

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITÉ A. MIRA DE BÉJAÏA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Energie Renouvelable  
Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

# Mémoire de fin de cycle

Pour l'obtention du diplôme de master

Thème

## Gestion de puissance d'un système hybride (Photovoltaïque-Eolien)

---

Présenté par :

TOUAHRIA LAMINE  
YOUSFI YOUGHOURTA

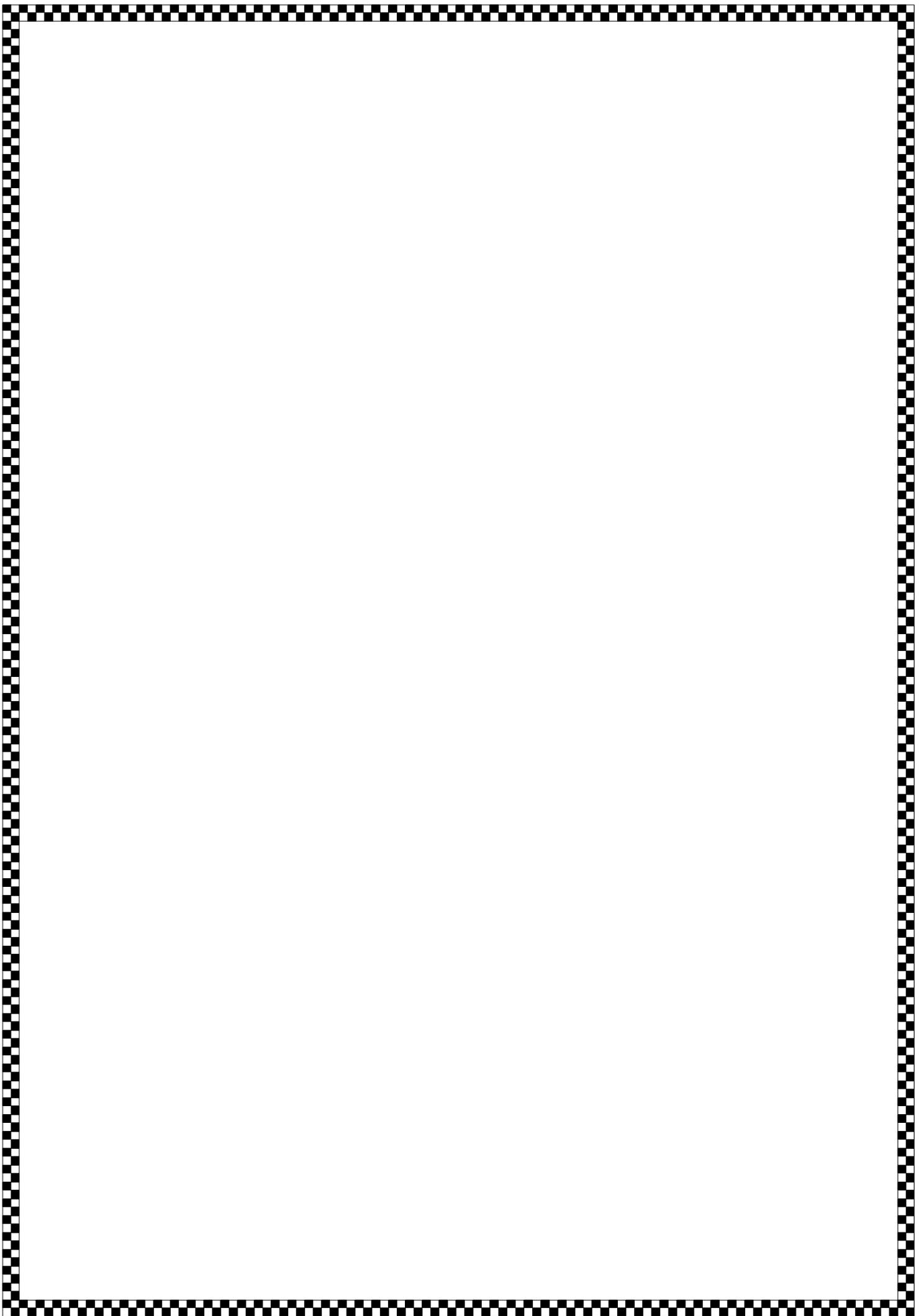
Dirigé par :

Mme K. RAHRAH  
Mme Z.BENBOUDAUD

Membre du jury :

Mr S.TARAFT  
Mme Z. AZEZ

Année universitaire : 2017/2018



# Remerciements

*Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et d'exprimer notre gratitude envers le Bon Dieu, qui nous a donné la patience et le courage durant toutes ces années d'études, et que grâce à lui nous avons pu effectuer ce modeste travail.*

*Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre encadreur Dr K. RAHRAH et co-encadreur Dr Z. MOKRANI pour avoir accepté de nous encadrer, pour leurs permanentes gentilleses et pour leurs précieux conseils tout au long de notre travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury, Dr S. TARAFT et Dr Z. AZEZ d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin pendant la réalisation de ce modeste travail.*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

- ❖ *A mes chers parents, ma précieuse maman SAÏDA qui grâce à elle je suis arrivée là où j'en suis aujourd'hui, et mon papa M.LAÏD.*
- ❖ *A toute personne qui m'est cher au cœur.*
- ❖ *A tous mes amis.*
- ❖ *A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser de près ou de loin ce travail.*
- ❖ *A mon binôme Youyou.*

TOUAHRIA LAMINE.

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

- ❖ *A mes chers parents, ma précieuse maman DJAOUIDA qui grâce à elle je suis arrivée là où j'en suis aujourd'hui, et mon papa MUSTAPHA.*
- ❖ *A toute personne qui m'est cher au cœur, surtout ma grande sœur KAHINA et ma nièce NADEDJE.*
- ❖ *A tous mes amis.*
- ❖ *A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser de près ou de loin ce travail.*

*YUGHOURIA YOUSFI.*

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SYSTEME HYBRIDE**

<b>Figure I.1</b> : Structure du système hybride (éolienne-photovoltaïque).....	5
<b>Figure I.2</b> : Architecture à bus à courant continu.....	6
<b>Figure I.3</b> : Architecture à bus à courant alternatif.....	7
<b>Figure I.4</b> : Architecture à deux bus (bus à courant continu/courant alternatif).....	7
<b>Figure I.5</b> : Eolienne à axe vertical.....	12
<b>Figure I.6</b> : Eolienne à axe horizontal.....	13
<b>Figure I.7</b> : Configuration à axe horizontal.....	14
<b>Figure I.8</b> : Les composants de l'aérogénérateur.....	17
<b>Figure. I.9</b> : Conversion de l'énergie éolienne.....	18
<b>Figure I.10</b> : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée.....	19
<b>Figure I.11</b> : Caractéristique puissance / vitesse du vent .....	20
<b>Figure I.12</b> : Schéma d'une Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	23
<b>Figure I.13</b> : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	25
<b>Figure I.14</b> : Effet photovoltaïque.....	26
<b>Figure I.15</b> : Cellule, module, panneau et système photovoltaïque.....	26
<b>Figure I.16</b> : Schéma électrique équivalent d'une cellule modèle 1 diode.....	27
<b>Figure I.17</b> : Schéma des différents types des cellules photovoltaïques.....	28

**CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME EOLIEN**

<b>Figure II.1</b> : Schéma synoptique de l'aérogénérateur.....	32
<b>Figure II.2</b> : Système de la turbine à modéliser.....	33
<b>Figure II.3</b> : Courbe $C_p(\lambda)$ .....	34
<b>Figure II.4</b> : Schéma bloc d'une turbine éolienne.....	36
<b>Figure II.5</b> : Les différents systèmes d'axes utilisés.....	40
<b>Figure II.6</b> : Schéma du redresseur.....	43
<b>Figure II.7</b> : Schéma de l'onduleur.....	44
<b>Figure II.8</b> : Schéma de principe de la commande vectorielle.....	47
<b>Figure II.9</b> : Schéma de principe de la méthode P&O.....	48
<b>Figure II.10</b> : Organigramme de la technique de perturbation et d'observation.....	49
<b>Figure II.11</b> : Schéma Bloc du système éolien.....	50
<b>Figure II.12</b> : Profil de vent appliqué[m/s].....	51
<b>Figure II.13</b> : Vitesse mécanique de la turbine [rad/s].....	51
<b>Figure II.14</b> : Allure du coefficient de puissance $C_p$ .....	52
<b>Figure II.15</b> : Puissance générée par l'éolienne.....	52
<b>Figure II.16</b> : Puissance générée par l'éolienne.....	53
<b>Figure II.17</b> : Allure du couple électromagnétique développé et sa référence.....	53
<b>Figure II.18</b> : Le flux rotorique.....	54

**CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME**  
**PHOTOVOLTAÏQUE**

<b>Figure III.1</b> : Système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation.....	55
<b>Figure III.2</b> : Modèle électrique idéal d'une cellule PV.....	56
<b>Figure III.3</b> : Modèle électrique a une diode sans résistance parallèle.....	57
<b>Figure III.4</b> : Model électrique à deux diodes sans résistance parallèle d'une cellule PV.....	57
<b>Figure III.5</b> : Schéma équivalent d'un model implicite de la cellule PV.....	58
<b>Figure III.6</b> : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.....	58
<b>Figure III.7</b> : Schéma bloc du GPV.....	59
<b>Figure III.8</b> : Caractéristique $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque.....	61
<b>Figure III.9</b> : Courbe $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque.....	62
<b>Figure III.10</b> : Caractéristique courant-tension pour différentes températures.....	63
<b>Figure III.11</b> : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures.....	63
<b>Figure III.12</b> : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ .....	64
<b>Figure III.13</b> : Caractéristique Puissance- tension pour différents ensoleillements.....	65
<b>Figure III.14</b> : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque.....	66
<b>Figure III.15</b> : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	68
<b>Figure III.16</b> : Circuit électrique du convertisseur DC-DC.....	69
<b>Figure III.17</b> : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha.T]$ .....	70
<b>Figure III.18</b> : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha T, T]$ .....	70

<b>Figure III.19 :</b> Réponse de l’algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ( $G=1000W/m^2$ ).....	71
<b>Figure III.20 :</b> Réponse de l’algorithme P&O pour différentes variations de l’ensoleillement à Température constante ( $T=25^{\circ}C$ ).....	72
<b>Figure III.21:</b> Schéma Bloc du système photovoltaïque.....	73
<b>Figure III.22:</b> Allure du courant photovoltaïque.....	74
<b>Figure III.23:</b> Allure de la tension photovoltaïque.....	74
<b>Figure III.24:</b> Allure de la puissance photovoltaïque.....	75
<b>Figure III.25 :</b> Puissance générer pour un ensoleillement variable.....	75

## ***CHAPITRE IV : GESTION DE L’ENERGIE DU SYSTEME HYBRIDE (PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN)***

<b>Figure IV.1 :</b> Schéma du bus continu.....	77
<b>Figure IV.2 :</b> Organigramme de la gestion de puissance du système hybride (photovoltaïque-éolien).....	79
<b>Figure IV.3 :</b> Profil de charge constante.....	81
<b>Figure IV.4 :</b> Profil de charge variable.....	82
<b>Figure IV.5 :</b> Profile du vent de la vitesse du vent.....	82
<b>Figure IV.6 :</b> Profile de l’ensoleillement.....	83
<b>Figure IV.7 :</b> Allure de la puissance hybride générée.....	83
<b>Figure IV.8:</b> Schéma bloc du système hybride avec bloc de gestion.....	84
<b>Figure IV.9 :</b> Profile de $P_{dem}$ , $P_{pv}$ , $P_{eol}$ .....	85
<b>Figure IV.10 :</b> Puissance photovoltaïque.....	86

<b>Figure IV.11</b> : Puissance éolienne.....	86
<b>Figure IV.12</b> : Puissance hybride ( $P_{pv}$ , $P_{eol}$ ).....	87
<b>Figure IV.13</b> : Déconnexion de la charge.....	87
<b>Figure IV .14</b> : profile de $P_{pv}$ , $P_{eol}$ et $P_{dem}$ .....	88
<b>Figure IV.15</b> : Puissance photovoltaïque.....	89
<b>Figure IV.16</b> : Puissance éolienne.....	89
<b>Figure IV.17</b> : Puissance hybride ( $P_{pv}$ et $P_{eol}$ ).....	90
<b>Figure IV.18</b> : Déconnexion de la charge.....	90

***CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SYSTEME HYBRIDE***

**Tableau I.1** : Classification des systèmes hybrides par gamme de puissance.....9

***CHAPITRE IV : GESTION DE L'ENERGIE DU SYSTEME HYBRIDE  
(PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN)***

**Tableau IV.1** : Différents modes d'alimentation de la charge..... 80

**Tableau IV.2** : Intervalle temporel des puissances alimentant la charge constante..... 88

**Tableau IV.3** : Intervalle temporel des puissances alimentant la charge variable.....90

## SYMBOLES

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SYSTEME HYBRIDE

- $P_v$  : Puissance du vent [W].
- $P_t$  : Puissance de la turbine [W].
- $C_p$  : Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.
- $C_{pma}$ : Coefficient de puissance maximale de la turbine éolienne
- $\rho$  : La densité de l'air [Kg/m<sup>3</sup>].
- $\pi$  : Constante d'Archimède ( $\pi=3.1416$ ).
- $V_v$  : La vitesse instantanée du vent [m/s].
- $R_t$  : Le rayon de la surface balayée [m].
- $V_v$  : La vitesse instantanée du vent [m/s].
- $\lambda$  : Le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent.
- $\lambda_{opt}$ : Vitesse spécifique optimale de la turbine éolienne
- $\Omega_t$  : La vitesse angulaire de rotation de la turbine [rad/s].
- $P_{pv}$  : Puissance photovoltaïque [W].
- $P_n$  : Puissance nominale de la turbine [W].
- $V_{vn}$  : Vitesse de vent nominale [m/s].
- $V_{vd}$  : La vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie [m/s].
- $V_{vM}$  : La vitesse maximale du vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée [m/s].
- $I_{ph}$  : Le photo-courant [A].
- $R_s$  : Résistance série [ $\Omega$ ].
- $R_p$  : Résistance parallèle [ $\Omega$ ].
- $P_c$  : Puissance de crête [W].
- $V_{co}$  : 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].

FF : Facteur de forme.

### ***CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME EOLIEN***

$P_{eol}$  : Puissance éolienne [W].

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

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

$\beta$  : 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]

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

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

$V_{sa, sb, sc}$  : Tensions statoriques [V].

$V_{ra, rb, rc}$  : Tensions rotoriques [V].

$I_{sa, sb, sc}$  : Courants statoriques [A].

$I_{ra, rb, rc}$  : Courants rotoriques [A].

$\Phi_{sa, sb, sc}$  : Flux statorique [Wb].

$\Phi_{ra, rb, rc}$  : Flux rotorique [Wb].

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

$R_r$  : Résistance rotorique [ $\Omega$ ].

$L_s L_r$  : Inductances propre stator et du rotor [H].

$[M_{sr}]$  : La matrice des inductances stator-rotor.

$M_s$  : L'inductance mutuelle entre les phases statoriques [H] ;

$M_r$  : L'inductance mutuelle entre les phases rotoriques [H] ;

$M_{sr}$ : L'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique [H] ;

$M_{max}$  : Maximum de la mutuelle inductance stator rotor quand leur axes coïncident [H] ;

$\theta$  : La position absolue entre deux axes magnétiques [degré°].

$\theta_s$ : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator [degré°].

$\theta_r$ : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor [degré°].

P : Nombre de paires de pôles.

d, q: Indices des axes direct et en quadrature du référentiel lié au champ tournant.

$\phi_{ds}$  : Flux statorique d'axe direct [Wb].

$\phi_{qs}$  : Flux statorique d'axe quadratique [Wb].

$\phi_{dr}$  : Flux rotorique d'axe direct [Wb].

$\phi_{qr}$  : Flux rotorique d'axe quadratique [Wb].

$I_{sd}, I_{rd}$  et  $I_{sq}, I_{rq}$  : Courants d'axes d et q statorique et rotorique [A].

$V_{sd}, V_{rd}$  et  $V_{sq}, V_{rq}$  : Tension d'axes d et q statorique et rotorique [V].

$l_s$  : Inductance de fuite statorique [H].

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique [H].

M : Inductance mutuelle cyclique [H].

$V_{dc}$  : La tension redressée [V].

$I_{dc}$  : Le courant modulé par le redresseur [A].

$S_a, S'_a, S_b, S'_b, S_c, S'_c$  : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'amorçage.

$I_{ond}$ : Le courant ondulé par l'onduleur [A].

$\omega_s, \omega_r$  : Pulsation statorique, rotorique [rad/s].

$T_r$  : Constante de temps rotorique.

### ***CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE***

$I_{pv}$  : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque [A].

$V_{pv}$  : La tension continue donnée par la cellule photovoltaïque [V].

$I_D, I_{D1}, I_{D2}$  : Le courant traversant les diodes [A].

$I_{pv}$  : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque [A].

$V_{pv}$  : La tension continue donnée par la cellule photovoltaïque [V].

$I_p$  : Le courant traversant la résistance parallèle [A].

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

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

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

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

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

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

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

$I_{Od}$  : Courant de saturation de la diode [A].

$q$  : Charge élémentaire [ $1.6.10^{-19}C$ ].

$K$  : Constante de Boltzman [ $1.39.10^{-23}$  (SI)].

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

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

$E_g$  : Energie de gap [ $1.76.10^{-19}$ ].

$C, C'$  : Condensateur.

$D$  : Diode.

$L$  : Inductance.

$V_e$  : La tension d'entrée [V].

$V_s$  : La tension de sortie [V].

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

$I_R$  : Le courant traversant a charge [A].

$I_L$  : Le courant traversant l'inductance  $L$  [A].

$I_c$  : Le courant traversant le condensateur C [A].

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

T : La période de hachage [S].

$\alpha$  : Le rapport cyclique.

## ***CHAPITRE IV : GESTION DE L'ENERGIE DU SYSTEME HYBRIDE (PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN)***

$P_{hyb}$  : Puissance hybride [W].

$P_{dem}$  : Puissance qui est demandé par la charge [W].

$I_{pv}$  : 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 PV-Eol [A].

$I_s$  : Courant de délestage [A].

$V_{dc}$  : Tension de sortie du bus continu [V].

## **ABREVIATION**

AC : courant alternatif.

DC : courant continue.

Eol : Eolien.

GADA : Génératrices asynchrones à double alimentation.

GPV : Générateur photovoltaïque.

Hyb : Hybride.

MRV : Machine à reluctance variable.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

PI : Proportionnel intégrale.

PPM : Point de puissance maximal.

PV : Photovoltaïque.

P&O : Méthode de perturbation et observation.

SEH : système d'énergie hybride.

STC : Conditions de fonctionnement standard (STandard conditions).

Wc : Watt crête.



---

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## ***CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SYSTEME HYBRIDE***

I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides (SEH).....	3
I.2.1 Description d'un système d'énergie hybride (SEH).....	3
I.2.2. Les différentes combinaisons des systèmes hybrides.....	3
I.2.2.1. Système hybride (photovoltaïque- groupe électrogène).....	4
I.2.2.2. Système hybride (éolien- groupe électrogène).....	4
I.2.2.3. Système hybride (éolien/photovoltaïque/groupe électrogène) .....	4
I.2.2.4. Système hybride étudié (photovoltaïque-éolien).....	5
I.2.3. Différentes architectures des systèmes d'énergie hybrides .....	5
I.2.4. Différents convertisseurs statiques.....	8
I.2.5. Classification des SEH.....	8
I.2.6. L'importance de la gestion de puissance dans le système hybride.....	9
I.2.7. Avantages et les inconvénients d'un système hybride.....	10
I.3. Généralités sur le système hybride étudié.....	10
I.3.1. Energie Eolienne.....	10
I.3.1.1. Classification des éoliennes.....	10
I.3.1.1.1. Selon l'axe.....	11
I.3.1.1. 2. Selon la vitesse.....	14
I.3.1. 2. Principaux composants d'un aérogénérateur.....	16
I.3.1.3. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur .....	17
I.3.1.4. Puissance récupérable par une éolienne.....	18
I.3.1.5. Régulation mécanique de la vitesse d'une éolienne.....	19

I.3.1.6. Machines électriques dans les aérogénérateurs.....	21
I.3.1.6.1. Machine synchrone.....	21
I.3.1.6.2. Machines à courant continu.....	22
I.3.1.6.3. La machine asynchrone.....	22
I.3.1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	23
I.3.2. Energie solaire.....	24
I.3.2.1. Rayonnement solaire.....	24
I.3.2.2. La cellule photovoltaïque.....	25
I.3.2.3. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	27
I.3.2.4. Différents types des cellules photovoltaïques.....	27
I.3.2.5. Caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	28
I.3.2.6. Protection des modules photovoltaïques.....	29
I.3.2.7. Avantages et inconvénients des PV.....	30
I.4. Conclusion.....	31

## ***CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME EOLIEN***

II.1. Introduction.....	32
II.2. Modélisation de la chaîne de production éolienne.....	32
II.2.1. Modélisation de la vitesse du vent.....	33
II.2.2. Modélisation de la turbine.....	33
II.2.3. Modèle des pâles.....	34
II.2.4. Le multiplicateur de vitesse.....	35
II.2.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	35
II.3. Modélisation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil.....	36
II.3.1. Modèle mathématique de la génératrice asynchrone.....	37
II.3.2. Equation générale de la machine asynchrone.....	37

II.3.3. Choix de repère (dq).....	41
II.4. Modélisation des convertisseurs statiques.....	43
II.4.1. Modélisation du redresseur.....	43
II.4.2. Modélisation de l'onduleur.....	44
II.4.3. Commande vectorielle de la génératrice asynchrone.....	45
II.5. Optimisation de la chaîne de conversion éolienne.....	48
II.5.1. Optimisation de la puissance de la turbine.....	48
II.5.1.1. Principe de la méthode P&O.....	48
II.5.1.2. Algorithme de la méthode P&O.....	48
II.6. Simulation de la chaîne de conversion éolienne.....	50
II.7. Conclusion.....	54

***CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME  
PHOTOVOLTAÏQUE***

III.1. Introduction.....	55
III.2. Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque.....	55
III.2.1. Modélisation du panneau photovoltaïque.....	56
III.2.1.1. Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque.....	61
III.2.1.1.1. Caractéristique Courant-Tension.....	61
III.2.1.1.2. Caractéristique puissance –tension.....	62
III.2.1.2. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV.....	62
III.2.1.2.1. Influence de la température.....	62
III.2.1.2.2. Influence de l'intensité du rayonnement.....	64
III.3. Optimisation de la puissance des modules PV.....	65
III.4. Le convertisseur DC-DC (hacheur).....	69

III.4.1. Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST).....	69
III.5. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT.....	71
III.6. Simulation et interprétation de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	73
III.7. Résultats de simulation.....	73
III.8. Conclusion.....	76

### ***CHAPITRE IV : GESTION DE L'ENERGIE DU SYSTEME HYBRIDE (PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN)***

IV.1. Introduction.....	77
IV.2. Modèle du bus continu.....	77
IV.3. Gestion d'énergie du système hybride étudié.....	78
IV.3.1. Organigramme de gestion d'énergie.....	79
IV.3.2. profils de charges utilisées.....	81
IV.3.2.1. Profil de charge constante.....	81
IV.3.2.2. Profil de charge variable.....	82
IV.3.3. profil du vent et de l'ensoleillement.....	82
IV.3.4. puissance générées par la source hybride (photovoltaïque-éolien).....	83
IV.4. Schéma bloc de simulation global.....	84
IV.5. Simulation et interprétation des résultats.....	85
IV.5.1. Charge constante.....	85
IV.5.2. Charge variable.....	88
IV.6. Conclusion.....	91
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>92</b>

#### **Références bibliographiques**

#### **Annexes**

## Introduction générale

La consommation d'énergie mondiale et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la Pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre [1].

Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire [2].

Face à tous ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine fossile et fissile. Certain pays, se sont tourné vers la nouvelle forme d'énergie dites « renouvelable » faisant appel à des ressources d'énergie inépuisable dans le temps et non polluante pour l'environnement. Parmi celle-ci on retrouve l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

Ces énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires [1].

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement de l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. Le rôle d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté [3].

C'est dans ce contexte que vient s'insérer notre étude qui consiste à l'étude et la gestion d'un système d'énergie hybride (éolien – photovoltaïque). Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres en plus de l'introduction et de la conclusion générale.

Le premier chapitre, sera consacré à des généralités sur l'hybridation, où nous allons décrire plus particulièrement le principe de fonctionnement de nos deux sources d'énergies (éolienne et photovoltaïque).

Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation mathématique des différentes parties constituant le système éolien. Suivi par la simulation de chaque partie en interprétant les résultats.

Le troisième chapitre, il sera consacré à la modélisation et simulation du système photovoltaïque. Puis la présentation des résultats de simulation.

Dans le quatrième chapitre, nous allons réaliser la gestion de puissance du système hybride, qui va nous permettre de superviser les flux d'énergie.

On termine ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

## I.1. Introduction

Une source d'énergie est considérée renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future à l'échelle de la durée de vie de l'humanité, c'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche [2]. A l'inverse des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) et fissiles (Uranium) qui sont limités à travers le temps.

La production d'électricité décentralisée par des sources d'énergies renouvelables, (photovoltaïque-éolien) offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [4].

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, l'énergie éolienne et l'énergie solaire ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se compléter mutuellement. C'est pourquoi on propose ce système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles [5].

## I.2. Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides (SEH)

### I.2.1 Description d'un système d'énergie hybride (SEH)

Un système multi-sources ou hybride est composé d'au moins deux sources énergétiques reliées entre elles par des convertisseurs, permettant de contrôler la tension et le courant fournis par chacune des différentes sources [6]. Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en fournissant une bonne qualité [7].

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi comme sources l'éolienne et les panneaux photovoltaïques, pour leurs maturité technologique, leur possibilité de dimensionnement, et pour leur facilité d'entretien.

### I.2.2. Les différentes combinaisons des systèmes hybrides

Il existe plusieurs combinaisons possible que sa soit entre des sources entièrement ou partiellement renouvelables, cela dépends de plusieurs critères (économique, environnemental, énergétique...). On peut trouver :

### **I.2.2.1. Système hybride (photovoltaïque- groupe électrogène)**

Le module photovoltaïque et les groupes électrogène se complètent très bien les un aux autres. Les systèmes photovoltaïques n'entraînent aucune consommation de combustible et leurs frais d'entretien sont généralement bas. Par contre les groupes électrogènes entraînent des frais d'exploitation et d'entretien très élevés, mais peuvent produire de l'électricité à la demande. La combinaison des sources d'énergies permet la production continue d'énergie a la demande (production de puissance électrique au moyen de générateur photovoltaïque lorsque le temps est ensoleillé et par groupe électrogènes par temps peut ensoleiller). Cependant, la production d'énergie n'est pas entièrement renouvelable et pour les applications dans les sites isolés, les frais de transport du combustible pour ces régions et les couts environnementaux sont élevés [7].

### **I.2.2.2. Système hybride (éolien- groupe électrogène)**

Ces systèmes sont conçus afin de réduire la consommation de carburant, tout en gardant une qualité de l'énergie acceptable. Pour être économiquement justifié, l'investissement en équipement nécessaire pour profiter de 'énergie du vent, doit se récupérer à travers les économies réalisées sur le carburant. A cause de la grande quantité de mini réseaux isolés, dont l'énergie primaire est le pétrole, dans les pays développés ou dans les pays en voie de développement, le marché pour réadapter ces systèmes en systèmes hybrides avec des sources éoliennes est substantiel [7].

### **I.2.2.3. Système hybride (éolien/photovoltaïque/groupe électrogène)**

Ce type de système hybride est bien adapté une production décentralisée d'électricité, peut contribuera résoudre le problème de raccordement aux réseaux d'électricité (cas des sites isolés). La donnée initiale dans la mise en œuvre d'un tel système énergétique est la demande, qui va être déterminée par rapport à la charge à alimenter. Cette demande doit être estimée aussi précisément que possible tant d'un point de vue des puissances appelées que de sa répartition temporelle, même si son caractère souvent aléatoire rend cette tâche bien difficile. L'ajout d'un groupe électrogène a un système de production d'énergies renouvelables, peut d'une part augmenter la fiabilité du système à alimenter des charges et d'autre part diminuer de manière importante le cout de l'électricité produite par une diminution importante de la taille du système de stockage [7] [8].

#### I.2.2.4. Système hybride étudié (photovoltaïque-éolien)

Dans notre travail le système hybride étudié est celui qui combine les deux sources d'énergie renouvelables : L'une est l'énergie solaire qui peut être facilement implanté dans n'importe quel site et qui a fait ces épreuves d'approvisionnement en électricité et de l'autre côté nous disposons de l'énergie éolienne aussi abondante qu'efficace à son tour. Ce système est fiable, économique et plus écologique que les systèmes hybrides comportant des générateurs diesel à carburant fossiles pour ainsi respecter l'environnement et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

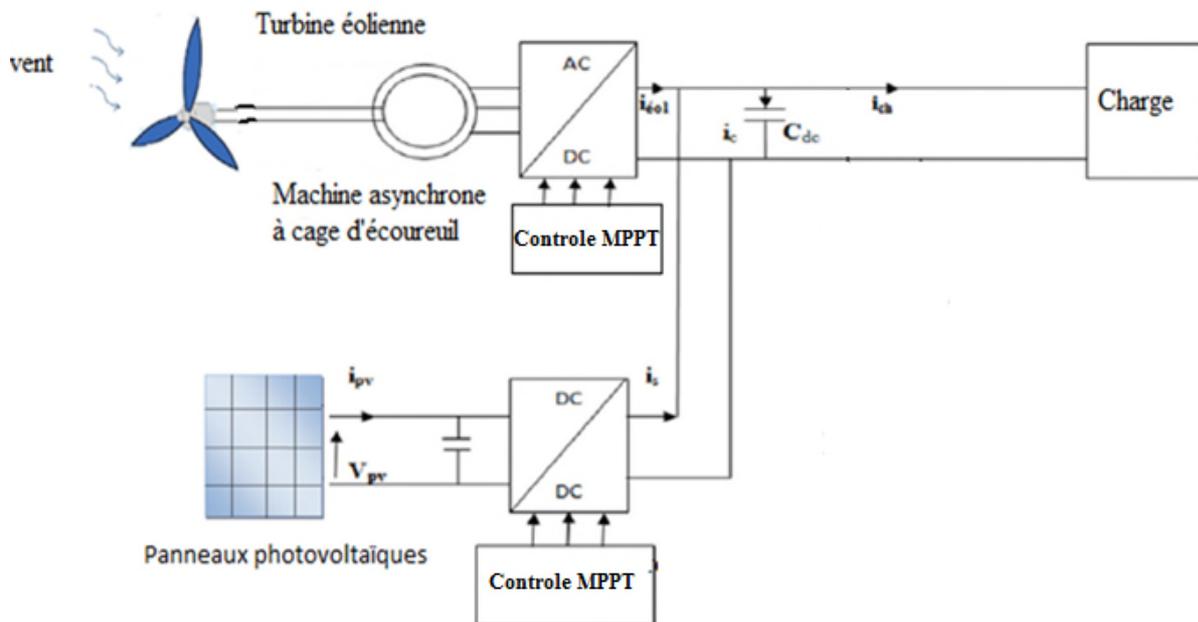


Figure I.1 : Structure du système hybride (éolienne-photovoltaïque).

L'intérêt porté à ce système est dû au fait que l'Algérie dispose d'une position géographique stratégique d'où la disponibilité et la complémentarité des gisements solaire et éolien [9].

#### I.2.3. Différentes architectures des systèmes d'énergie hybrides

Les générateurs photovoltaïques et éoliens dans un système hybride peuvent être connectés en trois configurations possibles, architecture à bus continu, architecture à bus alternatif et architecture à bus mixte.

##### ❖ Architecture à bus à courant continu

Dans le système hybride présenté dans la figure (I.2), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à courant continu (DC). Ainsi, le système de conversion

d'énergie à courant alternatif (AC) fournit d'abord sa puissance à un redresseur pour être convertie en courant continu (DC).

L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence [1]. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs [10].

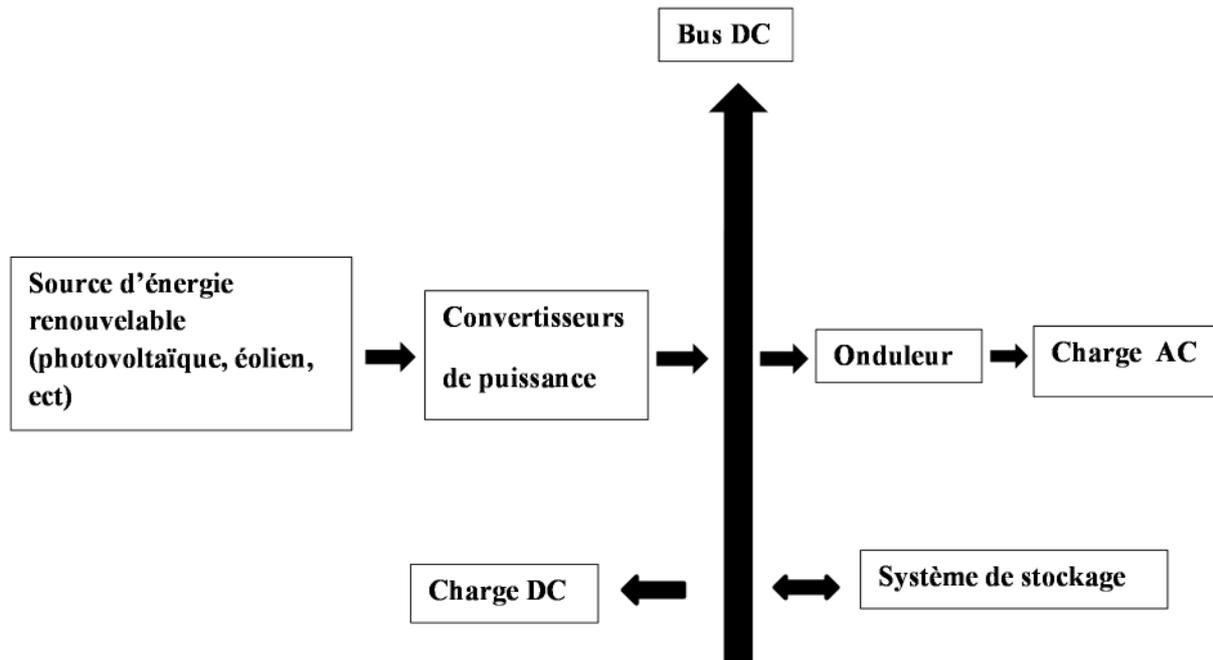


Figure I.2 : Architecture à bus à courant continu.

#### ❖ Architecture à bus à courant alternatif (AC)

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative ou au réseau, comme le montre la figure (I.3). Cette configuration se distingue par rapport à la configuration antérieure, dans le fait que chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs [1], ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge.

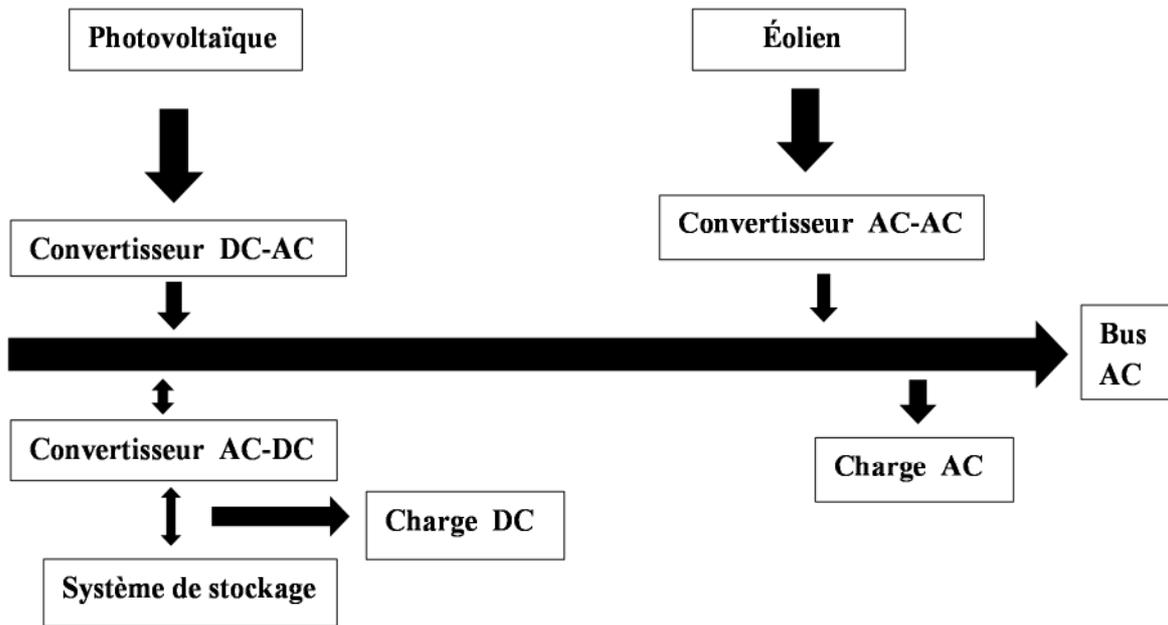


Figure I.3 : Architecture à bus à courant alternatif.

❖ Architecture mixte à bus DC/AC

Dans la configuration à deux bus, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter une partie de la charge en AC et l'autre partie en DC. Les deux bus doivent être reliés par un convertisseur bidirectionnel [11].

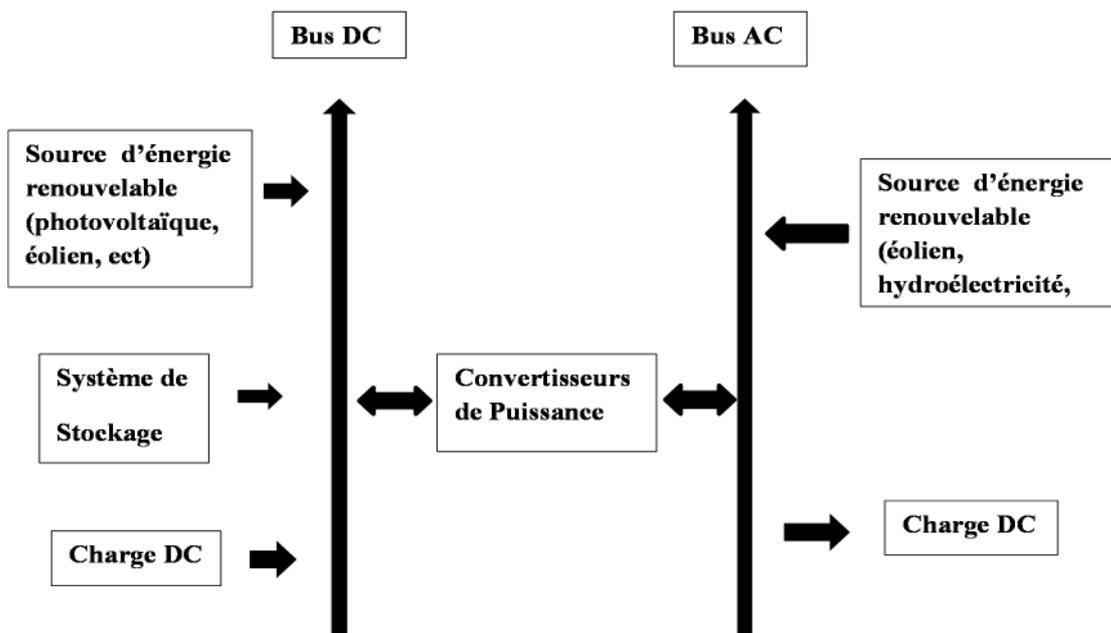


Figure I.4 : Architecture à deux bus (bus à courant continu/courant alternatif).

#### I.2.4. Différents convertisseurs statiques [12]

##### ❖ 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.

##### ❖ Convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite.

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.
- Onduleur à onde sinusoïdale.

##### ❖ 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 en une énergie unidirectionnelle quasi-continue que l'on peut diriger vers les moteurs à courant continu.

#### I.2.5. Classification des SEH

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance tableau (I.1) [4].

Puissance du SEH [KW]	Applications
<b>Faible &lt; 5</b>	Système autonome : stations de télécommunication, de pompage de l'eau, autres applications isolées.
<b>Moyenne entre 10 et 250</b>	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
<b>Grande &gt; 500</b>	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

**Tableau I.1 :** Classification des systèmes hybrides par gamme de puissance.

### I.2.6. L'importance de la gestion de puissance dans le système hybride [4]

Il est important de noter qu'un dimensionnement optimal de la chaîne énergétique combiné à une gestion d'énergie efficace permet de concevoir des systèmes hybrides intelligents et efficaces à moindre coût. Afin de parvenir à cette efficacité, plusieurs technologies et techniques de gestion et de dimensionnement ont été adoptées pour améliorer ses performances. La complexité des systèmes hybrides rend la prise de décision difficile. Mais ils présentent un intérêt évident et considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif.

Toutefois, une stratégie de contrôle intelligente est nécessaire pour gérer le comportement et la répartition de la puissance du système multi-source, ces sources énergétiques doivent alimenter la charge suivant ses besoins en respectant les différentes contraintes liées au fonctionnement des sources (production, puissance maximale, rendement, pertes énergétiques) et des éléments de stockage (état de charge, dynamique, vieillissement). Cette gestion d'énergie s'effectue par l'intermédiaire de l'électronique de puissance qui assure la répartition des flux entre les sources, les éléments de stockage et la charge, par le biais des convertisseurs.

### I.2.7. Avantages et les inconvénients d'un système hybride [4]

➤ **Avantages**

- ✓ Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- ✓ Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- ✓ Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.
- ✓ Rentabilité, faible coût lié au cycle de vie des composants du système hybride.

➤ **Inconvénients**

- ✓ Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite souvent le stockage dans le cas des systèmes autonome.
- ✓ Pas encore entièrement en production commerciale, peu de fournisseurs.
- ✓ Coût de capital élevé.

## I.3. Généralités sur le système hybride étudié

### I.3.1. Energie Eolienne

La ressource d'énergie éolienne provient du vent. Lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre : une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète en fonction de réchauffement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement [6].

L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité, elle est en plein développement en termes de puissance installée dans le monde. Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor (renouvelable, abondante, économique, exploitable...).

Une éolienne est une installation qui convertit la puissance de vent en énergie électrique, donc le maximum d'énergie émis ne dépend pas seulement de la machine mais aussi des limites de la vitesse du vent. D'autre part, elles convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique.

#### I.3.1.1. Classification des éoliennes

Les génératrices éoliennes peuvent être regroupées selon différentes catégories, et un classement est proposé comme suit :

### I.3.1.1.1. Selon l'axe [13]

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice (figure I.5) :

#### ❖ Eolienne à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Et elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables: SAVONIUS et DARRIEUS.

✚ L'éolienne SAVONIUS comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

- ✓ Elle est simple à fabriquer.
- ✓ Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.

✚ L'éolienne inventée par le Français DARRIEUS est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.



SAVONIUS



DARRIEUS

Figure I.5 : Eolienne à axe vertical.

#### ❖ Eolienne à axe horizontal [14]

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pâles constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Nous trouvons dans cette famille d'aéromoteurs deux catégories, « onshore » et « offshore », ces termes américains permettent de distinguer si l'éolienne est implantée sur terre ou à la surface de la mer.

- Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes marines dites « offshore » sont installées en mer.



Eolienne onshore



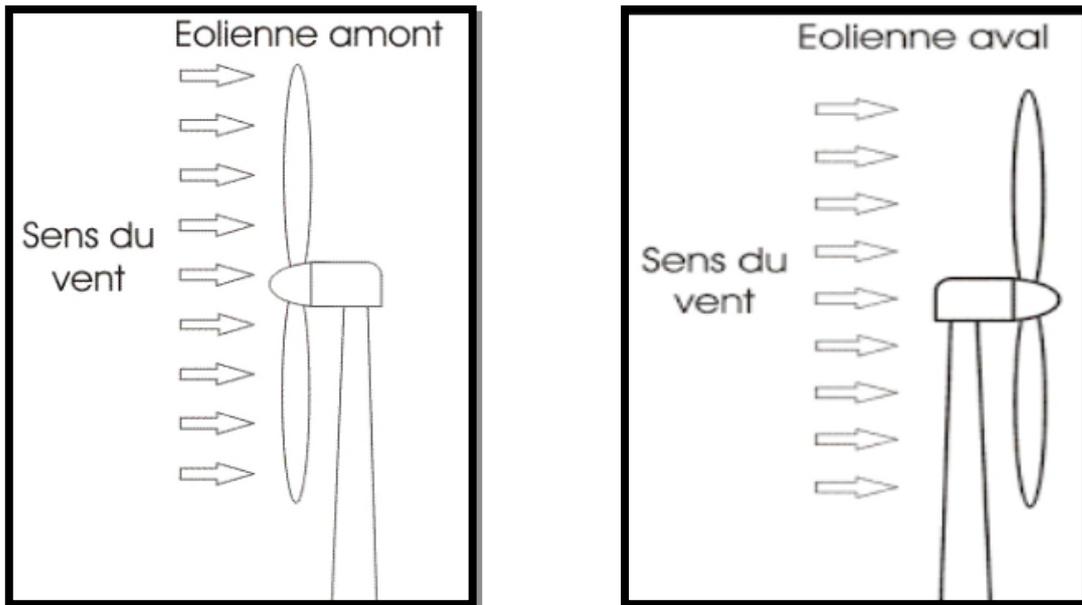
Eolienne offshore

**Figure I.6** : Eolienne à axe horizontal.

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

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal:

- ✚ **Amont** : Le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent.
- ✚ **Aval** : Le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.



**Figure I.7 :** Configuration à axe horizontal.

La disposition de turbine en amont est la plus utilisée car elle est plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pâles des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent pour toujours en tirer le maximum de puissance.

### I.3.1.1. 2. Selon la vitesse [15]

#### ❖ Eolienne à vitesse constante

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers d'un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1%.

➤ **Avantages**

- ✓ Système électrique plus simple.
- ✓ Plus grande fiabilité.
- ✓ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ✓ Pas besoin de système électrique de commande.
- ✓ Moins cher.

❖ **Eolienne à vitesse variable**

Pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne.

Dans ces systèmes, la vitesse mécanique de la turbine et la fréquence de la charge sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance. De cette manière la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. Ils ont une majeure efficacité car ils parviennent à maximiser la capture d'énergie du vent disponible.

➤ **Avantages**

- ✓ Niveau de bruit inférieur à bas régime éolien et un meilleur transfert de puissance vers la charge.
- ✓ Une meilleure extraction de l'énergie du vent.
- ✓ La vitesse variable représente l'avenir des éoliennes. En effet si la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maximums théoriques des courbes ne sont pas exploités. Contrairement à vitesse variable, les maximums théoriques sont atteints pour chaque vitesse du vent.

### I.3.1. 2. Principaux composants d'un aérogénérateur [15]

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateur qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de ces éléments :

- **Les pales** : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
- **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : relie les pales au multiplicateur.
- **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- **Le mât (tour)** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à l'huile, il est destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètre pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

- **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- Au pied du mât se trouve **un transformateur**.

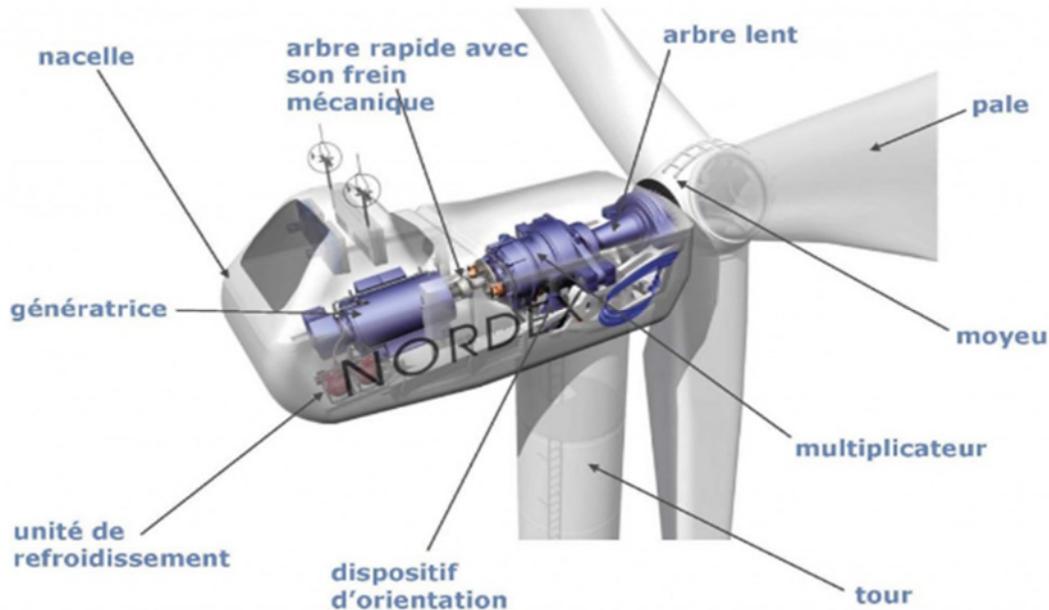


Figure I.8 : Les composants de l'aérogénérateur.

### I.3.1.3. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur

Le principe de fonctionnement de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et ensuite en énergie électrique peut être décrit dans ces 03 étapes suivantes [9] :

- 1) Au niveau des pales (capteur d'énergie), qui extraient une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique.
- 2) Au niveau de la génératrice électrique synchrone ou asynchrone, qui reçoit l'énergie mécanique pour la convertir en énergie électrique, transmise ensuite au convertisseur statique.
- 3) Au niveau de convertisseur statique, qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, cette dernière diffère selon les besoins de l'utilisation.

La figure suivante (I.9) illustre le principe de conversion de l'énergie éolienne.

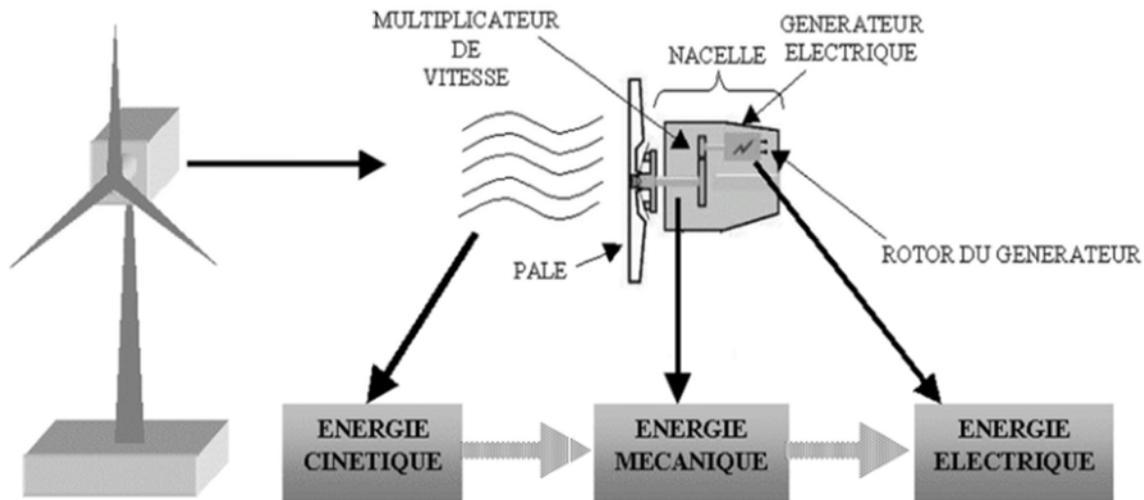


Figure. I.9 : Conversion de l'énergie éolienne.

#### I.3.1.4. Puissance récupérable par une éolienne

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

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

Où :

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

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

$R_t$  : Le rayon de la surface balayée [m].

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

La valeur du coefficient de puissance  $C_p$  dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent. Elle peut avantageusement s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$ .

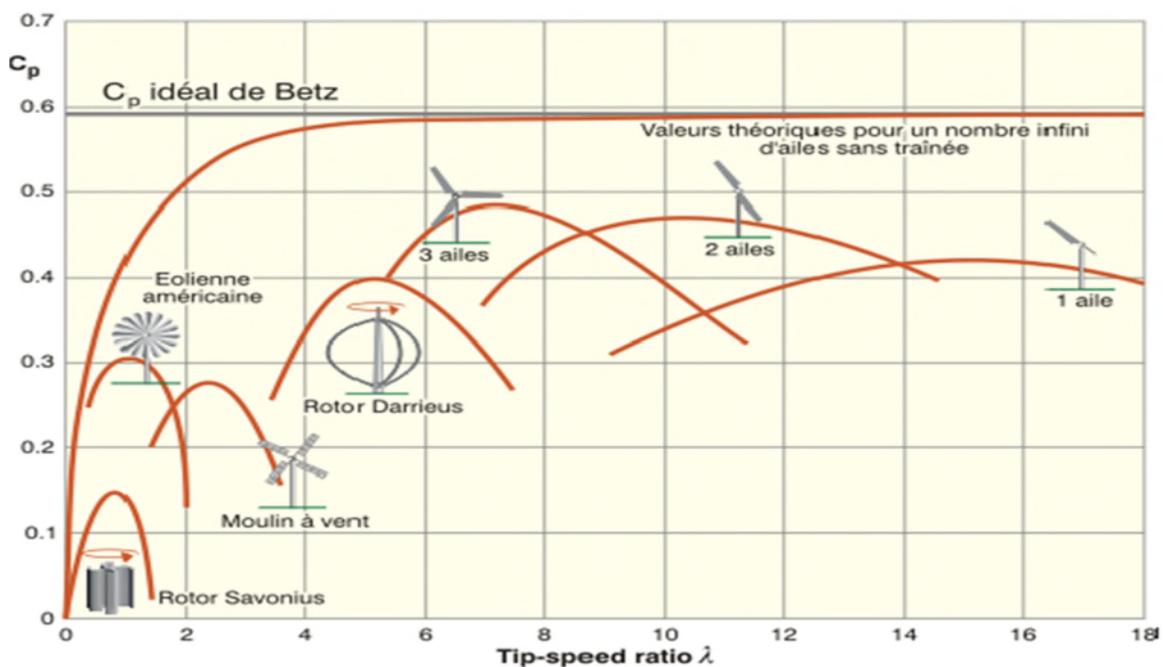
$\lambda$  : est le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent.

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

$\Omega_t$  : est la vitesse angulaire de rotation de la turbine [rad/s].

La figure (I.10) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, et 3 pales, et pour les turbines à axe vertical.

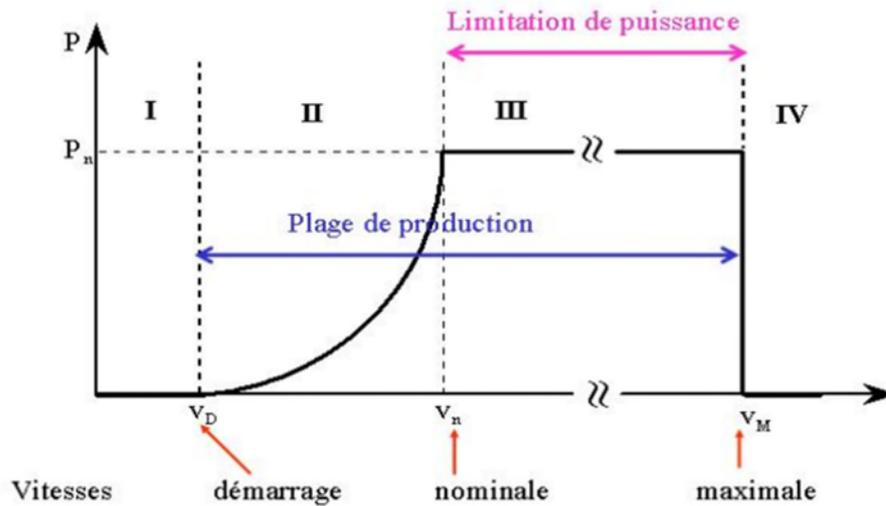
On remarque que chaque type d'éoliennes correspond à une vitesse normalisée  $\lambda_{opt}$ , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique  $C_p(\lambda)$  sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale.



**Figure I.10** : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée.

### I.3.1.5. Régulation mécanique de la vitesse d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnées :  $V_d$  la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et  $V_M$  la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement (figure I.11) [16].



**Figure I.11** : Caractéristique puissance / vitesse du vent.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [15] :

- La zone I : où  $P_t = 0$  (la turbine ne fournit pas de puissance).
- La zone II : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V$ .
- La zone III : où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P_{\text{turbine}}$  fournie reste sensiblement égale à  $P_n$  (puissance nominale).
- La zone IV : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

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

- Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » : ce système de régulation fait pivoter les pales de quelques degrés à chaque variation du vent pour qu'elles soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Autrement dit il faut varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum de vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale (zone III) [16] [17].

✚ Système « stall » ou « à décrochage aérodynamique » : pour éviter l’emballement du rotor par des vents forts (la vitesse du vent dépasse sa vitesse nominale) les pales sont conçues pour décrocher progressivement à la vitesse critique. Ainsi le rotor ne monte plus en vitesse lorsque le vent augmente à cause des turbulences qui se créent autour de la pale et fait diminuer sa portance, réduisant ainsi le couple produit [18]. Ce type de régulation est le plus utilisé car il a l’avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles, ni de système de régulation dans le rotor. Les pales sont fixées par rapport au moyeu de l’éolienne [16].

### I.3.1.6. Machines électriques dans les aérogénérateurs

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur. On citera quelques-unes d’entre elles et on s’intéressera d’avantage à la machine asynchrone à cage d’écureuil.

#### I.3.1.6.1. Machine synchrone

##### ❖ Machine synchrone à rotor bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que le générateur synchrone tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L’excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brosses avec un redresseur tournant. L’utilisation des machines à vitesse lente permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l’utilisation d’un générateur surdimensionné et d’un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système [19].

##### ❖ Machines synchrones à aimants permanents

La caractéristique d’auto excitation du générateur synchrone à aimants permanents lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l’application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, sa robustesse et son couple massique élevé en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en fait le moins compétitif [19].

### ❖ Machine à reluctance variable (MRV)

La machine à reluctance variable, est une machine synchrone à pôles saillants, démunie de bobinage d'excitation et fonctionnant exclusivement sur le couple de reluctance. Cette machine permet de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse. Suite à la diversité des applications des MRV, ces dernières se divisent en deux catégories : machine à stator lisse et machine à double denture [20].

#### I.3.1.6.2. Machines à courant continu

Les machines à courant continu sont utilisées sur les éoliennes de faible puissance. Ce type de machine comporte un stator portant le circuit inducteur (bobine ou à aimants permanents), et un rotor constituant le circuit induit connecte aux bornes de sortie, via le système balais collecteurs.

#### I.3.1.6.3. La machine asynchrone

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

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant [20].

### ❖ Machine asynchrone à cage d'écureuil

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau (sans interface électronique de puissance) jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de

compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse [21].

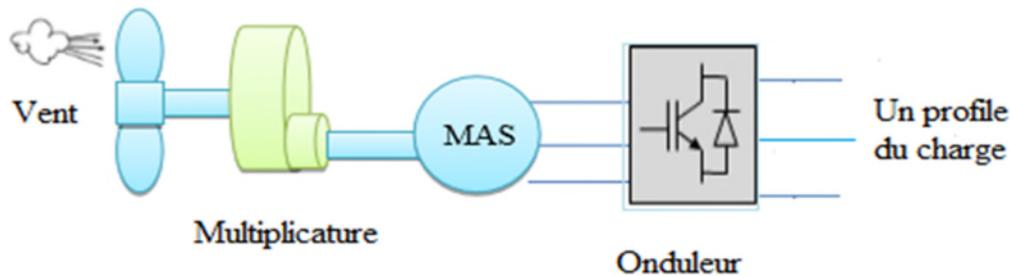


Figure I.12 : Schéma d'une Machine asynchrone à cage d'écureuil.

### I.3.1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [14]

#### ➤ Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- ✓ L'énergie éolienne produit de l'électricité sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.
- ✓ L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- ✓ C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches.
- ✓ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite.
- ✓ Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

➤ **Inconvénients**

- ✓ C'est une source onéreuse et couteuse.
- ✓ Faible rendement dans les sites moins ventés.
- ✓ La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.
- ✓ Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région et l'impact sur les parcours migratoires des oiseaux.

### **I.3.2. Energie solaire**

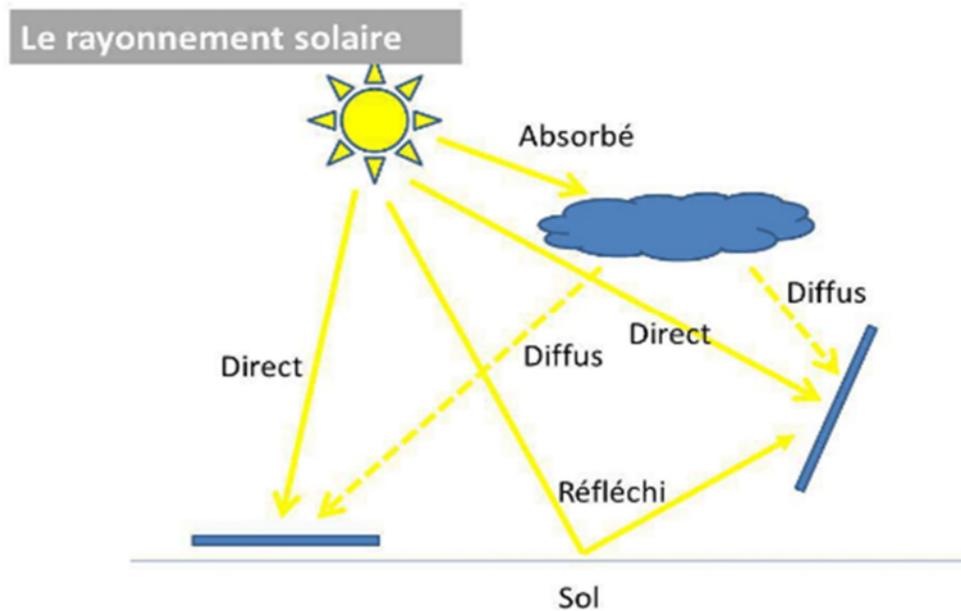
Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre ( $150 * 10^6$  km). La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à  $90 * 10^{15}$  GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que  $180 * 10^6$  GW. Avant d'arriver à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. Aussi, on introduit la notion de l'éclairement qui est la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteint  $1 \text{ kW/m}^2$  pour un site situé au niveau de la mer [22], [23].

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et ce, malgré une atténuation importante à la traversée de l'atmosphère; la quantité qui reste est encore assez importante, quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur  $1000 \text{ W/m}^2$  crête dans les zones tempérées et jusqu' à  $1400 \text{ W/m}^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [22].

#### **I.3.2.1. Rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et  $4.10^{-6}$  m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet [22].

On distingue plusieurs types de rayonnement : rayonnement direct (reçu directement du soleil), rayonnement diffus (qui dépend des conditions météorologique), rayonnement réfléchis (par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface) et en dernier le rayonnement global qui est la somme des rayonnements cité précédemment.



**Figure I.13 :** Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

### I.3.2.2. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est réalisée à partir de deux couches de semi-conducteur qui transforment directement l'énergie lumineuse en énergie électrique, une dopée (P) et l'autre couche dopée (N) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. 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 c'est ce qu'on appelle effet photovoltaïque [24]. La tension générée peut varier entre 0.3 V à 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de la cellule [25].

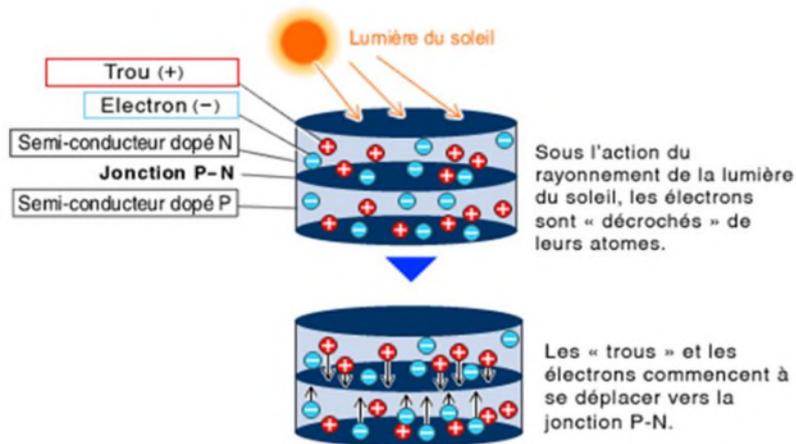


Figure I.14 : Effet photovoltaïque.

Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et /ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque ; plusieurs panneaux qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque ou générateur photovoltaïque GPV.

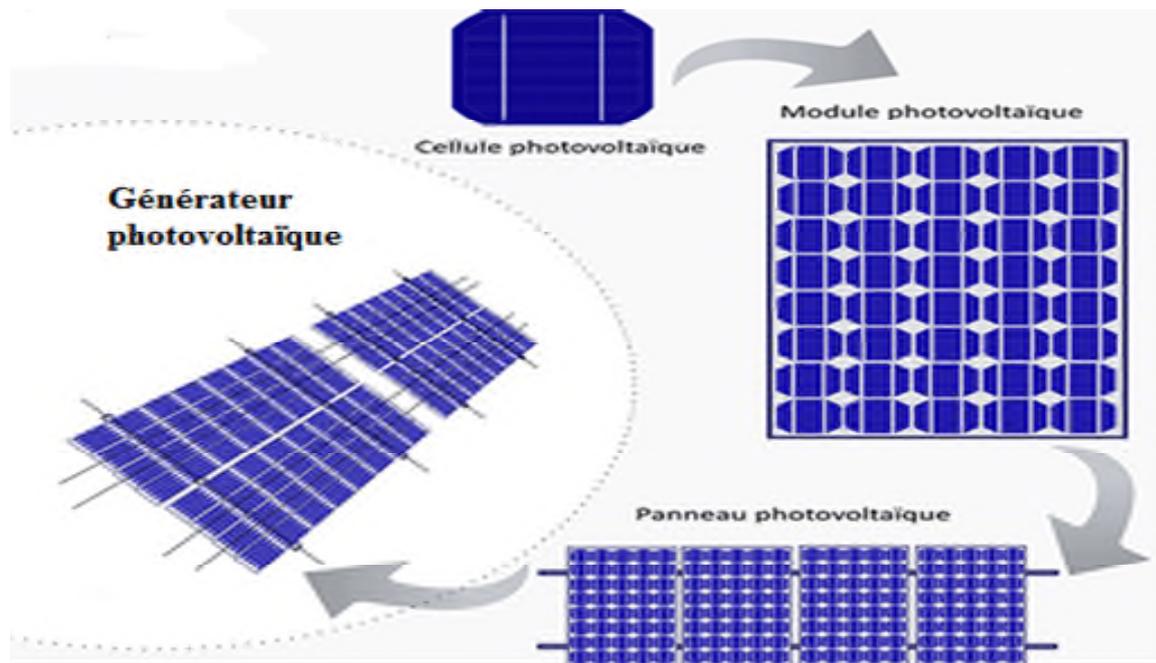
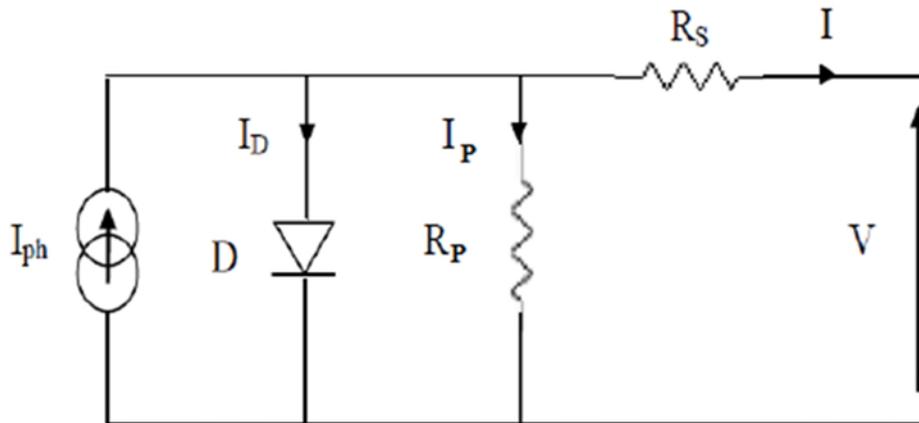


Figure I.15 : Cellule, module, panneau et système photovoltaïque.

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant. Tandis que les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension.

### I.3.2.3. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [10]

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistif parasite dû à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances figure (I.



16).

**Figure I.16 :** Schéma électrique équivalent d'une cellule modèle 1 diode.

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité, le générateur de courant modélise le courant  $I_{ph}$  génère par l'éclairement, les deux résistances modélise les pertes internes :

- Résistance série  $R_s$  : modélise les pertes ohmiques du matériau (chutes de tension).
- Résistance shunt  $R_p$  : modélise les courants parasites qui traversent la cellule (courant de fuite).

### I.3.2.4. Différents types des cellules photovoltaïques [26]

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisée par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

#### ❖ Les cellules monocristallines

- ✓ La première génération de photopiles.

- ✓ Bon rendement pour un ensoleillement direct (12-16%) (23 % en Laboratoire).
- ✓ Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- ✓ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.
- ❖ **Les cellules poly-cristallines**
  - ✓ Constitue de petit grain de silicium mono ce qui réduit un peu sont coût de fabrication.
  - ✓ Procédé nécessitant moins d'énergie.
  - ✓ Rendement 11-13% (18 % en Laboratoire).
- ❖ **Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple)**
  - ✓ Coût de production bien plus bas.
  - ✓ Rendement plus bas : 8-10% (13 % en laboratoire).
  - ✓ Durée de vie plus faible.

La figure suivante illustre les différents types de cellules en silicium et non silicium :



**Figure I.17** : Schéma des différents types des cellules photovoltaïques.

### I.3.2.5. Caractéristiques d'un module photovoltaïque [27]

Voici la description des paramètres d'un module :

- La puissance de crête  $P_c$  : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25 °C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- La tension à vide  $V_{oc}$  : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairage « plein soleil ».
- Le point de fonctionnement optimal ( $V_{mpp}, I_{mpp}$ ) : lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil.

$$P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (\text{I.3})$$

- Le rendement : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Le facteur de forme : rapport entre la puissance optimale  $P_{mpp}$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{I.4})$$

### I.3.2.6. Protection des modules photovoltaïques [28]

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association des cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles.

- ✚ La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- ✚ Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairage n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension direct puisqu'elle devient passante.

**I.3.2.7. Avantages et inconvénients des PV [29] [25]****➤ Avantages**

- ✓ Une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ Leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet (extensible).
- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. Il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.
- ✓ Ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.
- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments. Les modules solaires peuvent être en façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.
- ✓ Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse.

**➤ Inconvénients**

- ✓ La fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10 à 15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 23%.
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.
- ✓ La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans.
- ✓ Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Par conséquent la production d'électricité n'est pas constante.

**I.4. Conclusion**

Dans ce premier chapitre nous avons présentés des généralités sur les systèmes hybrides ainsi que les deux sources utilisées dans notre système en question pour la gestion de puissance. Il s'agit de combinas deux sources d'énergie entièrement renouvelable qui sont l'énergie solaire et l'énergie éolienne, nous avons expliqués leurs provenances, leurs caractéristiques et leurs composants.

Dans les deux prochains chapitres nous présenterons, la modalisation des deux sources constituant notre système hybride et on fera appel à MATLAB Simulink pour avoir les différentes caractéristiques voulues.

**II.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons modéliser une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable, qui intègre une génératrice asynchrone à cage d'écureuil. L'étude du système se décompose en trois parties :

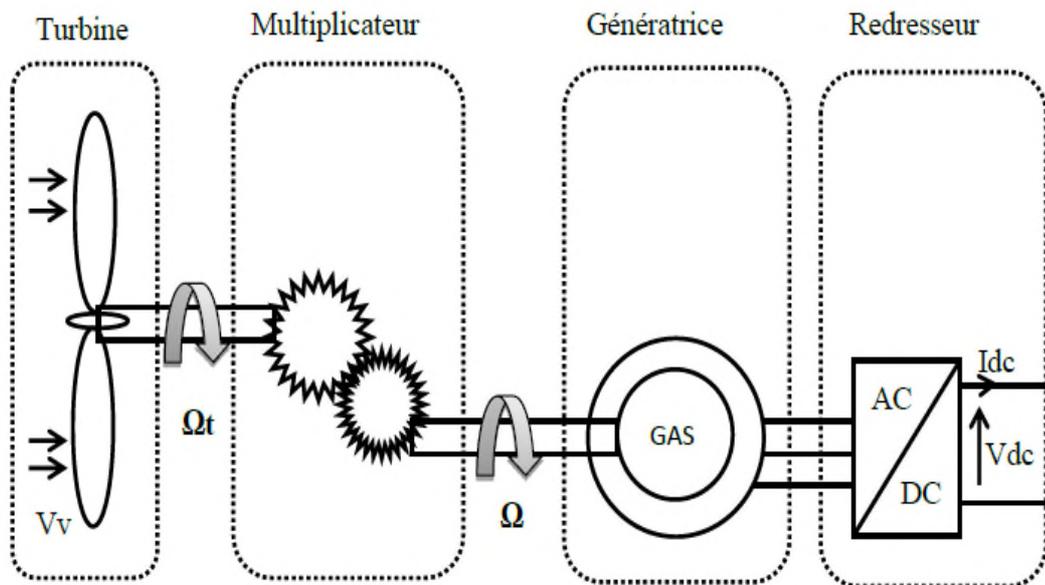
La première partie concerne la modélisation et le contrôle des pâles, on s'intéresse à la zone de fonctionnement à vitesse mécanique variable, le but est de mettre le ratio de vitesse ( $\lambda$ ) à son point optimale dont l'objectif est d'extraire le maximum de puissance générée.

Suivi par la deuxième partie qui est dédiée à la modélisation et la commande vectorielle de la machine asynchrone. Et en troisième partie nous avons présentés et commentés les résultats de la simulation du système.

**II.2. Modélisation de la chaine 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.1). 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.



**Figure II.1** : Schéma synoptique de l'aérogénérateur.

### II.2.1. 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 (II.1) suivante [12]:

$$V_V = f(t) \quad (\text{II.1})$$

### II.2.2. 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. [30], [31]

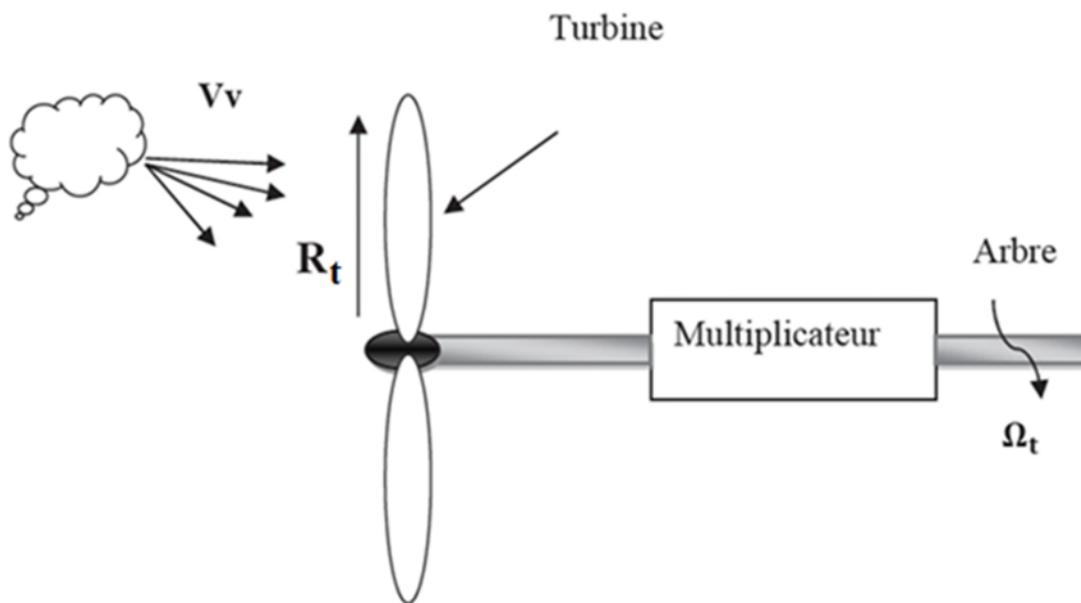


Figure II.2 : Système de la turbine à modéliser.

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

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

Avec :  $S = \pi R_t^2$

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.3) suivante :

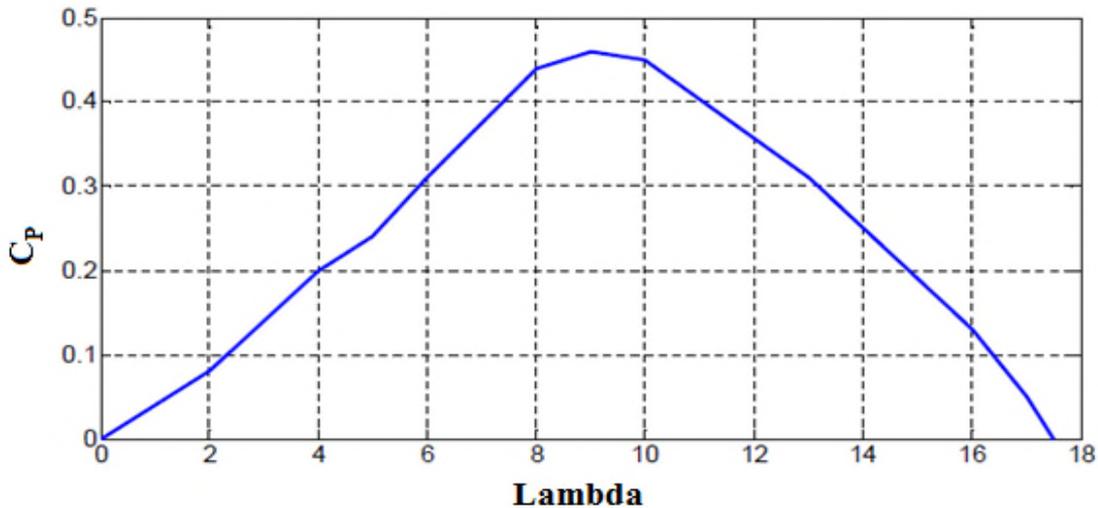


Figure II.3 : Courbe  $C_p(\lambda)$ .

### II.2.3. Modèle des pâles

La puissance cinétique du vent est donnée par [8]

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

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Son couple aérodynamique  $T_t$  est donné par l'expression suivante :

$$T_t = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} C_p \cdot S \cdot \rho \cdot V_v^3 \quad (\text{II.4})$$

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

$$P_t = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.5})$$

$\Omega_t$  : 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 pâle, le ratio de la vitesse ( $\lambda$ ) et l'angle d'orientation de la pâle  $\beta$ .

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

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_v} \quad (\text{II.6})$$

#### II.2.4. 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 [32]. La vitesse mécanique de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II.7})$$

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

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$G$  : Le gain du multiplicateur.

$T_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.

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

$\Omega_m$  : La vitesse mécanique de la génératrice.

$\Omega_t$  : La vitesse de la turbine.

#### II.2.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission

Avec la présence du multiplicateur, l'équation dynamique de l'arbre est donnée par [32], [33] :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + F\Omega_m = T_{em} - T_t \rightarrow (J + F)\Omega_m = T_{em} - T_t \quad (\text{II.9})$$

Avec :

- J : Inertie totale de l'arbre de transmission.
- F : Le coefficient de frottement dynamique.

Le schéma bloc de la turbine sous matlab simulink est représenté sur la figure (II.4) suivante :

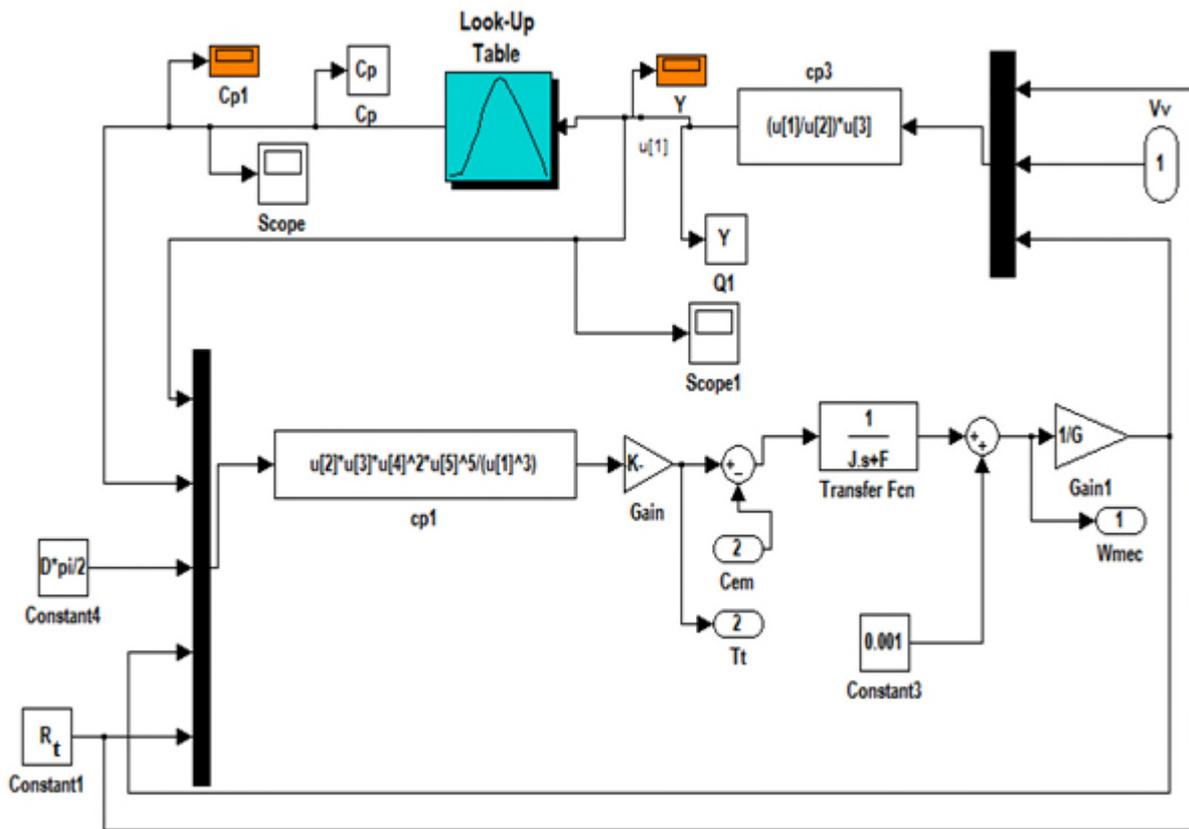


Figure II.4 : Schéma bloc d'une turbine éolienne.

### II.3. Modélisation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil

Grâce aux nombreux avantages qu'elle présente par rapport aux autres type de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la génératrice asynchrone à cage devient intéressante pour être coupler à une turbine éolienne.

La modélisation de la machine asynchrone à cage a déjà fait l'objet de nombreux travaux [32], dans le cadre de notre étude, on dispose d'une génératrice asynchrone à cage, une éolienne à axe horizontal, à vitesse variable à pales fixes.

### II.3.1. Modèle mathématique de la génératrice asynchrone

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications qui utilise la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement moteur, mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [2].

Pour mener à bien la modélisation de la machine, certaines hypothèses simplificatrices ont été faites [32].

- L'entrefer est supposé à épaisseur constante;
- L'effet des encoches est négligé;
- L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale;
- La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale;
- Les pertes ferromagnétiques sont négligées (pas de courants de FOUCAULT ni d'hystérésis) ;
- Les pertes mécaniques sont négligées;
- L'influence de l'effet de peau est négligée;
- Les variations des caractéristiques dues à l'échauffement ne sont pas prises en compte;
- La cage d'écureuil est remplacée par un bobinage triphasé rotorique équivalent.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants, les coefficients d'inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements et la résistance des barres rotorique varie peu en fonction de la vitesse de la rotation [34].

### II.3.2. Equation générale de la machine asynchrone [2]

Les équations générales de la machine à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{II.10})$$

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \quad (\text{II.11})$$

On spécifie respectivement les vecteurs ou paramètres statoriques par l'indice 's' et rotoriques par l'indice 'r'. Les indices 'abc' indique le triphasé. Les paramètres  $R_s$  et  $R_r$  représentent respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase.

Les vecteur  $[V]$ ,  $[I]$  et  $[\Phi]$  sont les vecteur tensions, courants et flux de chacune des armatures.

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{rs}(\theta)][I_{rabc}] \quad (\text{II.12})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{sr}(\theta)][I_{sabc}] \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$L_s, L_r$  : Inductances propre stator et du rotor.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{\max} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$[M_{sr}]$  : La matrice des inductances stator-rotor.

$\theta$  : La position absolue entre deux axes magnétiques rotorique et statorique.

$M_{\max}$  : Représente la valeur maximale d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement. Et pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations de la machine asynchrone dans un repère biphasé tournant « d-q ».

Dans ce cas, on utilise la transformation de Park. Cette dernière, normée, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et biphasé « d-q ».

En choisissant un repère d-q biphasé, l'axe d peut être repéré par :

$\theta_s$ : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator.

$\theta_r$ : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor.

Les deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s - \theta_r = P \cdot \Theta \tag{II.14}$$

Où

P : Nombre de paires de pôles.

$\Theta$  : est la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique,

Les différents axes sont illustrés sur la figure (II.5).

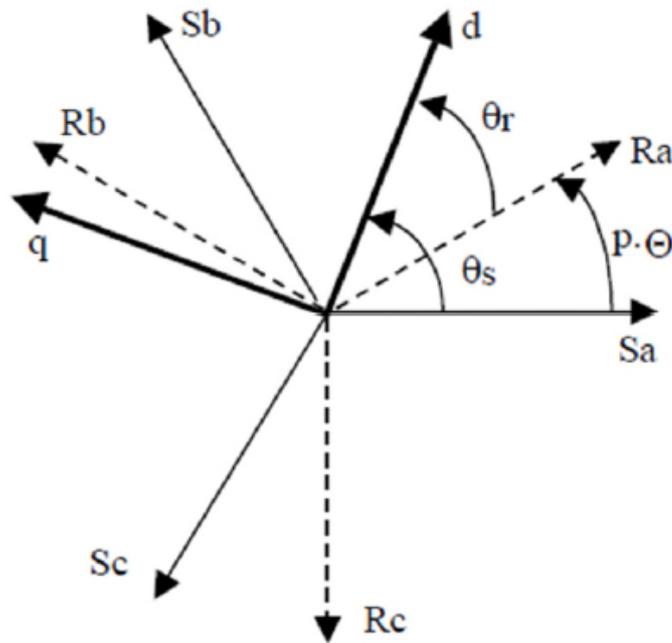


Figure II.5 : Les différents systèmes d'axes utilisés.

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques avec un angle de rotation  $\theta_s$ , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq:

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sq} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \tag{II.15}$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \tag{II.16}$$

$$V_{so} = R_s \cdot I_{so} + \frac{d\varphi_{so}}{dt} \tag{II.17}$$

De même, en l'appliquant aux équations rotoriques avec un angle de  $\theta_r$ , on obtient les équations rotoriques dans le repère dq:

$$V_{rd} = 0 = R_r \cdot I_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \quad (\text{II.18})$$

$$V_{sd} = 0 = R_r \cdot I_{rq} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.19})$$

$$V_{ro} = R_r \cdot I_{ro} + \frac{d\varphi_{ro}}{dt} \quad (\text{II.20})$$

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.17) et (II.20) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante.

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r + M$  : Inductance cyclique rotorique.

$l_s$  : Inductance de fuite statorique.

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique.

$M_{rs} = M_{rs} = \frac{3}{2} + M_0$  : Inductance mutuelle cyclique stator rotor.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de PARK est donnée par :

$$\begin{cases} T_{em} = P \cdot M_{sr}(I_{sq}I_{rd} - I_{sd}I_{rq}) \\ T_{em} = P(\varphi_{sd}I_{sq} - \varphi_{sq}I_{sd}) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

### II.3.3. Choix de repère (dq) [13]

En pratique, il existe trois types de référentiel, le choix du référentiel se fait selon le problème à étudier.

$\omega = 0$  : Correspond au référentiel stator.

$\omega = \omega_r$  : Correspond au référentiel lié au rotor.

$\omega = \omega_s$  : Correspond au référentiel lié au champ tournant.

Dans notre travail on utilise le référentiel lié au stator :

$\omega = 0$ , on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - \omega_r \varphi_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} = 0 \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \omega_r \varphi_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant les flux par leur expression en fonction des courants statoriques et rotoriques (équation (II.21)) on aura le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r M & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Tel que :

$M = M_{sr} = M_{rs}$  : Inductance mutuelle cyclique stator rotor.

Après la résolution de ce système d'équations matricielles, on obtient les expressions des courants statoriques et rotoriques suivants :

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[ V_{sd} - M \frac{dI_{rd}}{dt} - R_s \cdot I_{sd} \right] \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[ V_{sq} - M \frac{dI_{rq}}{dt} - R_s \cdot I_{sq} \right] \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[ R_r \cdot I_{rd} - M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_r (L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq}) \right] \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[ R_r \cdot I_{rq} - M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_r (L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd}) \right] \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

II.4. Modélisation des convertisseurs statiques [12]

La génératrice fournit de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et la charge. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

II.4.1. Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur statique qui assure la transformation d'énergie d'une source alternative en énergie continu, comme le montre le schéma ci-dessous :

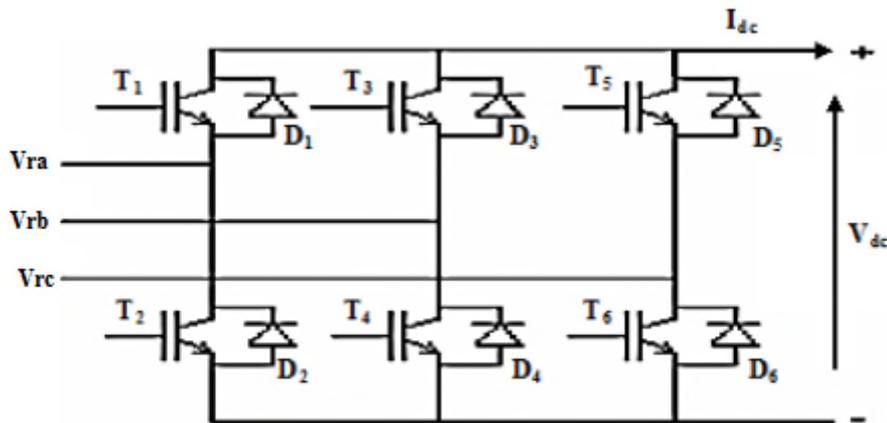


Figure II.6 : Schéma du redresseur.

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{II.28}$$

$$I_{dc} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c \tag{II.29}$$

Avec :

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : Tensions statoriques [V]

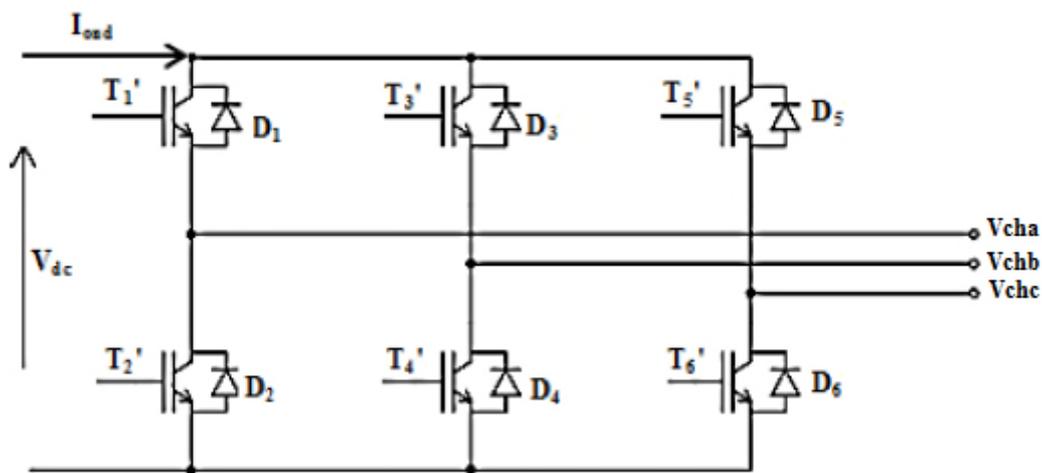
$V_{dc}$  : Est la tension redressée.

$I_{dc}$  : Le courant modulé par le redresseur.

$S_a, S_b, S_c$  : Ce sont des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égale à 1 si l'interrupteur est fermé ou égale à 0 dans le cas contraire).

**II.4.2. Modélisation de l'onduleur**

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courant, chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération comme le montre le schéma ci-dessous :



**Figure II.7 :** Schéma de l'onduleur.

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{cha} \\ V_{chb} \\ V_{chc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} \tag{II.30}$$

$$I_{ond} = S'_a i_{cha} + S'_b i_{chb} + S'_c i_{chc} \tag{II.31}$$

Avec :

$I_{ond}$ : Le courant ondulé par l'onduleur.

$S'_a, S'_b, S'_c$  : Sont des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égale à 1 si l'interrupteur est fermé ou égale à 0 dans le cas contraire).

**II.4.3. Commande vectorielle de la génératrice asynchrone [2][8][9]**

Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus fréquent est celui des courants et donc du couple. Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée où le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée.

La commande vectorielle vient donc régler ce problème de découplage des réglages du flux et du couple à l'intérieur de la machine.

On choisit l'orientation du repère telle que :

$$\varphi_{rd} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{rq} = 0 \tag{II.32}$$

Lorsque le champ rotorique est orienté, le comportement de la machine asynchrone est décrit par les équations suivantes :

$$T_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \varphi_r \cdot I_{sq} \tag{II.33}$$

$$0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_r}{dt} \tag{II.34}$$

$$0 = R_r \cdot I_{rq} + \omega_r \varphi_r \tag{II.35}$$

$$\varphi_r = M \cdot I_{sd} + L_r \cdot I_{rd} \tag{II.36}$$

$$0 = M \cdot I_{sq} + L_r \cdot I_{rq} \tag{II.37}$$

A partir de l'équation (II.34), on obtient :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r \cdot I_{rd} \tag{II.38}$$

Le flux s'exprime en fonction du courant et de la pulsation rotorique à partir de l'équation (II.35) sous la forme suivante :

$$\varphi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot I_{rq} \tag{II.39}$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer  $\varphi_r$  et  $\omega_r$ . On peut, à partir de l'équation (II.36), exprimer le courant  $i_{rd}$  comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\varphi_r - M.I_{sd}}{L_r} \tag{II.40}$$

Par ailleurs, l'équation (II.37) peut s'écrire de la manière suivante :

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot I_{sq} \tag{II.41}$$

Dans l'équation (II.36), on remplace  $i_{rq}$  par sa valeur exprimé en équation (II.35), il advient que :

$$\varphi_r = \frac{M.I_{sd}}{1+T_r \cdot S} \tag{II.42}$$

Avec :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique.}$$

S : Opérateur de Laplace.

La connaissance de  $\omega_s$  permet d'assurer la validité des équations car le référentiel «dq» doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne  $\omega_s = \omega_r + P \cdot \Omega$ . La vitesse de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique. Dans l'équation (II.38), on remplace  $i_{rq}$  par sa valeur donnée en équation (II.42). Ce qui donne :

$$\omega_r = \frac{M.I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} \tag{II.43}$$

On obtient finalement

$$\omega_s = \frac{M.I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} + P \cdot \Omega \tag{II.44}$$

Cette dernière relation correspond à un autopilotage de la machine asynchrone. C'est cette relation qui force à zéro une grandeur de sortie, et permet ainsi le découplage entre les deux grandeurs restantes dans l'expression du couple.

La figure (II.8) illustrée ci-dessous représente le schéma de la commande vectoriel d la génératrice asynchrone [32] :

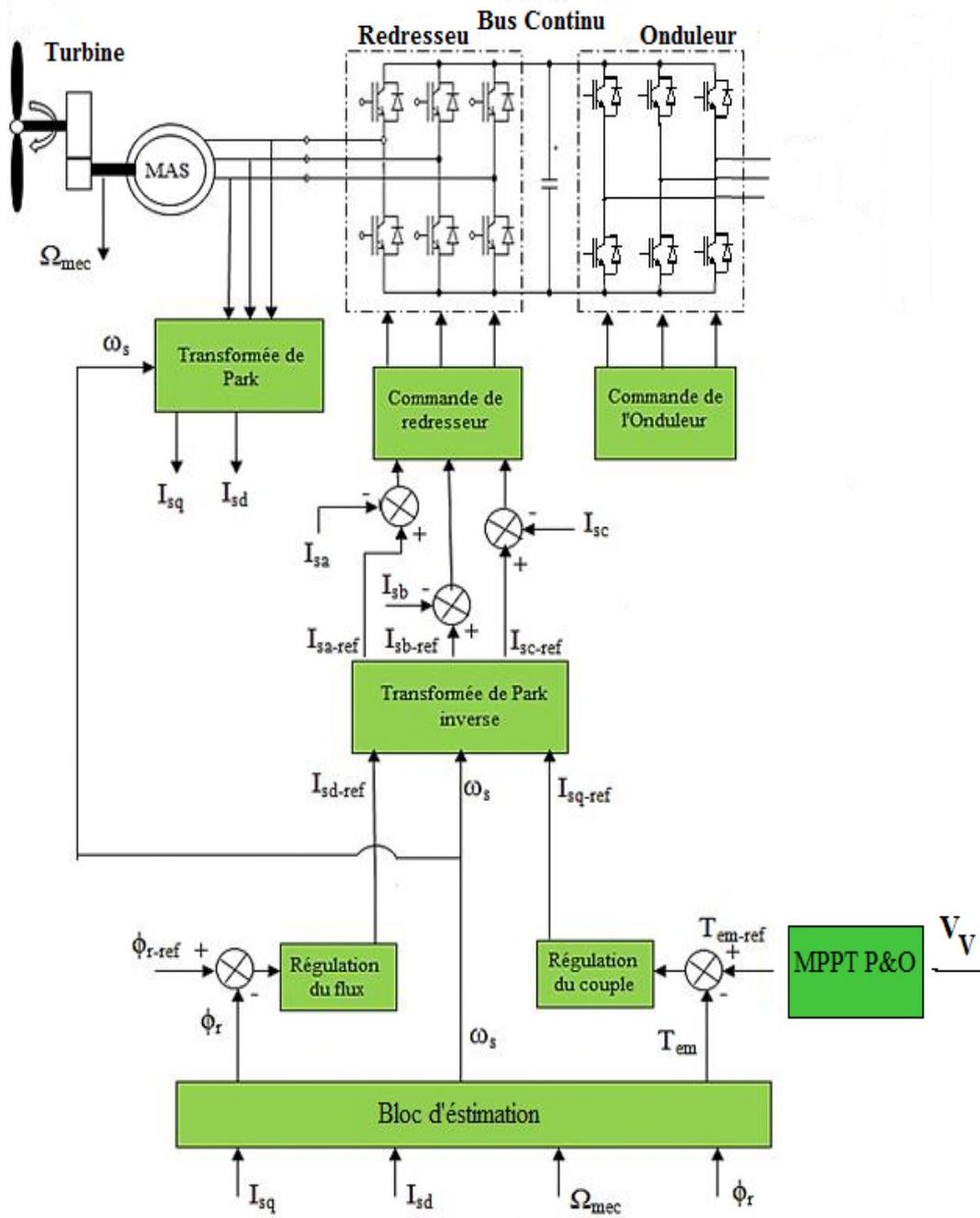


Figure II.8 : Schéma de principe de la commande vectorielle.

## II.5. Optimisation de la chaîne de conversion éolienne

### II.5.1. Optimisation de la puissance de la turbine

#### II.5.1.1. Principe de la méthode P&O [35]

Le principe de commande MPPT de type P&O consiste à perturber la vitesse de l'éolienne ( $\Omega_t$ ) d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de la puissance  $P_t$ . Ainsi, comme l'illustre la figure (II.9) on peut déduire que si une incrémentation positive de la vitesse ( $\Omega_t$ ) engendre un accroissement de la puissance  $P_t$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point optimal (PO). Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le point optimal.

En résumé, si suite à une perturbation de vitesse, la puissance  $P_t$  augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PO.

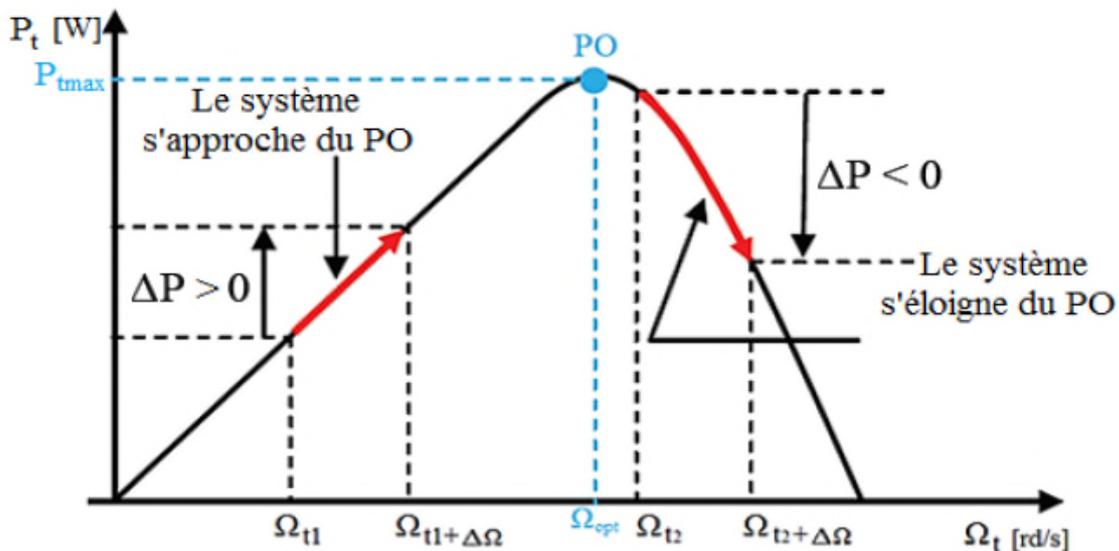


Figure II.9 : schéma de principe de la méthode P&O.

#### II.5.1.2. Algorithme de la méthode P&O

La figure (II.10) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de la vitesse.

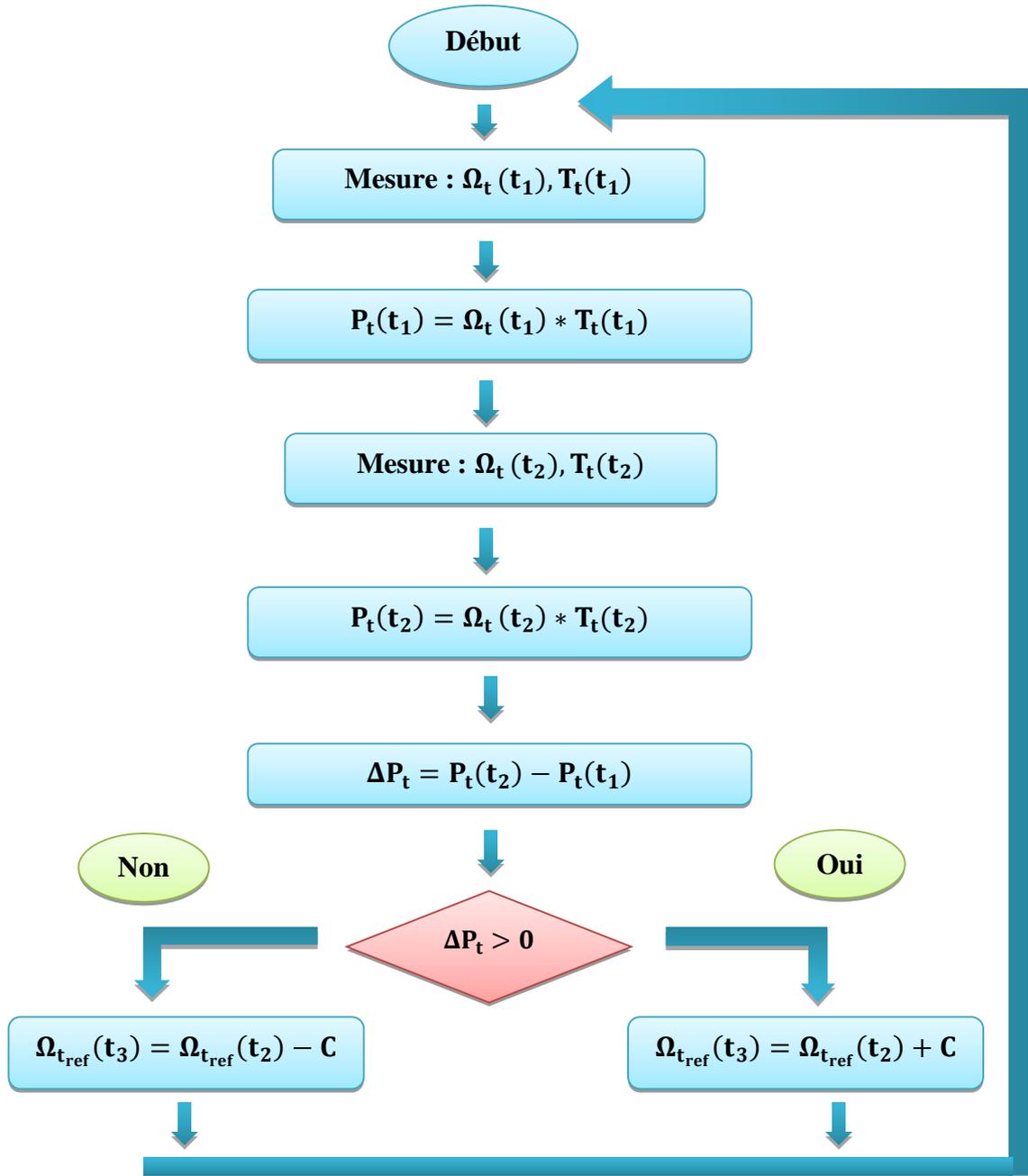


Figure II.10 : Organigramme de la technique de perturbation et d’observation.

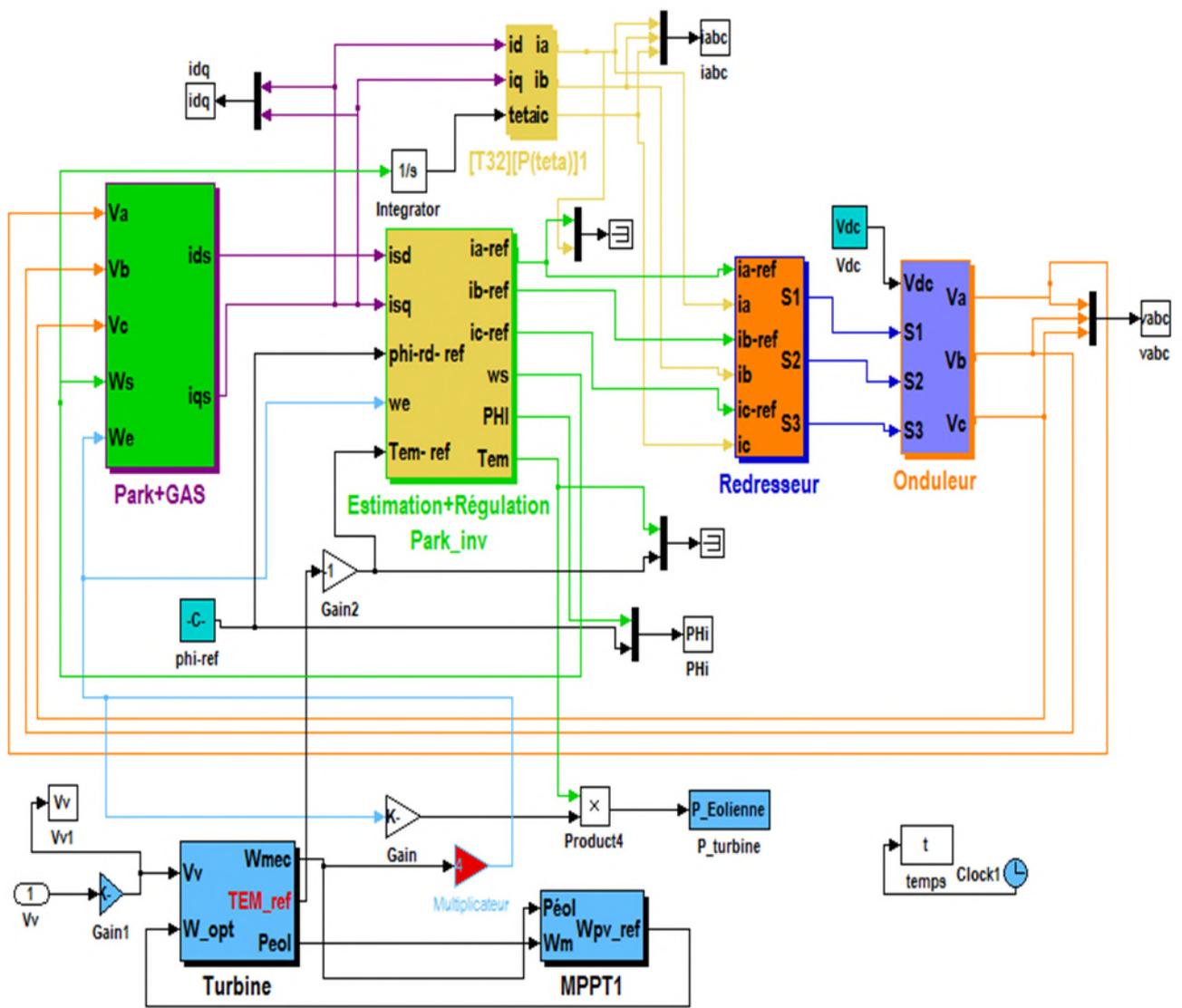


Figure II.11 : Schéma Bloc du système éolien.

Pour vérifier le fonctionnement de la turbine éolienne avec l'algorithme MPPT P&O, on simule sous Matlab/simulink et on applique un profil de vitesse du vent variable illustré sur la figure (II.12).

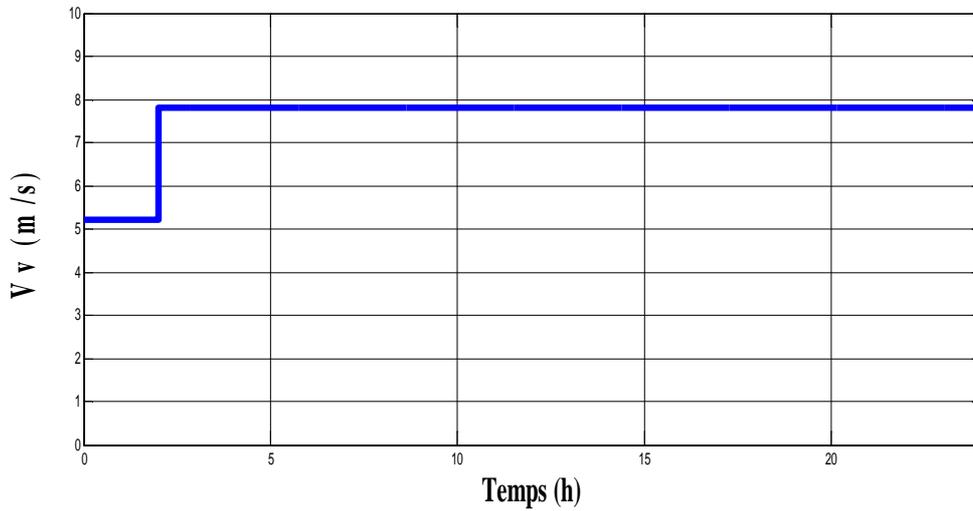


Figure II.12 : Profile de vent appliqué [m/s].

La figure (II.12) montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps. La vitesse du vent est initialement égale à 5.2 m/s puis atteint la valeur de 7.9 m/s après une durée  $t_t=2h$ .

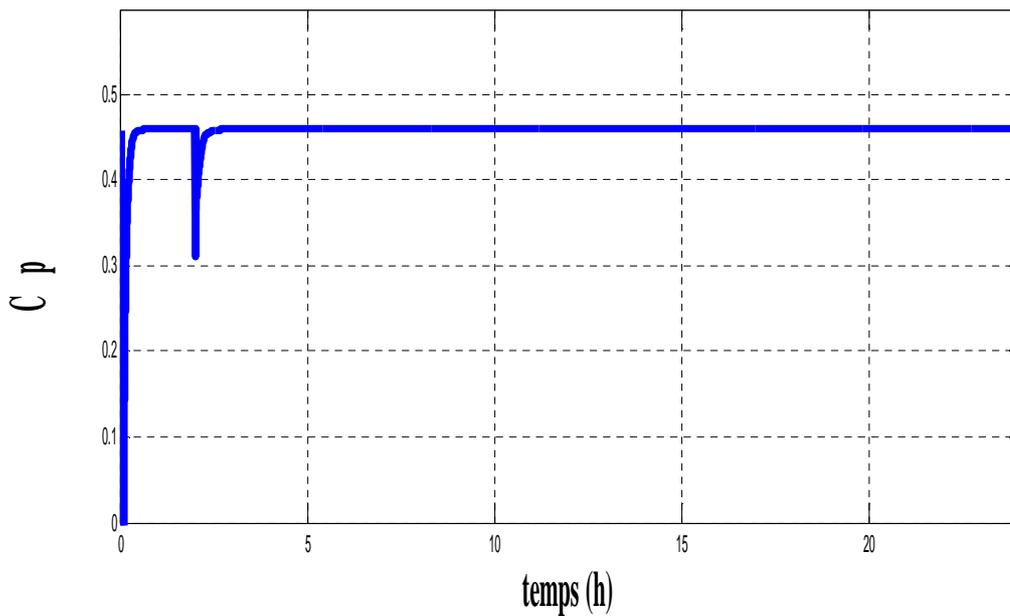


Figure II.13 : Allure du coefficient de puissance  $C_p$ .

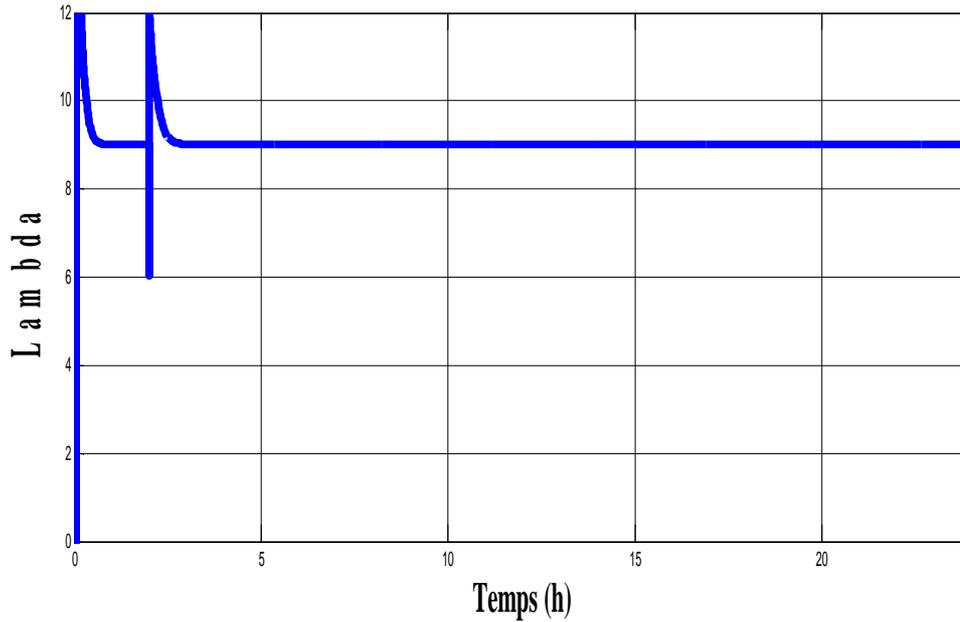


Figure II.14 : La vitesse spécifique ( $\lambda$ ).

La figure (II.13), représente le coefficient de puissance de la turbine. On constate bien qu’il prend sa valeur théorique maximale ( $C_{pmax}=0.46$ ) quel que soit la vitesse du vent appliquée. Cette valeur de  $C_{pmax}$  correspond à une valeur optimale de la vitesse spécifique ( $\lambda_{opt}=9$ ) représentée sur la figure (II.14). Dans ces conditions de  $C_{pmax}$  et  $\lambda_{opt}$ , on peut déduire que le régime de fonctionnement optimal de l’éolienne est atteint.

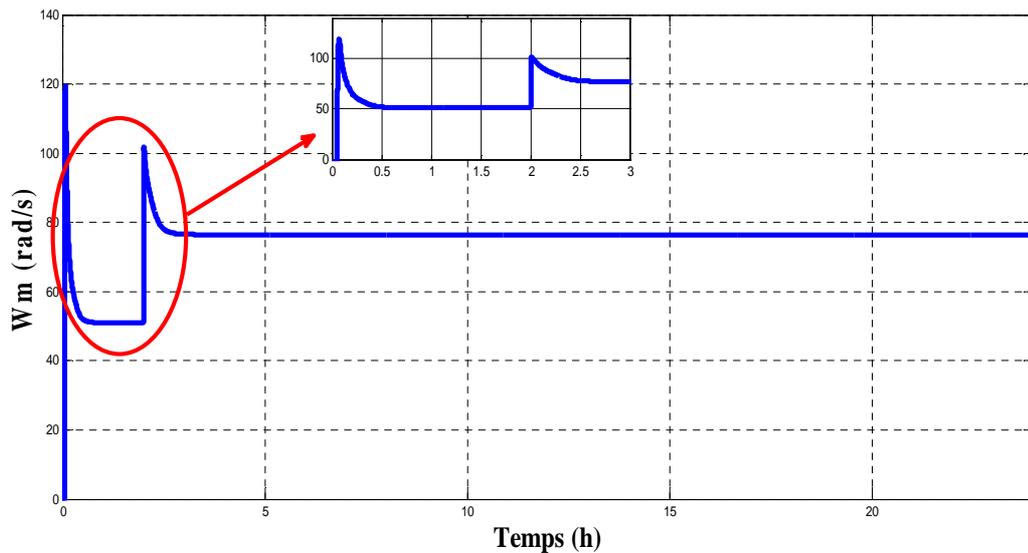


Figure II.15 : Vitesse mécanique de la turbine [rad/s].

La figure (II.15), représente la vitesse de la turbine. Elle varie proportionnellement avec la vitesse du vent.

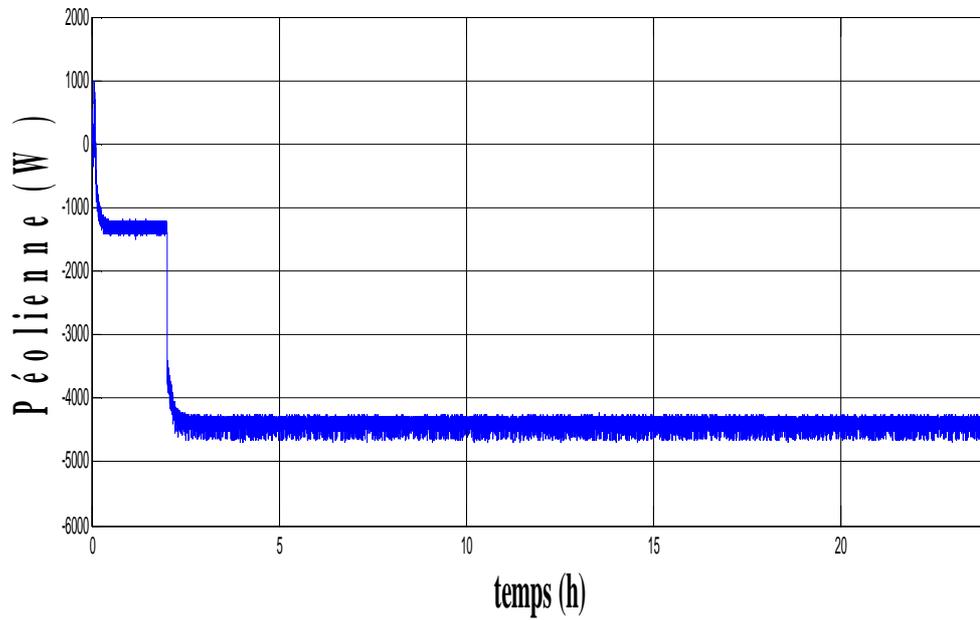


Figure II.16 : Puissance générée par l'éolienne.

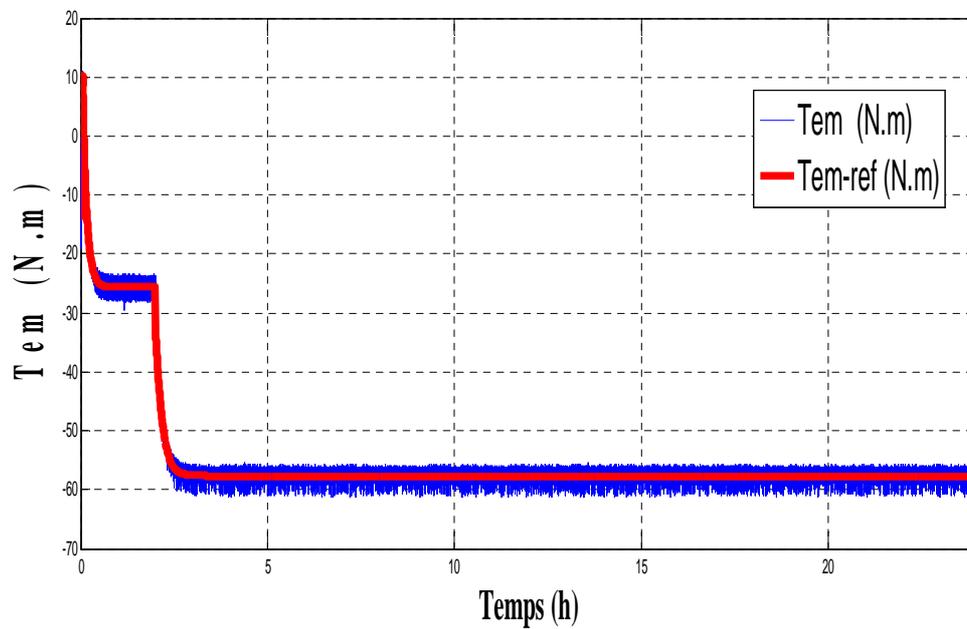


Figure II.17 : Allure du couple électromagnétique développé et sa référence.

La figure (II.16) montre l'allure de la puissance fournie par l'éolienne. On remarque que l'évolution de l'allure de la puissance fournie par l'éolienne est la même que celle du couple électromagnétique (figure (II.17)).

La figure (II.17), représente le couple électromagnétique de la génératrice asynchrone. Le couple électromagnétique étant négatif indique le fonctionnement en mode génératrice. On remarque que la valeur du couple suit sa référence et s'adapte avec les variations de la vitesse selon la puissance fournie.

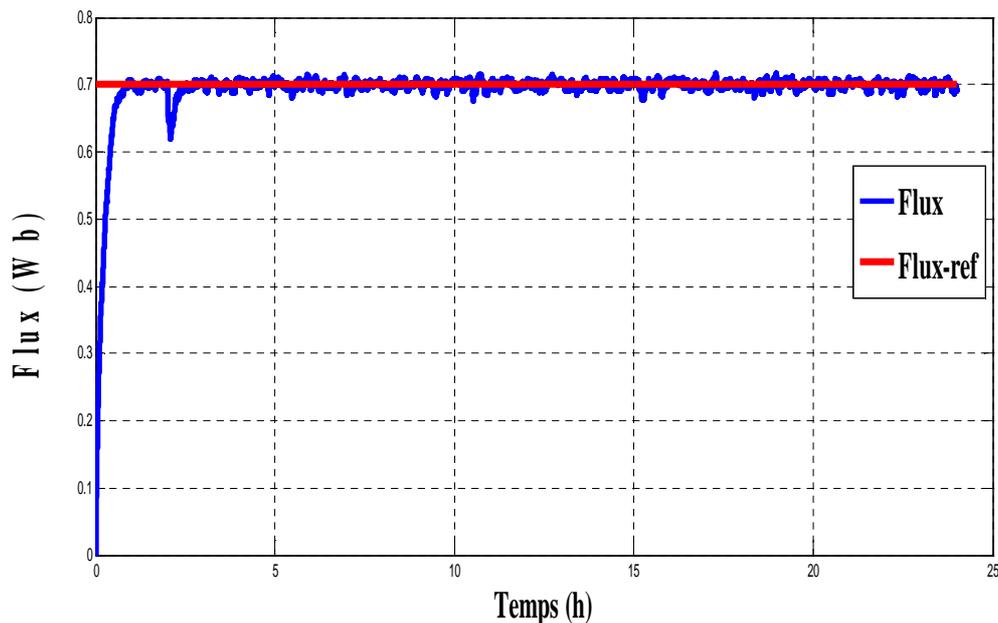


Figure II.18 : Le flux rotorique.

La figure (II.18) montre l'allure temporelle de la réponse du flux rotorique estimé à une consigne du flux rotorique de 0.7 Wb. On voit que la dynamique désirée est respectée, que l'erreur en régime permanent est nulle.

## II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation des éléments constituant la chaîne de conversion éolienne. Cette chaîne a été optimisée par la méthode P&O. Le contrôle vectoriel pour la génératrice asynchrone avec une régulation classique (PI) a été aussi présenté. Cette commande nous a permis de simplifier et d'offrir un découplage et rendre sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Nous avons ainsi donné et commenté les résultats obtenus lors de la simulation du système éolien.

### III.1. Introduction

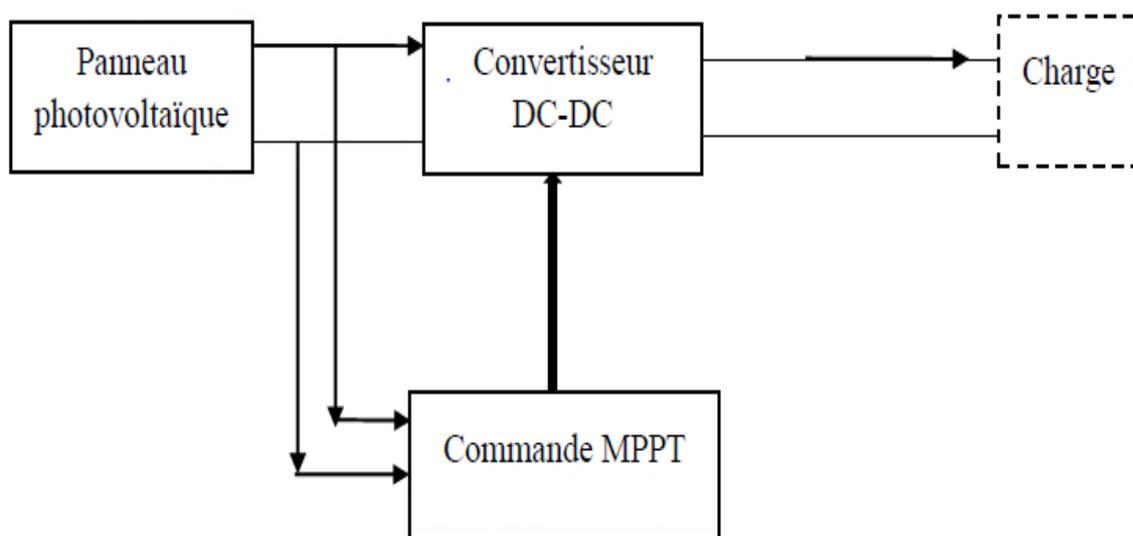
Dans ce chapitre nous allons modéliser la chaîne de production photovoltaïque en commençant par le modèle du panneau photovoltaïque utilisé (le modèle à une diode), suivi par le hacheur survolteur et la commande de maximisation de puissance utilisée qui est la méthode de perturbation et d'observation.

La modélisation est un moyen destinée à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique. Et la simulation aide à comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux.

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire courant-tension (I-V) du générateur PV au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximal, il est évident de modéliser le générateur PV.

### III.2. Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

Un système photovoltaïque est l'ensemble des éléments permettant de convertir l'énergie solaire qu'il reçoit en énergie électrique utilisée pour alimenter une charge spécifique pour une application donnée. Il est composé, comme présenter sur la figure (III.1) par : un système de captation énergétique (panneaux photovoltaïques), un hacheur survolteur et un système de commande, pour la maximisation de la puissance.



**Figure III.1 :** Système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation.

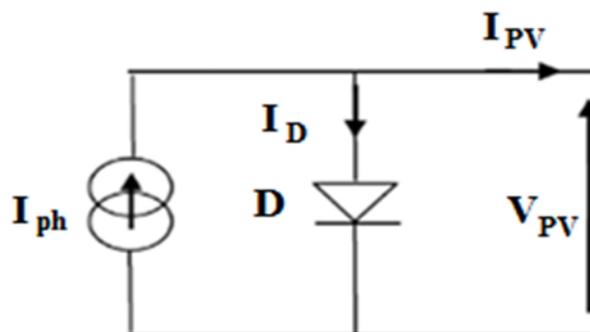
### III.2.1. Modélisation du panneau photovoltaïque [36]

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles de générateur PV, qui diffèrent 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.

#### ➤ **Modèle idéal**

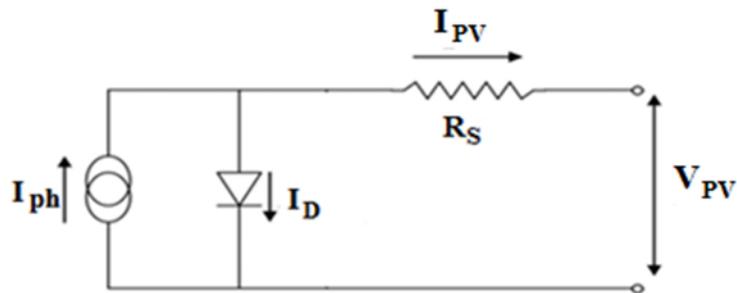
Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à l'éclairement incident, en parallèle avec une diode qui correspond à la jonction P-N de la cellule PV, qui est représentée par le circuit électrique (figure. III.2).



**Figure III.2 :** Modèle électrique idéal d'une cellule PV.

#### ➤ **Modèle à une diode sans résistance parallèle :**

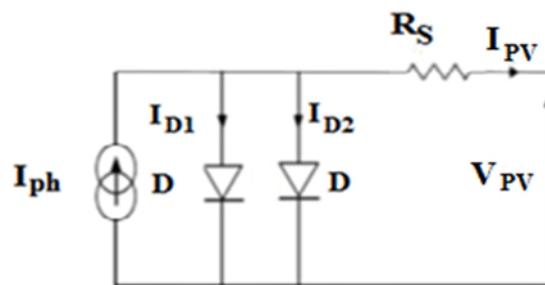
La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (figure, III.3), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, d'une diode pour la polarisation de la cellule et une résistance série.



**Figure III.3** : Modèle électrique à une diode sans résistance parallèle.

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

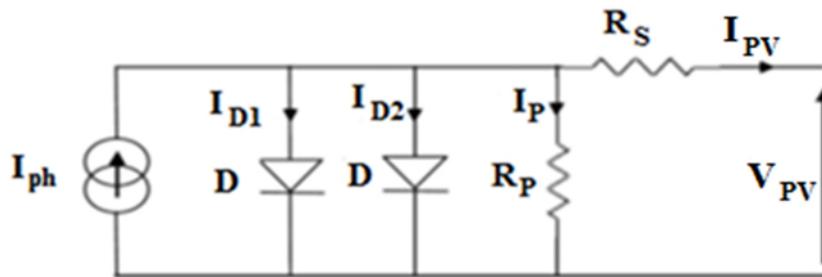
La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique (figure. III.4), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série.



**Figure III.4** : Model électrique à deux diodes sans résistance parallèle d'une cellule PV.

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

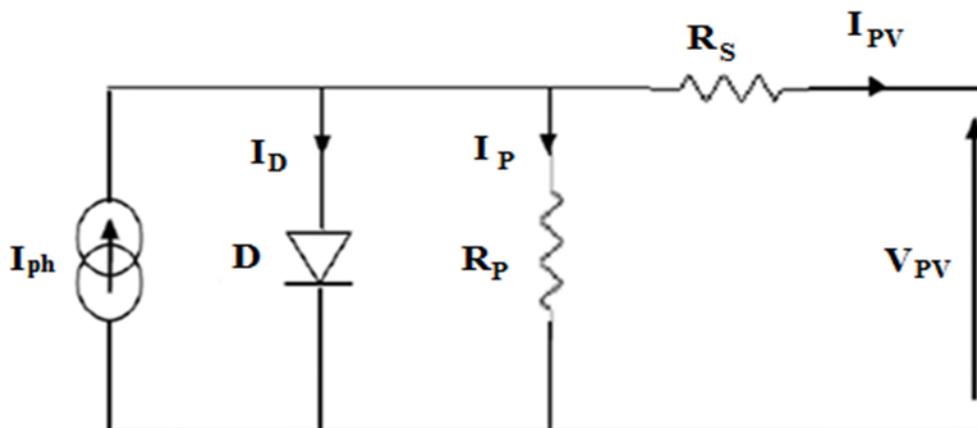
La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (figure, III.5), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance parallèle et une résistance série.



**Figure III.5 :** Schéma équivalent d'un modèle implicite de la cellule PV.

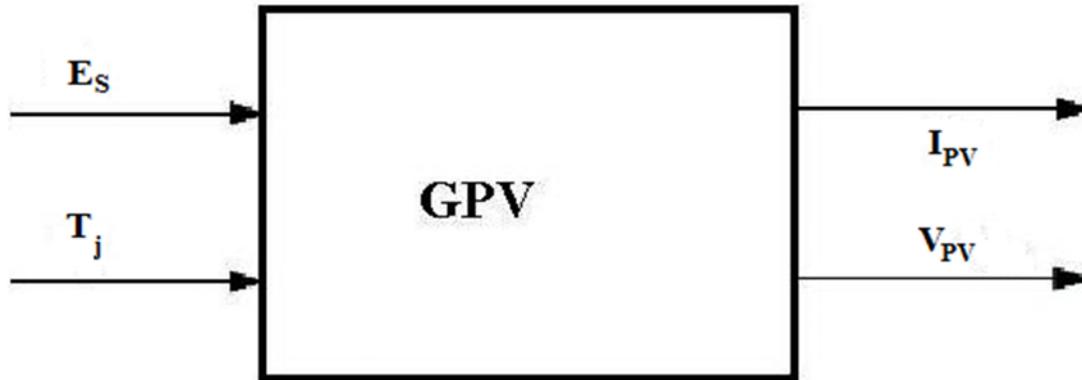
➤ **Modèle à une diode [34]**

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 (III.6).



**Figure III.6 :** 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 III.7 :** Schéma bloc du GPV.

A partir de la figure (III.6) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (\text{III.1})$$

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

$$I_p = \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (\text{III.2})$$

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

$$I_{ph} = P_1 E_s \left( 1 + P_2 (E_s - E_{sréf}) + P_3 (T_j - T_{jréf}) \right) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

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

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

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

$P_1, P_2, P_3$  : Paramètres constants.

- La température de jonction est donnée par :

$$T_j = T_a + E_s \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

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

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

- Le courant dans la diode est donnée par :

$$I_D = I_{od} \left[ \exp\left(\frac{q}{K.A.n_s.T_j} (V_{pv} + R_s I_{pv})\right) - 1 \right] \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$I_{od}$  : Courant de saturation de la diode [A].

$q$  : Charge élémentaire [ $1.6.10^{-19}\text{C}$ ].

$K$  : Constante de Boltzman [ $1.39.10^{-23}$  (SI)].

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

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

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

$V_{pv}$  : La tension de cellule [V].

$I_{pv}$  : Le courant de cellule [A].

- Le courant de saturation dans la diode est donné par :

$$I_{od} = P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{kT_j}\right) \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$E_g$  : Energie de gap [ $1.76.10^{-19}$ ].

$P_4$  : Paramètres constant.

- On obtiendra alors l'équation globale modélisant le générateur PV :

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

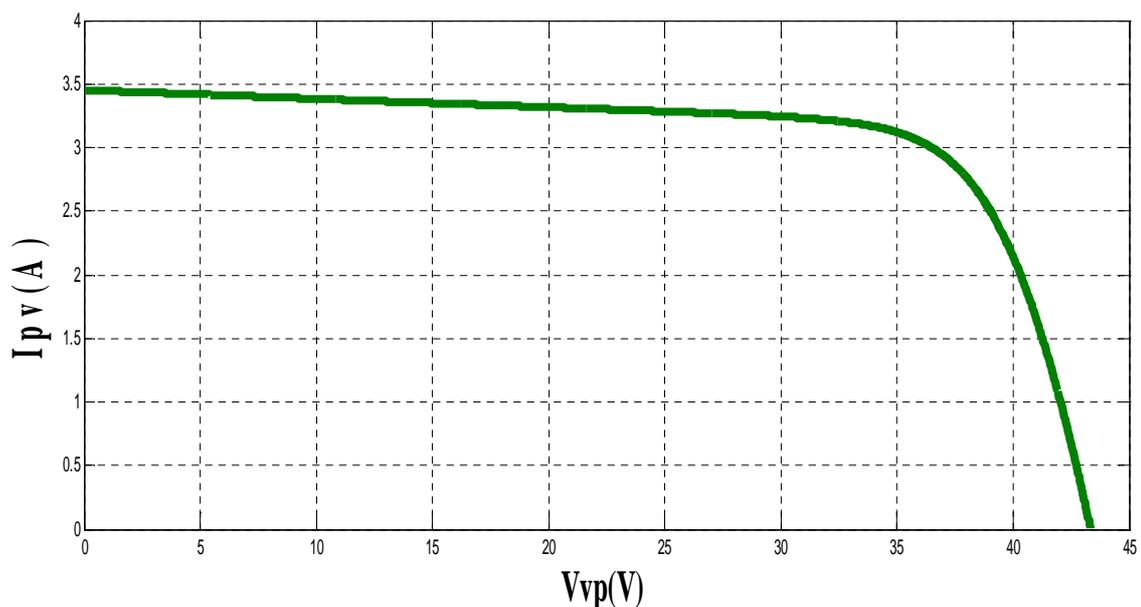
### III.2.1.1. Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

Dans notre travail nous avons utilisé le panneau de type SIEMENS [110  $W_c$ -24 V].

#### III.2.1.1.1. 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 (III.8) 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 III.8 :** Caractéristique  $I_{PV} = f(P_{PV})$  d'un module photovoltaïque.

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.

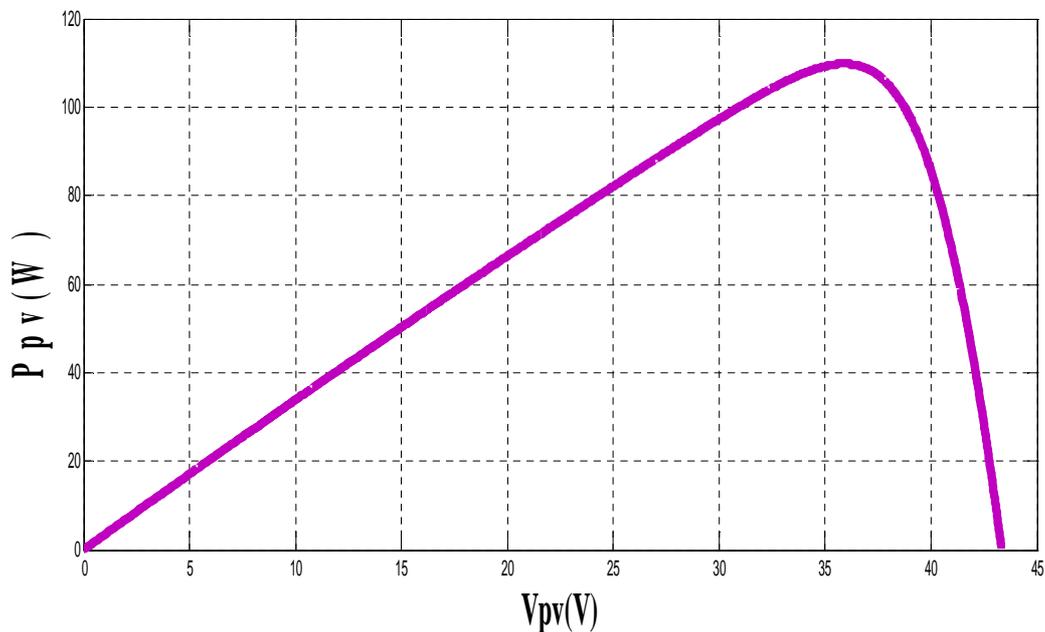
Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_{mpp}$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée [35].

### III.2.1.1.2. Caractéristique puissance –tension

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement standard (éclairage de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , 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 :

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} \quad (\text{III.8})$$



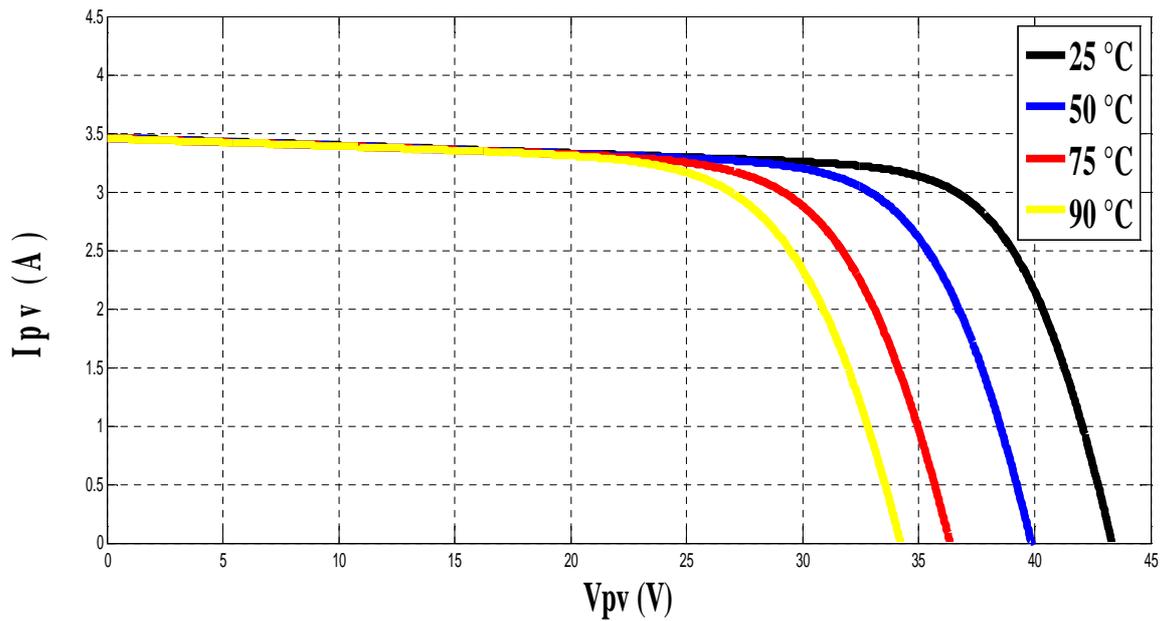
**Figure III.9 :** Courbe  $P_{pv} = f(V_{pv})$  d'un module photovoltaïque.

Cette courbe passe par un maximum de puissance ( $P_{opt}$ ), à cette puissance correspond une tension  $V_{opt}$  et un courant  $I_{opt}$  [37].

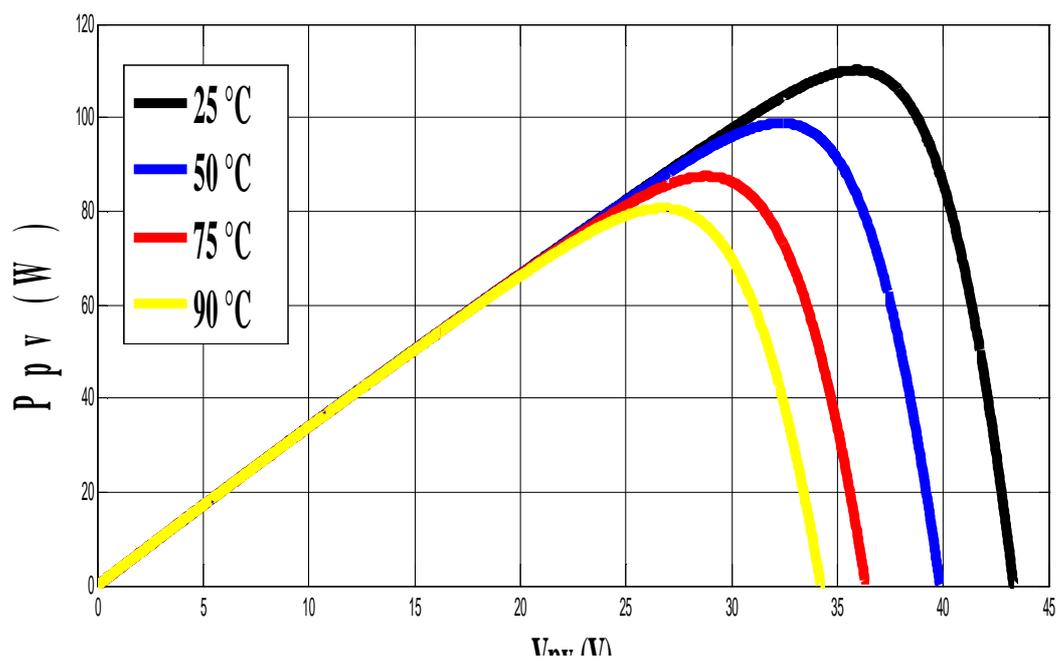
### III.2.1.2. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

#### III.2.1.2.1. Influence de la température

Les figures (III.10) et (III.11) présentent respectivement des courbes courant-tension et puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ( $25, 50, 75,$  et  $90^\circ\text{C}$ ) :



**Figure III.10 :** Caractéristique courant-tension pour différentes températures.



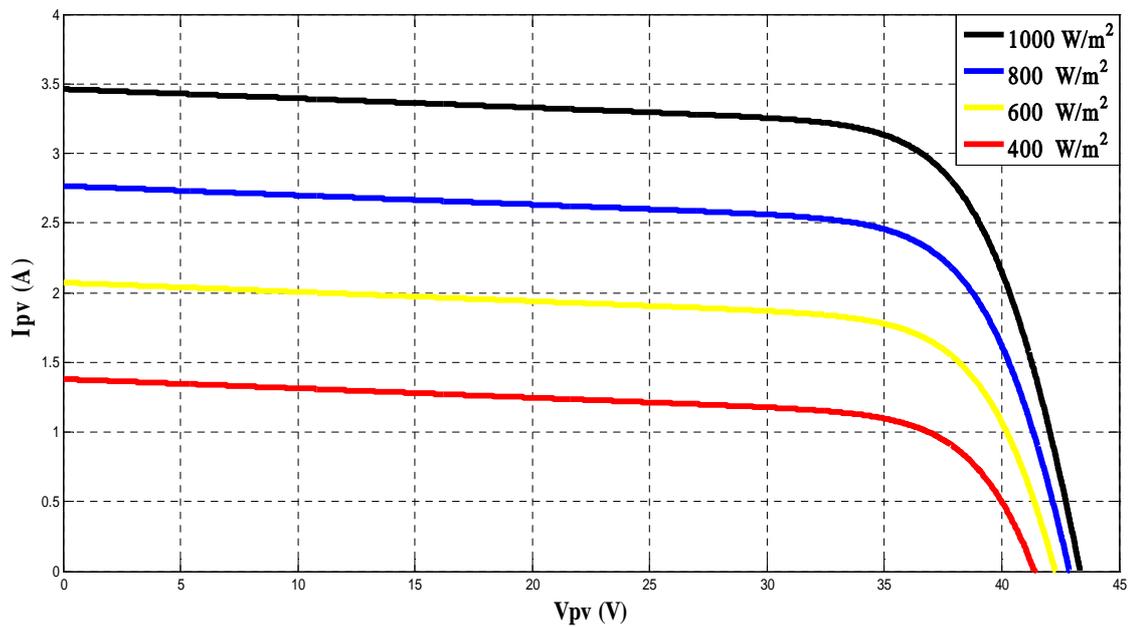
**Figure III.11 :** Caractéristique puissance-tension pour différentes températures.

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 (III.10) et (III.11), 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.

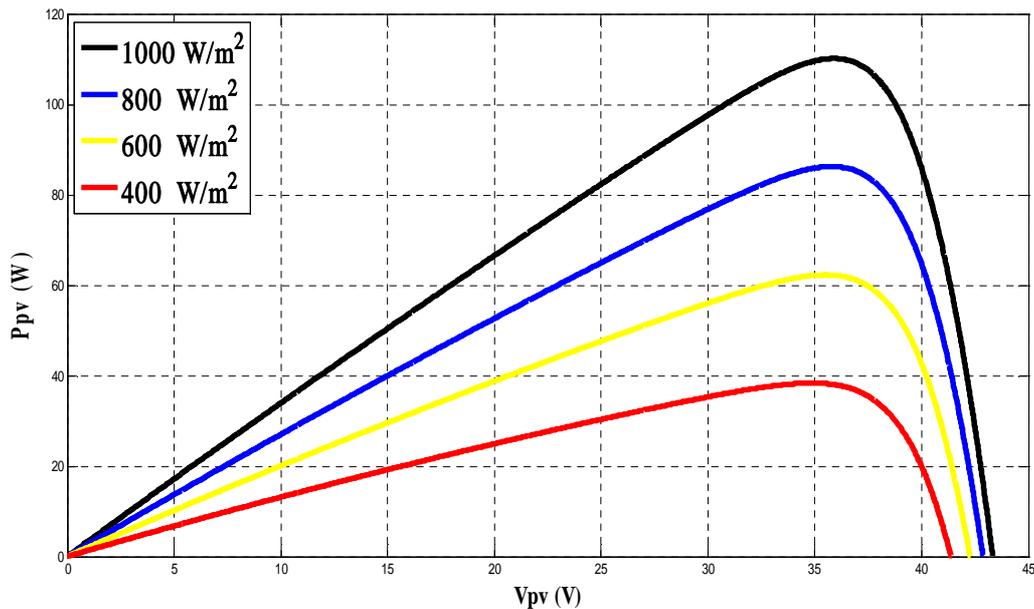
Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C [38].

### III.2.1.2.2. 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 (III.12) et (III.13) 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 III.12** : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$ .



**Figure III.13 :** Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements.

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 éclairement.

Et pour la caractéristique puissance-tension l'éclairement 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.

### III.3. Optimisation de la puissance des modules PV

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelque-soit les conditions météorologiques (température, irradiation). Cette commande place ainsi le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{opt}, I_{opt}$ ). Le premier système de puissance MPPT a été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années suivante, plusieurs

algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum, [39], [40]. A ce jour Ils existent différentes méthodes qui permettent le fonctionnement en MPPT, telle que :

- La méthode d'ajustement de courbe.
- La méthode «look-up table».
- La méthode de la tension du circuit ouvert du générateur.
- La méthode du court-circuit.
- La méthode Perturbation et d'observation (P&O).
- La méthode d'incrément de conductance.
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones).

#### ❖ Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement, elle peut dépister le point de puissance maximum même lors des variations de l'éclairement et de la température [41].

Si la puissance de sortie a augmenté, la tension  $V_{pv}$  est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, cette tension  $V_{pv}$  sera ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. Comme le montre la figure (III.14),  $V_{pv}$  est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

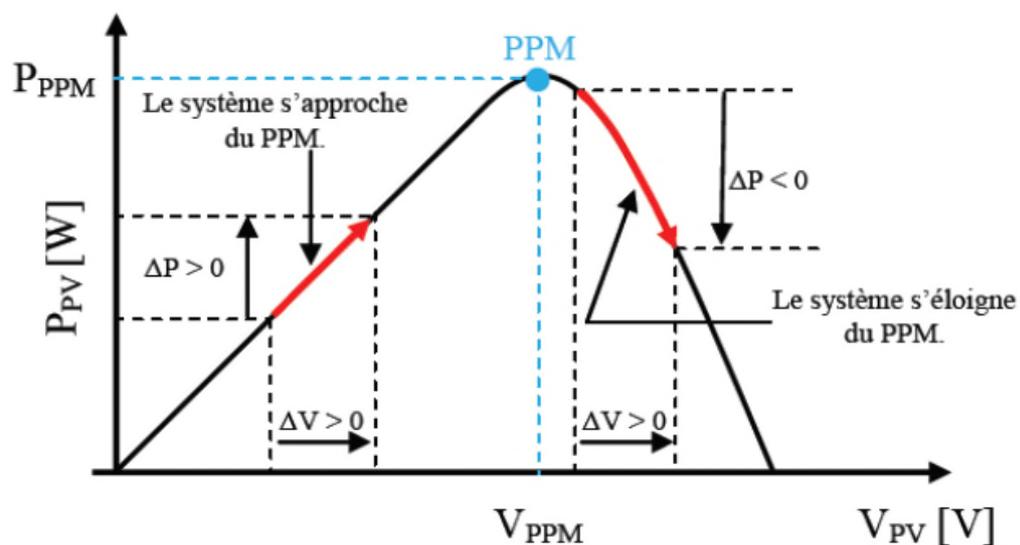


Figure III.14 : Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau photovoltaïque.

Quand le point de puissance maximale est atteint, la tension  $V_{pv}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{opt}$ . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [42].

La figure (III.15) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, la tension  $V_{pv}$  et le courant  $I_{pv}$  sont mesurés pour calculer la puissance photovoltaïque  $P_{pv(t)}$ . Cette valeur de puissance  $P_{pv(t)}$  sera comparée à la valeur  $P_{pv(t-1)}$  calculée au cycle précédent.

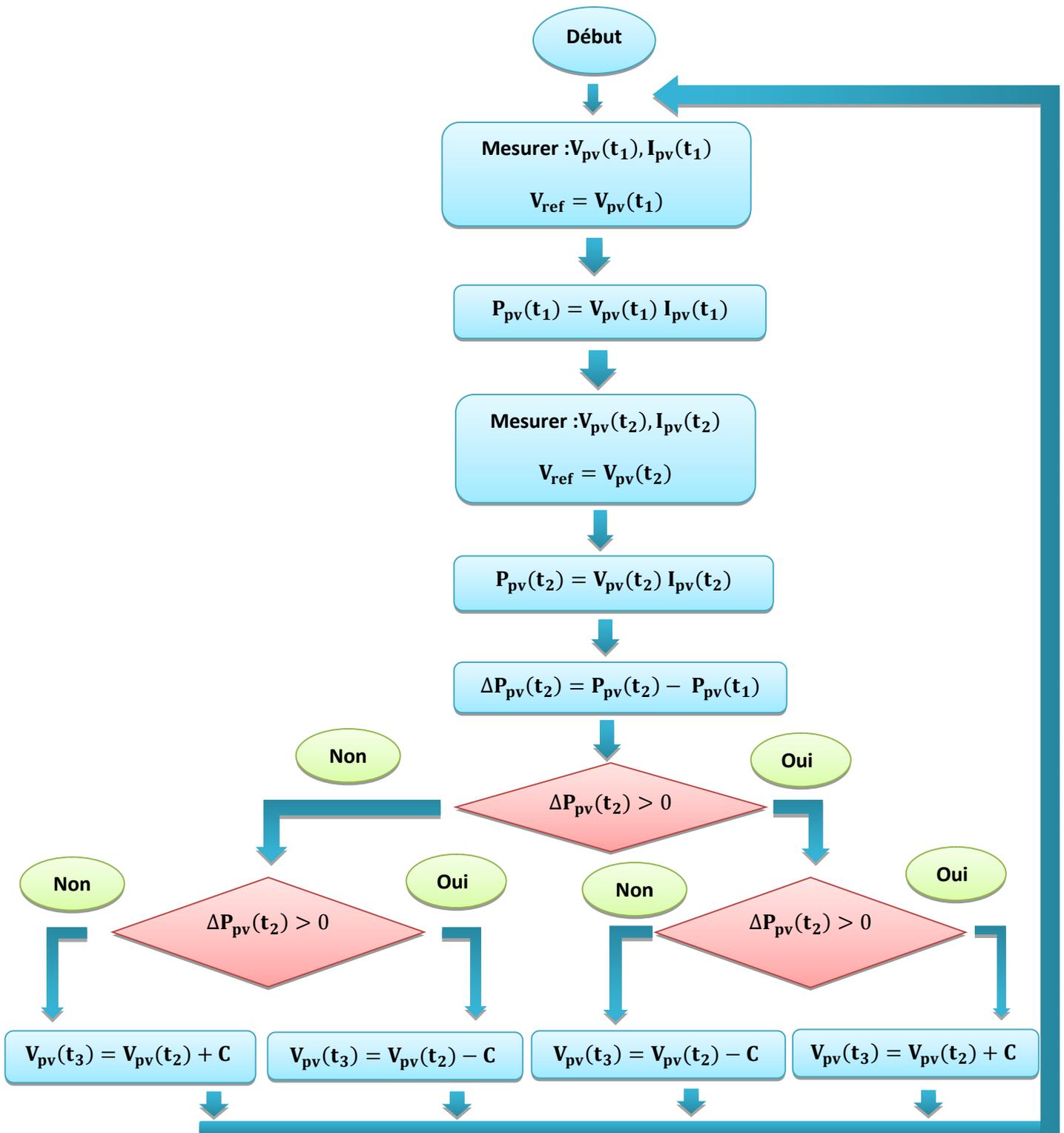


Figure III.15 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

### III.4. Le convertisseur DC-DC (hacheur) [3]

Le hacheur est un convertisseur continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

#### III.4.1. Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST)

Un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « BOOST » ou hacheur parallèle.

La conception de systèmes photovoltaïques optimisée est par nature difficile. En effet, coté source, pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Coté charge, que ce soit de nature continue (DC). Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source - charge. Le convertisseur utilisé est un hacheur survolteur, son circuit électrique est présenté dans la figure (III.16).

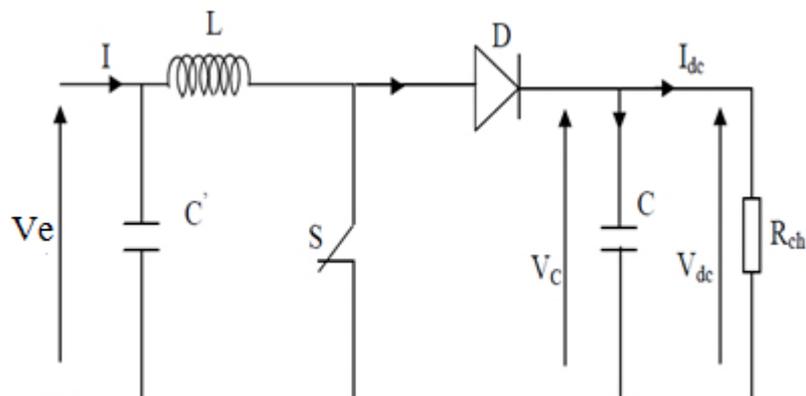


Figure III.16 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC.

Les figures (III.17), (III.18) montrent le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$ , qui comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant et la diode polarisée en inverse, donc bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha T$  ( $\alpha$  rapport cyclique, est compris entre  $0$  et  $1$ ).

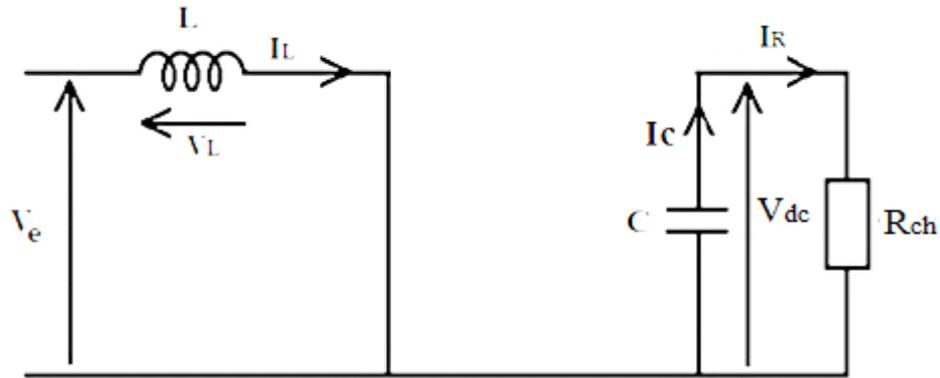


Figure III.17 : Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [0, \alpha.T]$ .

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

$$\begin{cases} V_L = -V_e = L \frac{dI_L}{dt} \\ V_{dc} = R \cdot I_{Rch} \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

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

Avec :  $I_C = I_R$ .

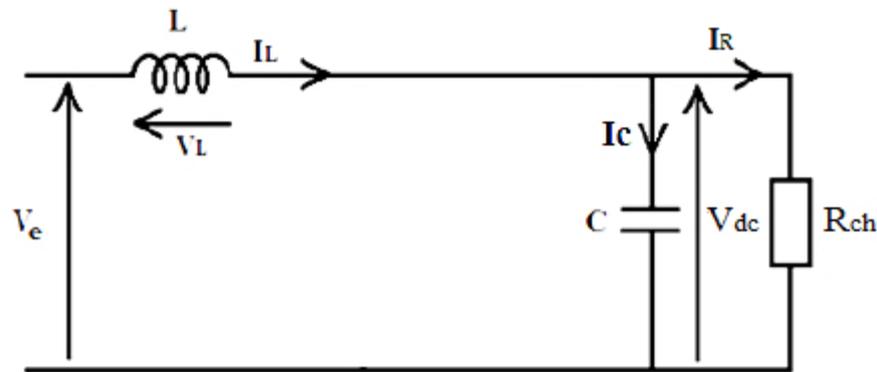


Figure III.18 : Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [\alpha T, T]$ .

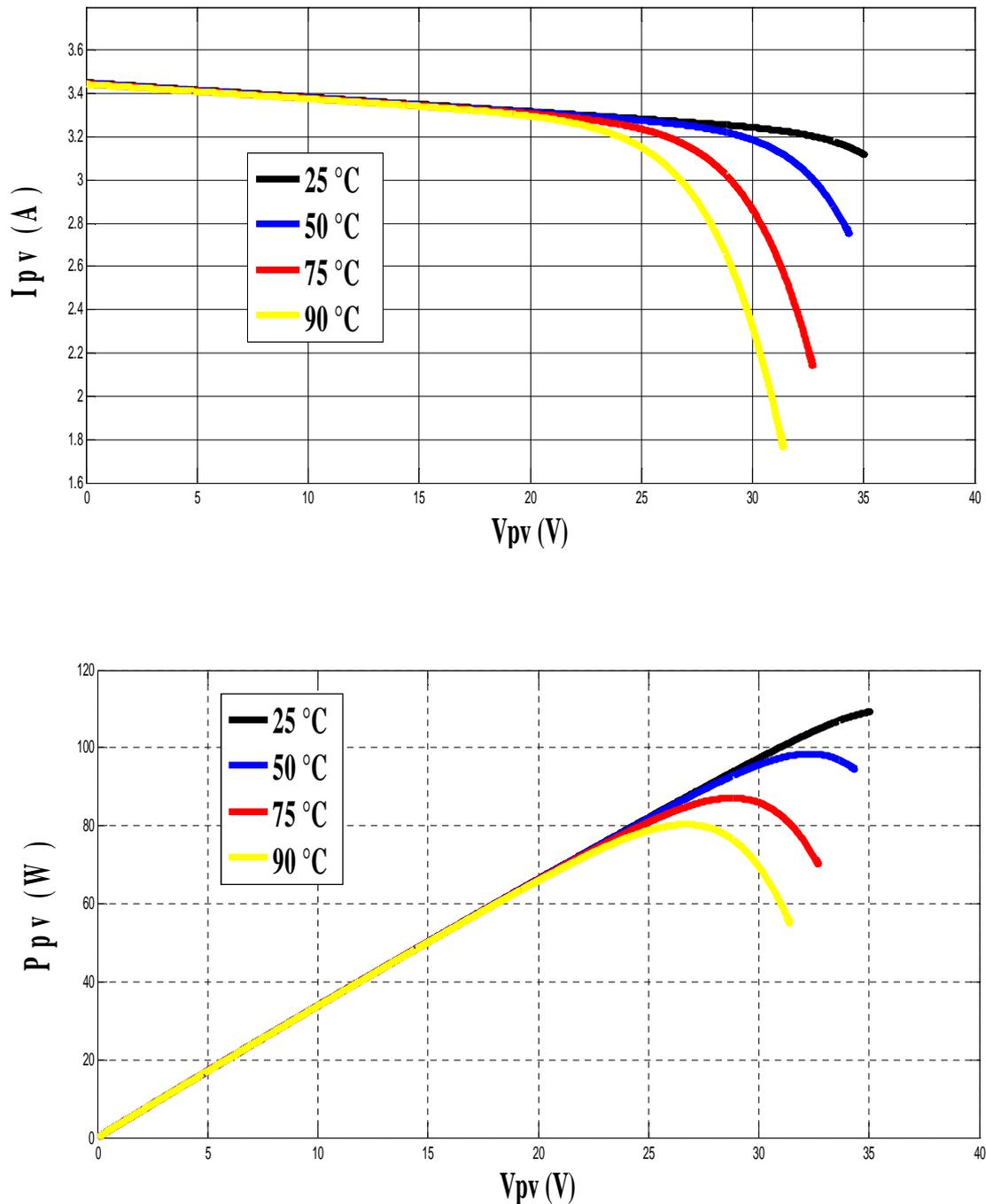
$$\begin{cases} V_L = V_e - V_{dc} \\ I_C = I_L - I_R \end{cases} \quad \text{(III.10)}$$

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

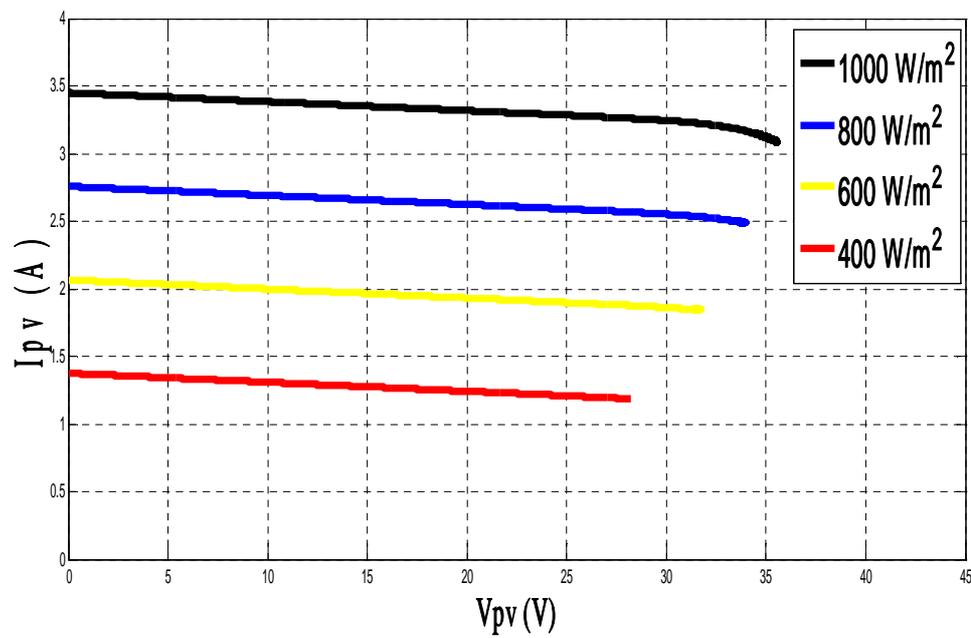
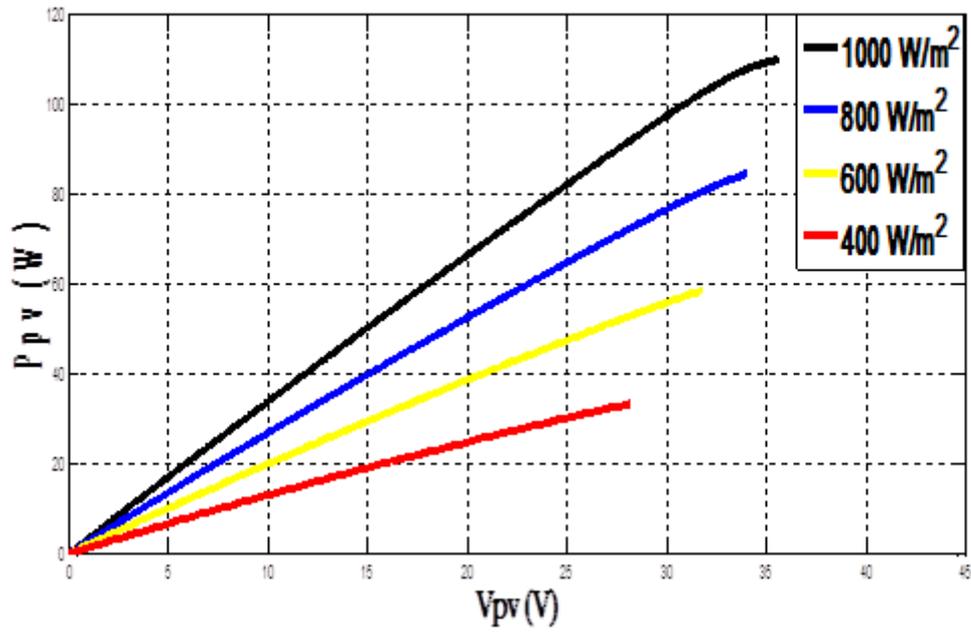
$$\begin{cases} V_{dc} = \frac{1}{1-\alpha} V_e \\ I_R = (1-\alpha) I_L \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

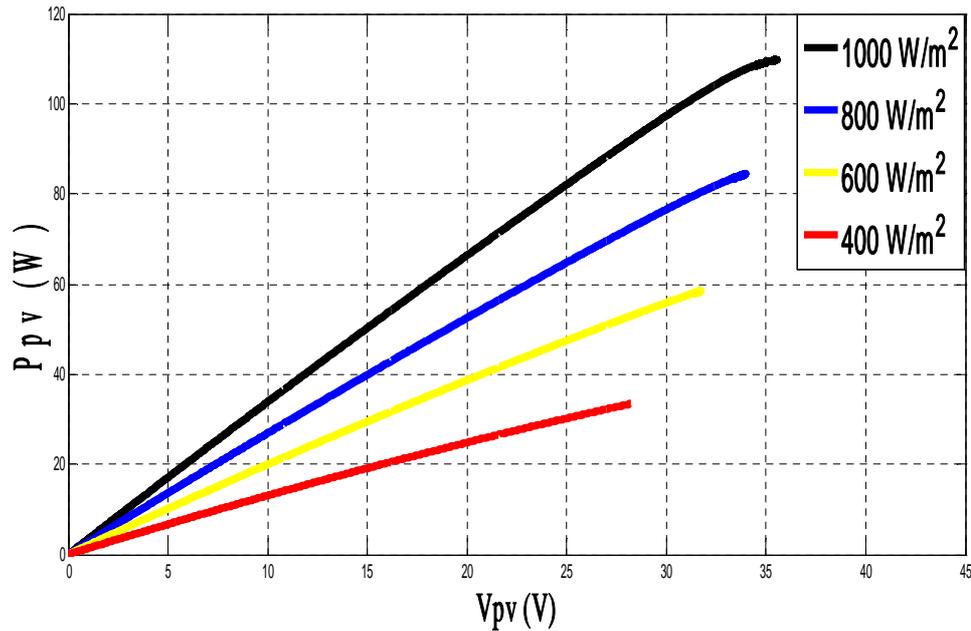
### III.5. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque avec l'application de l'algorithme d'optimisation MPPT, pour une extraction maximale de la puissance pour toute variation de l'ensoleillement et de la température.



**Figure III.19 :** Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ( $E=1000W/m^2$ ).





**Figure III.20 :** Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ( $T=25^{\circ}C$ ).

Pour les deux tests (température et ensoleillement) on remarque toujours une convergence de la puissance vers le point de puissance maximal (PPM), le courant converge également vers un point qui correspond à la valeur de la puissance maximale.

### III.6. Simulation et interprétation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Le schéma bloc de la chaîne de conversion photovoltaïque sous MATLAB est représenté dans la figure (III.21) ci-dessous.

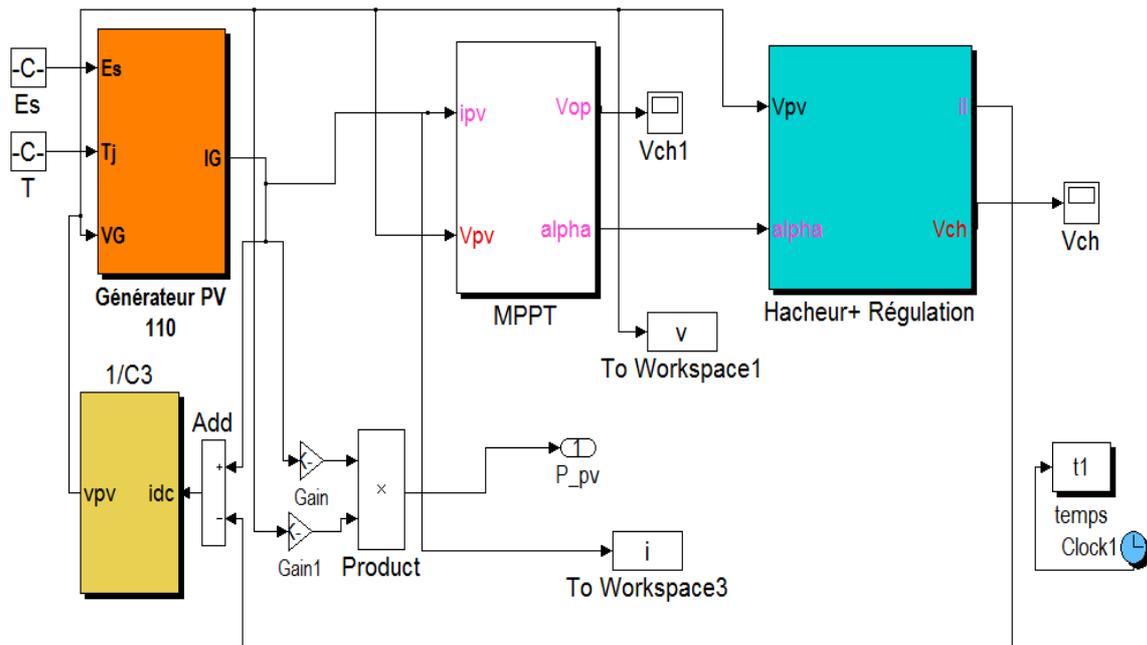
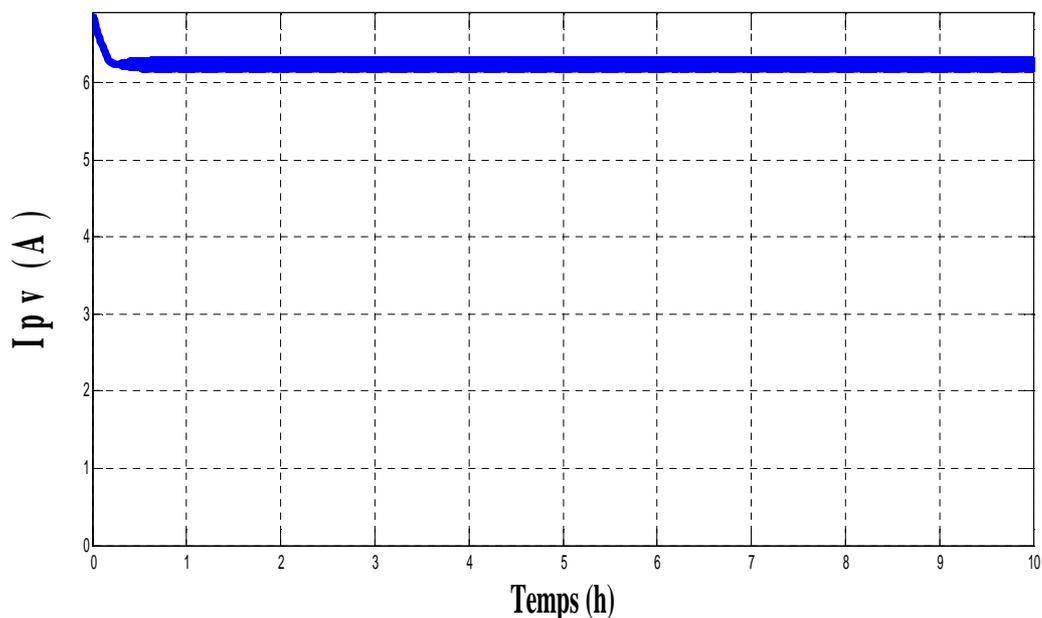
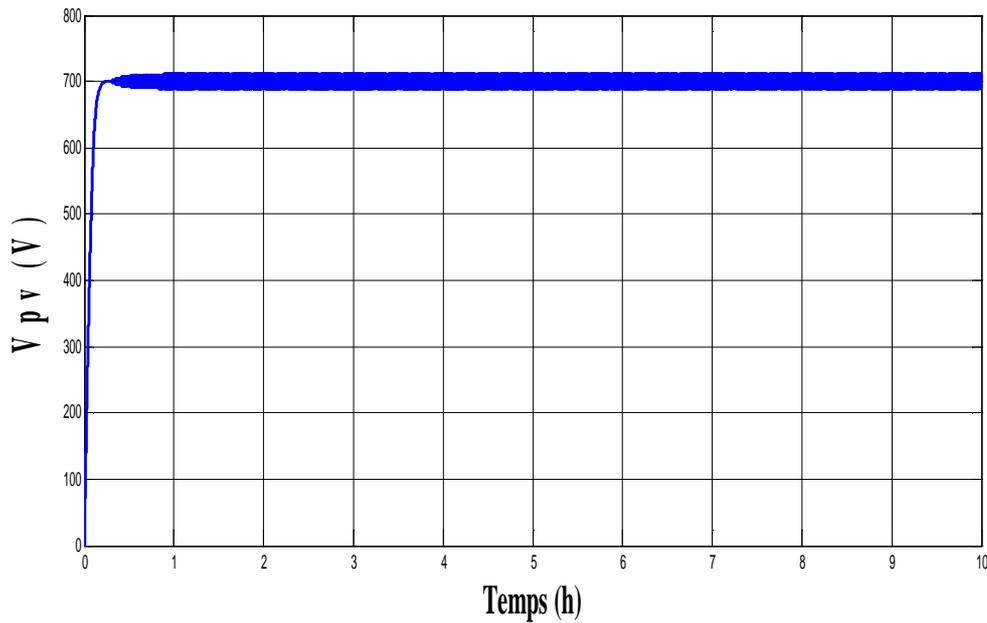
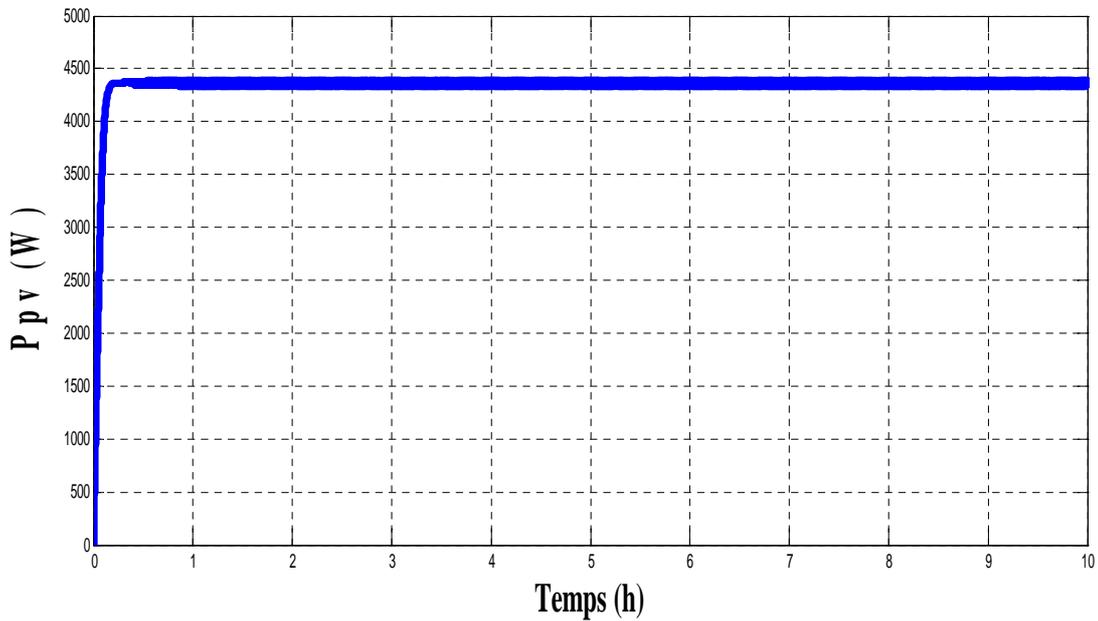


Figure III.21 : Schéma bloc du système photovoltaïque.

### III.7. Résultats de simulation

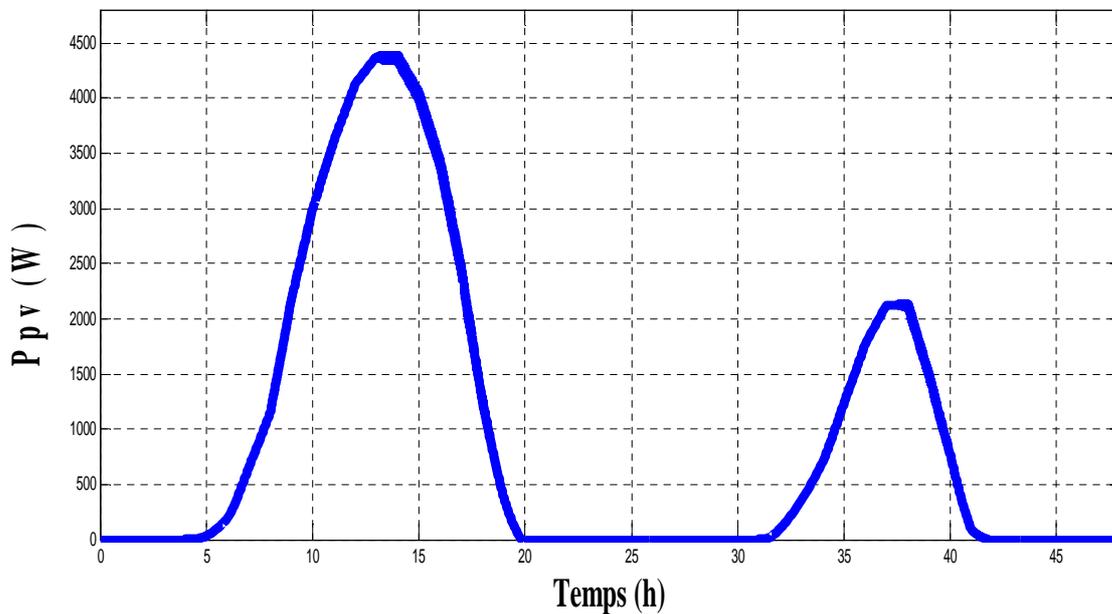
Les résultats de simulation sont obtenus dans les conditions STC (un ensoleillement  $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$  et une température  $T = 25^\circ\text{C}$ ). Les caractéristiques présentées sont obtenus à partir de 40 panneaux photovoltaïques de 110Wc. Pour le montage des panneaux on dispose de 20 panneaux en série connecter en parallèle avec 20 autres panneaux.



**Figure III.22 :** Allure du courant photovoltaïque.**Figure III.23 :** Allure de la tension photovoltaïque.**Figure III.24 :** Allure de la puissance photovoltaïque.

Les figures (III.22), (III.23) et (III.24) illustrent la variation en fonction du temps respectivement du courant, de la tension et de la puissance photovoltaïque. On remarque que le courant  $I_{pv}$ , la tension  $V_{pv}$  et leur produit qui donne en l'occurrence la puissance photovoltaïque sont constants au fil du temps.

La figure (III.25), illustre la puissance générée par les 40 panneaux PV pour un ensoleillement variables. L'ensoleillement et la puissance varie proportionnellement.



**Figure III.25** : Puissance générée pour un ensoleillement variable.

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation des différents composants de la chaîne de conversion photovoltaïque en utilisant le logiciel MATLAB. Et nous avons montré l'influence des conditions météorologiques (température, ensoleillement) sur les caractéristiques des panneaux photovoltaïques.

Afin d'avoir un bon rendement énergétique du panneau photovoltaïque, une commande MPPT de type (P&O) a été utilisée pour forcer le panneau photovoltaïque à fonctionner en permanence au point de puissance maximum.

Nous avons ainsi donné et commenté les résultats obtenus lors de la simulation du système photovoltaïque.

### IV.1. Introduction

L'avantage d'un système hybride relève de la complémentarité des deux sources d'énergies. Dans le but de mettre en relief cette complémentarité, il est alors nécessaire de connaître la contribution de chaque source (photovoltaïque et éolienne) pour l'alimentation de la charge.

L'objectif principal de notre étude est la gestion de l'énergie du système hybride photovoltaïque-éolien.

### IV.2. Modèle du bus continu

Le bus continu assure le couplage entre les sources d'énergie, et la charge. Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension et de produire de l'énergie réactive (figure IV.1).

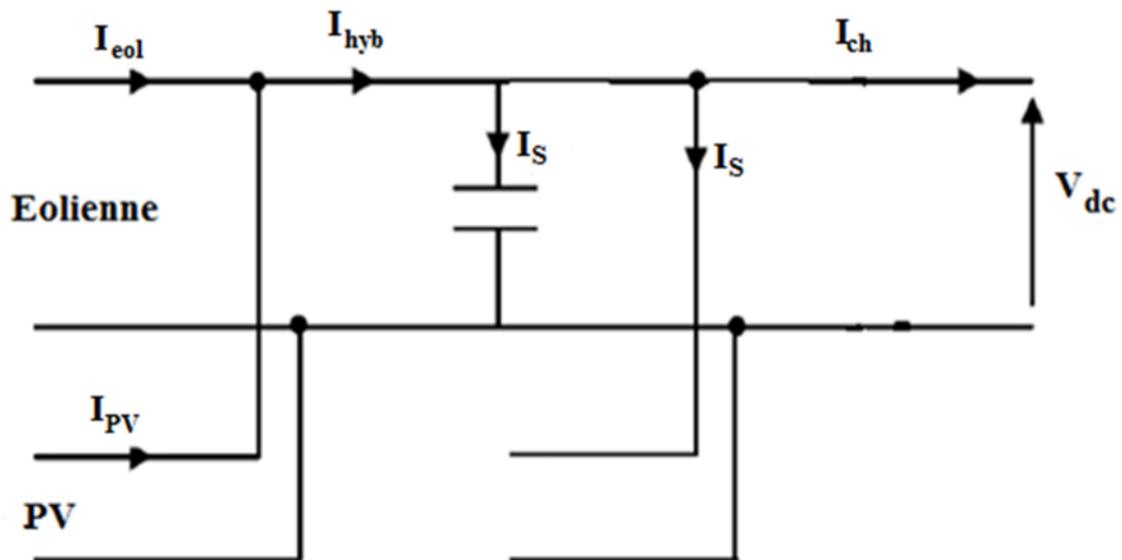


Figure IV.1 : Schéma du bus continu.

D'après la figure (IV.1), on a :

$$I_{\text{hyb}} = I_{\text{eol}} + I_{\text{pv}} \quad (\text{IV.1})$$

$$I_{\text{ch}} = I_{\text{hyb}} - I_{\text{c}} - I_{\text{s}} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

$$I_{\text{c}} = C \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \quad (\text{IV.3})$$

Donc la tension du bus continu est égale à :

$$V_{\text{dc}} = \int \frac{1}{C} \cdot I_{\text{c}} dt \quad (\text{IV.4})$$

$I_{\text{pv}}$  : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A].

$I_{\text{eol}}$  : Courant fourni par le générateur éolien [A].

$I_{\text{c}}$  : Courant qui traverse la capacité [A].

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

$I_{\text{s}}$  : Courant de délestage [A].

Il est important de fixer la tension du bus continu  $V_{\text{dc}}$  pour assurer le fonctionnement correcte des organes qui lui sont attachés.

### IV.3. Gestion d'énergie du système hybride étudié

On propose la gestion de l'énergie du système hybride constitué d'une éolienne de 5kW et de 40 panneaux photovoltaïques de 110  $W_{\text{c}}$ . Pour ce faire, nous avons conçu un algorithme de gestion qu'on a implanté sous MATLAB-Simulink qui traite les différentes situations possible aux quelles nous sommes appelés à être confrontés.

IV.3.1. Organigramme de gestion d'énergie

L'organigramme de gestion de gestion est présenté dans la figure (IV.2)

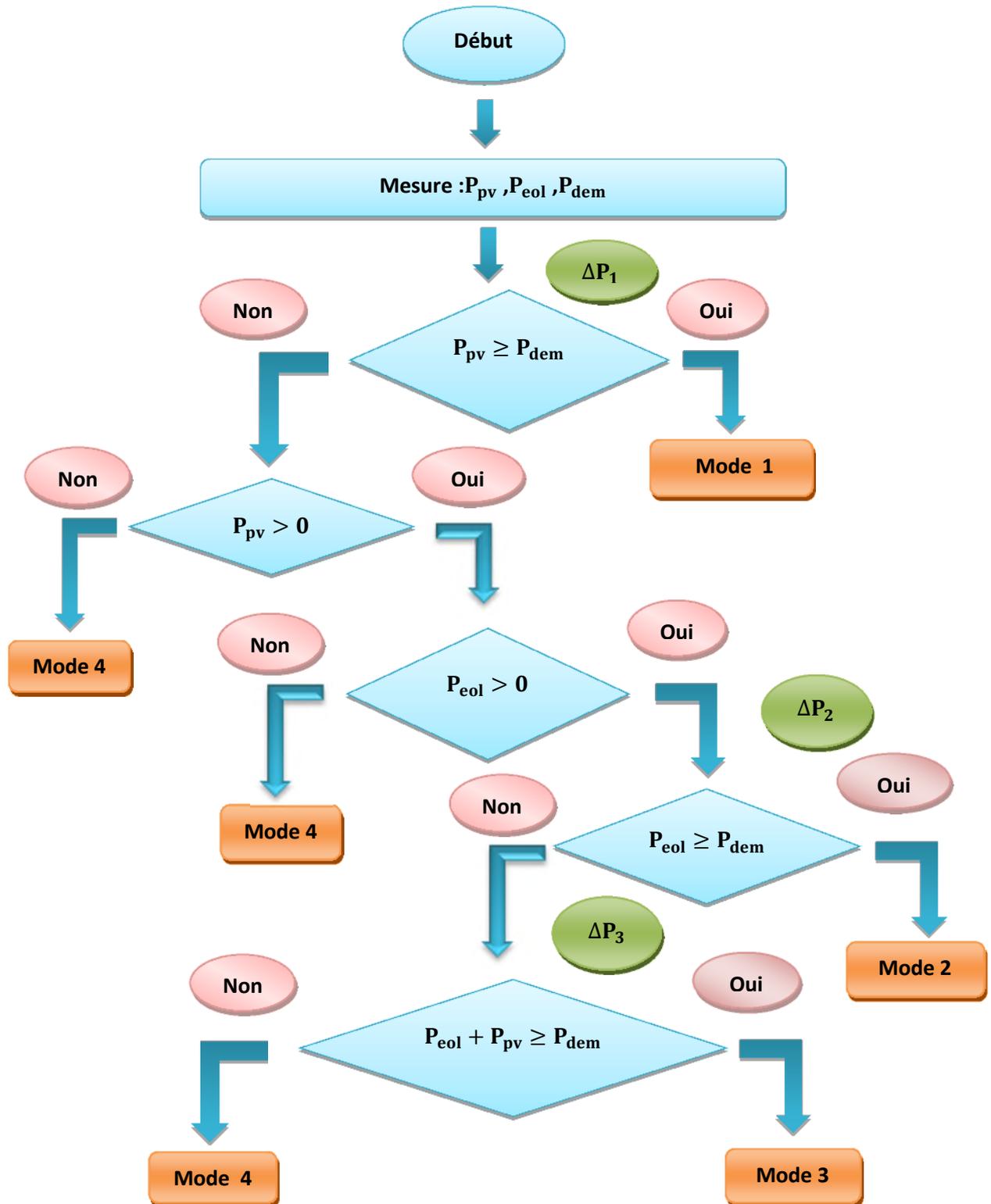


Figure IV.2 : Organigramme de gestion de puissance du système hybride (photovoltaïque-éolien).

❖ **Equation illustrant la gestion de puissance**

$$\Delta P_1 = P_{pv} - P_{dem} \quad (IV.5)$$

$$\Delta P_2 = P_{eol} - P_{dem} \quad (IV.6)$$

$$\Delta P_3 = (P_{pv} + P_{eol}) - P_{dem} \quad (IV.7)$$

❖ **Explication du déroulement du programme de gestion**

En premier lieu nous comparons la puissance générée par les panneaux photovoltaïques pour voir si elle est assez suffisante pour alimenter notre charge. Si ce n'est pas le cas, nous vérifions alors à son tour la puissance générée par l'éolienne pour voir si à elle seule pourrait subvenir aux besoins de notre charge. Si ce n'est pas le cas on hybride alors les deux sources afin d'alimenter notre charge correctement. Si aucun des cas ne s'exécute on déconnecte alors notre charge.

❖ **Mode d'alimentation possible de la charge**

Modes	$P_{ch}$
Mode 1	$P_{pv}$
Mode 2	$P_{eol}$
Mode 3	$P_{pv} + P_{eol}$
Mode 4	0

Tableau IV.1 : Différents modes d'alimentation de la charge.

❖ **Interprétation des modes :**

- **Mode 1 :** la charge est alimentée que par l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques.
- **Mode 2 :** la charge est alimentée que par l'énergie produite par le générateur éolien.
- **Mode 3 :** la charge est alimentée par l'énergie hybride produite par les deux générateurs photovoltaïque et éolien.
- **Mode 4 :** la charge est déconnectée pour faute d'approvisionnement.

En ce qui concerne les modes (1, 2 et 3) s'il y'a un surplus de puissance on pourrait faire appel au moyens de stockages comme les batteries pour sauvegarder ce surplus et l'utiliser ultérieurement, ou l'attribuer directement a des charges dérivatives s'il y'en a. Concernant le 4<sup>ème</sup> mode s'il y'a une puissance générée sachant qu'elle n'est pas assez pour alimenter notre charge, on pourrait toujours aussi la stocker.

### IV.3.2. Profils de charges utilisées

Afin de tester la robustesse de notre programme, nous avons élaboré deux profils de charge, qui sont illustrés sur les figures (IV.3) et (IV.4). Les premières 24h correspondre à une journée d'été et les deuxièmes à une journée d'hiver respectivement.

Pour l'ensoleillement et la vitesse du vent ils sont considéré comme variables, mais à part la température à la surface des panneaux PV qui est considérée constante ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).

#### IV.3.2.1. Profil de charge constante

Pour le premier essai on considère notre demande de charge constante et égale à 1000W comme illustré sur la figure (IV.3)

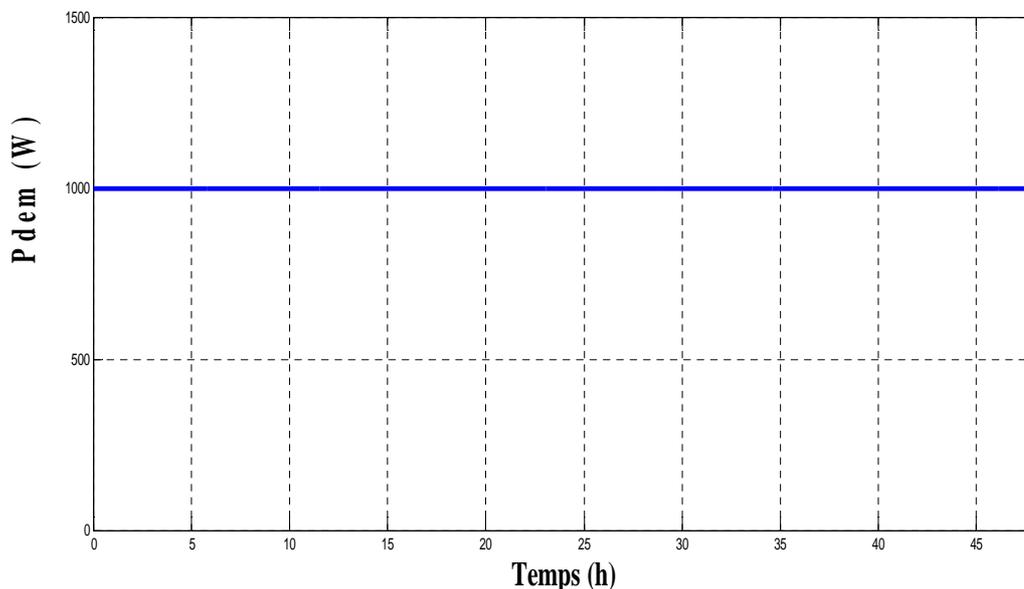


Figure IV.3 : Profil de charge constante.

### IV.3.2.2. Profil de charge variable

Pour le deuxième essai, notre demande de charge est variable comme illustré sur la figure (IV.4).

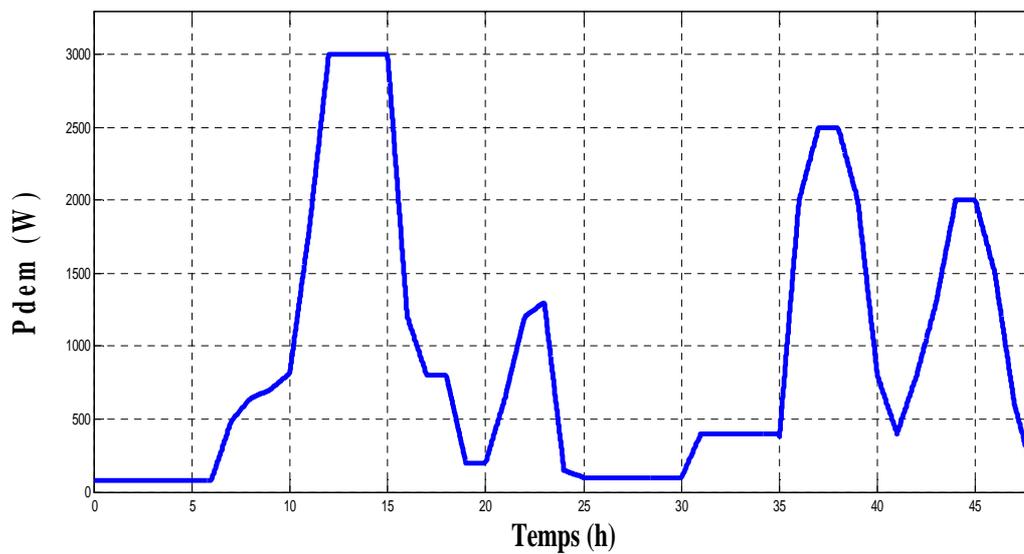


Figure IV.4 : Profil de charge variable.

### IV.3.3. Profile du vent et de l'ensoleillement

Les figures (IV.5) et (IV.6) représente le profil du vent et de l'ensoleillement appliqué dans notre étude.

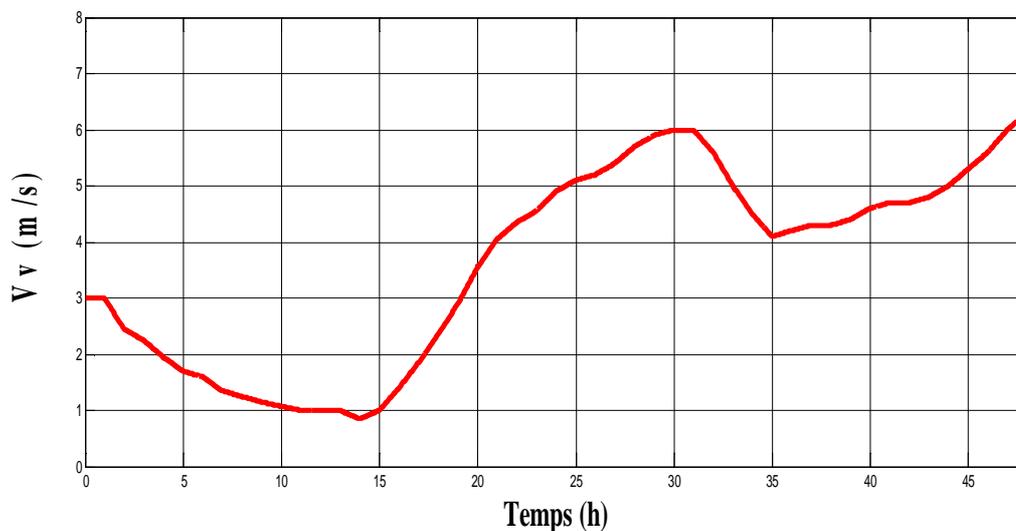


Figure IV.5 : Profil de la vitesse du vent.

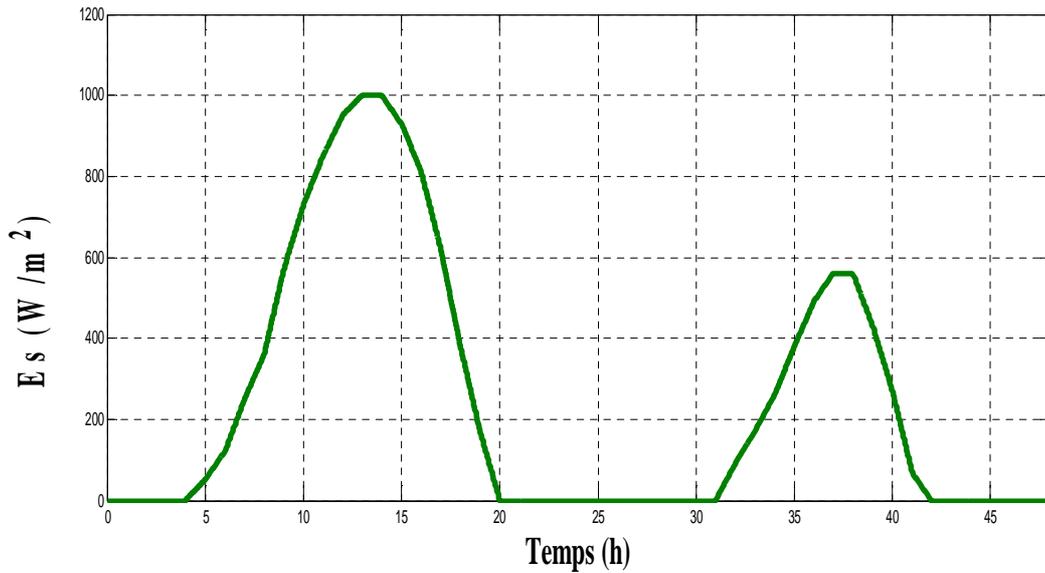


Figure IV.6 : Profil de l'ensoleillement.

#### IV.3.4. Puissances générées par les deux générateurs (photovoltaïque-éolien)

Après simulation nous avons obtenu un profil de puissance généré en été et en hiver par les deux sources (photovoltaïque et éolien). Un maximum de puissance photovoltaïque de 4400 W a été enregistré à un instant donné durant une journée d'été, et de 4500 W pour une journée d'hiver par le générateur éolien. Cette puissance obtenue est illustrée dans la figure (IV.7).

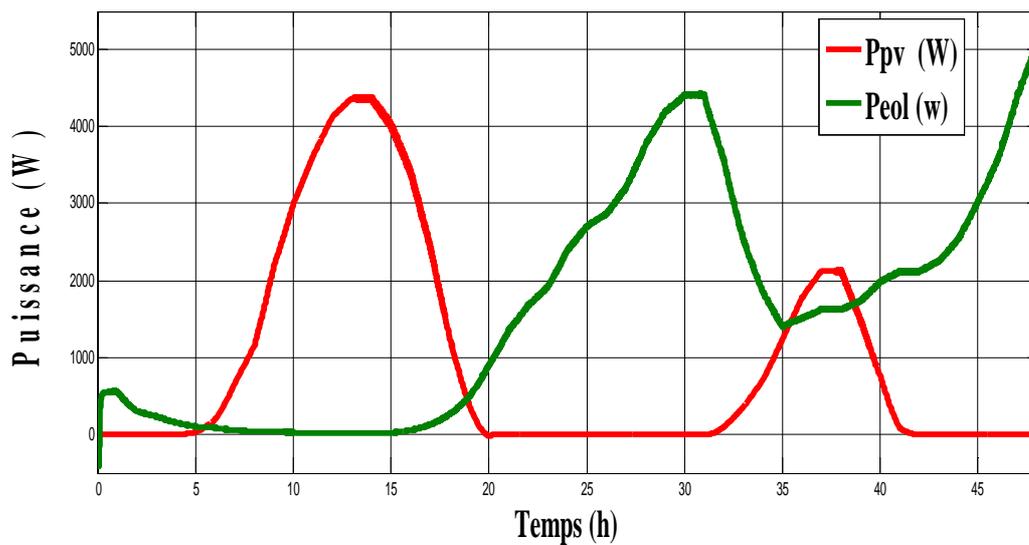


Figure IV.7 : Allure de la puissance hybride générée.

IV.4. Schéma bloc de simulation global

Le système PV/Eolien est composé de 40 panneaux PV de 110W et d'une éolienne de 5kW et d'un profil de charge (un profil constant et un autre profil variable). Deux simulations sont effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (panneau photovoltaïque, éolienne, bus continue, convertisseurs et la charge) sont modélisées par des blocs séparés puis reliées entre eux d'une manière cohérente.

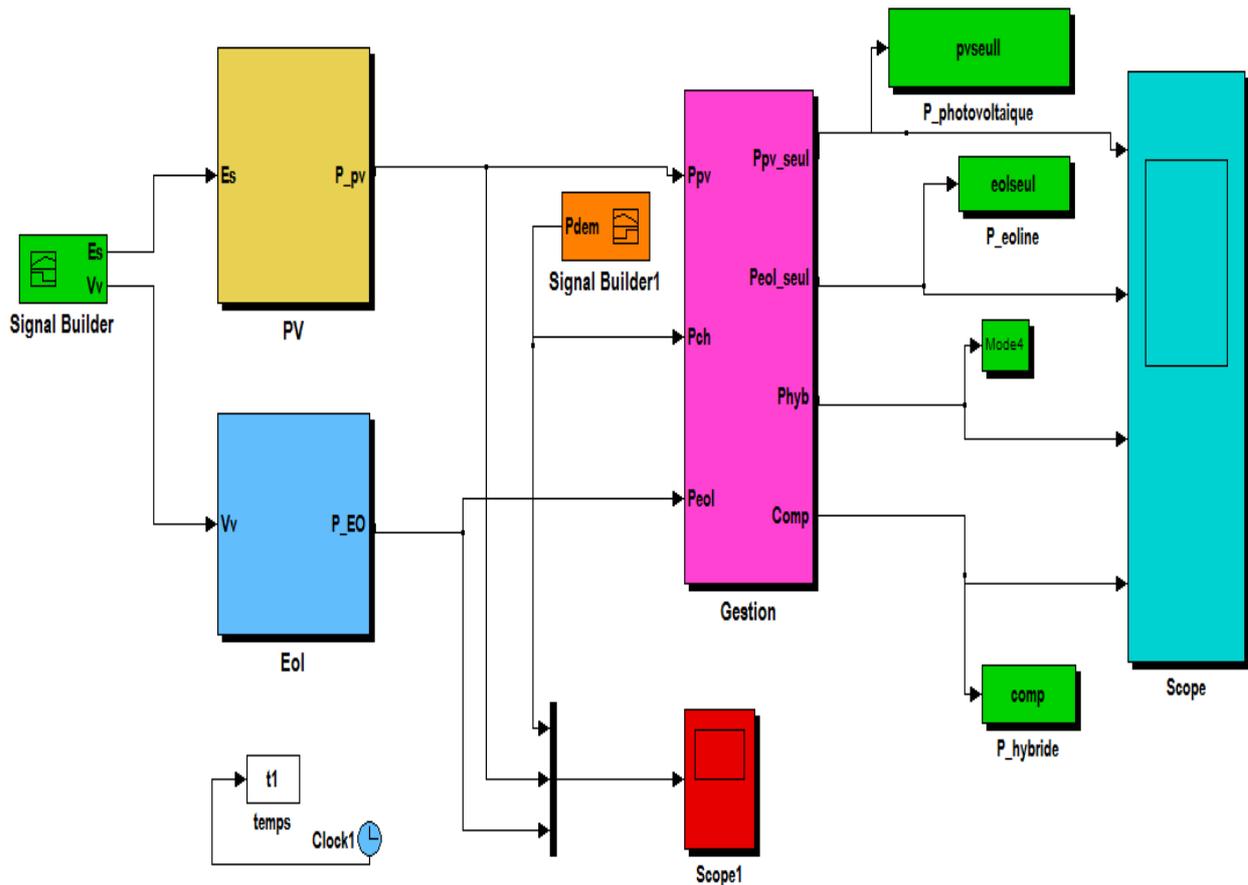


Figure IV.8 : Schéma bloc du système hybride avec bloc de gestion.

### IV.5. Simulation et interprétation des résultats

Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents cas possible pour les deux jours d'hiver et d'été, on présente les résultats de simulation obtenu pour les deux cas étudiés.

#### IV.5.1. Charge constante

La figure illustrée ci-dessous (IV.9) représente les deux puissances générées par le générateur éolien et photovoltaïque ainsi que le profil de charge demandé.

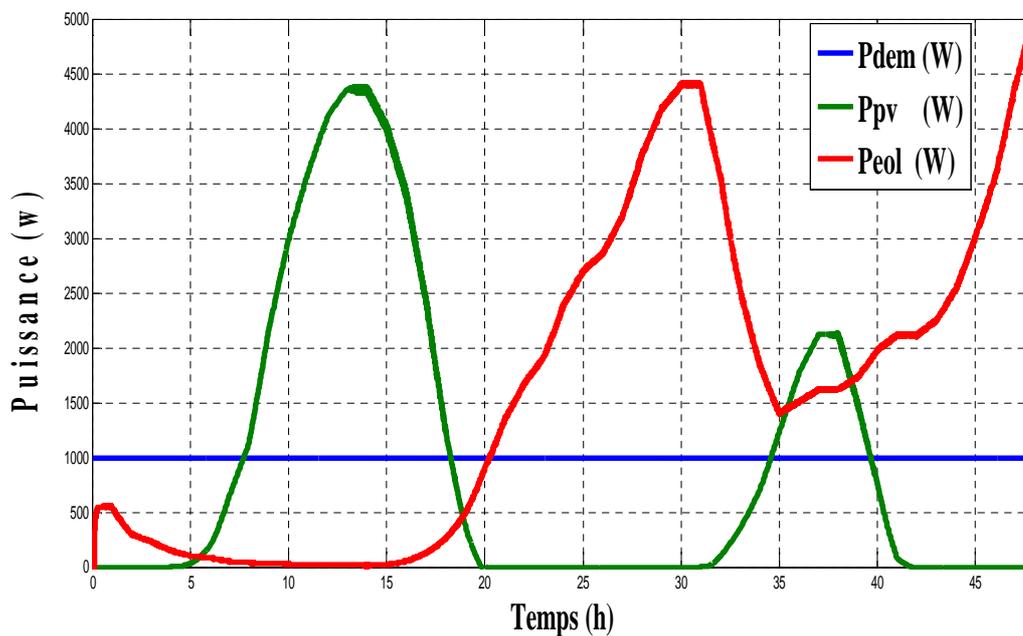


Figure IV.9 : Profil de  $P_{dem}$ ,  $P_{pv}$ ,  $P_{eol}$ .

D'après la figure (IV.9), on remarque qu'en été notre charge est alimentée en grande majorité par le générateur PV cela reflète donc l'ensoleillement assez élevé en été. Par contre en hiver notre charge est principalement alimentée par le générateur éolien qui correspond au vent élevé d'hiver.

## ❖ Figures de différents modes

Dans ce qui suit, nous allons montrer avec précision l'intervalle de temps des puissances qu'alimente notre charge ce qui reflète notre gestion appliquée au système.

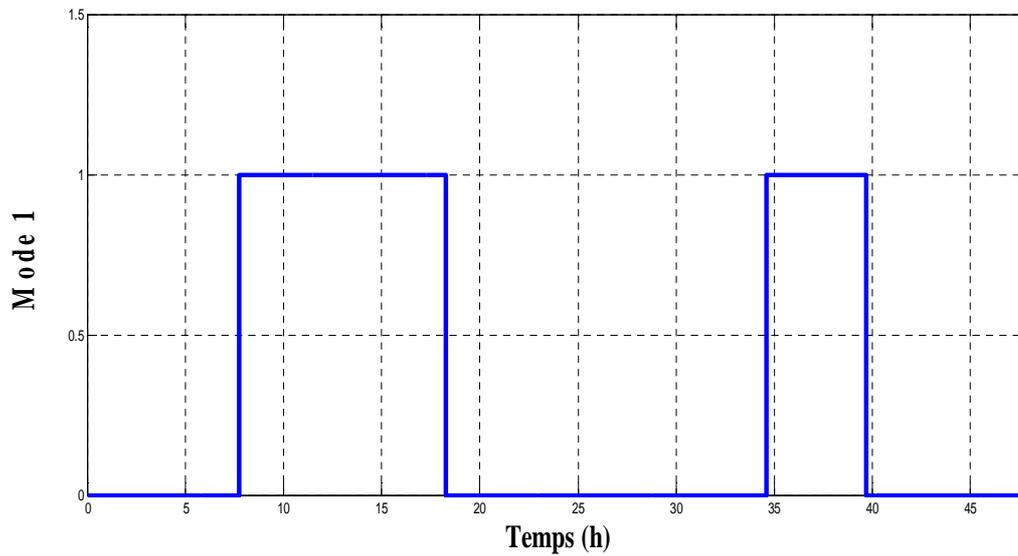


Figure IV.10 : Puissance photovoltaïque.

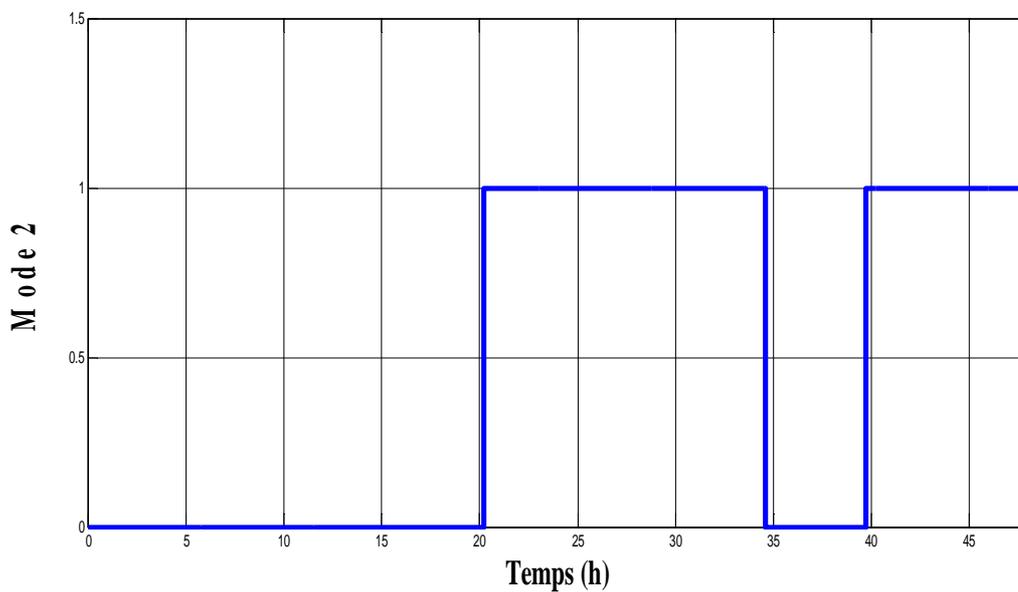


Figure IV.11 : Puissance éolienne.

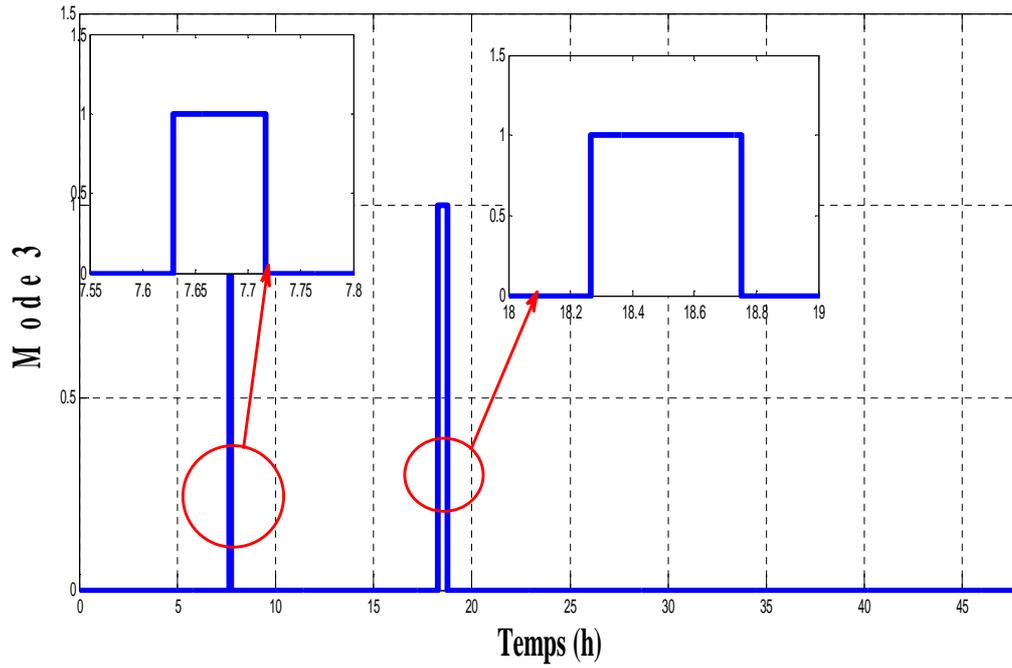


Figure IV.12 : Puissance hybride ( $P_{pv}$ ,  $P_{eol}$ ).

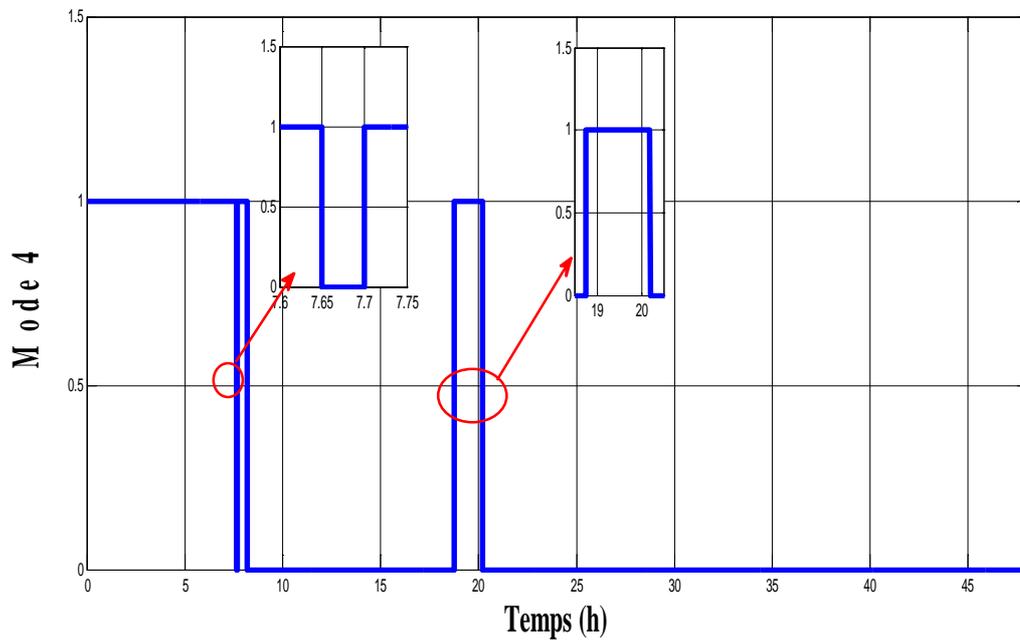


Figure IV.13 : Déconnexion de la charge.

Nous récapitulons les intervalles temporels de chaque puissance qui alimente notre charge dans le tableau (IV.2) suivant :

Puissance [W]	Intervalle d'alimentation [h]
$P_{pv}$	[08h20 - 18h15] et [33h50 - 39h50].
$P_{eol}$	[20h20 - 35h50] et [39h50 - 48h00].
$P_{hyb}$	[07h65 - 07h72] et [18h15 - 18h75].

Tableau IV.2 : Intervalle temporel des puissances alimentant la charge constante.

On constate que notre charge sera déconnecter pour faute d'approvisionnement dans les intervalles temporelles suivant : [0h - 07h65], [07h72 - 08h20] et [18h75 - 20h20], ce qui reflète réellement le mode 4.

#### IV.5.2. Charge variable

La figure illustrée ci-dessous représente les deux puissances générées par le générateur éolien et photovoltaïque ainsi que le profil de charge demandé.

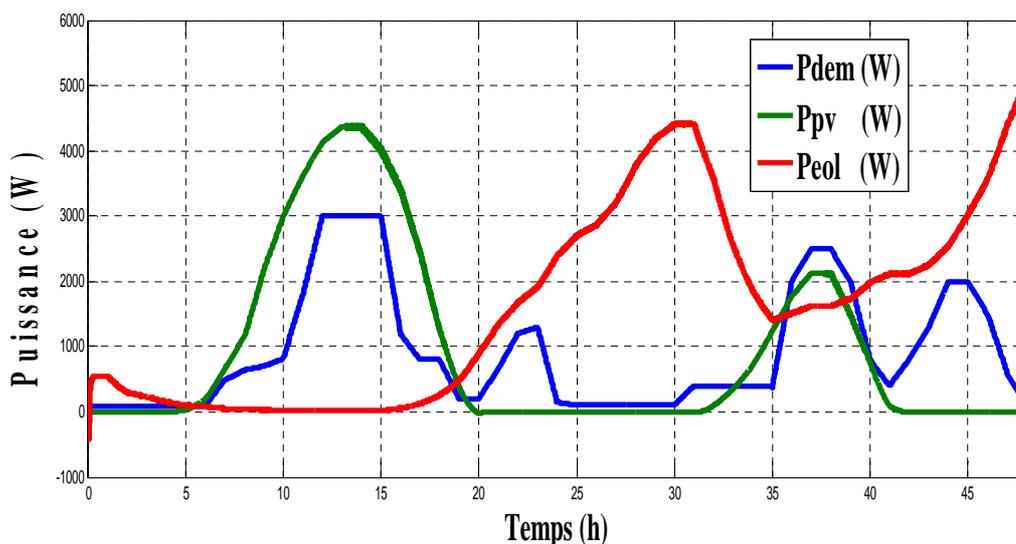


Figure IV.14 : Profile de  $P_{pv}$ ,  $P_{eol}$  et  $P_{dem}$ .

D'après la figure (IV.14) on voit que la puissance générée par les deux générateurs (photovoltaïque et éolien) subvient largement aux besoins énergétique demandés par la charge dans l'intervalle de temps qu'on lui a inséré.

❖ Figure des différents modes

Dans ce qui suit, nous allons montrer avec précision l'intervalle de temps des puissances qu'alimente notre charge ce qui reflète notre gestion appliqué au système.

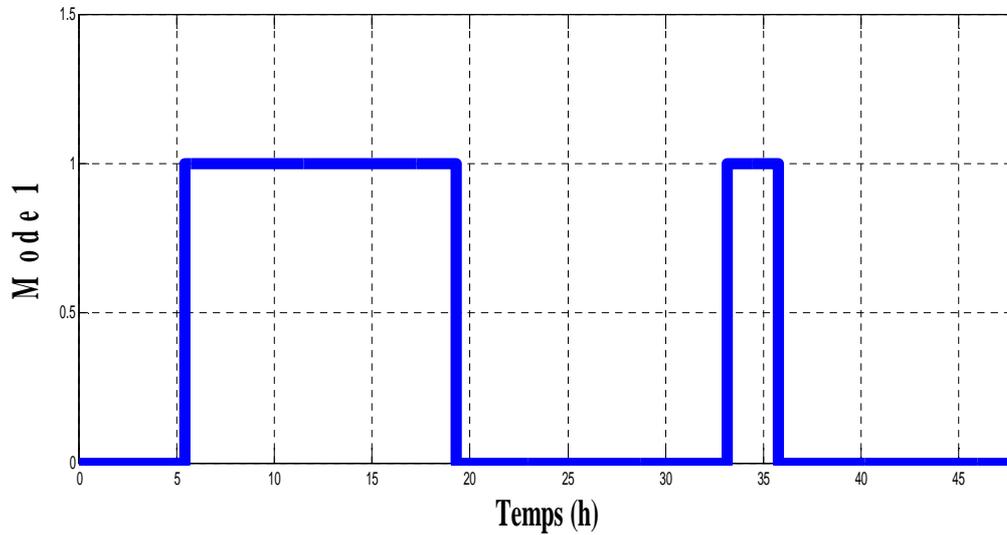


Figure IV.15 : Puissance photovoltaïque.

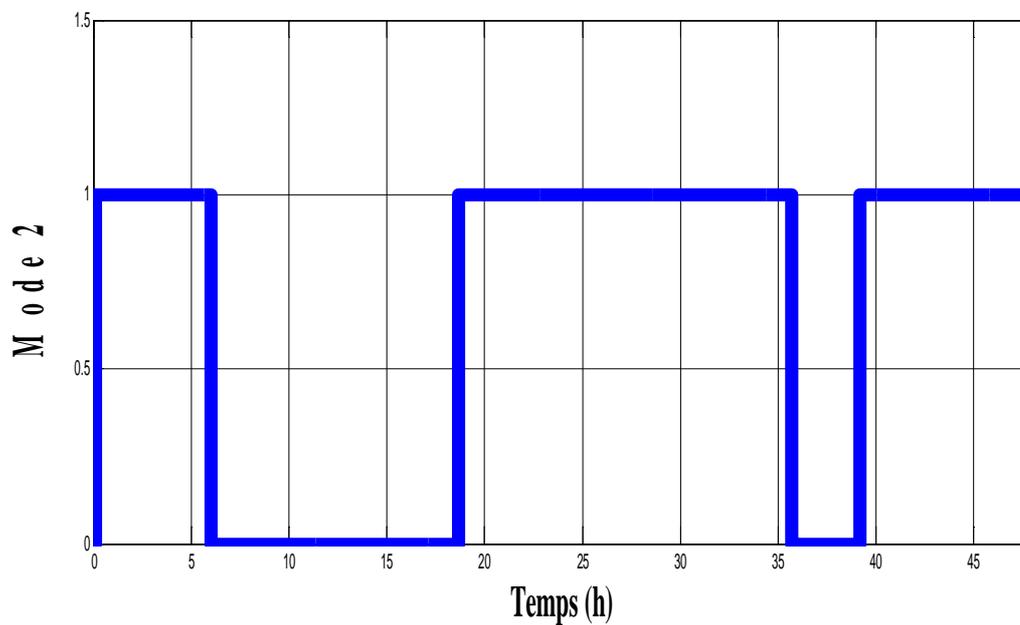


Figure IV.16 : Puissance éolienne.

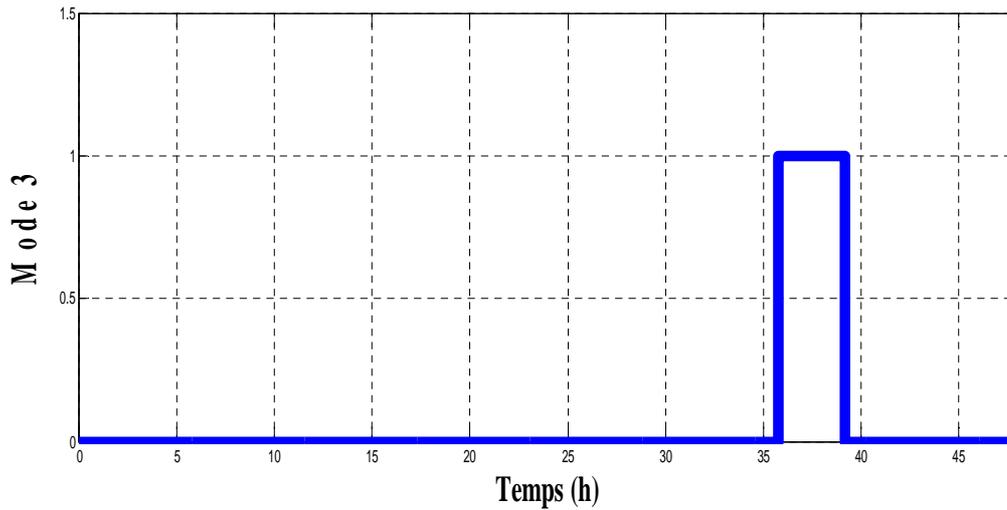


Figure IV.17 : Puissance hybride ( $P_{pv}$  et  $P_{eol}$ ).

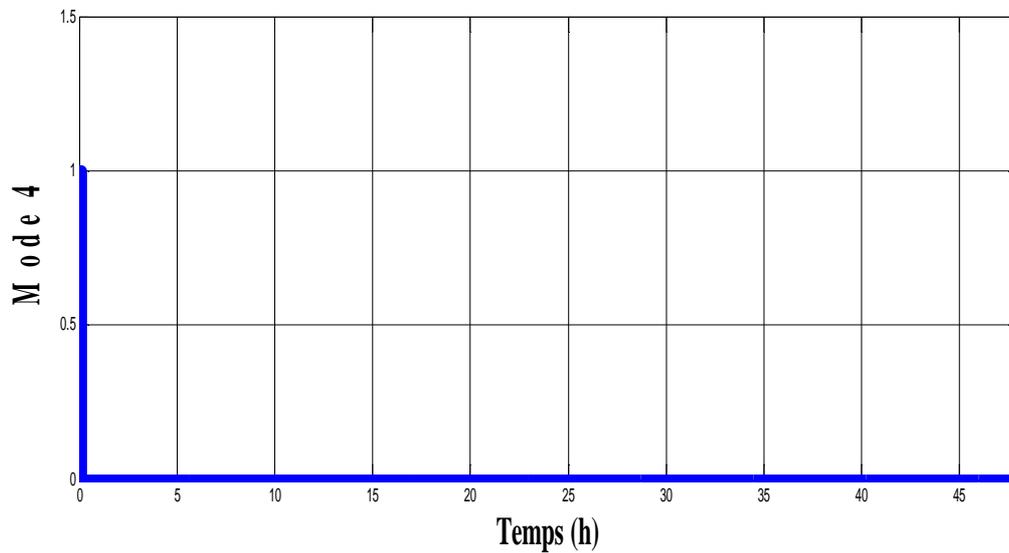


Figure IV.18 : Déconnexion de la charge.

Nous récapitulons les intervalles temporels de chaque puissance alimentant notre charge dans le tableau (IV.3) suivant :

Puissance [W]	Intervalle d'alimentation [h]
$P_{pv}$	[05h00 – 19h30] et [33h20 – 35h70].
$P_{eol}$	[0h – 05h00], [19h30 – 33h20] et [39h20 – 48h].
$P_{hyb}$	[35h80 – 39h20].

Tableau IV.3 : Intervalle temporel des puissances alimentant la charge variable.

On constate que notre charge est alimentée constamment, par conséquent le mode 4 n'intervient pas.

#### **IV.6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons conçu un algorithme de gestion sous MATLAB- Simulink destiné à la gestion de puissance dans le système hybride étudié. Cet algorithme traite les différents cas où nous sommes appelés à être confronté, ce qui fait que cette gestion soit primordiale.

Après simulation du système global, les résultats obtenus sont présentés et commentés, ces derniers ont montré le bon fonctionnement du système étudié.

Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétiques dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser dans un contexte isolé.

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude de la problématique de la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides. Le système hybride étudié est constitué d'une éolienne et d'un générateur photovoltaïque.

Le problème de gestion de l'énergie dans les systèmes hybride est crucial. Cependant, il faut qu'à chaque instant qu'on connaisse les puissances fournies par nos deux sources (photovoltaïque et éolienne), et celle qui est demandée par la charge. Ensuite il faut que l'algorithme de gestion prenne une décision adéquate pour le bon fonctionnement du système.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté d'une part quelque généralité sur l'hybridation. Et d'une autre part les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies photovoltaïque et éolienne. De plus nous avons évoqué tous les éléments constitutifs des deux systèmes, ainsi que leurs principes de fonctionnements.

Dans le second chapitre nous avons présenté la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice asynchrone.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque, qui est composée des modules photovoltaïques et d'un hacheur survolteur. Les caractéristiques (V-I) et (V-P) sont obtenus en prenant en compte les variations de la température ainsi que l'ensoleillement. Et pour extraire le maximum de puissance malgré le changement météorologique on a fait appel à une méthode MPPT de type (P&O) qui s'est avérée simple fiable et efficace.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté et simulé un algorithme de gestion de l'énergie du système hybride, et nous avons montré le bon déroulement de cette algorithme en expliquant tous les cas au quel nous serons éventuellement confrontés.

Ce travail nous a permis de constater à quel point la gestion de l'énergie est importante et indispensable pour le bon fonctionnement du système.

### Perspectives

En perspective de ce travail, il serait intéressant d'entrevoir :

- Utiliser l'énergie dissipée pour produire de l'hydrogène qui permettra d'alimenter une pile à combustible qu'on pourra ajouter au système de production.
- Améliorer le système global en utilisant le système de stockage comme les batteries, voir même un système de stockage hybride (batteries/ super-condensateur), pour faire absorber les dynamiques rapides des variations d'énergies par les super-condensateurs (l'absorption des pics de puissance) et laisser que les lentes aux batteries.
- Tester d'autres méthodes de maximisation de puissances (MPPT). Et introduire les techniques de commande intelligentes dans la gestion de puissance (logique floue, mode glissant...).
- Réaliser un banc d'essai à partir des résultats de simulation pour valider le travail et pourquoi pas le concrétiser.

- [1] S. Bensmail, « Optimisation et gestion d'un système hybride à énergies renouvelable ». Mémoire de doctorat de l'université de Bejaia, Algérie, 2017.
- [2] I.Hacini, « Etude et gestion d'un système d'énergie hybride ». Mémoire de doctorat de l'université de Bejaia, Algérie, 2015.
- [3] K. Tadjine et S.Mezzai, « Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) ». Mémoire de master de l'université de Bejaia, Algérie 2015.
- [4] F. Baghdadi, « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables ». Mémoire Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie 2011.
- [5] L. Zarour, « Etude technique d'un système d'énergie hybride (photovoltaïque-éolien) hors réseau ». Thèse de doctorat Université Mentouri de Constantine, Algérie 2010.
- [6] Chikh-Bled, « Etude du rendement de stockage d'un système photovoltaïque appliqué au pompage hydraulique ». Thèse de Magister Université de Tlemcen, Algérie 2001.
- [7] S. Delalay, « Étude systémique pour l'alimentation hybride - application aux systèmes intermittents ». Thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2013.
- [8] S. Saim et Y. Chalane, « Etude et calcul d'une génératrice asynchrone pour un système éolien autonome ». Mémoire Ingénieur. Université de Bejaia, Algérie 2004.
- [9] K. Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes ». Thèse de doctorat en cotutelle entre l'université A. Mira de Bejaia, Algérie, et l'université de Lille1, France, 2010.
- [10] S. Lalouni, « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride » de l'Université de Bejaia, Algérie, 2009.
- [11] H. Khamtache et L.MOALI, « Gestion de puissance d'un Système Hybride ». Mémoire de master l'université de Bejaia, Algérie 2017.
- [12] C. Serir, « commande d'un système multi-sources photovoltaïque-éolien associée à un système de stockage ». Mémoire de doctorat, université de Bejaia, Algérie 2017.

- [13] H. Kernif et A. Mebarki, « Contribution à l'amélioration des performances d'un système d'énergie hybride (PV/EOL) ». Mémoire de master de l'université de Bejaia, Algérie 2017.
- [14] A. Miricki, « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.
- [15] O. Feddaoui, « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération-Application aux Energies Renouvelables ». Thèse de Magister Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, Algérie, 2014.
- [16] K. Ferkous, « etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ». Mémoire de Magistère de l'université de Constantine, Algérie 2009.
- [17] J.L. Rodriguez, « analyse dynamique des systèmes de contrôle des Aéroturbines de vitesse variable entraînées par MADA ». Thèse doctorale à l'université Carlos III, Madrid, Espagne 2000.
- [18] A. Boyette, « contrôle/commande d'une génératrice asynchrone double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse de doctorat de l'université Henri Ponicaré, Nancy, France 2006.
- [19] L. Miguel, « Contribution à L'optimisation d'un system de conversion éolienne pour une unité de production isolée ». Thèse de Doctorat, Université de Paris, France, 2012.
- [20] L. Aloui, « Etude par simulation d'une éolienne basée sur une machine Asynchrone à double alimentation alimentée par convertisseur matriciel ». Mémoire de Magister en électrotechnique à l'Université de Bejaia, Algérie 2006.
- [21] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France 2007.
- [22] A. Labouret, P.cumunel et J-P.Braun, « Cellules Solaires Les Bases de L'énergie Photovoltaïque ». Dunod, Paris, France 2001.
- [23] [http://www.ciele.org/filieres/solaire\\_photovoltaïque.htm](http://www.ciele.org/filieres/solaire_photovoltaïque.htm).
- [24] S. Vighetti, « Systèmes photovoltaïques raccordes au réseau: choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse Docteur de l'Université de Grenoble, France 2008.

- [25] H. Hassini, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien photovoltaïque ». Mémoire Magister Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, Algérie 2010.
- [26] B. Othmane et D. Fathi, « L'étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ». Mémoire de Master Université KASDI MERBAH-Ouargla, Algérie 2006.
- [27] R. Maouadj, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de Magister en Electrotechnique Université de Tlemcen, Algérie 2005.
- [28] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative ». Mémoire de magister en électrotechnique Université de Tizi-Ouzou, Algérie 2012.
- [29] Comprendre l'énergie photovoltaïque, « Avantages et inconvénients du PV ». [www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com](http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com).2018.
- [30] Brice Belten, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrice asynchrone double alimentation : en mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur ». Thèse de doctorat Université de Brigande accidentelle, 2010.
- [31] M. Adjoudji, M. Abid, A. Aissaoui, Y. Ramdani et Houria Bounaua, « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation monté dans une éolienne ». Université Djilali liabes BP89, Sidi bel Abbes, Algérie 2011.
- [32] K. Idjdarene, « Analyse et control d'une chaine de conversion électrique par énergie éolienne ». Mémoire Magister en Electrotechnique Université de Bejaia, Algérie 2005.
- [33] M. Bouaraki, « Etude d'un entrainement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF ». Mémoire de Magister Université de Boumerdesse, Algérie 2011.
- [34] 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.
- [35] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA». Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

- [36] D. Rekioua, O. Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques ». Conférence sur les énergies renouvelables, l'université de Bejaia, Algérie 2007.
- [37] Observatoire des énergies Renouvelables « Energie renouvelables bilan et perspectives ». Douzième inventaire. Edition 2013.
- [38] V. Salas, E. Olias, A. Barrado et A. Lazaro, « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic system ». Solar Energy Materials & Solar Cells n°90, pp. 1555–1578, 2006.
- [39] S. Lalouni, D. Rekioua, T. Rekioua et E. Matagne « Fuzzy logic control of stand-alone Photovoltaic system with battery storage ». Journal of Power Source, vol. 193, N°: 2, pp : 899–907, 2009.
- [40] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen et S. Moussa, « Optimisation d'un système Hybride (Eolien – Photovoltaïque) totalement autonome « », Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N.3, pp. 199-209, 2006.
- [41] M. Boudehouche et M. Ouennoughi, « gestion d'un système photovoltaïque avec stockage ». Mémoire de master de l'université de Béjaia, Algérie 2016.
- [42] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque ». Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie 2005.
- [43] B. Fellah, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité ». Application aux Sites de Tlemcen et de Bouzareah, Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen 2012.

### Paramètres d'un panneau photovoltaïque SIEMENS de 110W<sub>c</sub>

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau $P_m$	110 W
Puissance nominale $P_n$	110 W
Courant au point de puissance max $I_m$	3.15 A
Tension au point de puissance max $V_m$	35 V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	3.45A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	43.5V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{cc}(\alpha_{cc})$	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{oc}(\beta_{oc})$	-152 mV/°C

### Paramètres de la turbine

- ❖ La puissance nominale :  $P_t = 5$  kW.
- ❖ Rayon :  $R_t = 3.24$  [m].
- ❖ La vitesse nominale :  $\Omega_t = 215$  tr/min.
- ❖ La vitesse moyenne de vent :  $V_V = 7$  m/s.
- ❖ Le gain de multiplicateur :  $G = 3.53$ .

### Paramètres de la machine asynchrone

Les paramètres électriques :

- ❖ Rotor de type de cage d'écureuil.
- ❖ 4 paires de pôles.
- ❖ 230/400 - 23.8/13.7 - 5.5 kW - 50 Hz - 690 tr/min.
- ❖  $R_s = 1.07131 \Omega$ .
- ❖  $R_r = 1.29511 \Omega$ .
- ❖  $L_s = 0.1137$  H.
- ❖  $L_r = 0.1096$  H.
- ❖  $M = 0.10474$  H.

Les paramètres mécaniques :

- ❖  $J = 0.230$  kg. m<sup>2</sup>.
- ❖  $F = 0.0025$  N. m/rad. s<sup>-1</sup>.

### Valeur de la capacité du bus continu

- ❖  $C = 600$  µf.

### Redresseur

- ❖ Amplitude de la porteuse:  $V_P = 300$  V.
- ❖ Fréquence de la porteuse  $f_p = 2000$  Hz.

