

République Algérienne Populaire et Démocratique

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira de Bejaia



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire De Fin De Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Option: Energie renouvelable et Automatismes Industriels

Thème

Commande et optimisation d'un système de pompage hybride (photovoltaïque-éolien)

Présenté par :

M^{lle} BENBELAID Nabila

M^{lle} MAIZIA Razkia

Encadré par :

M^{me} R. ABDELLI



Année Universitaire 2015-2016

REMERCIEMENT

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

Nous exprimons nos vifs remerciements en particulier à nos promotrices Mme R.Abdelli qui a accepté de nous encadrer et pour leurs orientations et soutiens.

Nous remercions profondément Mme Ch.Serir pour son aide, ces conseils et pour le temps qu'elle nous a consacré.

En tiens à remercier tous les enseignants du département électrotechnique, qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre cursus, ainsi les membres de jury, qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.

Nous remercions aussi tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail aux personnes auxquelles je dois tout après Allah, mes très chères parents, ils ont sacrifiés tout pour nous, juste pour nous voir réussir, qu'Allah vous bénisse, vous apporte de santé et vous gardes pour nous.

A ma très chère grand-mère, mes oncles et mes tantes.

A mes très chers frères

A mes chères cousins et cousines

A toute la famille BENBELAID et KARA

A tout mes amies

A mon binôme, MAIZIA Razkia ainsi que toute sa famille.

A tous mes camarades et amis(es) de la promo d'électrotechnique 2016

Et à tous ceux que je connais.

Nabila

DEDICACE

Je dédie ce travail aux personnes auxquelles je dois tout après Allah, mes très chères parents, ils ont sacrifiés tout pour nous, juste pour nous voir réussir, qu'Allah vous bénisse, vous apporte de santé et vous gardes pour nous.

A mes très chère grand-parentes, mes très chères sœurs

Et frères

Et mes neveux et ma nièce

(Amine, Daoud, Adem, Asma, Oumar)

A mes oncles et mes tantes. A mes chères cousins et cousines

A toute la famille MAIZIA et IBALAI DEN

A tout mes amies

A mon binôme, BENBELAID NABILA ainsi que toute sa famille.

A tous mes camarades et amis(es) de la promo d'électrotechnique 2016

Et à tous ceux que je connais

Razkia

Listes des figures

N°	Désignation	Page
Chapitre I		
1	Système de pompage hybride (éolien photovoltaïque)	3
2	Principe de la conversion photovoltaïque	4
3	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	5
4	Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque	5
5	Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques	6
6	Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques	6
7	Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques	6
8	Différentes zones de la caractéristique I (V), T = 25 °C	7
9	Constitution d'une centrale éolienne	9
10	Constitution de la nacelle	10
11	Eolienne à axe vertical	12
12	Eolienne à axe horizontal	12
13	Pompe centrifuge	14
14	Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge	15
15	Pompe volumétrique	15
16	Caractéristiques d'une pompe volumétrique	16
17	Moteur à courant continu	16
18	Moteur synchrone	18
19	Moteur asynchrone	19
Chapitre II		
20	Schéma simplifié du système de pompage hybride	21
21	Schéma simplifié du système photovoltaïque	22
22	Courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour divers ensoleillements à T=25°C	24
23	Courbes $I_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour divers ensoleillements à T=25°C	25
24	Courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour diverses températures à G=1000W/m ²	26
25	Courbes $I_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour diverses températures à G=1000W/m ²	26
26	Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)	27
27	Circuit de l'onduleur relié à la machine	28
28	Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil	30
29	Modèle de Park de moteur asynchrone.	32

30	Phénomène d'autoamorçage	35
31	Structure de la chaine de conversion éolienne	40
32	Modèle simplifié de la partie mécanique	41
33	Filtre capacitif	44
Chapitre III		
34	Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT	46
35	Organigramme de l'algorithme P&O	48
36	Variation de T_c en fonction de temps.	49
37	Caractéristiques ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) dans les conditions STC convention.	49
38	Puissance en fonction de temps	50
39	Courant I_{pv} en fonction de temps	50
40	Tension V_{pv} en fonction de temps.	50
41	Variation de E_s en fonction de temps.	51
42	Puissance P_{pv} en fonction de temps.	51
43	Courant I_{pv} en fonction de temps.	51
44	Tension V_{pv} en fonction de temps.	52
45	Schéma global de système de conversion d'énergie éolienne.	52
46	Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.	55
47	Schéma bloc sous MATLAB/simulink de la turbine éolienne.	55
48	Vitesse du vent en fonction de temps.	56
49	Allure de la vitesse de vent en fonction de temps.	56
50	Coefficient de puissance C_p optimisé fonction de temps.	56
51	Vitesse spécifique optimale en fonction de temps.	57
52	Puissance de la turbine en fonction de temps.	57
Chapitre IV		
53	Le schéma de générateur photovoltaïque proposé	64
54	Schéma global de système de pompage hybride.	65
55	Variation de l'ensoleillement.	66
56	Variation de la vitesse de vent.	66
57	Allure de la puissance hybride.	67
58	Tension de bus continu V_{dc} .	67
59	Allure de débit en fonction de temps.	67
60	Allure de flux en fonction de temps.	68

Liste des figures

61	Allure de couple en fonction de temps.	68
62	Allure de vitesse en fonction de temps.	68
63	Allure des I_{sd} et I_{sq} en fonction de temps.	69
64	Allure des courants statorique.	69
65	Zoom sur les courants statoriques de la MAS.	69

Liste des symboles

I_{pv}	Courant photovoltaïque (A).
V_p	Tension photovoltaïque (V).
I_d	Courant de la diode (A).
$R_{s,h}$	Résistance shunt (Ω).
R_{sc}	Résistance série est due aux pertes joule (Ω).
R_{pv}	la résistance à la sortie du panneau (Ω).
R_{opt}	Impédance optimale de charge (Ω).
I_{mpp}	Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (A).
V_{mpp}	Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale (V).
P_{mpp}	Puissance maximale du panneau(W).
I_{cc}, I_{sc}	Courant en court-circuit.(A).
V_{co}	Tension en circuit ouvert.(V).
V_{cc}	Tension en circuit ouvert(V).
T_c	Représentent la température dans les conditions quelconques ($^{\circ}C$)
α_{sc}	Coefficient d'incrémentatation du courant I_{cc} .
β_{cc}	Coefficient d'incrémentatation de la tension V_{co} .
G	Représentent le niveau d'insolation (W/m^2).
V_{nouv}	Nouvelles valeurs de la tension photovoltaïque après correction (V) .
I_{nouv}	Nouvelles valeurs du courant photovoltaïque après la correction (A).
I_s	Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation (A).
I_l	Courant de l'inductance de lissage (A).
L	l'inductance de lissage du courant (H).
V_s	la tension aux bornes de la résistance R_s (V).
α	Rapport cyclique.
S_i	l'état de l'interrupteur du convertisseur statique.
I_{DC}	Courant de l'onduleur(A).
I_{ch}	Courant de la charge (A).
$V_{sabc}; V_{rabc}$	Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique(V).
$I_{sabc}; I_{rabc}$	Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique (A).
$\phi_{sabc}; \phi_{rabc}$	Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique.
R_s, R_r	Respectivement les matrices de résistances statorique et rotorique (Ω).
L_s, L_r	Inductance de fuite statorique et rotorique (H).

M	Inductance mutuelle(H).
M_s	Les inductances mutuelles entre phases statorique(H).
M_r	Les inductances mutuelles entre les phases rotorique(H).
[P]⁻¹	Matrice de Park inverse.
C_{em}	Couple électromagnétique (N.m). .
ω_c	Pulsation des signaux statorique.
L_m	Inductance magnétisante statique.
φ_m	Flux magnétisant.
P_{éol}	La puissance éolienne (W).
C_T	Couple de la turbine (N.m).
ρ	Densité volumique de l'air.
R	Longueur d'une pale.
V_v	Vitesse du vent (m/s).
λ	Vitesse spécifique.
J	l'inertie totale du système ramonée sur l'arbre de la génératrice.
C_{eol}	Le couple éolien (N.m).
C_T	Le couple de la turbine (N.m).
C_f	Le couple résistant du aux frottements.
C_p	Coefficient de puissance.
C_{mec}	Le couple mécanique.
f	Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.
I_{red}	Courant de redresseur (A).
I_{ond}	Courant de l'onduleur (A).
V_{DC}	La tension du bus continu (V).
I_c	Courant dans le condensateur (A).
C	Capacité de filtrage du bus continu.
H_g	Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation(m)
Q	Le débit de la pompe (m ³ /s).
C_r	Couple résistant de la pompe (N.m).
K_r	Un coefficient de proportionnalité[(Nm/rad. s ⁻¹) ²].
Ω	Vitesse de moteur asynchrone (rad/s).
P_n	Puissance nominale du moteur asynchrone(w).
C_{em-réf}	Couple électromagnétique de référence.

h	La hauteur manométrique (m).
C_{reser}	Capacité du réservoir d'eau (m ³).
P_{ele}	Puissance électrique du moteur (W).
P_{hyd}	Puissance hydraulique (W).
E_L	Energie électrique journalière demandée heures/jour par la charge (KWh/j).
P_g	la puissance fournie par le générateur photovoltaïque (W).
Ω_n	Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).
N_p	Le nombre de panneaux.
P_m	Puissance maximale délivrée par le générateur(W).
P_v	La puissance de panneaux (W).
E_c	Energie électrique journalière demandée par la charge (kWh/j)
τ_p	la durée de pompage.
η_m	Rendement du moteur.
P_{mec}	Puissance mécanique requise par la pompe(W).
η_{ond}	Rendement de l'onduleur.
V	Quantité d'eau requise (m ³).
Q_n	Débit nominal (m ³ /h).
η_p	Rendement de pompe.

Les Abréviations

HMT	La hauteur manométrique totale.
MPP	Point de puissance maximum.
MPPT	Maximum power point tracking.
MLI	Modulation de la longueur d'impulsion.
P&O	Perturbation et observation.
PV	Photovoltaïque.
GPV	Générateur photovoltaïque.
MAS	Moteur asynchrone.
GAS	Générateur asynchrone
DC	Courant continu.
AC	Courant alternatif.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur le système de pompage hybride	
I-1 Introduction.....	3
I-2 Description d'un système de pompage.....	3
I-3 L'énergie solaire	4
I-3-1 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	4
I-3-2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	4
I-3-3 Association des cellules photovoltaïques.....	5
I-3-3-1 Association en série	5
I-3-3-2 Association en parallèle.....	6
I-3-3-3 Association hybride (en série et en parallèle).....	6
I-3-4 Zones de fonctionnement du module solaire	7
I-3-5 Fonctionnement optimal du générateur	7
I-3-6 Avantages et inconvénients de la photovoltaïque.....	8
I-3-6-1 Avantages.....	8
I-3-6-2 Inconvénients.....	8
I-4 L'énergie éolienne	8
I-4-1 Constitution d'un aérogénérateur.....	9
I.4.2 Principe de fonctionnement d'un système éolien.....	11
I-4-3 Les différents types d'éolienne.....	11
I-4-3-1 Les éoliennes à axe vertical.....	11
I-4-3-2 Eolien à axe horizontal.....	12
I-4-4 les différents types de machines électrique utilisées.....	13
I-4-5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	13
I-4-5-1 Avantages	13
I-4-5-2 Inconvénients.....	13
I-5 Sous-système de pompage (Groupe motopompe).....	14
I-5-1 types de pompes utilisées.....	14
I-5-1-1 Les pompes centrifuges.....	14
I-5-1-2 Les pompes volumétriques.....	15
I-5-2 Types de moteurs utilisés.....	16
I-5-2-1 Moteur à courant continu.....	16
I-5-2-2 Moteur à courant alternatif.....	17

I-5-2-3 Moteur synchrone.....	18
I-5-2-4 Moteur asynchrone.....	19
I-6 Les système de conversion.....	19
I-6-1 Le convertisseur continu-continu.....	19
I-6-2 Le convertisseur continu- alternatif.....	18
I-7 Recherche du point de puissance maximale.....	19
I-8 Conclusion.....	20

Chapitre II : modélisation des éléments de système de pompage hybride

II-1 Introduction.....	21
II-2 Système de pompage hybride.....	21
II-3 Modélisation de la chaine photovoltaïque.....	22
II.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque.....	22
II-3-2 Caractéristique d'un module solaire (I-V), (P-V).....	24
II-3-2-1 Influence de l'ensoleillement.....	24
II-3-2-2 Influence de la température.....	25
II-4 Modélisation du convertisseur DC/DC (hacheur survolteur)	26
I.5 Modélisation du convertisseur DC-AC (Onduleur).....	28
II-6 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	29
II-6-1 Equations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	30
II-6-1-1 Equations des tensions et des flux.....	30
II-6-1-2 Modèle de Park de la Machine Asynchrone.....	32
II-6-1-3 Régime non saturé.....	33
II-6-1-4 Régime saturé.....	34
II-7 Modélisation de la turbine (éolienne).....	40
II-7-1 Modélisation de la vitesse du vent.....	41
II-7-2 La vitesse spécifique réduite.....	41
II-7-3 la puissance de l'éolienne.....	41
I-7-4 Le couple de la turbine.....	42
II-7-5. Modélisation du multiplicateur de vitesse.....	42
II-7-6 L'arbre de transmission.....	42
I-8 Modélisation du redresseur.....	43
II-9 Modélisation du bus continu.....	44
II-10 Modélisation de la pompe centrifuge.....	44
II.11 Conclusion.....	45

Chapitre III : optimisation de système de pompage

III-1 Introduction.....	46
III-2 Optimisation de système photovoltaïque.....	46
III-2-1 La commande de recherche du point de puissance maximale.....	46
III-2-1-1 Méthode de Perturbation et Observation (P&O).....	47
III-2-2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT.....	48
III-2-2-1 Variation de l'ensoleillement E_s et de la température T_c	49
III-3 Optimisation de l'éolienne.....	52
III-3-1 La commande de recherche du point de puissance maximale (maximum power point Tracking MPPT).....	53
III-3-1-1 MPPT avec asservissement de vitesse.....	53
III-3-1-2 MPPT sans asservissement.....	54
III-3-2 Simulation du fonctionnement de la turbine avec l'algorithme MPPT.....	55
III-4-Conclusion.....	57

Chapitre IV : contrôle vectoriel de système de pompage hybride

IV-1 Introduction.....	58
IV-2- Etapes de dimensionnement d'un système de pompage.....	58
IV-3- Application.....	62
IV-4- Commande vectorielle de moteur asynchrone.....	64
IV-5- Commande MLI.....	64
IV-6- Résultats de simulation.....	65
IV-7-Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	71

Introduction générale

Avec l'arrivée du nouveau millénaire, les débats sur l'avenir énergétique de la planète se sont intensifiés compte tenu des besoins sans cesse croissants dans le domaine et les conséquences que cela peut engendrer à moyen terme. En effet, l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques, laissent présager une augmentation considérable de la consommation en énergie. A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore [1].

Une première piste à cette crise annoncée étant la diminution de la consommation énergétique, c'est ainsi que sont apparus sur le marché, ces dernières années, des appareils de faible consommation (réfrigérateurs, laves linge, ampoules basse consommation, ...). En parallèle, il faut développer de nouvelles sources d'énergie propres et renouvelables. A ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables [1]. Dans notre travail, on s'intéresse à l'énergie provenant du soleil et du vent qui feront l'objet de ce mémoire.

Le rôle d'un système hybride (éolienne – photovoltaïque) avec stockage de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'adopter une puissance énergétique, mais de réaliser un 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 réanimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté [2].

Dans la recherche de solutions à la maîtrise de l'énergie applicable au pompage, il ne paraît intéressant de connaître les bénéfices d'une nouvelle technique de pompage basée sur la complémentarité de deux sources d'énergies renouvelables, à savoir l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres, dont le premier sera consacré à la présentation des généralités sur le système de pompage hybride.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de pompage. Nous allons commencer par la modélisation de la chaîne de conversion éolienne, composée d'une éolienne, un générateur asynchrone et d'un redresseur, par la suite la modélisation de la deuxième chaîne photovoltaïque qui est composée de plusieurs panneaux photovoltaïques et

d'un hacheur et enfin, la modélisation du groupe motopompe, composé d'un moteur asynchrone à cage et d'une pompe centrifuge.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation de quelques MPPT utilisées pour l'optimisation des systèmes de pompage (éolienne photovoltaïque) ensuite, un choix d'un MPPT sera fait afin de l'appliquer à notre système.

On finira par un dernier chapitre qui sera basé sur le dimensionnement du système global et la représentation des résultats de simulation du système étudié avec l'application de la commande au groupe motopompe.

I-1- Introduction

Le terme « Système d'énergie hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergies renouvelables comme l'éolienne et le photovoltaïque peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels [3].

Dans ce chapitre, on présentera des généralités sur le système de pompage et la chaîne de conversion éolienne et photovoltaïque ainsi que la description des différents éléments les constituant. On donnera par la suite un petit aperçu sur l'optimisation qui consiste à extraire le maximum de puissance dans notre système.

I-2- Description d'un système de pompage :

Le système qu'on va étudier est résumé dans la figure (I-1)

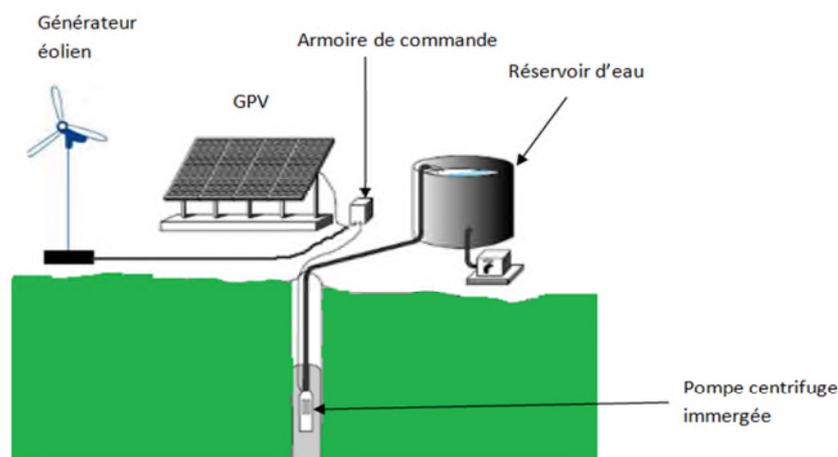


Figure (I-1) : système de pompage hybride (éolien-photovoltaïque)

Il est constitué principalement :

- D'un générateur photovoltaïque et un générateur éolien ;
- De trois convertisseurs statiques ; un hacheur, un redresseur et un onduleur ;
- D'un groupe motopompe qui comprend un moteur et une pompe ;
- D'un réservoir de stockage.

Les avantages de choix de système sont :

- Production 100%
- Par de souci d'environnement, n'émet pas des gaz à effet de serre

I-3- L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (1kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Parmi les procédés utilisés par l'énergie solaire, l'énergie solaire photovoltaïque qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

I-3-1 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée [5].

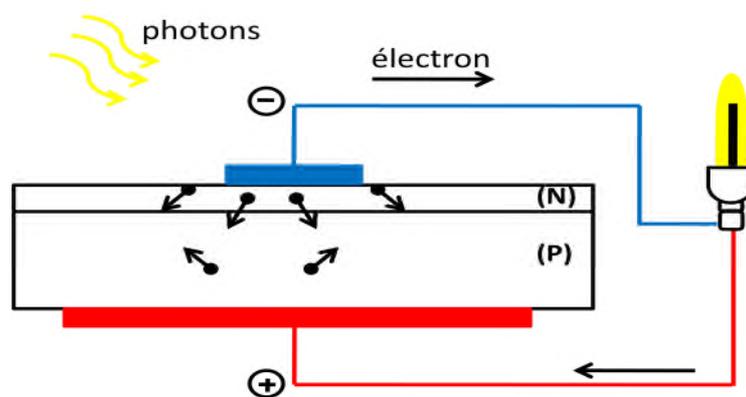


Figure (I-2) : Principe de la conversion photovoltaïque.

I-3-2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_s représente la

résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_{sh} représente le courant de fuite. Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN [6].

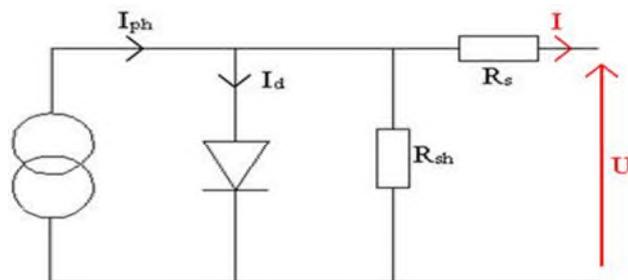


Figure (I-3) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les conditions normalisées du test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de 1000W/m^2 d'une température ambiante de 25°C et d'un spectre **AM de 1.5**. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées **STC** (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort [7].

La figure (I-4) présente la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque avec les points importants qui la caractérisent.

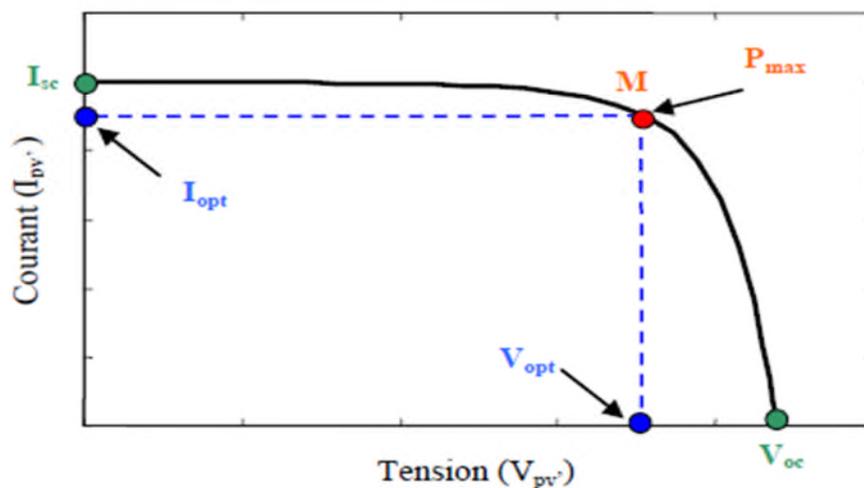


Figure (I-4) : Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque.

I-3-3 Association des cellules photovoltaïques

I-3-3-1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [8].

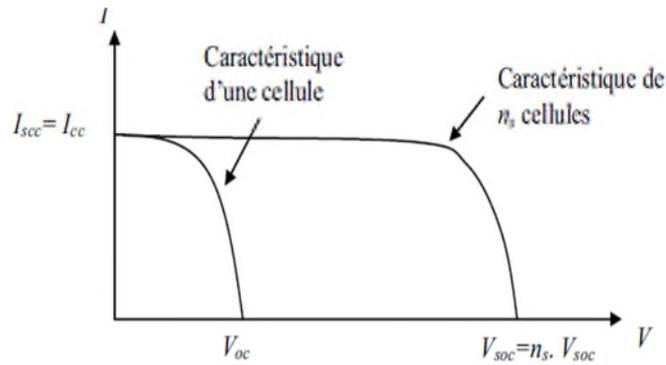


Figure (I-5) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.

I-3-3-2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [8].

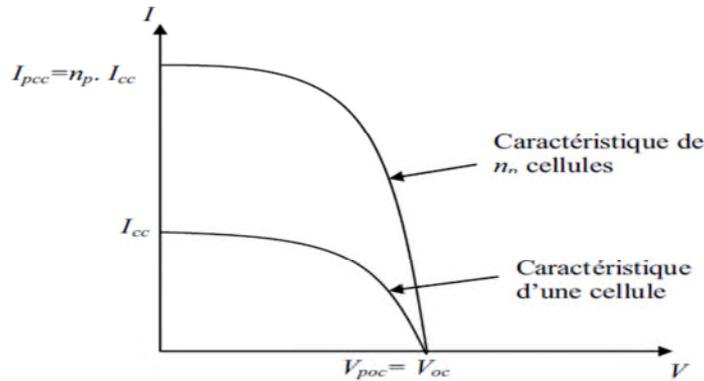


Figure (I-6) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques.

I-3-3-3 Association hybride (en série et en parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est -à-dire série-parallèle [8].

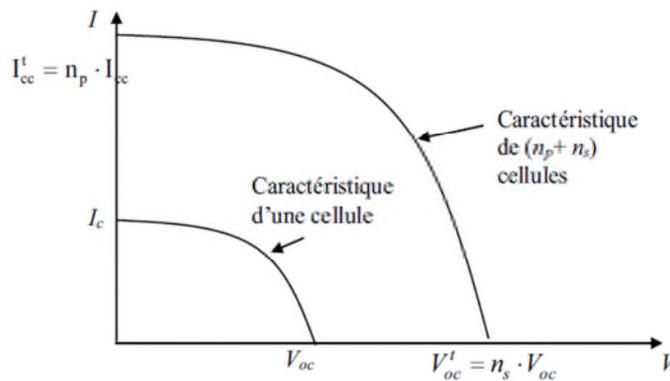


Figure. (I-7) : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (np+ ns) cellules identiques.

I-3-4 Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque, pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe I-V est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I-8) représente trois zones essentielles:

- fonctionnement comme générateur de courant: le point de fonctionnement appartient à la zone (I),
- fonctionnement comme générateur de tension : le point de fonctionnement appartient à la zone (III). La tension est proche de la tension à vide V_{oc} et le courant est faible,
- fonctionnement optimal: quand le point de fonctionnement appartient à la zone (II), l'utilisation est meilleure; la puissance absorbée est maximisée [9].

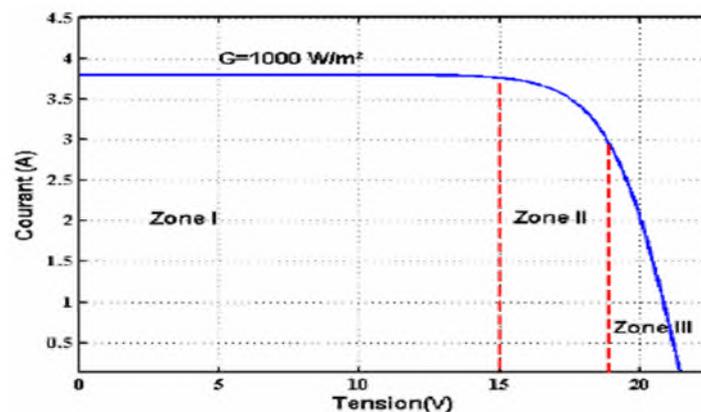


Figure (I-8) : Différentes zones de la caractéristique I (V), $T = 25\text{ °C}$.

I-3-5 Fonctionnement optimal du générateur

Dans les conditions données, c'est au point de puissance maximale que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. C'est pourquoi ce point est souvent qualifié de point de puissance optimale, terme traduisant mieux la caractéristique relative aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie. L'utilisation du générateur étant le plus souvent considérée comme optimale en ce point noté (V_{opt}, I_{opt}) .

Le point de fonctionnement du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point (V_{opt}, I_{opt}) , permet d'y extraire le maximum de puissance dans ces conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge vaut alors $R_{opt} = V_{opt} / I_{opt}$.

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales R_{opt} lorsque les conditions varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire [9].

I-3-6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**I-3-6-1 Avantages**

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque :

- Sa gratuité.
- Pas de pollution
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Un coût de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité (5% de la surface des déserts suffiront pour alimenter la planète entière).

I-3-6-2 Inconvénients

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas des panneaux photovoltaïques.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'extraction des panneaux ont un impact sur l'environnement.

I-4- L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [10].

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

- ✓ Soit conservation de l'énergie mécanique, le vent est utilisé pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- ✓ Soit transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [11].

IV.1 Constitution d'un aérogénérateur :

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes [12]:

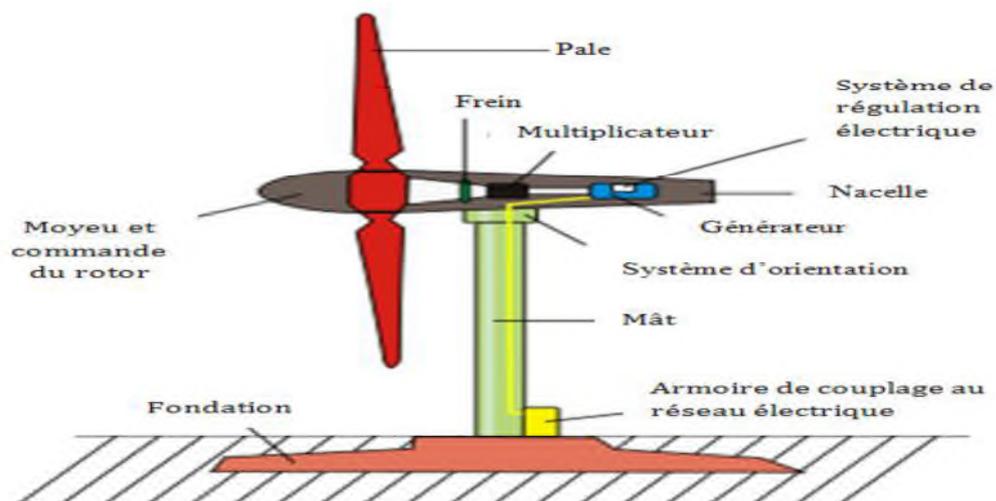


Figure (9) : Constitution d'une centrale éolienne.

- **Le mat :** qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500 kW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance
- **Les pales :** qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale et d'améliorer le coefficient de puissance en passant d'une pale à deux et de 3% en passant de deux à trois. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien plus des aspects esthétiques du système tripale par rapport au système bipale constituent des atouts supplémentaires

- **La fondation** : une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vent et dans des conditions de givrage.
- **La nacelle** : qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique.

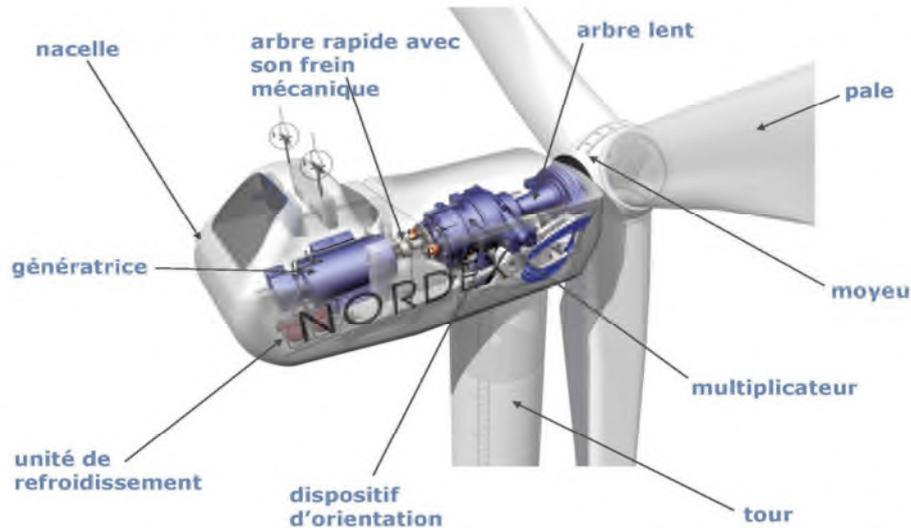


Figure (10) : Constitution de la nacelle.

- **Le moyeu** Le moyeu est la partie mécanique, en bout de l'éolienne, qui supporte les pales. Il est pourvu d'un système passif (aérodynamique), actif (vérins hydrauliques) ou mixte (active stall) qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de vent) [13].
- **L'arbre primaire** C'est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre 20 - 40 tr/min, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur mécanique de vitesse [14].
- **L'arbre de la génératrice ou arbre secondaire** L'arbre secondaire est celui de la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique (dispositif de sécurité) qui limite la vitesse de rotation en cas de vent violent [14].
- **Le système de refroidissement** Le multiplicateur de vitesse, comme la génératrice, connaissent un échauffement suite aux efforts mécaniques. Des refroidisseurs sont donc utilisés pour limiter les températures de ces organes. Ils se présentent sous la forme de ventilateurs, de radiateurs d'eau ou d'huile. Ce dernier est plutôt destiné pour le refroidissement des multiplicateurs [13].
- **Le multiplicateur mécanique de vitesse** La vitesse de la turbine est très classiquement inférieure à la vitesse de la génératrice. Par conséquent, dans un système conventionnel de conversion de l'énergie éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de

la turbine à celle de la génératrice. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. Le multiplicateur relie donc l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. La présence de ces multiplicateurs induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance [15].

- **Le système d'orientation de la nacelle** Le système d'orientation de la nacelle est constitué d'une couronne dentée (crémaillère) équipée d'un moteur. Il permet d'orienter l'éolienne et de bloquer sa position, grâce à un frein, dans l'axe du vent [14].
- **Le générateur électrique** Dans le cas de la conversion de l'énergie éolienne, les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. Ce sont souvent des structures standard à une ou deux paires de pôles. Suivant les puissances et le fonctionnement désirés (connexion au réseau électrique ou fonctionnements isolé et autonome) [14].

I-4-2 Principe de fonctionnement d'un système éolien :

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice [16].

I-4-3 Les différents types d'éolienne :

Les éoliennes peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe verticale et celles à axe horizontal.

I-4-3-1 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont :

- faible impact visuel,
- pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [16].

Il existe principalement deux types d'éoliennes à axe vertical ; les turbines Darrieus classiques, à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales.

Les éoliennes à axe vertical de type Savonius utilisent la force de trainée et celles de type Darrieus reposent sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif ; cet effet est similaire aux forces qui s'exercent sur l'aile d'un avion [14].

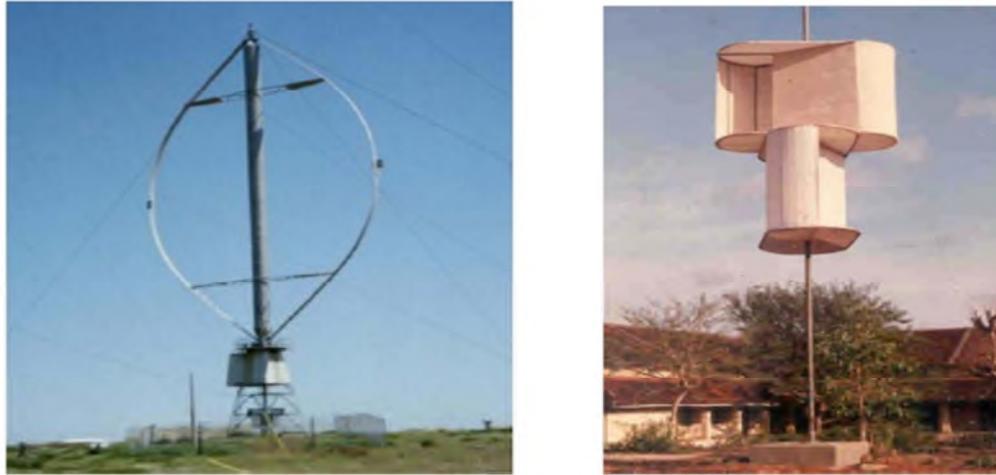


Figure (I-11) : Eolienne à axe vertical.

I-4-3-2 Eolien à axe horizontal :

Ces éoliennes sont beaucoup plus employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et occupent une faible emprise au niveau du sol. On peut distinguer deux axes horizontaux : les éoliennes dont l'hélice est en amont de la machine par rapport au vent et les éoliennes dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent [18].

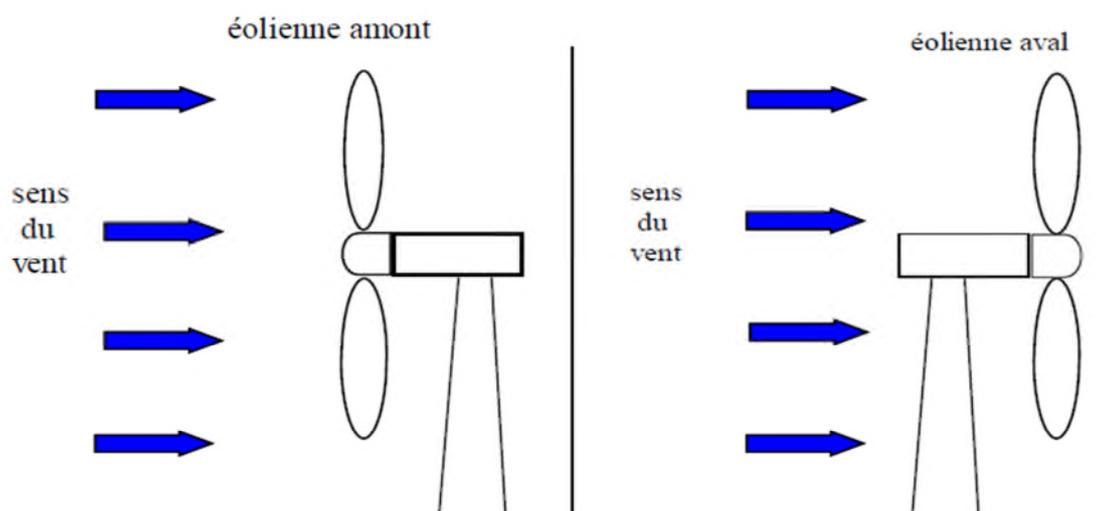


Figure (I-12) : Eolienne à axe horizontal.

I-4-4 les différents types de machines électriques utilisées :

En général les machines les plus utilisées sont :

❖ Les machines synchrones :

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment pour de très grandes puissance (centrale thermique, hydrauliques et nucléaire) la gamme de puissance de ces générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien varie de 500 kW à 2 MW [9].

❖ Les machines asynchrones

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator. Ces générateurs asynchrones utilisés dans le domaine éolien de moins de 20kw [19].

❖ Les machines à courant continu

Ce type présente une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais ces machines sont chères et ont un grand poids [18].

❖ Les générateurs à réluctances variables

Sont des machines mécaniquement robustes ; ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses, une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple [9].

I-4-5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I-4-5-1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales [20].

I-4-5-2 Inconvénients

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.

- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe [20].

I-5 Sous-système de pompage (Groupe motopompe)

Dans le système qu'on va étudier, on utilise un groupe motopompe qui est constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge avec un débit et une hauteur bien déterminés.

I-5-1 Types de pompes utilisées

Une pompe est une machine capable de transformer une énergie mécanique en énergie hydraulique. Il y a plusieurs types disponibles pour les systèmes de pompage. On distingue principalement deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétriques.

I-5-1-1 Les pompes centrifuges

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

Les caractéristiques des pompes centrifuges :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faible ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- La puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global [21].

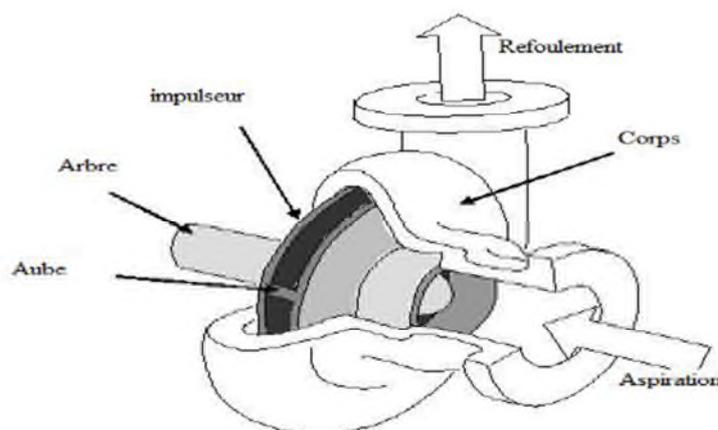


Figure (I-13): Pompe centrifuge

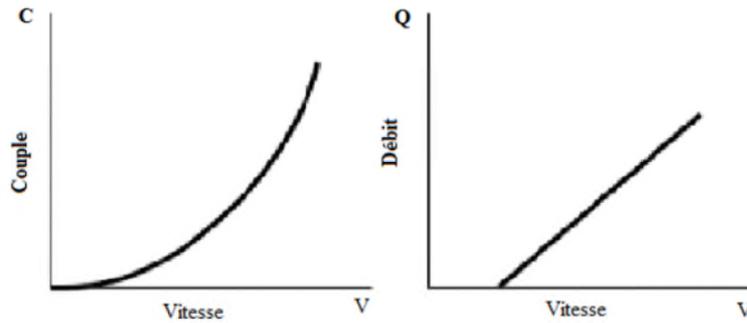


Figure (I-14) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge

I-5-1-2 Les pompes volumétriques

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

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

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

Pour palier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système [21].



Figure (I-15) : Pompe volumétrique.

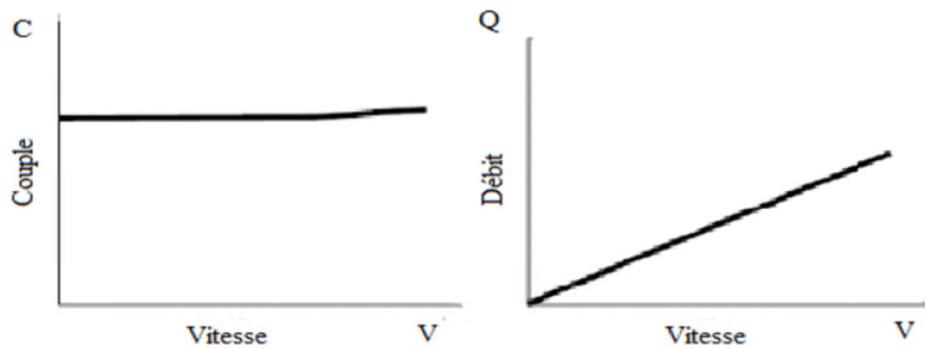


Figure (I-16): Caractéristiques d'une pompe volumétrique.

I-5-2 Types de moteurs utilisés

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution de convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout moins coûteux [22].

I-5-2-1 Moteur à courant continu :

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui s'use, est complexe à réaliser et consomme de l'énergie [23].

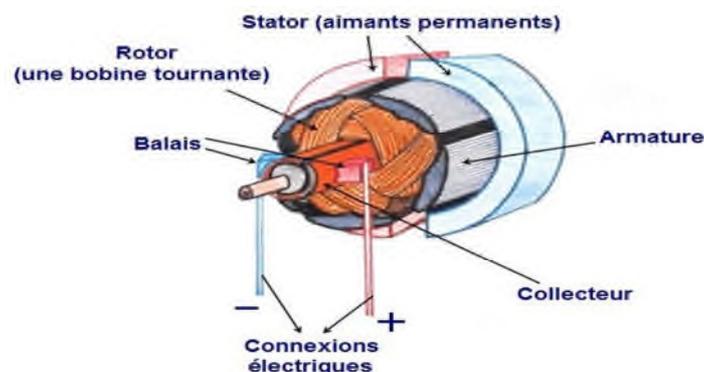


Figure (I-17): Moteur à courant continu.

I-5-2-2 Moteur à courant alternatif :

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

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Moteur synchrone.
- Moteur asynchrone.

I-5-2-3 Moteur synchrone :

La machine synchrone est une machine à champ magnétique tournant qui présente deux paires (P) de pôles magnétiques au rotor ainsi qu'au stator. P représente le nombre de paires de pôles (p pôles nord et p pôles sud). La vitesse de rotation n du rotor dépend directement de la fréquence f de la tension d'alimentation, on parle de vitesse de synchronisme.

Autrefois utilisés quasi exclusivement en alternateur, le développement de l'électronique de puissance et la généralisation des aimants comme inducteur permettent aujourd'hui d'employer les machines synchrones en tant que moteurs dans une large gamme de puissance. La machine synchrone dans la très grande majorité des cas est utilisée en triphasé [24].

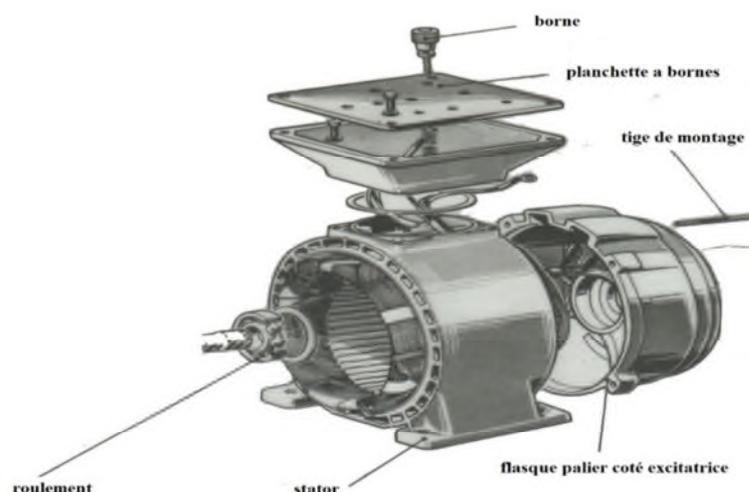


Figure (I-18): Moteur synchrone.

I-5-2-4 Moteur asynchrone :

C'est un moteur qui se caractérise par le fait qu'il est constitué d'un stator (inducteur) alimenté en courant alternatif et d'un rotor (induit) soit en court-circuit, soit bobiné aboutissant à des bagues dans lesquelles le courant est créé par induction. Ces moteurs ont la particularité de fonctionner grâce à un champ tournant.

On distingue deux catégories de moteur asynchrones en fonction du type de rotor :

- Les moteurs asynchrones à rotor en court-circuit, de faible puissance.
- Les moteurs asynchrones à rotor bobiné à bagues dans lesquelles l'enroulement du rotor aboutit à des bagues par l'intermédiaire desquelles on peut insérer des résistances. Ils sont de grande puissance.

Les moteurs asynchrones peuvent démarrer par leurs propres moyens s'ils sont polyphasés. Le couple de démarrage des moteurs asynchrones est faible.

C'est un moteur dont la vitesse est proportionnelle à la fréquence du courant.

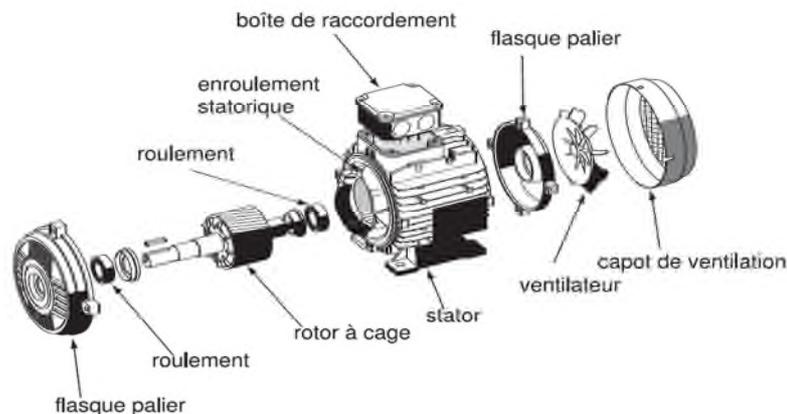


Figure (I-19) : Moteur asynchrone.

I-6- Les système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge alternative (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

I-6-1 Le convertisseur continu-continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du générateur photovoltaïque correspondante au point de puissance

maximale. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [25].

I-6-2 Le convertisseur continu- alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs [25]:

- Rotatif

C'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances) [25].

- Statique

On le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient [25]:

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

I-7 Recherche du point de puissance maximale

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracking, est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens. Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique courant-tension est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclaircissement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge.

➤ **Quelques commandes MPPT utilisées pour l'optimisation des systèmes**

Plusieurs applications industrielles nécessitent l'utilisation des méthodes modernes de contrôle, permettant d'avoir une réponse rapide et des performances dynamiques élevées. Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'optimisation d'un système photovoltaïque, on cite les suivantes :

- Méthode "perturbation et observation" (P&O).
- Méthode "conductance incrémentielle".
- Méthodes basées sur des relations de proportionnalité.
- Méthode à base de la logique floue.
- Méthodes à base de réseau de neurones artificiels.

I-8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur le système hybride destiné au pompage, qui se compose de deux chaînes de conversion d'énergie renouvelable, éolienne et photovoltaïque. Nous avons aussi présenté les caractéristiques du fonctionnement des éléments constitutifs de chaque chaîne.

Pour maximiser l'utilisation des sources renouvelables, plusieurs méthodes sont utilisées afin d'avoir un rendement meilleur, nous avons cité quelques une et leurs importances dans la chaîne de conversion d'énergie.

II.1. Introduction

Après avoir étudié et citer les différents composants du système de pompage hybride, nous procédons à la modélisation de notre système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié, on doit connaître alors les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques du site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre nous présenterons d'abord, la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque (qui est constitué d'un générateur photovoltaïque et d'un convertisseur DC/DC), en suite la modélisation de la chaîne de conversion éolienne (qui est constituée d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone (GAS) et un redresseur), on terminera par la modélisation de l'onduleur et du groupe moteur-pompe.

II.2. Système de pompage hybride

Le system à modéliser est représenté sur la figure (II.1).

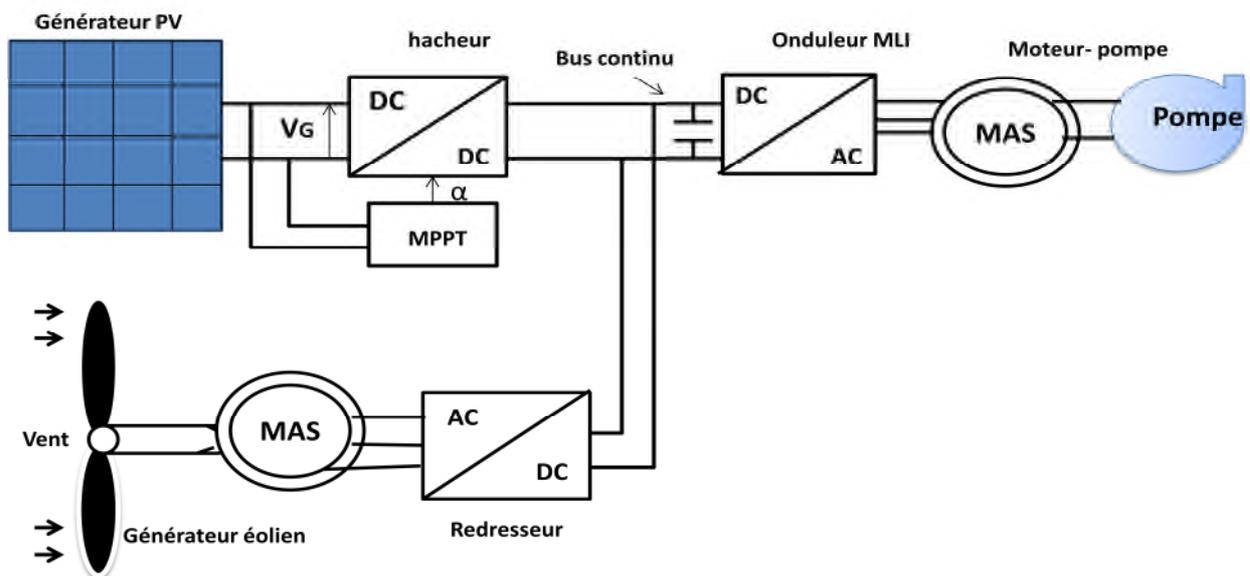


Figure (II.1) : Schéma simplifié du système de pompage hybride.

II.3. Modélisation de la chaîne photovoltaïque

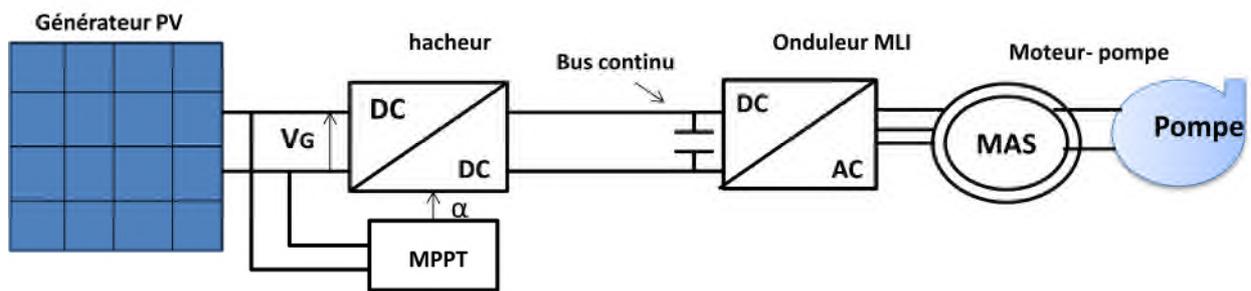


Figure (II.2) : Schéma simplifié du système photovoltaïque

II.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles de générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

Le modèle le plus simple d'un générateur photovoltaïque est représenté comme un circuit équivalent qui se compose d'un générateur de courant modélisant l'éclairement en parallèle avec une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et de deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par :

$$I_{pv} = I_{cc} \{ 1 - K_1 [e^{K_2 V_{pv}^m} - 1] \} \quad (II.1)$$

Où les coefficients K_1 , K_2 et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (II.2)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc}(1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{cc}} \right] \quad (II.3)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1+K_1}{K_1} \right] \quad (II.4)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}} \right]} \quad (II.5)$$

Où

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale (V_{opt}).

I_{cc} : Courant en court-circuit.

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.1) est applicable que pour un niveau d'insolation G et de température particulière ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ °C}$), relatif aux conditions standards de fonctionnement. Quand l'insolation et la température varient on aura les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.6})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc, stc} \quad (\text{II.7})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{co} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

ΔG : Représente la variation de l'insolation.

T_{stc} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

ΔT_c : Représente la variation de la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

α_{sc} : Représente un coefficient d'incrément de courant I_{sc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/°C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

β_{co} : Représente un coefficient d'incrément de la tension V_{co} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/°C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{nouv} = V_{stc} + \Delta V \quad (\text{II.9})$$

$$I_{nouv} = I_{stc} + \Delta I \quad (\text{II.10})$$

Pour notre étude, on a choisi le modèle à cinq paramètres, (I_{cc} , V_{co} , I_{mpp} , V_{mpp} et R_s).

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de 1000 W/m^2 et une température de 25 °C). Le tableau (II.1) montre les paramètres du panneau photovoltaïque, de type SIEMENS SM 110-24, qui seront utilisés pour la simulation.

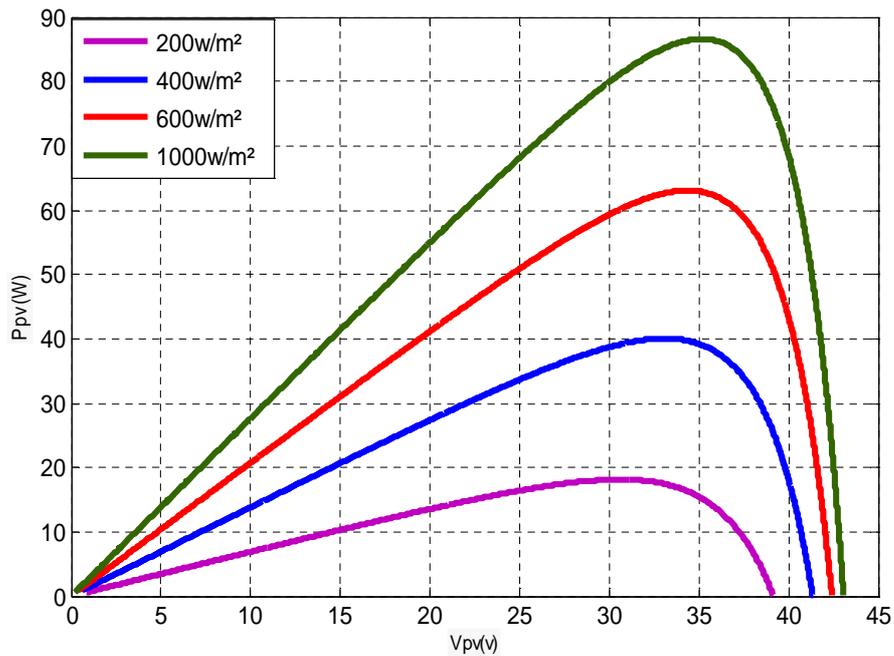
Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110 W
Courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3.15 A
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35 V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45 A
Tension en circuit ouvert V_{cc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentement du courant I_{cc} (α_{cc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentement de la tension V_{co} (β_{co})	-152 mV/°C

Tableau (II.1) : Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24.

II.3.2 Caractéristique d'un module solaire (I-V), (P-V)

II.3.2.1 Influence de l'ensoleillement

Après simulation pour divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$, les résultats obtenus sont représentés par les caractéristiques suivantes

Figure (II.3) : Courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

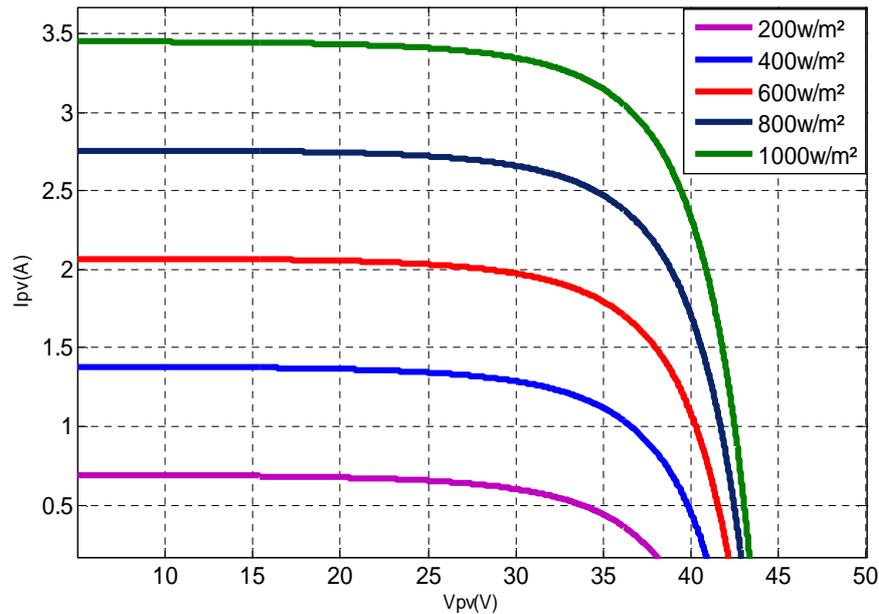


Figure (II.4) : Courbes $I_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$

En faisant varier l'éclairement entre 400 w/m^2 et 1000 w/m^2 avec un pas de 200, les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$ et $I_{pv}=f(V_{pv})$ sont données par les figures (II.3, II.4). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre la tension de circuit ouvert n'a augmenté que légèrement avec l'ensoleillement, ceci implique que :

La puissance optimale du panneau (P_{opt}) est proportionnelle à l'ensoleillement.

II.3.2.2 Influence de la température

Après simulation pour diverses températures à $G=1000\text{W/m}^2$, les résultats obtenus sont représentés par les caractéristiques suivantes :

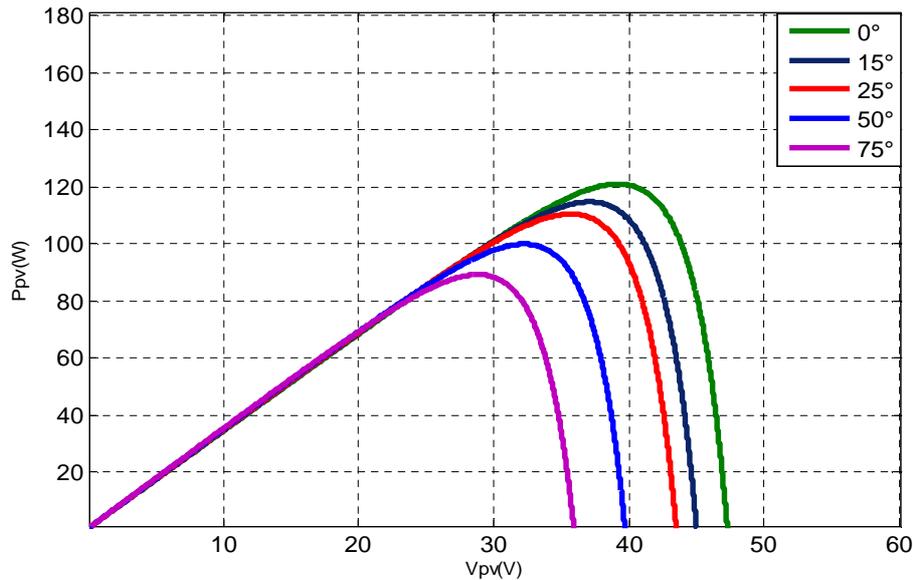


Figure (II.5) : Courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour diverses températures à $G=1000W/m^2$.

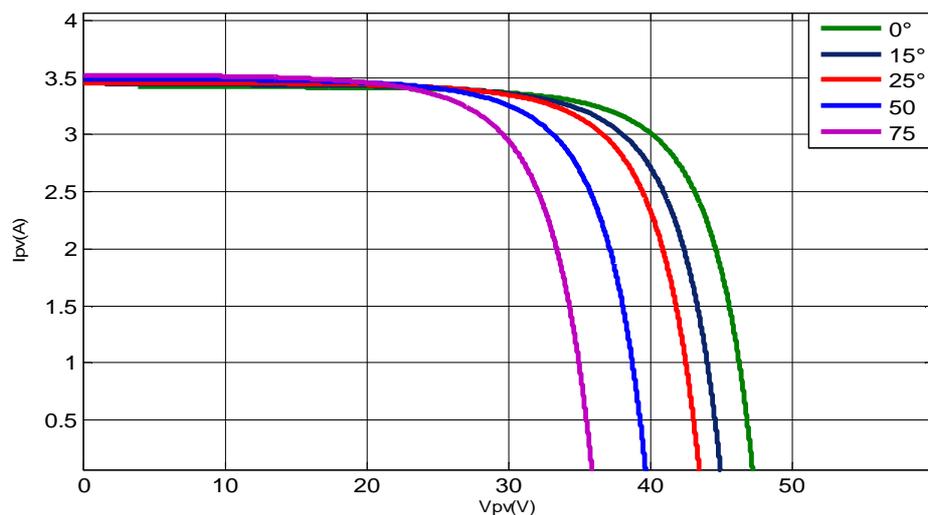


Figure (II.6) : Courbes $I_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour diverses températures à $G=1000W/m^2$.

En faisant varier la température, les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$ et $I_{pv}=f(V_{pv})$ sont données par les figures (II.5, II.6). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre la tension de circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température, de même pour la puissance optimale.

II.4 Modélisation du convertisseur DC/DC (hacheur survolteur) :

C'est un convertisseur DC/DC de type parallèle qui est inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique α ($0 < \alpha < 1$) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la figure (II.7).

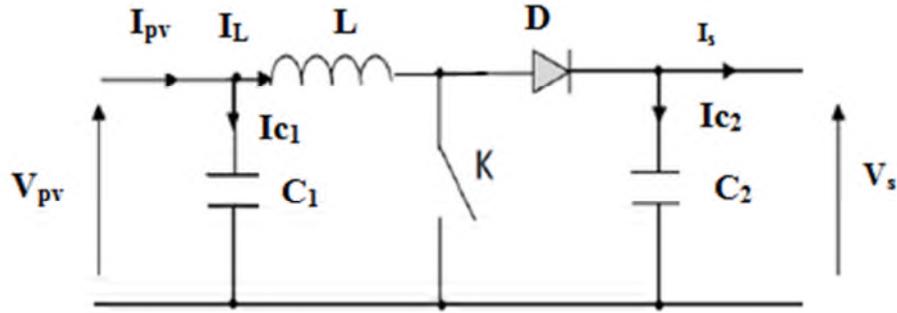


Figure (II.7) : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, dans le Système d'équations suivant :

$$\begin{cases} I_L = I_{pv} - C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} \\ I_s = (1 - \alpha)I_L - C_2 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} \\ V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha)V_s \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} I_L = I_{pv} \\ I_s = (1 - \alpha)I_L \\ V_{pv} = (1 - \alpha)V_s \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_s et I_s) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique α du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (figure II.7) par le système d'équations :

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_{pv}}{1 - \alpha} \\ I_s = (1 - \alpha)I_{pv} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

A partir du système d'équations (II.14), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_s :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{(1-\alpha)V_s}{I_s/(1-\alpha)} = R_s(1 - \alpha)^2 \tag{II.14}$$

Alors, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_s :

$$\frac{R_{pv}}{R_s} = (1 - \alpha)^2 \Rightarrow \alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \tag{II.15}$$

Puisque le rapport α vérifie l'inégalité $0 < \alpha < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante : $R_s > R_{pv}$.

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance interne du panneau ($R_{pv}=R_{opt}$) et le rapport cyclique ($\alpha = \alpha_{opt}$) obéissent donc à l'équation :

$$R_{opt} = (1 - \alpha_{opt})^2 R_s \tag{II.16}$$

II.5 Modélisation du convertisseur DC-AC (Onduleur) [26]

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé.

Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable.

Le schéma de cet onduleur est donné dans la figure (II.8)

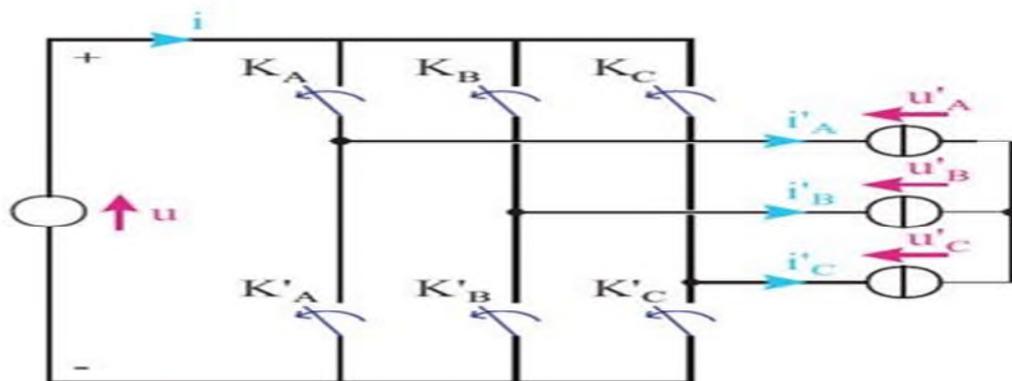


Figure (II.8) Circuit de l'onduleur relié à la machine. [26]

Les tensions composées V_{ab} ; V_{bc} ; V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \tag{II.17}$$

Avec : $V_{ao}; V_{bo}; V_{co}$ sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point «O» comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de CHARLE comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$V_{an}; V_{bn}; V_{cn}$ sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et

V_{no} est la tension du neutre de la charge par rapport au point « O ».

On a supposé que la charge est équilibrée c.à.d.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.19})$$

En remplaçant (II.19) dans (II.18) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.20})$$

En remplaçant (II.20) dans (II.17) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{DC} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{DC} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{DC} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

S_i est l'état de l'interrupteur K_i tel que : $\begin{cases} S_i=1 & \text{si } K_i \text{ fermé} \\ S_i=0 & \text{si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}$

Donc:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$I_{DC} = S_1 \cdot i_{ach} + S_2 \cdot i_{bch} + S_3 \cdot i_{cch} \quad (\text{II.24})$$

II-6 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Le moteur asynchrone est le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants. Ainsi, il a une structure simple, robuste et facile à construire.

Le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, créée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs du rotor sont coupés par les champs tournant [27].

II-6-1 Equations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

II-6-1-1 Equations des tensions et des flux [14]

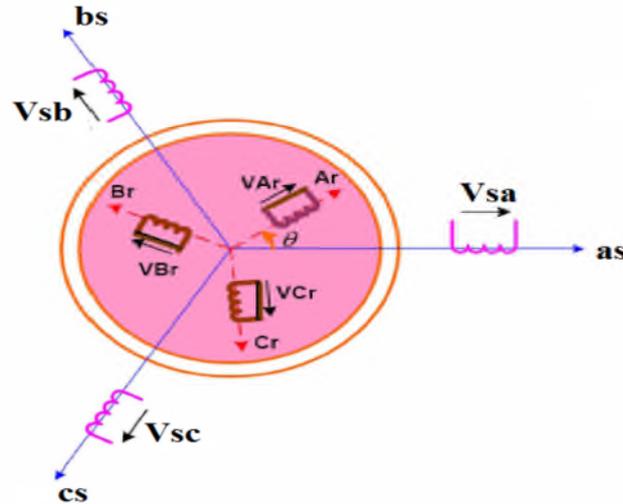


Figure (II.9) : Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on trouve les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone et elles s'écrivent sous forme matricielle :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \tag{II.25}$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \tag{II.26}$$

Avec

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

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

Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.

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

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

Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique.

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

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

Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique.

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

Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.26) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{I_{rabc}}]}{dt} \quad (\text{II.27})$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique qui s'écrit :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_{sabc}, I_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}] \right) \quad (\text{II.28})$$

Les flux totalisées Φ_{sabc} , Φ_{rabc} des phases statorique et rotorique s'expriment en fonction des inductances sous la forme suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \quad (\text{II.29})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \quad (\text{II.30})$$

Avec :

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

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \quad [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

Les inductances propres et mutuelles statorique (L_s , M_s) et rotorique (L_r , M_r) sont constantes, seules les inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases de rotor qui varient. Elles dépendent de l'angle θ telle que :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cdot \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_3 = M_{sr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

M_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

Finalement on peut écrire les équations électriques de moteur asynchrone :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \} \quad (\text{II.32})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} - \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{so} = R_s \cdot I_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \\ V_{ro} = R_r \cdot I_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.36})$$

Avec :

V_{sd}, V_{sq} : tension statorique direct et quadratique.

I_{sd}, I_{sq} : Courant statorique direct et quadratique.

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux rotorique direct et quadratique.

I_{rd}, I_{rq} : Courant rotorique direct et quadratique.

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotorique direct et quadratique.

ω_s, ω_r : Vitesse statorique rotorique.

$\omega = P \cdot \Omega = \omega_s - \omega_r$: Vitesse mécanique

II-6-1-3 Régime non saturé :

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux les flux statorique et rotorique s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante [28].

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$ Inductance cyclique statorique

$L_r = l_r + M$ Inductance cyclique rotorique

L_s Inductance propre cyclique statorique.

L_r Inductance propre cyclique rotorique.

M Inductance mutuelle

Finalement on obtient la matrice suivante qui rassemble toute les équations de moteur asynchrone :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} \cdot I_{sq} - \Phi_{rq} \cdot I_{rd}) \quad (\text{II.39})$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$j \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II.40})$$

II-6-1-4 Régime saturé :

Il est bien connu que le modèle linéaire peut être utilisé pour étudier le comportement de la machine asynchrone dans un fonctionnement en mode moteur. Les résultats que donne ce modèle sont acceptables. Cependant, il n'en est pas de même si ce même modèle est utilisé pour examiner le fonctionnement en mode générateur autonome.

Le modèle de la machine asynchrone établi précédemment n'est plus suffisant pour obtenir de bons résultats dans l'analyse des régimes de la génératrice. Néanmoins, ce modèle utilise une inductance magnétisante M constante, ce qui sous-entend que le matériau magnétique utilisé pour la conception de la machine est linéaire.

La simulation du phénomène d'auto-excitation de la machine asynchrone par un banc de capacités ne peut se satisfaire de ce modèle puisque c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement en régime permanent. En effet lorsque la machine est entraînée par un dispositif externe, la présence d'un champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine crée un couple électromagnétique engendrant une force électromotrice sur les enroulements statorique. La connexion de capacités sur les phases du stator entraîne alors la création d'un courant réactif qui augmente le champ magnétique de la machine et par conséquent les forces électromotrices. C'est cette réaction cyclique qui permet à la machine d'arriver à un régime permanent situé dans la zone saturée. La Figure (II.10) représente l'évolution de la force électromotrice statorique ainsi que la caractéristique externe du condensateur $v_c = \frac{I_c}{C\omega_c}$ (Où ω_c est la pulsation des signaux statorique) en fonction du courant I_m , pour un fonctionnement à vide de la machine. L'interaction des deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent.

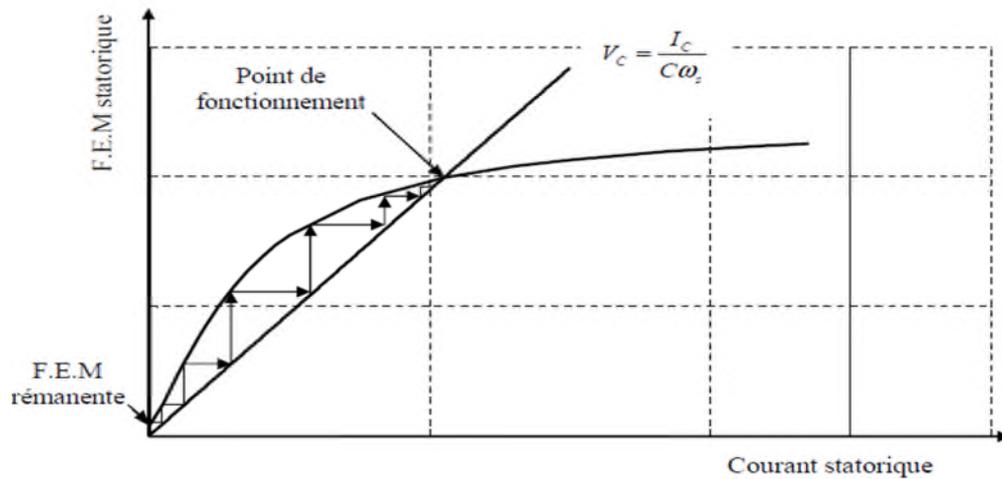


Figure. II.11 : Phénomène d'autoamorçage

Dans le fonctionnement en génératrice. De plus, la saturation entraîne un phénomène secondaire « l'effet croisé ». Il s'agit d'un couplage magnétique entre les enroulements des axes d et q. En conséquence, ces deux phénomènes conjugués doivent être pris en compte par le modèle équivalent.

Il est donc nécessaire de prendre en compte l'effet de saturation pour étudier la machine asynchrone en génératrice autonome. En outre, cet effet entraîne également un phénomène secondaire dit « effet croisé » qui peut être considéré comme un couplage magnétique entre les enroulements des axes d et q. Ces deux phénomènes conjugués doivent donc être pris en compte par le modèle équivalent afin d'aboutir à des résultats précis dans le cas du fonctionnement générateur d'une machine asynchrone [29], [14]

Pour aborder le modèle en régime saturé, reprenons les équations (II.36)

Dans le repère de PARK, chacun des flux peut-être décomposé en un flux magnétisant et un flux de fuite [30], [31]

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{sd} = l_s \cdot i_{sd} + \Phi_{md} \\ \Phi_{sq} = l_s \cdot i_{sq} + \Phi_{mq} \\ \Phi_{rd} = l_r \cdot i_{rd} + \Phi_{md} \\ \Phi_{rq} = l_r \cdot i_{rq} + \Phi_{mq} \end{array} \right. \quad (\text{II.41})$$

En définissant les courants magnétisants de la machine à partir des composantes des courants statorique et rotorique suivant les deux axes d et q comme suit :

$$\begin{cases} i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \\ i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

D'onc on définit le module du courant magnétisant global sous la forme suivante:

$$|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (\text{II.43})$$

Dans ce cas, L_m qui caractérise la magnétisation de la machine, peut être exprimé comme étant le rapport de $|\Phi_m|$, flux total magnétisant de la machine par $|i_m|$:

$$L_m = \frac{|\Phi_m|}{|i_m|} \quad (\text{II.44})$$

Nous pouvons exprimer chacun des deux flux magnétisants par :

$$\begin{cases} \Phi_{md} = L_m \cdot i_{md} \\ \Phi_{mq} = L_m \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

L_m est appelée « inductance magnétisante statique ». L'épaisseur de l'entrefer étant supposée constante, L_m , en fonction du courant, est identique suivant les deux axes d et q.

On obtient, pour les flux statoriques et rotoriques suivant les deux axes, les expressions suivantes [32]:

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = l_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{md} \\ \Phi_{sq} = l_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{mq} \\ \Phi_{rd} = -l_r \cdot i_{sd} + (l_r + l_m) \cdot i_{md} \\ \Phi_{rq} = -l_r \cdot i_{sq} + (l_r + l_m) \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Les équations électriques de la machine asynchrone s'écrivent alors, sous forme matricielle comme suit [32] :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (l_r + L_m) \\ -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (l_r + L_m) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} l_s & 0 & L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & l_s & L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \\ -l_r & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -l_r & L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & l_r + L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (II.47)$$

Avec : $L'_m = \frac{dL_m}{d|i_m|}$

Trois termes peuvent être distingués :

- le premier $l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt}$ est issu du flux de fuites ;
- le second $(L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|}) \cdot \frac{di_{md}}{dt}$ est dû à la saturation suivant l'axe direct ;
- et le troisième $L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt}$ reflète l'effet du courant suivant l'axe q sur le flux d'axe direct. C'est l'effet croisé.

La connaissance de l'évolution de permet de calculer toutes les inductances qui interviennent en régime de $L_m=f(|i_m|)$ et $L'_m=f(|i_m|)$ saturation. C'est ce principe de base qui est appliqué dans le modèle équivalent

On pose que :

$$\begin{cases} L_{md} = L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \\ L_{mq} = L_m + L'_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \\ L_{dq} = L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \end{cases} \quad (II.48)$$

La relation matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot l_s & 0 & -\omega_s \cdot L_m \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s \cdot L_m & 0 \\ -R_r & \omega_r \cdot l_r & R_r & -\omega_r (l_r + L_m) \\ -\omega_r \cdot l_r & -R_r & \omega_r \cdot (l_r + L_m) & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} l_s & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_s & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_r & 0 & l_r + L_{md} & L_{dq} \\ 0 & -l_r & L_{dq} & l_r + L_{mq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

L'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = P \cdot L_m \cdot (i_{md} \cdot i_{sq} - i_{mq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.50})$$

Par ailleurs, la fréquence des grandeurs statorique étant inconnue, le système d'équations de la génératrice est mieux conditionné lorsqu'il est exprimé dans le référentiel (d,q) lié au rotor. En effet, dans ce repère, seule la valeur de la vitesse de rotation mécanique est nécessaire. Dans ce cas, le système d'équations du modèle linéaire dans ce repère est donné par l'expression matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -p \cdot \Omega \cdot l_s & 0 & -p \cdot \Omega \cdot M \\ P \cdot \Omega L_s & R_s & p \cdot \Omega M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0_r \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & M & 0 \\ 0 & l_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

Et le même système d'équations, en tenant compte de la saturation, s'écrira comme suit dans le référentiel (d,q) lié au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -p \cdot \Omega \cdot l_s & 0 & -p \cdot \Omega \cdot L_m \\ P \cdot \Omega l_s & R_s & p \cdot \Omega L_m & 0 \\ -R_r & 0 & R_r & 0 \\ 0 & -R_r & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} l_s & 0 & L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & l_s & L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \\ -l_r & 0 & l_r + L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & -l_r & L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & l_r + L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

A vide, les tensions statorique aux bornes des condensateurs constituent également des inconnues. Par conséquent, il faut tenir compte des équations du circuit électrique extérieur. Ces dernières peuvent s'écrire en fonction des capacités d'excitation sous la forme matricielle suivante [33], [32]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sd} \\ -i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & p\Omega \\ -p\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

➤ **Cas d'un banc de capacités et une charge équilibrée [14]**

Dans le cas de la présence d'une charge équilibrée, cette relation matricielle est modifiée pour tenir compte des courants dans la charge et devient alors :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sd} & -i_{chd} \\ -i_{sq} & -i_{chq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & p\Omega \\ -p\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.54})$$

Enfin, suivant la nature de la charge, on ajoute les équations suivantes

$$\text{Charge R : } \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

$$\text{Charge RL : } \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} + L \cdot \frac{di_{chd}}{dt} \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} + L \cdot \frac{di_{chq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

$$\text{Charge RC : } \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} + \frac{1}{C_s} \int i_{chd} \cdot dt \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} + \frac{1}{C_s} \int i_{chq} \cdot dt \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

$$\text{Charge RLC : } \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} + L \cdot \frac{di_{chd}}{dt} + \frac{1}{C_s} \int i_{chd} \cdot dt \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} + L \cdot \frac{di_{chq}}{dt} + \frac{1}{C_s} \int i_{chq} \cdot dt \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

➤ Cas d'une charge déséquilibrée [14]

L'utilisation d'une génératrice asynchrone pour la génération de l'électricité dans un site isolé implique que la charge peut être déséquilibrée. Pour étudier ce cas de figure, on peut utiliser le même modèle de Park de la machine proposé dans le cas des charges équilibrées (équation (II.52)). Toutefois, concernant les équations du circuit électrique extérieur, on adoptera l'écriture triphasée de ces dernières. Ainsi, les tensions aux bornes des condensateurs sont données par l'équation matricielle suivante

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sa} & -i_{cha} \\ -i_{sb} & -i_{chb} \\ -i_{sc} & -i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-59})$$

icha, ichb et ichc étant les courants dans la charge triphasée et C la capacité d'auto-amorçage avec diode.

II-7 Modélisation de la turbine (éolienne)

la chaîne de conversion éolienne est représentée sur la figure(II.11)

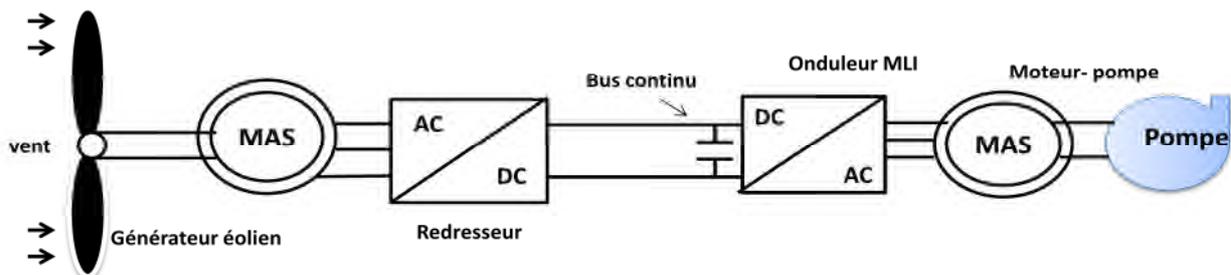


Figure (II.11) : Structure de la chaîne de conversion éolienne.

Pour modéliser la turbine, on doit avoir quelque hypothèses de simplification ;

- ✓ La vitesse de répartition du vent est supposée uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et un même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- ✓ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être ignoré.
- ✓ Les pertes par frottement de la turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du coté génératrice [14].



Figure(II.12) : Modèle simplifié de la partie mécanique

II-7-1 Modélisation de la vitesse du vent

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée de système de conversion d'énergie éolienne, a une variation aléatoire et une caractéristique très fluctuante. Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela est meilleure exploitation de la vitesse du vent [35]. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. La direction dans l'axe vertical peut être négligeable, la vitesse évaluée dans l'axe horizontale est une fonction du temps [36].

$$V_v = f(t) \quad (\text{II.60})$$

II-7-2 La vitesse spécifique réduite

C'est un rapport entre la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_T}{V_v} \quad (\text{II.61})$$

II-7-3 la puissance de l'éolienne

La puissance aérodynamique dépend du coefficient de puissance de la turbine et la longueur des pales ainsi de la vitesse spécifique :

$$P_{éol} = P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_v^3 \quad (\text{II.62})$$

Ce cas là avec des pales orientables, mais si on utilise des pales fixe, la puissance ne dépendra pas de l'angle de calage, et l'équation (II.62) devient :

$$P_{éol} = P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda) \cdot V_v^3 \quad (\text{II.63})$$

ρ : Densité volumique de l'air.

R : longueur d'une pale.

V_v : vitesse du vent.

λ : vitesse spécifique.

II-7-4 Le couple de la turbine

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} \quad (\text{II.64})$$

Si on remplace la puissance par sa valeur, on aura :

$$C_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_v^3 \cdot \frac{1}{\Omega_T} \quad (\text{II.65})$$

On cherche alors le coefficient C_p qui caractérise l'aérogénérateur :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\delta} - C_3 \cdot \beta - C_4 \cdot \beta - C_5 \right) \cdot e^{-\frac{C_6}{\delta}} \quad (\text{II.66})$$

Avec : $\frac{1}{\delta} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$

$$C_T = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_v^2 \quad (\text{II.67})$$

On a aussi :

$$C_T - C_{em} - f \cdot \Omega_T = J \cdot \frac{d\Omega_T}{dt} \quad (\text{II.68})$$

II-7-5. Modélisation du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante:

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad (\text{II.69})$$

Le couple sur l'arbre de la machine est :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II.70})$$

Avec :

- G : le gain de multiplicateur.
- T_{em} : le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.
- T_t : le couple développé par la turbine sous l'action de vent.
- Ω_{mec} : La vitesse mécanique de la génératrice.
- Ω_t : La vitesse de la turbine.

II-7-6 L'arbre de transmission

$$J \cdot \frac{d\Omega_T}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.71})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale (C_{em}) appliqué au rotor.

Avec :

J : l'inertie totale du système ramonée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres, et du multiplicateur.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_{eol} - C_{em} - C_f \quad (II.72)$$

$$C_f = f \cdot \Omega_T \quad (II.73)$$

Où :

C_{em} : le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_{eol} : le couple éolien.

C_f : le couple résistant du aux frottements

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

La turbine éolienne est une génératrice de puissance finie pouvant fonctionner avec toutes combinaison de vitesse réduite λ et coefficient de puissance C_p , la meilleur combinaison s'appelle le point de puissance maximale qui correspond à (C_{opt}, λ_{opt}) qui donne une puissance maximale pour une vitesse du vent donnée

II-8 Modélisation du redresseur

le rôle du redresseur est de transformer la tension alternative générée par la génératrice éolienne en tension continue aux bornes du bus continu en utilisant des IGBT avec des diodes en antiparallèle, ces interrupteur sont bidirectionnels, ce qui permet le transit de puissance dans les deux sens du système. Les signaux de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs sont générés par des comparateurs à hystérésis. Il est géré selon l'équation suivante :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S'_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T'_i \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } T'_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.74)$$

$$I_{dc} = S_a \cdot I_{a+} + S_b \cdot I_{b+} + S_c \cdot I_{c+} \quad (II.75)$$

Avec

V_a, V_b, V_c : Tension simple ;

V_{dc} : Tension redressé ;

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondants à l'état de l'interrupteur.

II-9 Modélisation du bus continu

La tension continue, en amont du convertisseur DC/AC, est maintenue constante à sa valeur de référence à l'aide d'un hacheur survolteur [37].

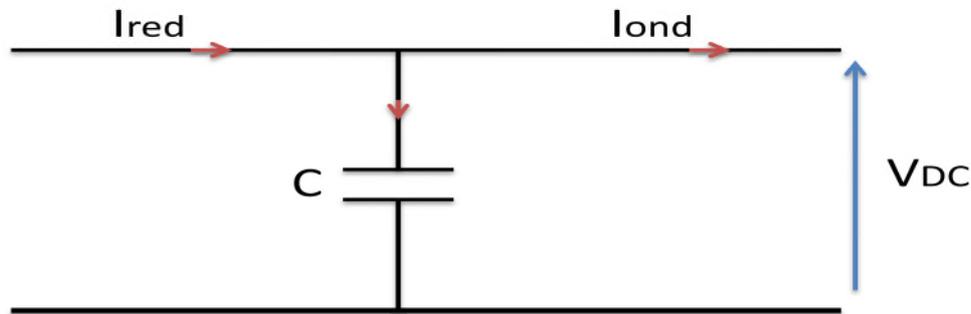


Figure II.13 : Filtre capacitif.

Le condensateur du bus continu est modélisé par : [38]

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} I_c \quad (\text{II.76})$$

L'expression de la tension du bus continu s'écrira comme suit :

$$V_{DC} = \frac{1}{C} \int I_c dt \quad (\text{II.77})$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un noeud ou circulent deux courants

$$I_c = I_{red} - I_{ond} \quad (\text{II.78})$$

Avec :

C : capacité de filtrage du bus continu.

II-10 Modélisation de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse :

$$F(H, Q, \omega) = 0$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère généralement la vitesse constante.

On peut écrire l'équation de la hauteur manométrique totale (HMT) en fonction de la hauteur géométrique et les pertes de charges par l'équation :

$$HMT = H_g + P_c \quad (\text{II.79})$$

Avec :

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

P_c : Perte de charge produite par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elle s'exprime de cette façon :

$$P_c = \left(\lambda \frac{L}{D} + \epsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^5 g} \right) = K_p Q^2 \quad (\text{II.80})$$

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie(m)

L : Longueur de la tuyauterie(m)

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

ε : Coefficient des pertes de charge locales.

K_p : Constante la canalisation.

Q : le débit de la pompe.

Dans cette application, l'expression de la hauteur manométrique totale est donnée par un modèle PLEIDER-PETERMAN

$$HMT = \alpha_0 \omega_r^2 - \alpha_1 \omega_r Q - \alpha_2 Q^2 \quad (\text{II.81})$$

Avec:

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ des constantes de la pompe.

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II.82})$$

Où :

Ω : vitesse de moteur asynchrone (rad/s).

Avec :

K_r : Un coefficient de proportionnalité [$(Nm/rad.s^{-1})^2$] qui donné par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.83})$$

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone(w).

Ω_n :vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a modélisé les deux chaines de conversion d'énergie à s'avoir la chaine éolienne (vent, voile, génératrice asynchrone) et la chaine photovoltaïque (panneau photovoltaïque, hacheur) et les convertisseurs de puissance (redresseur et onduleur), ainsi que la pompe centrifuge.

Cette modélisation sera utilisée pour la simulation des deux chaines de conversion d'énergie éolienne et photovoltaïque.

III-1 Introduction :

Après avoir modélisé les deux chaînes de conversion photovoltaïque et éolien afin de prévoir leur comportements, nous allons les simuler séparément avec application des algorithmes d'optimisation pour l'extraction de point de puissance maximale (MPPT) pour maintenir une alimentation permanente de la charge pour des variations climatiques (le vent, l'irradiation et la température) sous MATLAB/Simulink

Le but de ce chapitre est de présenter brièvement un rappel sur la technique d'optimisation utilisée, soit la méthode de perturbation et observation cette technique consiste en la maximisation de puissance électrique et ce, pour le générateur photovoltaïque ou éolien et pour la quantité d'eau pompée pour des paramètres climatiques données (éclairage, température et vitesse du vent), ainsi sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue ainsi que son application pour l'optimisation d'un système de pompage alimentée par une source hybride (photovoltaïque, éolienne)

III-2 Optimisation de système photovoltaïque

III-2-1 La commande de recherche du point de puissance maximale

Par définition la commande MPPT, associée à un étage intermédiaire 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 météorologique (irradiation, température). La commande de convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt}, I_{opt})

La figure suivante montre la caractéristique de la puissance tension (P_g, V_g) d'un panneau photovoltaïque :

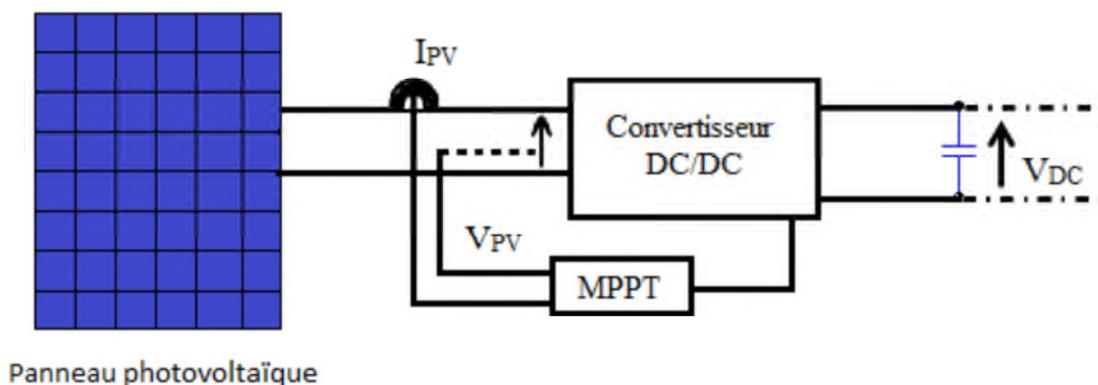


Figure (III.1) Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT.

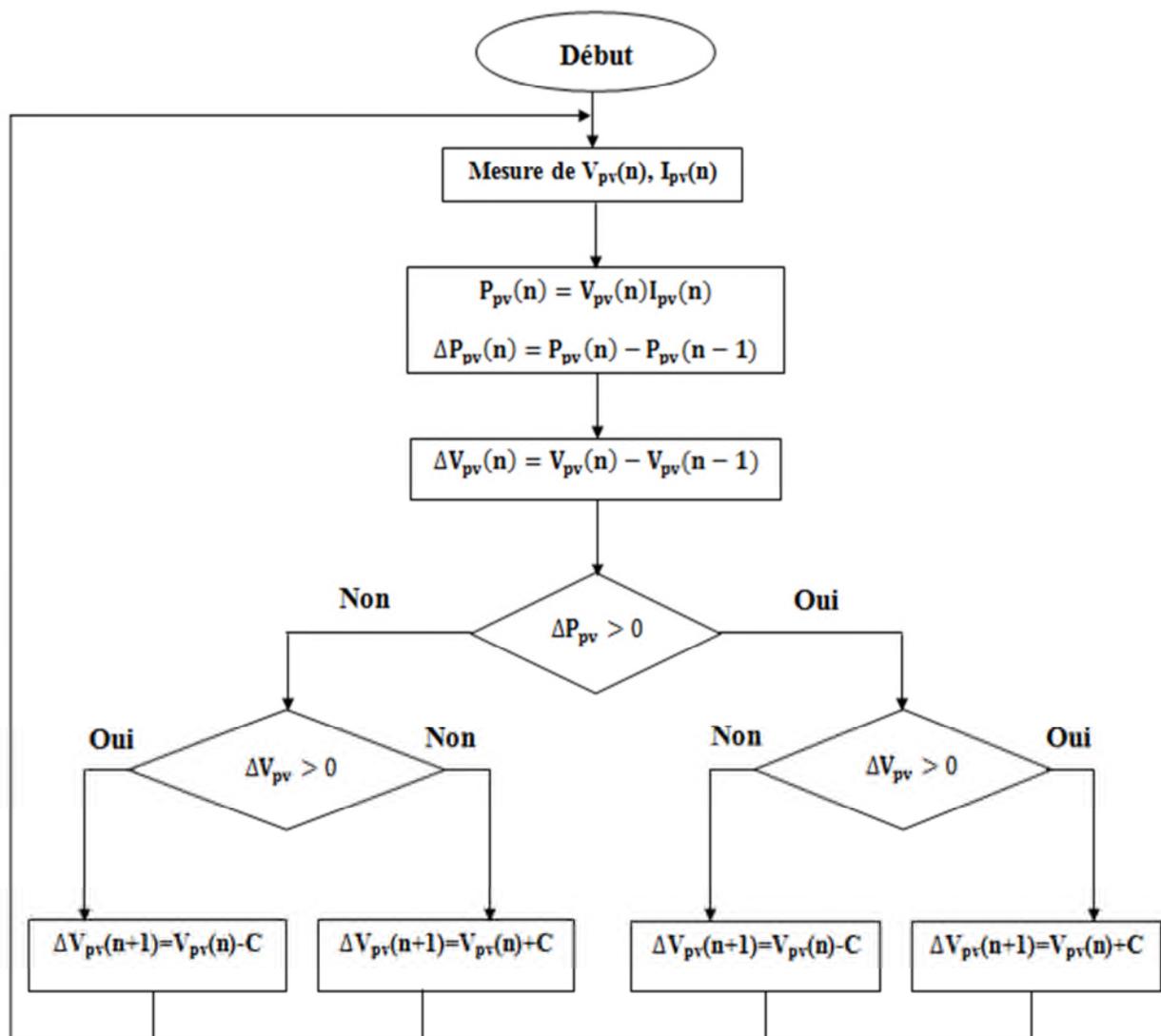
III-2-1-1 Méthode de Perturbation et Observation (P&O)

La P&O est la méthode la plus utilisée 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 maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, l'algorithme Perturbation et Observation, est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension V_{pv} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P_{pv}(n)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P_{pv}(n-1)$ alors on garde la même direction de la perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure (III.2), donne l'organigramme de cet algorithme.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.



Figure(III.2) : Organigramme de l'algorithme P&O

III-2-2 Simulation du panneau photovoltaïque avec 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.

La figure (III.3) représente les caractéristique ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) dans les conditions STC ($E_{stc}=1000W/m^2$ et $T_{stc}=25^\circ$).

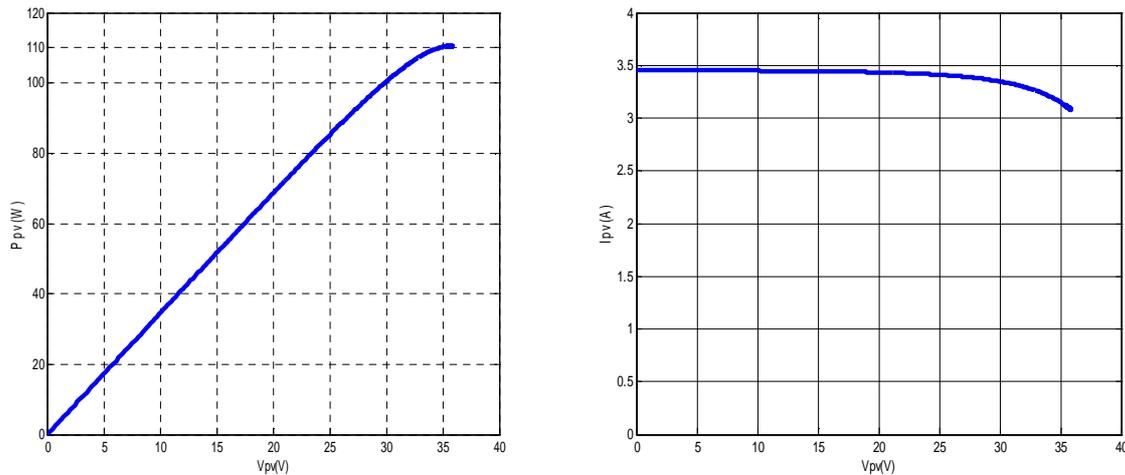
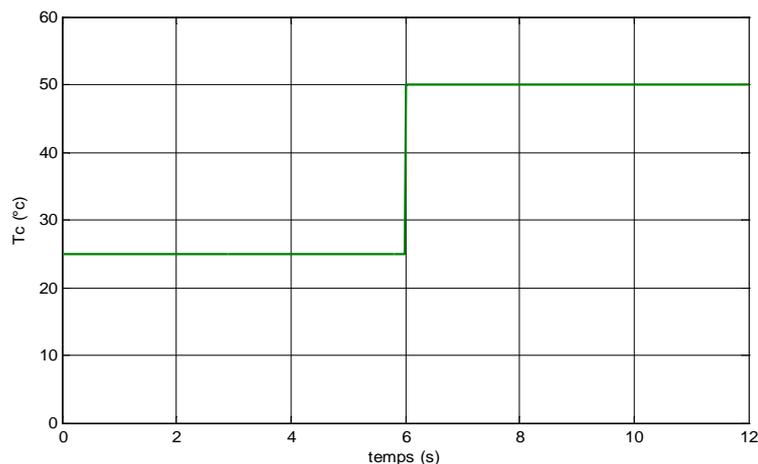


Figure (III.3) : caractéristiques ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) dans les conditions STC convention.

III-2-2-1 Variation de l'ensoleillement E_s et de la température T_c

On applique un échelon d'ensoleillement de 1000W/m^2 puis 700W/m^2 et un échelon de température de 25°C puis 50°C qui sera représenté sur la figure (III.4) respectivement après un temps de ($t=6\text{s}$), et nous présentons ci-dessus les caractéristique (courant, tension, puissance) en fonction du temps.

- **Variation de la température ($E_s=1000\text{W/m}^2$) :**



Figure(III.4) : variation de T_c en fonction de temps.

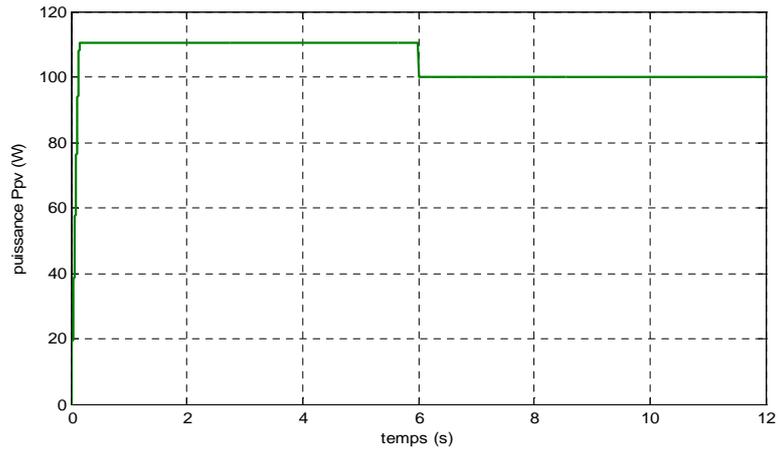


figure (III.5) : puissance en fonction de temps

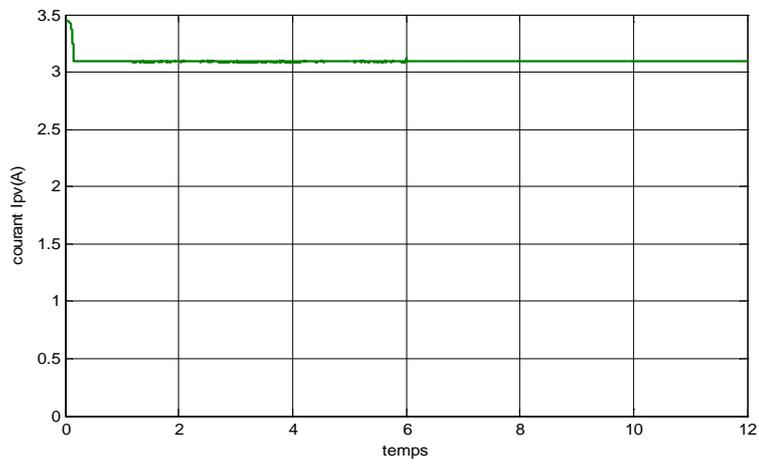


Figure (III.6) : courant Ipv en fonction de temps

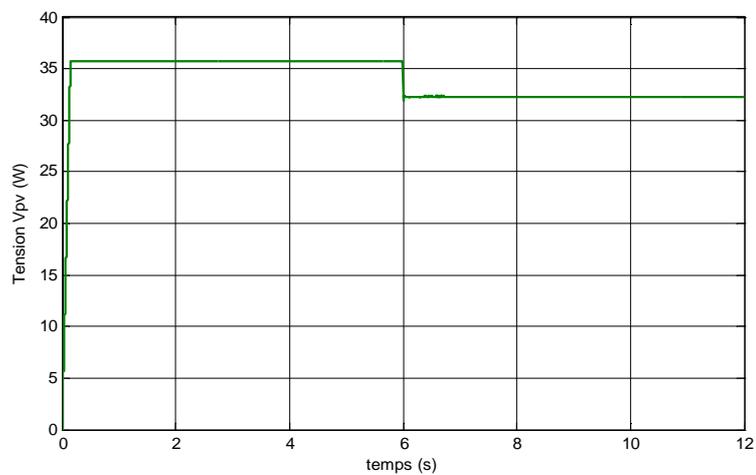
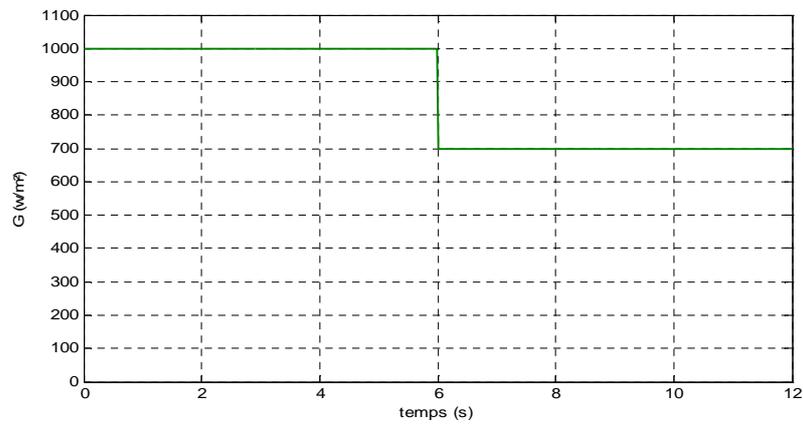


Figure (III.7) : tension Vpv en fonction de temps.

- Variation de l'ensoleillement ($T_c=25^\circ\text{C}$) :



Figure(III.8) : variation de E_s en fonction de temps.

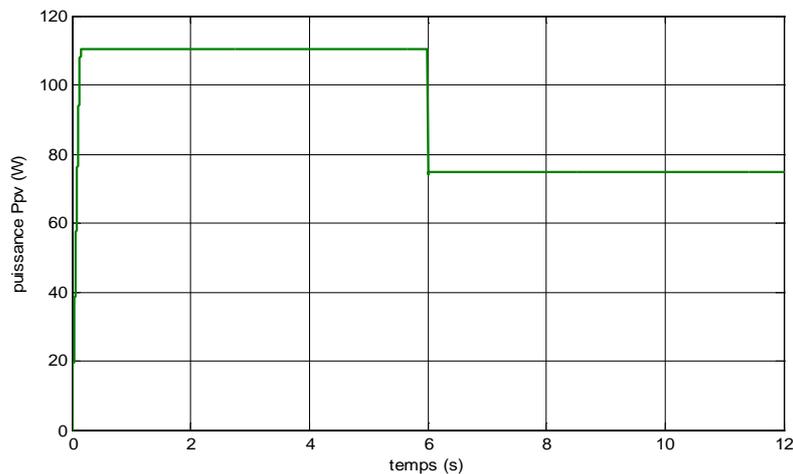


Figure (III.9) : puissance P_{pv} en fonction de temps.

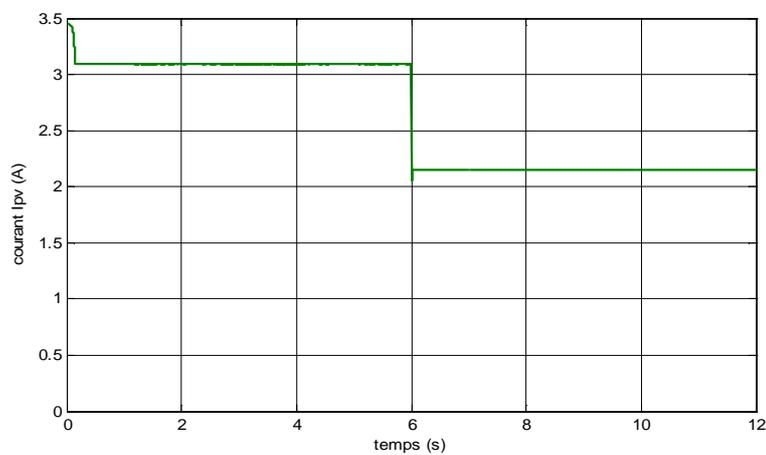


Figure (III.10) : courant I_{pv} en fonction de temps.

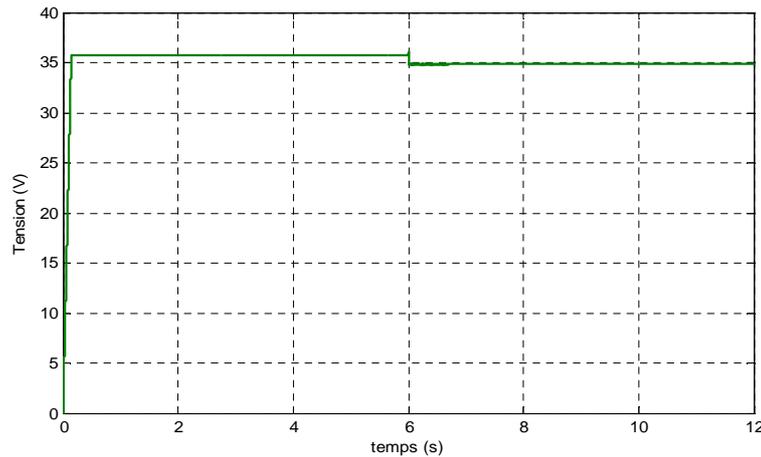


Figure (III.11) : tension V_{pv} en fonction de temps.

Lors de la variation de l'ensoleillement, on remarque que le courant I_{pv} et la puissance P_{pv} varie proportionnellement avec la variation de l'ensoleillement et que la tension V_{pv} , tandis que lors de la variation de la température, la tension diminue avec l'augmentation de la température ce qui engendre une diminution de la puissance, Alors que le courant reste inchangé.

III-3 Optimisation de l'éolienne

La chaîne de conversion éolienne (figure III.12) est composée d'une turbine éolienne entraînant une génératrice asynchrone, associée à un redresseur, et un onduleur alimentant un groupe motopompe.

On va trouver la courbe de puissance, typique des éoliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un bon prélèvement énergétique. Alors, on parle ainsi de maximisation de la puissance de l'aérogénérateur. C'est la même procédure que nous avons étudiée pour le générateur photovoltaïque [9].

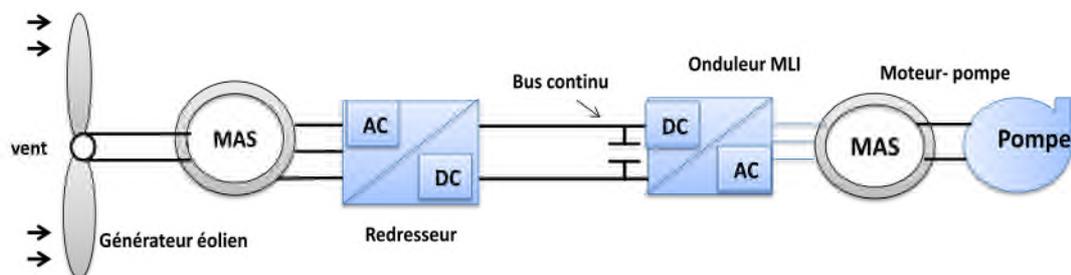


Figure (III.12) Schéma global de système de conversion d'énergie éolienne.

III-3-1 La commande de recherche du point de puissance maximale (maximum power point Tracking MPPT) :

La MPPT qui signifie la maximisation de la puissance extraite, est un facteur primordial pour l'amélioration du rendement d'un système. Les systèmes éoliens et photovoltaïque sont de puissance (grandeurs de sortie) variables car leur grandeurs d'entrées sont variables, pour cela un algorithme d'MPPT qui suit la puissance maximale et indispensable [35].

Cette technique intervient durant le fonctionnement de l'éolienne dans la zone ou

$$V_{vdémarrage} \leq V_v \leq V_{vnominale}$$

Il y a deux types de MPPT :

MPPT avec asservissement de vitesse et MPPT sans asservissement de vitesse

III-3-1-1 MPPT avec asservissement de vitesse :

Dans cette méthode de recherche de MPPT, le couple électromagnétique développée par la machine est supposé égale à sa valeur de référence quelque soit la puissance générée, et cela malgré les perturbations qu'engendre la nature fluctuante du vent :

$$C_{em} = C_{em-réf} \quad (III.1)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettent de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence [40].

$$C_{em-réf} = C_{ass} \cdot (\Omega_{réf} - \Omega_{mec}) \quad (III.2)$$

Avec :

C_{ass} : Régulateur de vitesse

$\Omega_{réf}$: Vitesse de référence

Selon l'équation la vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_{Turbine} = \frac{\lambda \cdot V_v}{R} \quad (III.3)$$

Pour la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} et la valeur maximale de coefficient de puissance $C_{p,max}$, la vitesse de référence de la turbine est :

$$\Omega_{réf} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (III.4)$$

L'efficacité de cette commande est assurée par le régulateur de vitesse qui doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.

III-3-1-2 MPPT sans asservissement :

la caractéristique $C_p(\lambda)$ en forme parabolique admet un maximum C_{pmax} pour λ_{opt} .

La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance, lui-même nécessite la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent. Pour une vitesse du vent V_v donnée correspond à une vitesse de rotation qui donne λ_{opt}

Et par conséquent, pour que le système fonction en puissance maximale, la loi de commande pour la référence du couple électromagnétique est [41] :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul $C_{mec}=0$.
- Le couple résistant du aux frottements peut être négligé $C_f \approx 0$.

Sachant que :

$$C_{mec}=C_{em}-C_{eol}-C_f=0 \quad (III.5)$$

Alors :

$$C_{em}=C_{eol}=C_{aero} \quad (III.6)$$

A partir du couple aérodynamique on estimation le couple électromagnétique de référence :

$$C_{em-ref}=C_{aér-est} \quad (III.7)$$

De l'équation du couple de la turbine, on va déduire l'expression du couple aérodynamique estimé :

$$C_{aér-est}=\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{T-est}} \cdot V_{v-est}^3 \quad (III.8)$$

Avec :

$$\Omega_{T-est} = \Omega_{mec} \quad (III.9)$$

$$V_{v-est}=\frac{R \cdot \Omega_{T-est}}{\lambda} \quad (III.10)$$

L'expresion du couple électromagnétique de référence est donné par la relation suivant :

$$C_{em-ref}=\frac{1}{2} \cdot \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (III.11)$$

La puissance extraite est en fonction de λ , alors pour qu'elle soit maximale on doit avoir : $\lambda = \lambda_{opt}$ qui correspond au coefficient de puissance C_{pmax} . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em-ref}=\frac{1}{2} \cdot \frac{C_p}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (III.12)$$

En mettant :

$$C_{em-ref}=\frac{1}{2} \cdot \frac{C_p}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \quad (III.13)$$

Pour les conditions optimales:

$$C_{em-ref} = K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \tag{III.14}$$

Dans l'algorithme MPPT contrôlé en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée, on détermine le couple de référence comme le montre la figure (III.13).

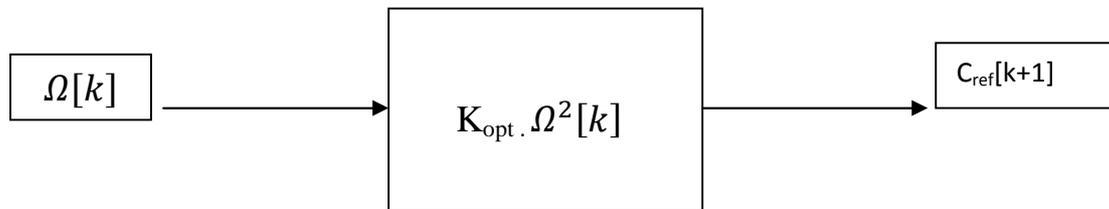


Figure (III.13) : couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.

III-3-2 Simulation du fonctionnement de la turbine avec l'algorithme MPPT :

Les résultats de simulation du fonctionnement de la partie mécanique avec l'algorithme MPPT et non connectée à la génératrice sont présentés ci-dessous. La figure (III.14) représente le schéma bloc de simulation.

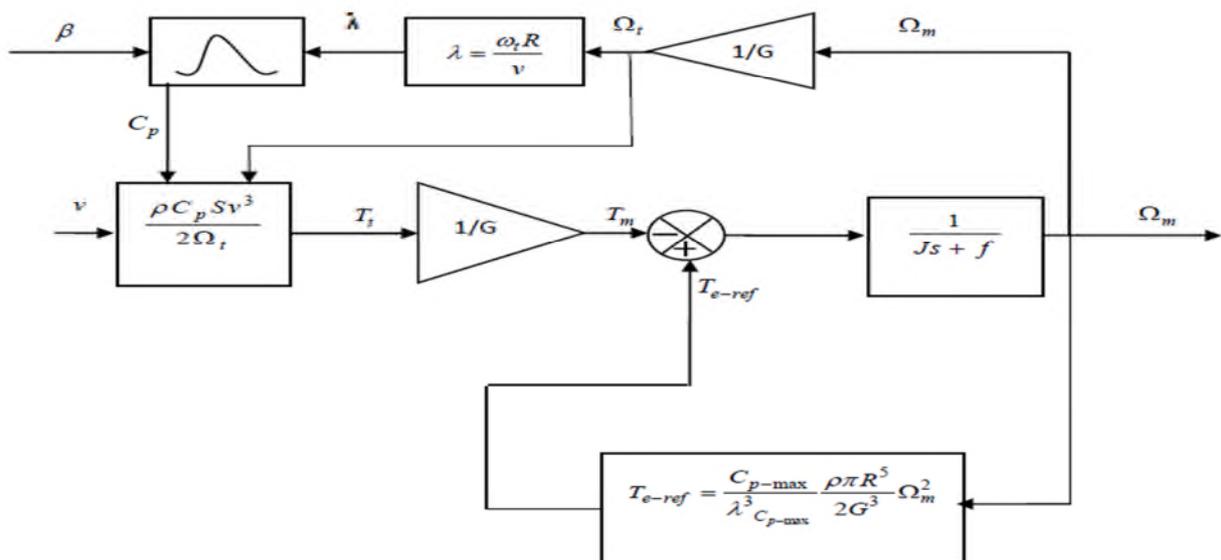


Figure (III.14) : schéma de la turbine éolienne avec MPPT.

Pour vérifier le fonctionnement de la turbine éolienne, on applique un échelon de vitesse du vent de 12m/s et puis 16m/s après un temps de 10s, les résultats de simulation obtenue sont indiqués sur les courbes suivantes :

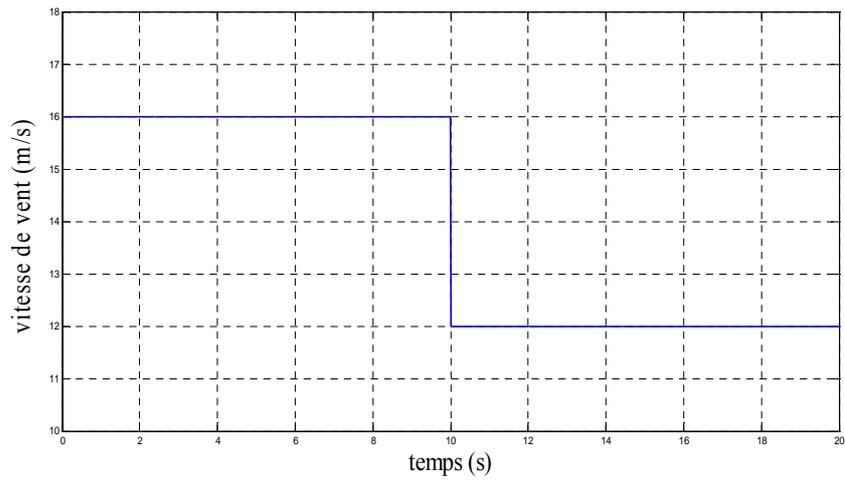


Figure (III.15) : vitesse du vent en fonction de temps.

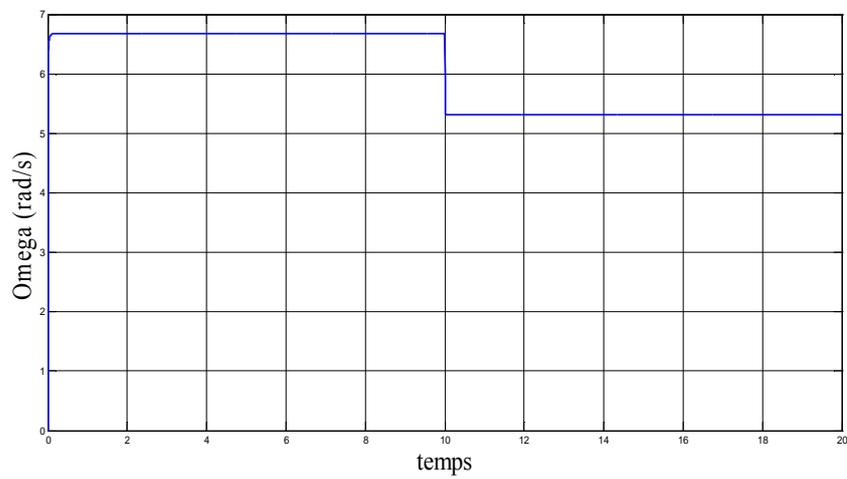


Figure (III.16) : Allure de la vitesse de la turbine en fonction de temps.

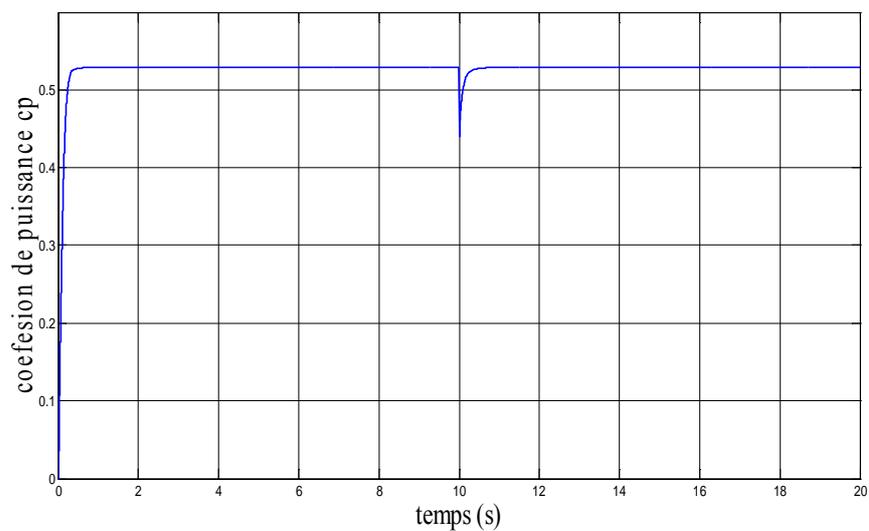


Figure (III.17) : coefficient de puissance Cp optimisé fonction de temps.

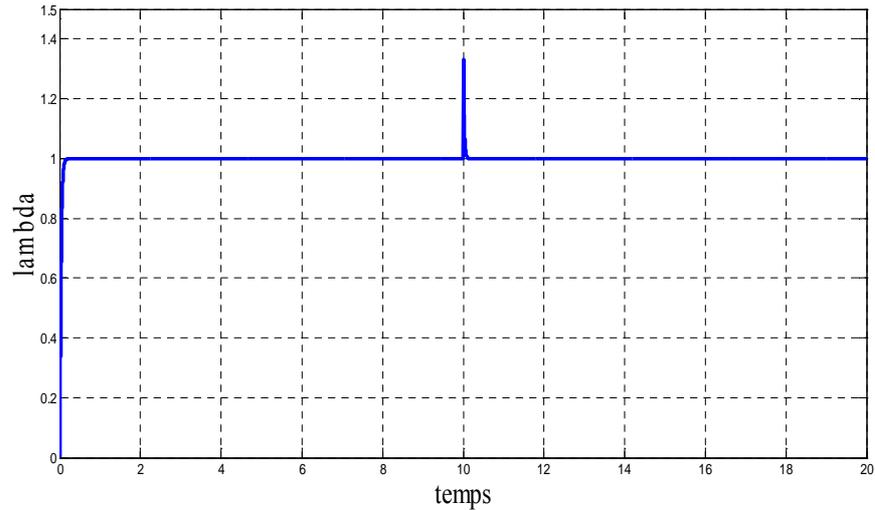


Figure (III.18) : Vitesse spécifique optimale en fonction de temps.

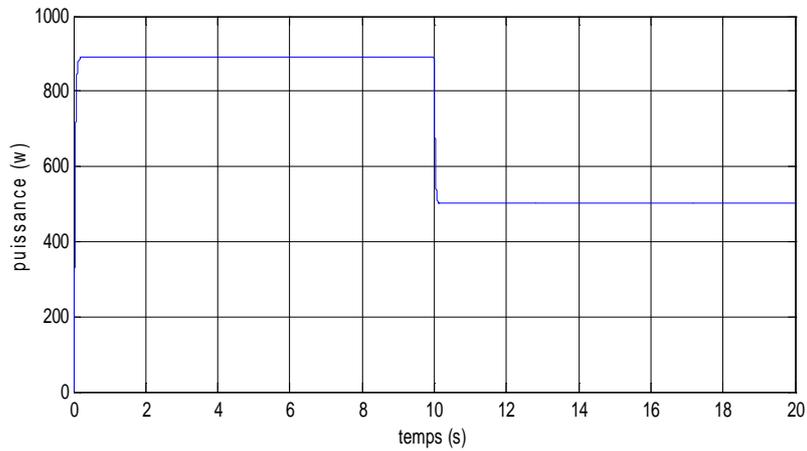


Figure (III.19) : puissance de la turbine en fonction de temps.

D'après la figure (III.16) on voit que la vitesse de la turbine éolienne suit la variation de la vitesse du vent figure (III.15) pour permettre de garder un rapport de vitesse à sa valeur optimale, cela permet d'avoir un coefficient de puissance maximale figure (III.17) quelque soit la vitesse.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation des deux chaînes de conversion éolienne et photovoltaïque qui fonctionnent au point maximal de puissance (MPP).

On peut conclure que pour avoir une meilleure connexion entre les deux chaînes de conversion (éolienne et photovoltaïque) et la charge et pour produire le maximum de puissance, la méthode de poursuite du point de puissance maximale doit être utilisée.

IV-1 INTRODUCTION

Après avoir modélisé et simulé indépendamment les deux chaînes de conversion d'énergies (éolien et photovoltaïque), on les a couplés ensemble pour avoir un système hybride, pour assurer une alimentation continue de notre charge quelque soit les conditions météorologique.

Un bon dimensionnement s'avère important pour un bon fonctionnement et une bonne exploitation du système de pompage, car l'efficacité de toute installation électrique dépend essentiellement de la rigueur de son dimensionnement et influe directement sur le cout et les performances de l'installation.

Le dimensionnement de notre installation sera organisé de la façon suivante :

- Détermination de la puissance de charge (énergie consommée).
- Dimensionnement des systèmes éolien et photovoltaïque

IV-2- Etapes de dimensionnement d'un système de pompage [42]

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

➤ Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie.

Les besoins en eau estimés pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail.

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journaliers et l'autonomie requise du système.

➤ Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire nous mène à dimensionner la pompe, et pour la dimensionner on doit tenir compte de deux facteurs suivants :

- La quantité d'eau requise.
- La hauteur que doit convaincre la pompe.

La puissance hydraulique P_h nécessaire pour faire déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \cdot q_v \quad (\text{IV. 1})$$

Avec :

g : Accélération de la pesanteur (9.81m/s²).

h : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe(m).

q_v : Débit volumique (m³/s).

ρ : Masse volumique d'eau (1000kg/m³).

➤ **Choix des composantes**

Nous allons dimensionner les différents éléments de notre système pour un réservoir d'eau, une hauteur géométrique et un débit nominal.

• **Dimensionnement des panneaux**

La puissance du générateur photovoltaïque (P_{pv}) à installer doit tenir compte de l'énergie journalière demandée par la charge (E_c), de la durée de pompage nécessaire pour satisfaire les besoins journaliers en eau égale à (τ_p) et des pertes environ de la puissance attribuable à la température et à la poussière, la dimension théorique de celui-ci sera de :

$$P_{pv} = \frac{E_c}{\tau_p (1 - \sum P_{pertes})} \quad (\text{IV.2})$$

Le nombre de panneaux nécessaires se calcule par :

$$N_p = \frac{P_{pv}}{P_m} \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

$P_m = 110W$: Puissance maximale délivrée par le générateur pour les conditions standards (E=1000W/m², T=25°C)

• **Dimensionnement du moteur asynchrone**

Le dimensionnement du moteur, réside dans le calcul de la puissance électrique qu'il lui faut pour entrainer la pompe, cette puissance est exprimée en (W) et se calcule par la puissance mécanique requise par la pompe et le rendement du moteur :

$$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta_m} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

η_m : Rendement du moteur.

P_{mec} : Puissance mécanique requise par la pompe.

En tenant compte des pertes de puissance au niveau de l'onduleur, la puissance reçue par le moteur sera égale à la puissance délivrée par l'ensemble des modules PV soustraite des pertes au niveau de l'onduleur. Nous aurons par la suite :

$$P_d = \frac{P_{ele}}{\eta_{ond}} \quad (IV.5)$$

Avec :

η_{ond} : Rendement de l'onduleur

Les besoins journaliers énergétiques en électricité peuvent être évalués comme suit :

$$E_c = P_d \tau_p \quad (IV.6)$$

Avec :

E_c : Energie électrique journalière demandée par la charge (kWh/j)

τ_p : Temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau et qui se calcule

Comme suit :

$$\tau_p = \frac{V}{Q_n} \quad (IV.7)$$

Avec

V : Quantité d'eau requise (m³)

Q_n : Débit nominal (m³/h)

- **Dimensionnement de la pompe**

Comme on a déjà dit lors du calcul de la puissance hydraulique nécessaire, la connaissance de cette puissance nous ramène à dimensionner la pompe avec un débit et une hauteur supposés connus.

La puissance hydraulique nécessaire pour faire déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par l'équation suivante :

$$P_{mec} = \frac{P_h}{\eta_p} \quad (IV.8)$$

Avec :

η_p : Rendement de pompe.

- **Dimensionnement du réservoir d'eau**

Le concepteur devra déterminer la dimension optimale du réservoir d'eau non seulement selon la durée anticipée de stockage pour pallier les variations journalières, mais aussi et surtout selon les besoins des utilisateurs et, bien sûr, selon le coût du système de stockage. Le dimensionnement du réservoir repose donc sur un certain nombre de facteurs qu'il faudra avoir évalués au préalable :

- ✓ Lorsque la pompe est au fil du soleil, le réservoir doit pouvoir stocker l'eau nécessaire pour la journée, ou au moins pouvoir stocker l'eau fournie par la pompe.
- ✓ le réservoir peut permettre de tirer l'eau de façon constante afin de maximiser le débit du forage ou du puits, surtout en période sèche.
- ✓ le réservoir doit permettre une certaine autonomie durant les journées peu ensoleillées.

La taille du réservoir solaire dépend du nombre de personnes et de la consommation d'eau par personne et par jour. La consommation d'eau est estimée en fonction du type de bâtiment et du confort de l'aménagement.

Le volume du réservoir doit représenter 1 à 1,5 fois la consommation d'eau quotidienne du village :

$$L_{rmin} = N_{fa} (N_{per} C_{per} + C_{b\acute{e}ta} + C_{irr}) \quad (IV.9)$$

Tel que :

L_{rmin} : Taille minimale du réservoir.

N_{fa} : Nombre de familles du village.

N_{per} : Nombre moyen des personnes pour chaque famille.

C_{per} : Consommation moyenne d'eau quotidienne pour une personne.

$C_{béta}$: quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation des bétails d'une famille quotidiennement.

C_{irr} : quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation des plantes du jardin d'une famille.

Mais la taille maximale du réservoir est calculée comme suit :

$$L_{r\min} = 1.5N_{fa} (N_{per}C_{per} + C_{béta} + C_{irr}) \quad (\text{IV.10})$$

Pour ce qui est de notre cas, on a pris un exemple d'un réservoir d'eau qui alimente un petit village à la wilaya de Bejaia qui contient 200 familles de 6 personnes avec une consommation économisée d'eau (une famille Algérienne) le volume moyen consommé par une personne est estimé à 25 Litres/jours.

Quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation des bétails d'une famille quotidiennement est 100 Litres/jours.

Quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation des plantes du jardin d'une famille est estimée par 100 Litres/jours.

Donc la consommation quotidienne du village est estimée par 70 m^3 (selon l'équation 9), mais nous on va prendre un réservoir de 100 m^3 à 110 m^3 (selon l'équation 10).

IV-3 Application [41]

- une hauteur $h = 12 \text{ m}$,
- Débit volumique $q_{v(\text{désiré})} = 21 \text{ m}^3/\text{h}$,
- Rendement de pompe $\eta_p = 55\%$,
- Rendement du moteur $\eta_m = 85\%$,
- Rendement de l'onduleur $\eta_{ond} = 95\%$,
- pertes qu'on suppose égales à 20%.

Donc on aura :

$$P_h = 0.68 \text{ kW}$$

$$P_{mec} = 1.24kW$$

$$P_{\acute{e}le} = 1.47kW$$

$$P_d = 1.55kW$$

$$\tau_p = 3.33h$$

$$E_c = 5.16kWh / jour$$

$$P_{pv} = 1.94kW$$

$$N_p \geq \frac{P_{pv}}{P_{max}} = 17.61 \rightarrow N_p = 18 \text{ Panneaux SIEMENS}$$

➤ **groupement en série-parallèles :**

Afin d'obtenir la puissance désirée, sous une tension convenable, il est nécessaire de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque (GPV).

$$N_{p.series} \geq \frac{V_{dc} (1-\alpha)}{V_m} \quad (IV.11)$$

$$N_{branches} \geq \frac{\frac{P_{pv}}{V_{dc} (1-\alpha)}}{I_m} \quad (IV.12)$$

Tel que :

α : Le rapport cyclique de l'élévateur de tension, $(1-\alpha) = 0.46$

V_{dc} : La tension continue à l'entrée de l'onduleur.

V_m : La tension au point de puissance maximal (panneau SIEMENS SM 110-24) dans les conditions standards.

I_m : Le courant au point de puissance maximal (panneau SIEMENS SM 110-24) dans les conditions standards.

D'après les formules (11) et (12), et pour $V_{dc} = 465V$, on aura :

$$N_{p.series} = 6 \text{ Panneaux en séries.}$$

$$N_{branches} = 3 \text{ Branches en parallèles.}$$

Le schéma de générateur photovoltaïque proposé est présenté sur la figure (IV.1) :

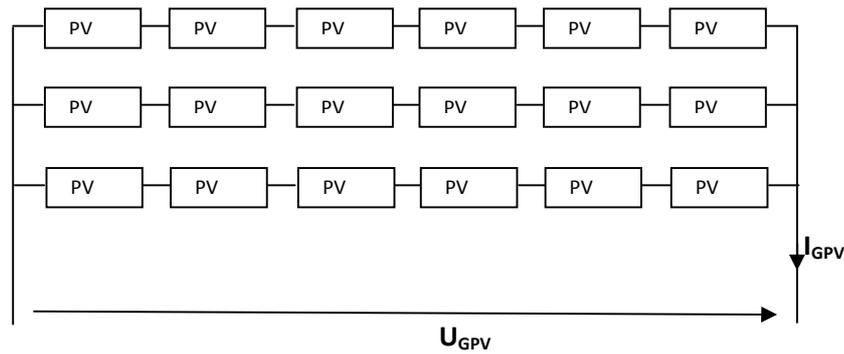


Figure IV.1 Le schéma de générateur photovoltaïque proposé

Comme on travail avec le modèle à une diode simplifié donc :

$$U_{GPV} = N_{p.series} * V_{pv} = 6 * 35 = 210V$$

$$I_{GPV} = N_{branches} * I_{pv} = 3 * 3.14 = 9.42A$$

$$P_{PV} = U_{GPV} * I_{GPV} = 210 * 9.42 = 1.978kW$$

IV-4- Commande vectorielle de moteur asynchrone [14]

Pour commander une machine alternative, on rencontre des difficultés dans le fait qu'il existe un couplage fort entre les variables d'entrées, sortie et internes.

Afin d'obtenir les performances souhaitées, la stratégie de commande des machines à courant alternatif consiste souvent à rendre le comportement électromécanique similaire à celui d'une machine à courant continu. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit :

- Le flux statorique ;
- Le flux rotorique ;
- Le flux d'entre fer ;

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [13]

IV-5- Commande MLI

La MLI est une stratégie de commande analogique, elle est utilisée pour générer les signaux de commande qui permettent l'ouverture et la fermeture des interrupteurs utilisée dans les deux convertisseurs de la chaine étudiée. Le principe de MLI se base sur la comparaison entre un signal sinusoïdal appelé référence et un signal triangulaire ou en dents de scie appelé porteuse, tel que $f_{porteus} > 20 f_{référence}$, on obtient a la sortie des convertisseurs des tensions ou des courants en forme de plusieurs créneaux rectangulaires de largeurs convenable.

IV-6- Résultats de simulation

La figure (IV.2) montre le schéma global du système de pompage hybride (photovoltaïque, éolien), qui contient un générateur photovoltaïque de 18 panneaux SIEMENS (génération principal) et le générateur éolien de 1KW (générateur secondaire).

La simulation de ce système global se fait sous Matlab/Simulink

$$\phi_{ref} = 0.7 \text{ web}$$

$$V_{dc} = 465 \text{ V}$$

$$P_{hyb} = P_{gpv} + P_{éol}$$

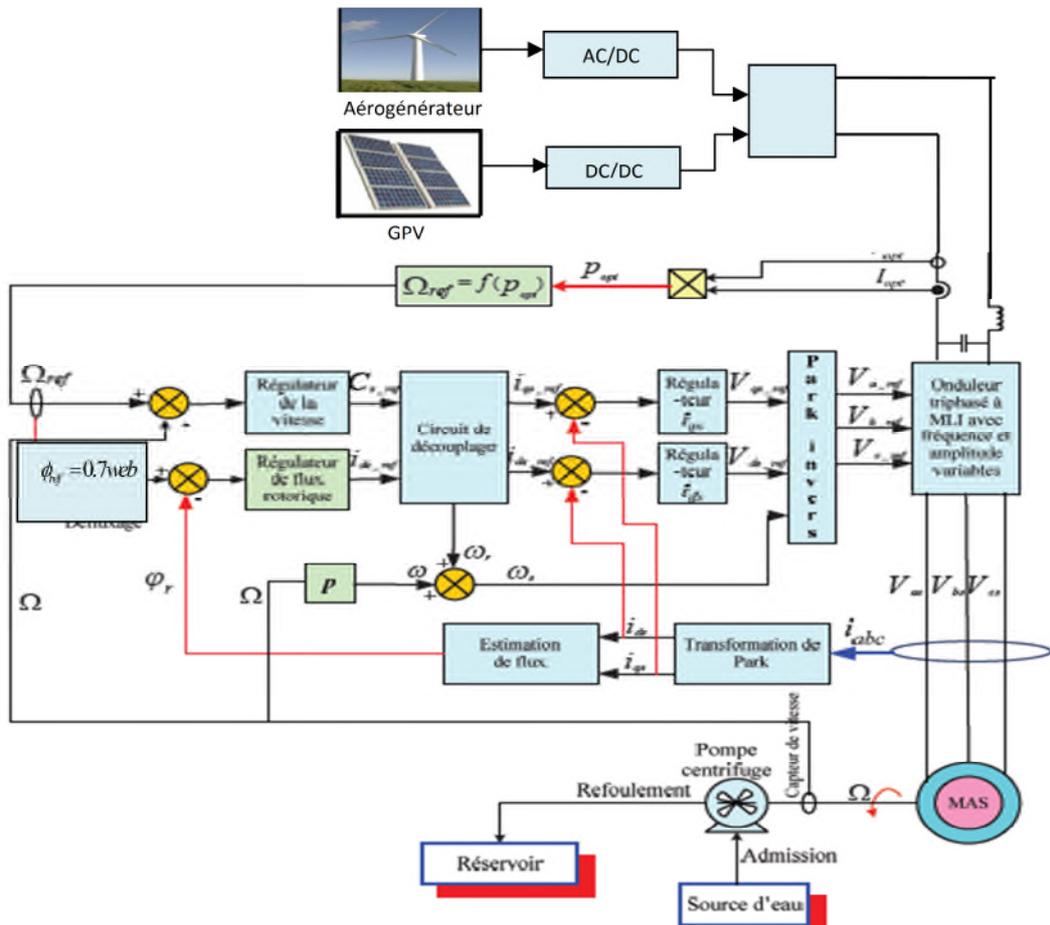


Figure (IV.2) : schéma global du système de pompage hybride.

Les figures suivantes montrent le comportement du système hybride testé sous des variations climatiques (vent et éclairage), nous avons utilisé un profil d'éclairage et un profil de vent représenté respectivement dans les figures (IV.3) et (IV.4)

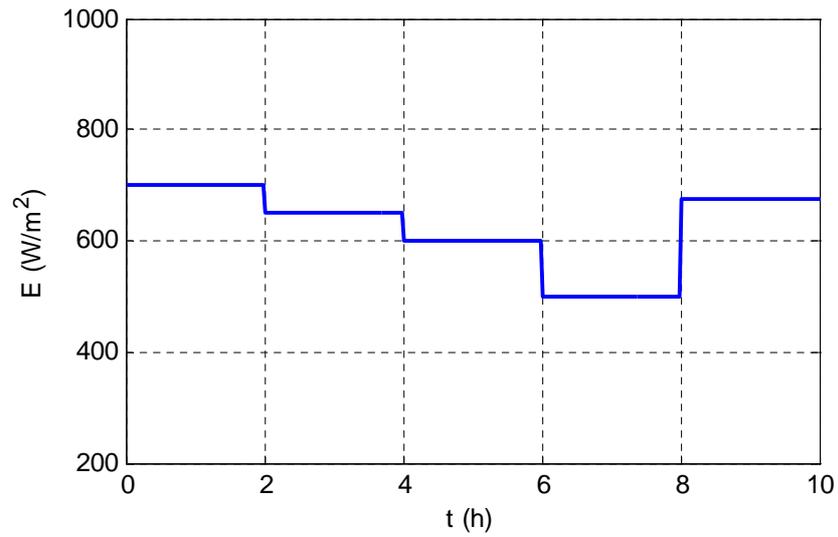


Figure (IV.3) : Variation de l'ensoleillement.

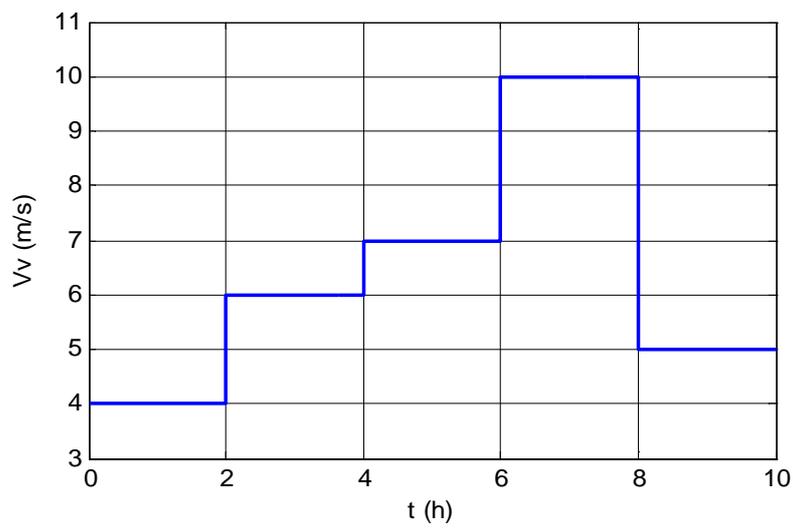


Figure (IV.4) variation de la vitesse de vent.

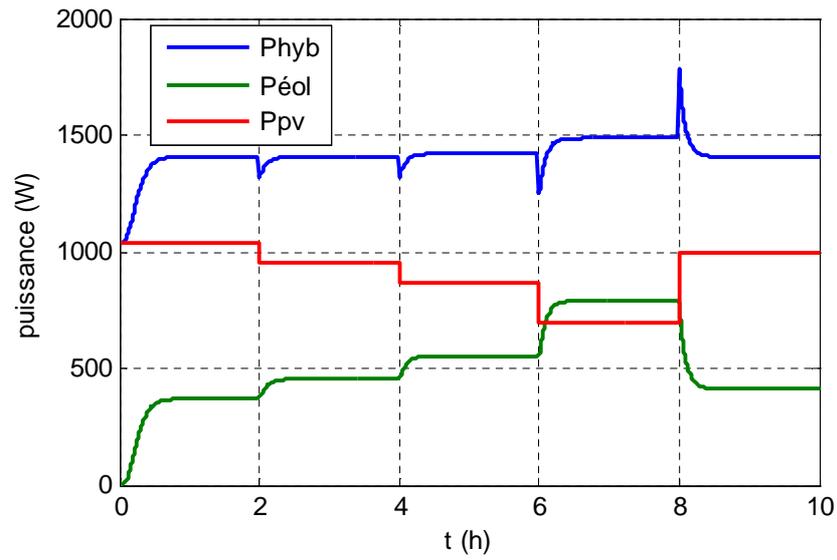


Figure (IV.5) : Allure des puissances.

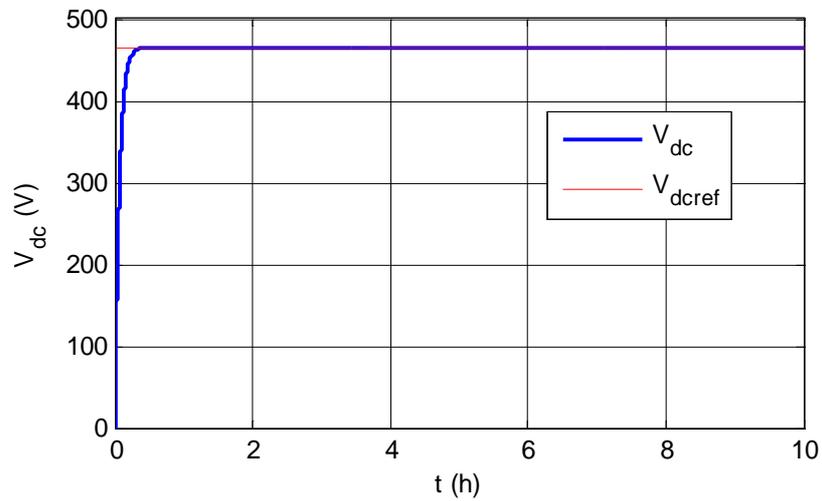


Figure (IV.6) : Tension de bus continu Vdc.

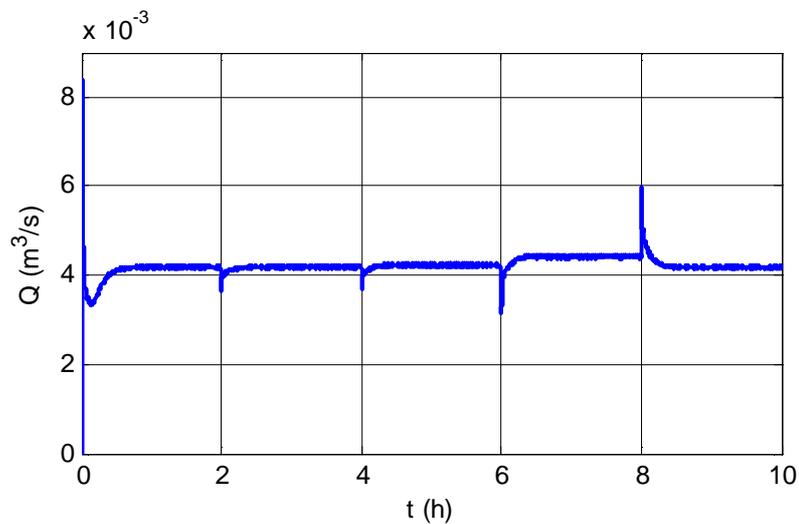
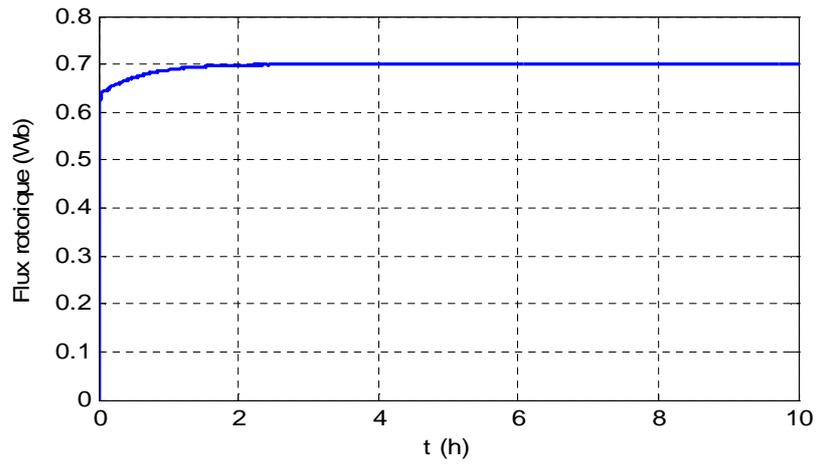


Figure (IV.7) : Allure de débit en fonction de temps.



Figure(IV.8) : Allure de flux en fonction de temps.

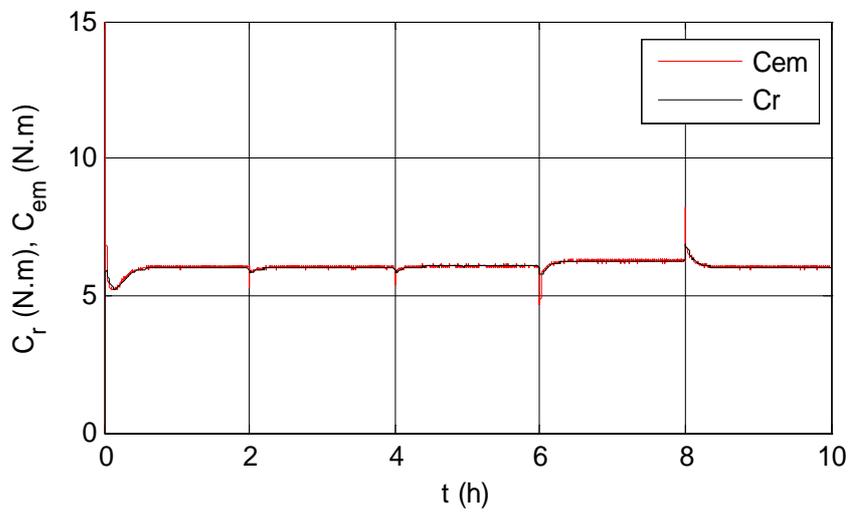


Figure (IV.9) Allure de couple en fonction de temps.

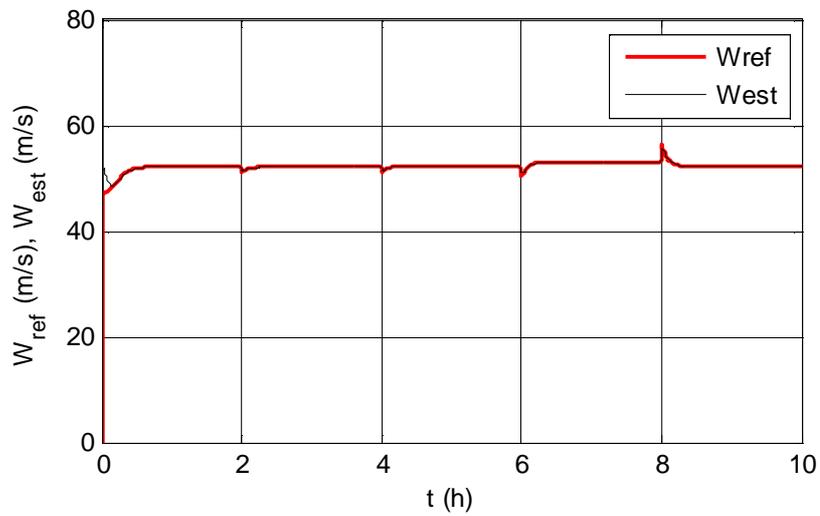


Figure (IV.10) : allure de vitesse en fonction de temps.

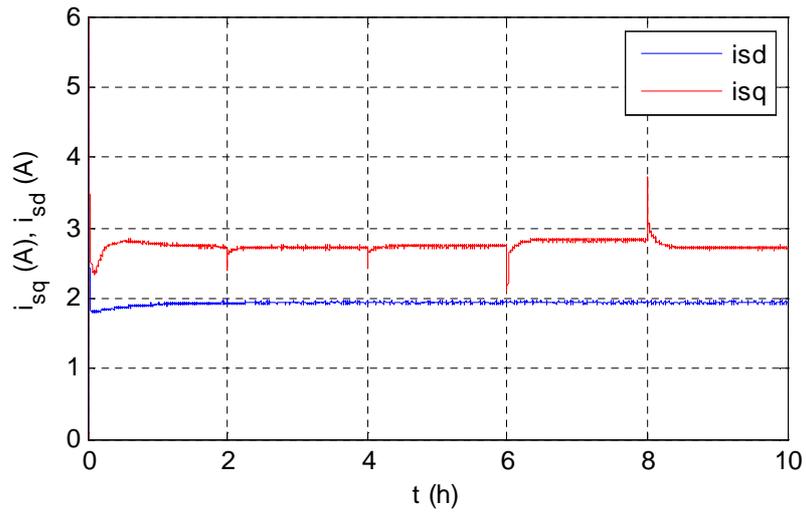


Figure (IV.11) : Allure des I_{sd} et I_{sq} en fonction de temps.

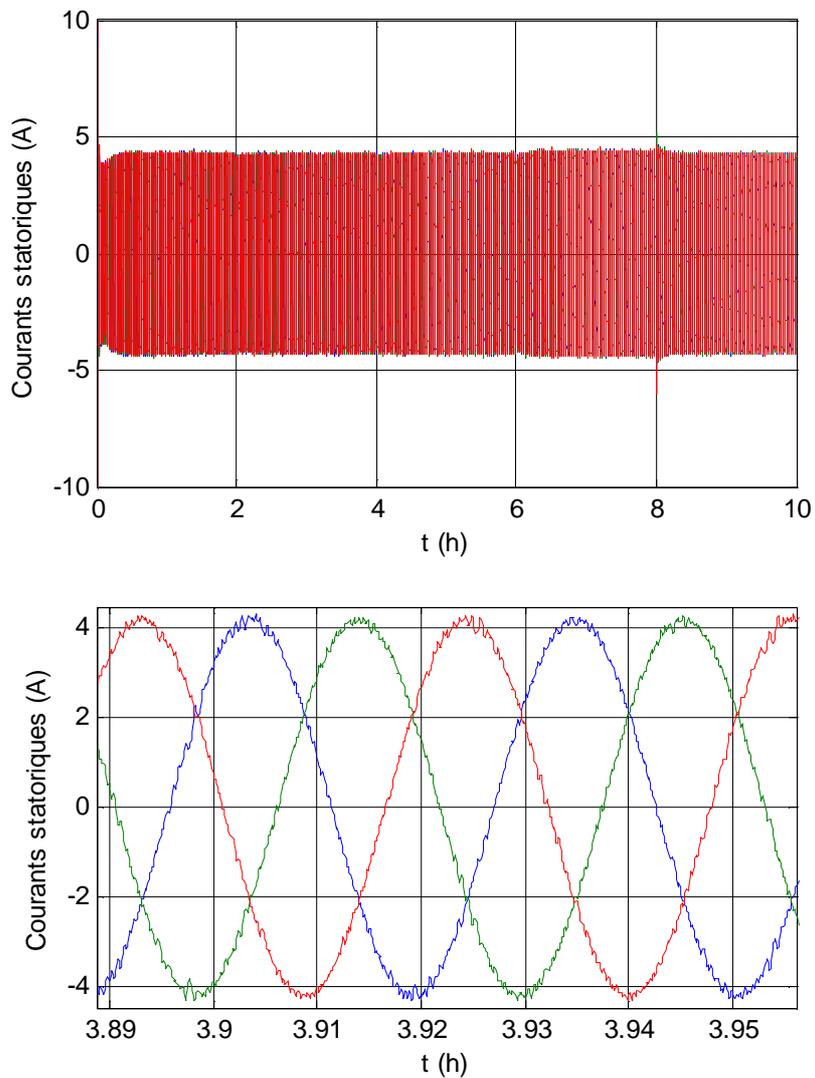


Figure (IV.12) : Les courants statoriques de la MAS et le Zoom.

On voit bien que la tension V_{dc} est bien régulée et suit la référence qui est de 465V, la vitesse de la MAS suit l'allure de la puissance hybride, le courant I_{sd} suit la référence du flux qui suit sa référence fixé à 0.7, le courant I_{sq} suit sa référence qui est l'image du couple, on constate que les courants statorique de la MAS sont sinusoïdaux et que le débit suit la variation de la vitesse qui est dû aux variations des conditions météorologiques.

IV-7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné les différentes composants de système de pompage hybride on a trouvé un générateur photovoltaïque composé de 18 panneaux considéré comme une source principale et une éolienne comme source secondaire pour la compensation. Puis on a procédé à la simulation du système globale qui résume l'alimentation de la pompe par la somme de la puissance produites par les deux sources.

Conclusion générale

Notre travail s'est porté sur la commande et optimisation de système de pompage hybride, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un générateur éolienne, des convertisseurs d'électronique de puissance et d'un groupe motopompe.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur les systèmes hybrides et donné un aperçu sur les différentes combinaisons et une brève description du système de pompage hybride, en suite une modélisation des différents composants du système autonome, qui est composée d'une turbine éolienne, avec une génératrice asynchrone et de panneaux photovoltaïque. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que le groupe moteur-pompe qui est composé d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge a été faite en chapitre II.

Nous avons décrit par la suite, la commande des deux chaines de conversion d'énergie. La commande à puissance maximale (MPPT) à été appliquée au système photovoltaïque suivant la méthode basée sur l'algorithme Perturbation et Observation (P&O) et optimisation de la chaine de conversion éolienne est effectué en utilisant l'algorithme MPPT classique. Les deux commandes MPPT ont permis de fournir une puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques.

Le dimensionnement et l'application de la commande vectorielle, et simulation de l'installation du système hybride a été présenté dans le quatrième chapitre. On a simulé le système global en appliquant différents profils (l'ensoleillement, vitesse de vent), les résultats de simulation montrent bien l'efficacité des commandes appliquées aux deux systèmes, le débit obtenu est variable en fonction des variations des conditions météorologiques.

Références bibliographiques

- [1] A.T.Singo, «système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», Thèse Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I 2010.
- [2] H.Hassini. «Modélisation simulation et optimisation d'un système hybride éolien photovoltaïque», Mémoire de magister de l'université Abou-Baker Belkaid, Tlemcen, 2010.
- [3] Dari Med El-Hadi : « Intégration d'une éolienne sur un réseau électrique isolé » Mémoire de Master en Electrotechnique. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [4] A. Attar «les énergies renouvelable» ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des ressources en eau.
- [5] B.Feleche, D.Delagnes «Energie solaire photovoltaïque» ; Energie solaire photovoltaïque. Doc, B.Flèche- D. Delagnes, juin 2007.
- [6] K.Nishioka, N.Sakitani, K.Kurobe, Y. Yamamoto. Y. Ishikawa, Y. Uraoka, T. Fuyuki, Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline Si solar cells using modified equivalent circuit model, Journal Appliqué de physique, vol. 42, pp: 7175-7179,2003.
- [7] S.Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de Doctorat de l'université de Béjaia, 2009.
- [8] Alain Bilbao Learreta, «Réalisation de Technique MPPT numérique» Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Université Virgile, Septembre2006.
- [9] L.ZAROOUR «Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de doctorat en électrotechnique, université de Constantine, 2010.
- [10] Energies Renouvelables. <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [11] B.Fellah «système de hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah» mémoire de magister de l'université Abou-Baker Belkaid, Tlemcen 2012.
- [12] [http : 1 /basetpe.free.fr/tpc 1/éolien/fonctionnement _ eolien.html](http://1/basetpe.free.fr/tpc/1/éolien/fonctionnement_eolien.html).
- [13] B. Robyns, B. François, F. Degobert et J. P. Hautier « Commande vectorielle de la machine Asynchrone, désensibilisation et optimisation par la logique floue », Editions Technip, France, Juillet 2007.

- [14] K. Idjdarene, «Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes» thèse de doctorat de l'université de Bejaia, 2009.
- [15] L. Leclercq «Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [16] N. Cherfia «Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens», mémoire de Magister de l'université Constantine, 2010.
- [17] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis, IEEE industry applications St Louis, November , 1998..
- [18] L. Meziane, S. Oublaïd «Etude d'un system de pompage alimenté par une source hybride (éolienne-photovoltaïque)», Mémoire de Master de l'université de Bejaia, 2014.
- [19] M. Lopez «contribution à l'optimisation d'un system de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de doctorat« sciences et technologies de l'information des télécommunications et des systèmes » université paris-sud11, 2005.
- [20] H.Camblong «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable» thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers centre de Bordeaux, Décembre 2003.
- [21] KY. Thierry, S.Maurice «système photovoltaïque dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte à goutte», Mémoire de DEA en physique Appliquée, université d'Ouagadougou, 2010.
- [22] A.Belhocinie, Zaidi «étude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome» mémoire de master université de Bejaia, 2012.
- [23] F. Bendjoudie, F.lakhdari «étude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries» mémoire de master université Bejaia 2014.
- [24] cours de génie électrique. Mendés France Épinal.
- [25] I.Bendjamâa, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister université Abou-Baker Belkaid, Tlemcen, unité de recherche matériaux et énergies renouvelables, école doctorale: énergies renouvelables, 2012.

- [26] A .LOUADAH « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque
Mémoire de master en électromécanique; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA.
BEJAIA, 2009
- [27] S. BENSMAIL « Contribution à la modélisation et à l'optimisation des systèmes
Photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique Option : Systèmes Electro
Energétiques; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, 2012
- [28] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier – « Introduction à l'électrotechnique approfondie »,
Technique et Documentation, France, ISBN 2-85206-089-2,
- [29] E. Levi, M. Sokola – « A novel saturation adaptive rotor flux estimator for rotor flux
Oriented induction machines », 7th European Conference on Power Electronics and
ApplicationsEPE'97, Trondheim, Norway, 8-10 September 1997, pp. 1-8
- [30] J. E. Brown, K. P. Kovacs et P. Vas – « A method of including the effects of main flux
Saturation in the generalized equations of AC machines », IEEE saturation in the
Generalized equations of AC machines », IEEE Transaction on Power Apparatus and
Systems, vol. PAS.102, No. 1, 1983.
- [31] P. Vas – « Generalized analysis of saturated AC machines », Archiv für Electrotechnik, No.
64, 28-29 Janvier, 1981, pp. 57-62.
- [32] D. Rekioua, K. Idjdarene, D. Aouzellag, T. Rekioua et A. M. Tounzi –«Modelling
And study of an autonomous induction generator taking the saturation into account », 15th
8 International Conference on modeling and Simulation of Electric Machines, Converters
And Systems (ELECTIMACS 2005), Hammamet, Tunisia, April 17-20, 2005, accepté
- [33] R. Ibtouen, M. Benhaddadi, A. Nesba, S, Mekhtoub et O. Touhami –« Dynamic
Performances of a self excited induction generator feeding different static loads », 15th
International Conference on Electrical Machine ICEM 2002, Brugge, Belgium , 25-28
August 2002, pp. 1-6.
- [34] M. MAYOUF, «contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aiment
Permanente », Université de Biskra, Mémoire de Magister 2008.
- [35] Meziane S « Implantation expérimentale de L'MPPT pour un système de génération
Hybride solaire-éolien » Thèse de Magistère Université de Batna 2009.
- [36] A .MERECKI «Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une
Éolienne de petite puissance » Thèse de doctorat institut nationale polytechnique de
Toulouse, France 2005.

- [37] TABTI Ali, AHMEDI Zahir, « Commande et modélisation d'une éolienne à base d'une MSAP couplé au réseau » Mémoire de Master, université A-Mira de Bejaia. 2013.
- [38] H. FOCH et F. FOREST, « Onduleur de tension : mise en œuvre », Technique de L'ingénieur, réf. D3177 2000.
- [39] Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Doctorat en Electrotechnique
Optimisation floue- génétique d'un système de pompage éolien Présentée par sciences
Option: Guettaf abderrazak Soutenue publiquement le : 28/03/2013 Université Mohamed Khider – Biskra
- [40] S.EL AIMANI, «Modélisation de différentes Technologie D'Eoliennes intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat 2004, UNIVERSITE DES SCIENCE ET TECHNOLOGIES DE LILE.
- [41] K. Idjdarene « analyse et contrôle d'une chaine de conversion électrique par énergie Éolienne» Mémoire de magister en électrotechnique, université de Bejaia 2005.
- [42] C. Serir, «Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque». Mémoire de Magister de L'Université de Bejaia, Algérie, 2012.
- [43] K.Djermouni, «Etude d'Algorithmes MPPT Appliqués aux Systèmes de Pompage Photovoltaïque», mémoire d'ingénieur, université A.MIRA Béjaïa, 2010.

ANNEXE

➤ Paramètres de la machine asynchrone [42]

La machine utilisé est machine asynchrone à cage d'écurueil standard. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Puissance nominale $P_n=1.5kW$.
- Tension 220/380V.
- Courant 5.2/3A.
- La vitesse de rotation nominale $N=1460tr/mn$.
- Nombre de paire de pôle $p = 2$
- Inductance cyclique statorique $L_s = 0.4662 H$
- Inductance cyclique rotorique $L_r = 0.4662 H$
- Inductance cyclique mutuelle $M = 0.44 H$
- Résistance statorique $R_s = 5.75 \Omega$
- Résistance rotorique $R_r = 4.2 \Omega$
- Coefficient de frottement : $f = 0.0009 N.m.s/rad$
- Inertie : $J = 0.0003 N.m$

➤ Paramètres de la pompe centrifuge [43]

Vitesse nominale ω_n	150 rad/sec
Constante C_1	$4.923410 \cdot 10^{-3} m/(rad/sec)^2$
Constante C_2	$1.5826 \cdot 10^{-5} m/(rad/sec)(m^2/sec)$
Constante C_3	$-18144 m/(m^3/sec)^2$
hauteur géométrique H_g	12m
longueur de la canalisation l	7.4m
diamètre de la canalisation d	0.06m
coefficient de pertes de charge locales ou singulière ζ	6.3m
coefficient des pertes de charge dans la canalisation λ	0.036m
La gravitation g	$9.81m^2/s$