

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA
Faculté des Sciences technologies
Département Génie électrique

MEMOIRE de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master énergies renouvelables
Option : Energies renouvelables en électrotechnique.

Thème

Contrôle vectoriel d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage

Mémoire présenté par :

LALAMI Wahid

BOUKERRAM Rabah

Devant les Jury:

Nom et Prénom	Université	
Mr MADI.	UAM Bejaia	President
Mr BEKKA.	UAM Bejaia	Examineur

Encadreur :

M^{me} C. SERIR

Année universitaire 2018/2019

REMERCIEMENT

*Nous tenons tout d'abord à remercier **DIEU** le tout puissant, pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions très vivement notre Promotrice **Mme SERIR Chafiaa**, de nous avoir proposé le sujet, et de l'aide précieux qu'elle a toujours bien Voulu nous apporter, et pour nous tendre la main à chaque Fois qu'on a besoin.*

*Nous présentons aussi nos sincères remerciements au **président du jury et les membres de jury** examinateurs d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

Toute la promotion MASTER Energies renouvelables
2018/2019

Enfin, Nous tenons à remercier Hamza et tous ceux qui nous ont aidés de près et de loin à réaliser ce travail.

LALAMI et BOUKERRAM

DEDICACES

Nous dédions ce travail qui est le fruit de toute une vie d'études :

A ceux qui ont toujours dévoué et sacrifiés pour nous ;

Ceux qui nous ont aidés du mieux qu'ils puissent pour réussir ;

Ceux qui nous ont accompagnés tout au long de ce parcours ;

Ceux qui ont toujours été là dans nos moments de détresse ;

Nos chers parents

Nos frères et sœurs

Nos familles

Nos amis et camarades

Et à tous ceux qui nous sont chers

Wahid

Rabah

SOMMAIRE

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction 1

Chapitre I : généralité sur le système de pompage photovoltaïque avec stockage

I.1 Introduction.....	3
I.2 Histoire de photovoltaïque.....	3
I.3 Le solaire photovoltaïque.....	3
I.3.1 Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère.....	4
I.3.2 Spectre du rayonnement solaire.....	5
I.4 La cellule photovoltaïque.....	5
I.4.1 Principe de la conversion photovoltaïque.....	5
I.4.2 Types de cellules.....	6
I.4.2.1 Cellule en silicium amorphe.....	6
I.4.2.2 Cellule en silicium monocristallin.....	7
I.4.2.3 Cellule en silicium poly cristallin.....	8
I.4.3 Caractéristique d'une cellule PV à base de silicium.....	8
I.5 Le module photovoltaïque.....	9
I.5.1 Association en série.....	9
I.5.2 Association en parallèle.....	10
I.6 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	10
I.7 Les différents types de systèmes photovoltaïques.....	10
I.7.1 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	10
I.7.2 Systèmes hybrides.....	11
I.7.3 Systèmes photovoltaïques autonomes.....	11
I.7.3.1 Systèmes autonomes sans stockage électrochimique.....	11
I.7.3.2 Systèmes autonomes avec stockage électrochimique.....	11

I.8 Utilisation des systèmes solaires.....	12
I.9 Les systèmes de pompages photovoltaïques.....	12
I.9.1 Le pompage au fil du soleil.....	12
I.9.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries)	13
I.10 Les types du stockage	14
I.10.1 Stockage de l'eau	14
I.10.2 Stockage électrochimique	14
I.10.2.1 Les batteries	14
I.10.2.1.1 Principe de fonctionnement des batteries.....	15
I.10.2.1.2 Caractéristiques générales des batteries.....	15
I.10.2.1.3 Batterie plomb acide	15
I.11 Les convertisseurs statiques.....	15
I.11.1 Convertisseur DC/AC (Onduleur)	16
I.11.2 Convertisseur DC/DC (hacheur).....	16
I.11.2.1 Convertisseur Buck (hacheur série).....	16
I.11.2.2 Convertisseur Boost (hacheur parallèle).....	16
I.11.2.3 Convertisseur Buck-Boost	17
I.12 Groupe moteur-pompe	17
I.12.1 Moteurs	18
I.12.1.1 Moteur à courant continu	18
I.12.1.2 Moteur à courant alternatif.....	18
I.12.1.2.1 Les moteurs synchrones	18
I.12.1.2.2 Les moteurs asynchrones	19
I.12.2 Pompes.....	20
I.12.2.1 La pompe volumétrique	20
I.12.2.2 La pompe centrifuge	21
I.13 Conclusion	23

Chapitre II : modélisation du système de pompage photovoltaïque avec stockage

II.1 Introduction	24
II.2 Description du système à étudier	24
II.3 Modélisation du système	25
II.3.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	25
II.3.1.1 Le modèle à une diode	25
II.3.1.2 Modèle à deux diodes	26
II.3.1.3 Le modèle explicite	27
II.4 Modélisation de l'hacheur survolteur	31
II.5 Modélisation d'un hacheur Buck-Boost	32
II.6 Modélisation du bus continu.....	33
II.7 Modélisation du convertisseur DC/AC.....	33
II.8 Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil	35
II.8.1 Equations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil	36
II.8.1.1 Equations des tensions et des flux	36
II.8.1.2 Modèle de Park de la Machine Asynchrone	37
II.9 Modélisation de la batterie	39
II.10 Modélisation de la pompe centrifuge	43
II.11 Conclusion	44

Chapitre III : Optimisation, contrôle et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque avec stockage

III.1 Introduction	45
III.2 Adaptation de l'énergie photovoltaïque.....	45
III.2.1 La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT))	45
III.2.2 La méthode Perturbation & Observation (P&O).....	46
III.3 Commande des onduleurs	48

Sommaire

III.3.1 Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis.....	48
III.4 Choix de la méthode de dimensionnement	49
III.5 Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque	50
III.5.1 Evaluation des besoins en eau	50
III.5.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire	50
III.5.3 Détermination de l'énergie solaire disponible.....	51
III.5.3.1 Inclinaison et orientation optimale des capteurs photovoltaïques.....	51
III.5.3.2 Mois de dimensionnement	51
III.5.4 Choix des composantes	52
III.6 Commande de la machine asynchrone	57
III.6.1 Mode de réglage de la vitesse du moteur asynchrone	57
III.6.2 Principe de la commande.....	58
III.6.3 Choix d'orientation du flux	59
III.6.4 Expressions des tensions statorique avec flux rotorique orienté	61
III.6.5 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique.....	62
III.6.6 Calculs des régulateurs	62
III.7 Simulation du système contrôlé par la commande vectorielle	63
III.8 Gestion de l'énergie entre les différents composants du système.....	69
III.8.1 Simulation du système de pompage photovoltaïque avec stockage.....	71
III.9 Conclusion.....	75
Conclusion générale	76

Bibliographie

Annexes

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

Wc	La puissance photovoltaïque exprimée en Watt crête.
PV	Photovoltaïque.
GPV	Générateur photovoltaïque.
V_{co}	tension de circuit ouvert (circuit ouvert) (V).
I_{cc}	courant de court-circuit (A).
I_{pv}	courant délivré par le panneau photovoltaïque(A).
V_{pv}	tension générée par le panneau photovoltaïque(A).
P_{pv}	Puissance photovoltaïque(W).
I_{GPV}	Courant du générateur photovoltaïque (A).
V_{GPV}	Tension du générateur photovoltaïque(V).
T	Température (°C).
PPM	Point de puissance maximale.
MPPT	Poursuite du Point de Puissance Maximale (Maximal power point tracking).
V_{mpp} (V_{opt})	Tension au point de puissance maximal (V).
I_{ppm} (I_{opt})	Courant au point de puissance maximal (A).
DC	Courant continue.
AC	Courant alternatif.
HMT	Hauteur manométrique totale (m).
V_{dc}	Tension de bus continu (V).
I_{dc}	Courant de bus continu (A).
I_{ond}	Courant à l'entrée l'onduleur (A).
V_{sabc}	tension statorique(V).
I_{sabc}	courant statorique(V).

Liste des symboles et abréviations

φ_{sabc}	flux statorique(Wb).
φ_{rabc}	flux rotorique(Wb).
R_s	Résistance statorique(Ω).
R_r	Résistance rotorique(Ω).
C_{em}	Couple électromagnétique (N.m)
L_s, L_r	Inductances propres statoriques et rotoriques de la machine asynchrone (H).
M_s	Inductance mutuelle entre phases statoriques de la machine asynchrone (H).
M_r	Inductance mutuelle entre phases statoriques de la machine asynchrone (H).
M_{sr}	Inductance mutuelle maximale entre une phase de stator et une phase de rotor (H).
V_d	Tension direct(V).
V_q	Tension quadrature (V).
V_{sd}	Tension statorique direct(V).
V_{sq}	Tension statorique quadrature(V).
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique directe et quadrature(A).
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux statorique direct et quadratique(Wb).
I_{rd}, I_{rq}	Courant statorique direct et quadratique(A).
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotorique direct et quadratique(Wb).
φ_{ref}	Flux de référence (Wb).
J	Inertie de la machine ($Kg.m^2$).
ω_s, ω_r	Vitesse statorique, rotorique(rad/s).
Ω	Vitesse mécanique(rad/s).
ω_n	Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).
ω_{opt}	Vitesse optimale du moteur asynchrone (rad /s).
ω_{ref}	Vitesse de référence (rad/s).

Liste des symboles et abréviations

N_s	vitesse de synchronisme (tr/min).
N_r	Vitesse rotorique (tr/min).
g	Glissement.
P	Nombre de pair de pole.
f_s	Fréquence statorique Hz.
C_r	Couple résistant (N.m).
V_{bat}	Tension de la batterie(V).
I_{bat}	Courant délivré par la batterie(A).
P_{bat}	Puissance de la batterie (W).
EDC	Etat de charge de la batterie(%).
EDC_{max}	Etat de charge maximale de la batterie(%).
EDC_{min}	Etat de charge minimale de la batterie(%).
P_c	Les pertes de charges dans les canalisations(W).
P_n	Puissance nominale du moteur asynchrone(W).
Q_n	Débit nominal (m ³ / h).
q_v	Débit désiré (m ³ /s).
V	Quantité d'eau requise (m ³).
E_{ele}	Énergie requise pour la pompe (kWh).
P_{ele}	Puissance électrique nécessaire pour que le moteur fonctionne(W).
T_r	Transistor.
g	Accélération de la pesanteur (9.81 m/s ²).
ρ	Masse volumique d'eau (1000Kg/m ³).
P_d	Puissance délivrée par l'ensemble des modules.
η_{ond}	Rendement de l'onduleur(%).

Liste des symboles et abréviations

η_p	Rendement de pompe(%).
η_m	Rendement du moteur(%).
E_{elec}	Energie électrique journalière demandée par la charge (kWh/j).
σ	Coefficient de dispersion de blondel.
ξ	Coefficient d'amortissement.
K_p, K_i	Coefficients de proportionnalité et d'intégration.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Types de rayonnement solaire reçus au sol.....	4
Figure I.2 : Spectre du rayonnement solaire	5
Figure I.3 (a-b) : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.....	6
Figure I.4 : Silicium amorphe	7
Figure I.5 : Silicium Monocristallin.....	7
Figure I.6 : Silicium Poly cristallin.....	8
Figure I.7 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$	8
Figure I.8 : Cellules identiques en série.....	9
Figure I.9 : Cellules identiques en parallèle.....	10
Figure I.10 : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil	12
Figure I.11 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil	13
Figure I.12 : Caractéristique du débit pour le pompage avec stockage électrochimique.....	13
Figure I.13 : Principe de fonctionnement du pompage avec stockage électrochimique.....	14
Figure I.14 : Circuit électrique du hacheur « Buck ».....	16
Figure I.15 : Circuit électrique du hacheur « Boost ».....	17
Figure I.16 : Circuit électrique du hacheur « Buck-Boost ».....	17
Figure I.17 : Moteur à courant continu	18
Figure I.18 : Moteur synchrone	19
Figure I.19 : Moteur asynchrone.....	19
Figure I.20 : Pompe volumétrique	21
Figure I.21 : Courbes du couple et du débit d'une pompe volumétrique.....	21
Figure I.22 : Pompe centrifuge	22
Figure I.23 : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.....	22

Chapitre II

Figure II.1 : Système globale à étudier	24
Figure II.2 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle à une diode	25
Figure II.3 : Schéma électrique équivalent du modèle à deux diodes.....	27

Liste des figures

Figure II.4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$	28
Figure II.5 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	29
Figure II.6 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$	29
Figure II.7 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	30
Figure II.8 : hacheur survolteur	31
Figure II.9 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (buck-boost)	32
Figure II.10 : Modèle du bus continu.....	33
Figure II.11 : Circuit électrique de l'onduleur.....	34
Figure II.12 : Représentation de la machine asynchrone à cage d'écurueil	36
Figure II.13 : Modèle de Park de moteur asynchrone.....	38
Figure II.14 : Schéma équivalent du modèle électrique	40
Figure II.15 : Influence de la température sur la capacité	42
Figure II.16 : Variation de l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie pour différentes températures	42

Chapitre III

Figure III.1 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque.....	47
Figure III.2 : Organigramme de la méthode perturbation et observation (« C » est la largeur du pas de perturbation)	48
Figure III.3 : Illustration de la bande de courant à hystérésis.....	49
Figure III.4 : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaïa de 1998 à 2007	51
Figure III.5 : Le schéma de générateur photovoltaïque proposé	56
Figure III.6 : Principe de découplage	59
Figure III.7 : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer)	59
Figure III.8 : Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.....	62
Figure III.9 : Schéma bloc du réglage de flux par un PI	63
Figure III.10 : Schéma globale du système de pompage photovoltaïque contrôlé par la commande vectorielle	64
Figure III.11 : profil du l'ensoleillement.....	64
Figure III.12 : Allure de la vitesse pour $(1000W/m^2)$	64
Figure III.13 : Allure du flux pour $(1000W/m^2)$	65

Liste des figures

Figure III.14 : les courants statorique pour (1000W/m ²)	65
Figure III.15 : Allure du courant quadratique I_{sq} et direct I_{sd} pour (1000W/m ²)	65
Figure III.16 : Allure du couple électromagnétique C_{em} , résistant C_r pour (1000W/m ²).....	66
Figure III.17 : Allure du débit pour (1000W/m ²)	66
Figure III.18 : Allure de la tension continu a l'entrée de l'onduleur (1000W/m ²).....	66
Figure III.19 : profil du l'ensoleillement	67
Figure III.20 : Allure de la vitesse pour (1000W/m ² et 500W/m ²).....	67
Figure III.21 : flux rotorique ϕ_{rd} pour (1000W/m ² et 500W/m ²)	67
Figure III.22 : les courants statorique pour (1000W/m ² et 500W/m ²).....	68
Figure III.23 : allure des courants quadratique I_{sq} et direct I_{sd} pour (1000W/m ² et 500W/m ²)	68
Figure III.24 : le couple électromagnétique C_{em} et résistant C_r pour (1000W/m ² et 500W/m ²)	68
Figure III.25 : Allure du débit pour (1000W/m ² et 500W/m ²)	69
Figure III.26 : Allure de la tension continue à l'entrée de l'onduleur (1000W/m ² et 500W/m ²)	69
Figure III.27 : Algorithme de gestion d'énergie du système globale.....	70
Figure III.28 : Tension aux bornes des batteries	71
Figure III.29 : Allure de l'état de charge de la batterie	72
Figure III.30 : Allure de la tension du bus continu.....	72
Figure III.31 : Allure de différentes puissances	72
Figure III.32 : allure de mode 1	73
Figure III.33 : allure de mode 2	73
Figure III.34 : allure de mode 3	73
Figure III.35 : allure de mode 4	74
Figure III.36 : allure de mode 5	74
Figure III.37 : Allure du débit	74

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

Tableau II.1 : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110..... 28

Chapitre III

Tableau III.1 : Caractéristique de l'onduleur choisis 55

Tableau III.2 : Dimensionnement du système de pompage 55



Introduction générale

Introduction générale

Une grande partie de la consommation mondiale d'énergie est assurée par les énergies d'origines fossiles (pétrole, gaz, ...). La consommation excessive de ces ressources énergétiques qui sont limitées, conduit à l'épuisement progressif de ces réserves et intensifie les rejets de gaz à effet de serre et donc la pollution de l'atmosphère qui donne lieu au changement climatique, face à ces conséquences alarmantes il est nécessaire de prendre en considération le développement des énergies alternatives dites sources d'énergies renouvelables (soleil, vent, courant d'eau, biomasse ou chaleur naturelle...), ces dernières sont distribuées dans l'espace, et pouvant être collectées et converties par l'intermédiaire des capteurs, elles permettent de réduire la consommation de combustibles d'origine fossile ou fissile, et par conséquent de réduire les impacts environnementaux et socio-économiques de nos besoins en énergie.

Dans ce contexte, notre étude s'intéresse à l'énergie solaire photovoltaïque, qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé.

L'énergie solaire est disponible partout sur notre planète en des degrés divers et elle est entièrement renouvelable. Son apport est variable au gré des jours et des saisons, mais elle est relativement prévisible.

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. [37]

Le pompage photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'il fonctionne avec ou sans batterie. Alors que la première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules photovoltaïques. Le pompage sans batterie ou « pompage au fil du soleil » utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [49], mais les réservoirs présentent un inconvénient car ils accumulent des résidus sur les parois et à la surface au fil du temps, c'est pour cela que nous avons opté pour un système de pompage photovoltaïque avec batteries, qui permet l'utilisation directe de l'eau. [14]

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire se porte sur le contrôle vectoriel d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage. Nous avons structuré notre travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on va définir le principe de la conversion photovoltaïque, ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque. On va présenter aussi les différents systèmes photovoltaïques existants. Notre application porte sur les systèmes de pompage photovoltaïque alors une description de ces différents composants sera donnée.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément constituant le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone à cage d'écureuil, la pompe centrifuge et la batterie.

Dans le troisième chapitre, nous allons nous intéresser à l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque, puis nous présenterons une méthode de

dimensionnement basés sur les besoins en eau. Ensuite nous présenterons le contrôle vectoriel de la machine asynchrone et son objectif. On termine ce chapitre par la conception d'un algorithme de gestion pour l'ensemble de l'installation.

Enfin on terminera notre travail par une conclusion générale, dans laquelle nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

Chapitre I

**Généralité sur le système de pompage
photovoltaïque avec stockage**

I.1 Introduction

Dans nos jours, la demande en eau est de plus en plus importante, le problème se multiplie en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier dans les régions désertiques. En effet un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service. [48]

Dans cette première partie, nous allons présenter des généralités sur l'énergie photovoltaïque, ensuite citer les différents types de pompage, ainsi que leurs composants et enfin nous ferons un choix sur chaque composant de système.

I.2 Histoire de photovoltaïque

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est apte à répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial. Celle-ci sera d'autant plus grande et d'autant plus rapide que des méthodes permettant de produire de l'électricité solaire à moindre coût seront utilisées.

La puissance des installations est exprimée en Watt crête (W_c). Le W_c est la puissance fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement normalisé de $1000W$ par m^2 , à une température de $25^\circ C$. Le rendement électrique est le rapport de puissance lumineuse incidente sur la puissance électrique fournie. Les modules existants permettent des rendements électriques compris entre 5 et 15%. [22]

I.3 Le solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (Composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (W_c) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. [1]

Le soleil est la seule source extérieure d'énergie qui alimente le système terre océans atmosphère.

Le soleil transforme chaque seconde de façon irréversible 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement, l'énergie émise par seconde par le soleil est donc d'environ $3,85.10^{26}$ W, cependant seule une infime partie de cette puissance est reçue par la terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du soleil : environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ $1,9.10^{17}$ W), tel que l'énergie solaire reçue par unité surface perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, qui s'appelle la constante solaire, qui est estimée à $1\ 367$ W.m⁻². [7]

I.3.1 Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère

Les phénomènes atmosphériques influent sur le rayonnement solaire reçu sur la surface de la terre. Ces phénomènes sont la nébulosité, les poussières, l'humidité, la couverture du sol, ...etc.

En réalité, le rayonnement total reçu sur une surface, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairement énergétique global), est défini par la somme des trois composantes suivantes (**Figure I.1**) :

- **Eclairement direct** : C'est le rayonnement solaire reçu directement du soleil. Cette composante s'annule si le soleil est caché par des nuages ou par un obstacle.
- **Eclairement diffus** : C'est le rayonnement solaire provenant de toute la voute céleste. Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages.
- **Eclairement réfléchi** : C'est le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo (coefficient de réflexion) du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neige, eau, etc.). [21]

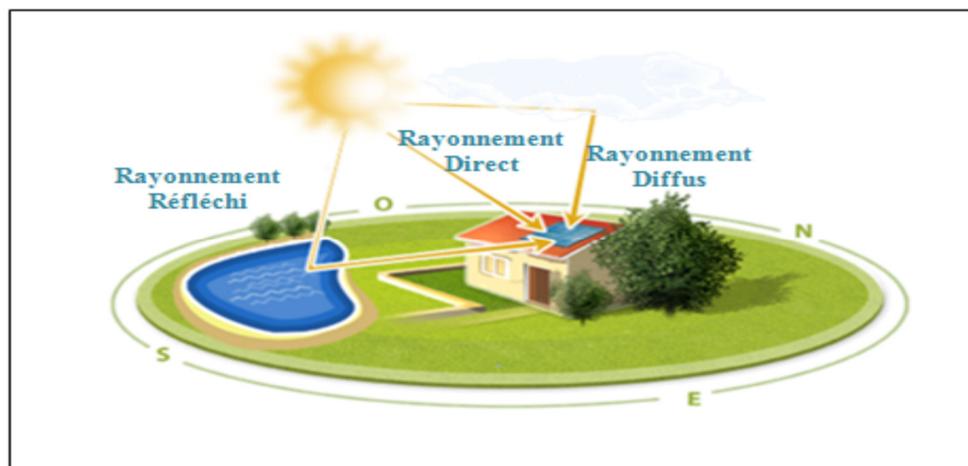


Figure I.1 : Types de rayonnement solaire reçus au sol

I.3.2 Spectre du rayonnement solaire [2]

Le soleil émet des particules appelées photons en très grandes quantités, c'est le rayonnement solaire. Ces flux de photons qu'on appelle également radiations ou rayons, voyagent dans l'espace à la vitesse de 300 000 km/s (c'est la vitesse de la lumière) et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes. On distingue par leur longueur d'onde les différents types de rayons : c'est le spectre solaire.

Les rayons de longueur d'ondes très courtes (les rayons x, gamma,), extrêmement dangereux sont heureusement arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère.

Les rayons de longueur d'onde très longue (ondes radio) sont très faibles à la surface de la terre.

Nous parviennent essentiellement :

- Les ultraviolets (UV), invisibles, sans échauffer, provoquent des dommages sur les cellules.
- La lumière visible, nous permet de distinguer les formes et les couleurs.
- Les Infrarouges (IR), invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent.

Généralement le rayonnement émis par le soleil est constitué de 9% UV, 43% lumière visible et 48% d'infrarouge (Figure I.2).

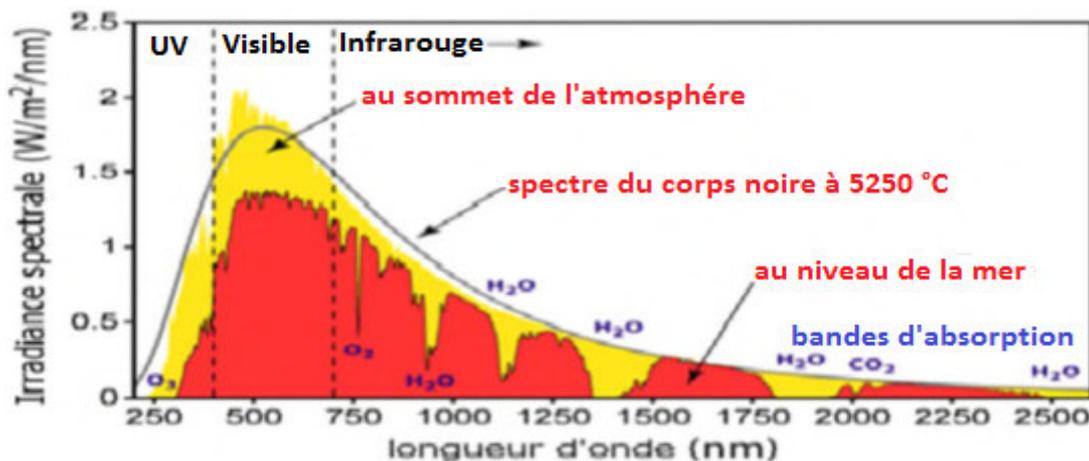


Figure I.2: Spectre du rayonnement solaire [3]

I.4 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ont la particularité de produire un courant électrique lorsqu'elles sont exposées aux rayonnements du Soleil. Elles sont constituées de semi-conducteurs à base, de silicium, de sulfure de cadmium, ou de tellure de cadmium.

I.4.1 Principe de la conversion photovoltaïque [32]

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule

est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule (Figure.I.3).

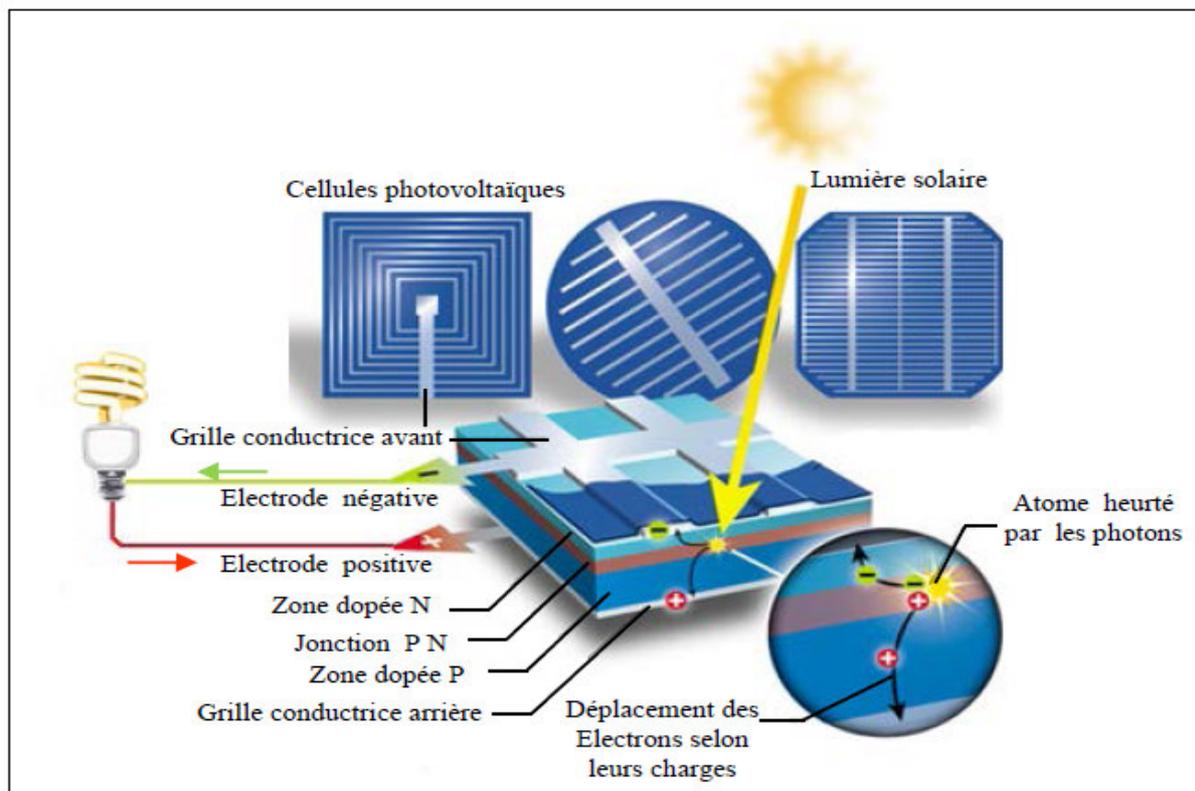


Figure I.3 : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{co} .

Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit I_{cc} et dépend fortement du niveau d'éclairage.

I.4.2 Types de cellules [9]

Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0,6 V).

I.4.2.1 Cellule en silicium amorphe

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires" (Figure I.4).

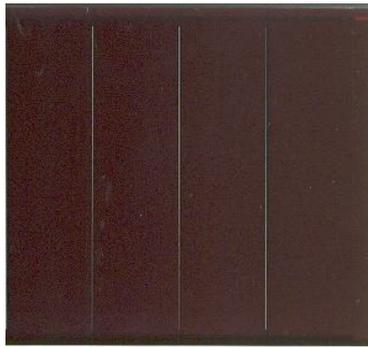


Figure I.4 : Silicium amorphe [10]

➤ **Avantages**

-Elles fonctionnent avec un éclairage faible (par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

-Elles sont moins chères que les autres.

➤ **Inconvénients**

-Leur rendement (10% environ) est moins bon que les autres en plein soleil.

-Leurs performances diminuent sensiblement avec le temps.

I.4.2.2 Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement du silicium fondu on s'arrange pour qu'il se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme (Figure I.5).

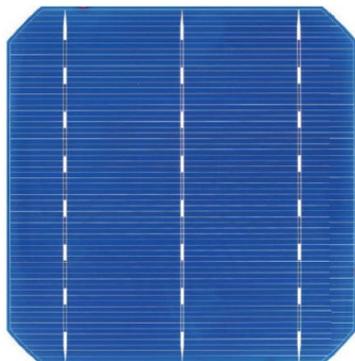


Figure I.5 : Silicium Monocristallin [4]

➤ **Avantage**

-Bon rendement (20% environ).

➤ **Inconvénients**

-Les cellules sont chères.

-Fonctionnement très médiocre sous un faible éclairage.

I.4.2.3 Cellule en silicium poly cristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux (Figure I.6).

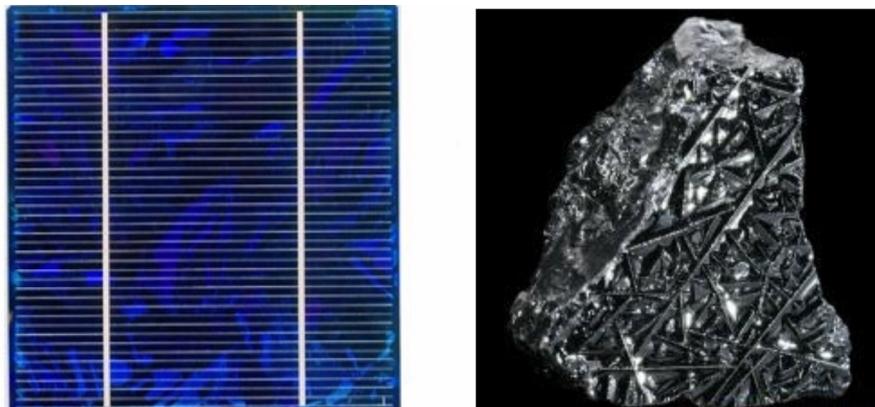


Figure I.6 : Silicium Poly cristallin [6]

➤ **Avantages**

- Bon rendement (13% environ), mais cependant moins bon que pour le monocristallin
- Plus économique

➤ **Inconvénients**

- Encombrement plus important.
- Durée de vie légèrement inférieure.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix).

I.4.3 Caractéristique d'une cellule PV à base de silicium

Le fonctionnement d'une cellule PV dépend des conditions d'ensoleillement et de la température. [40]

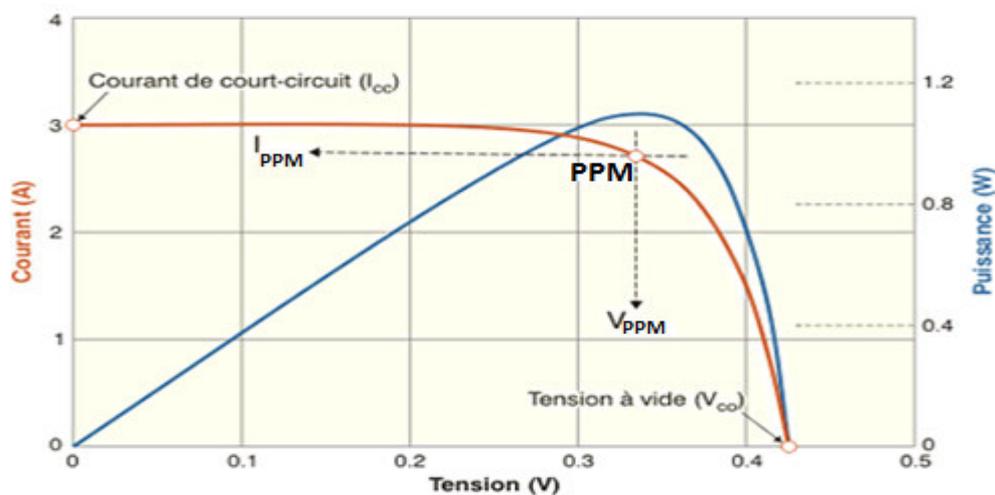


Figure I.7 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: PPM obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{ppm} , I_{ppm}).

I.5 Le module photovoltaïque [17]

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules.

De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique, le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en parallèle afin d'augmenter l'intensité d'utilisation.

I.5.1 Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série (voir figure I.8).

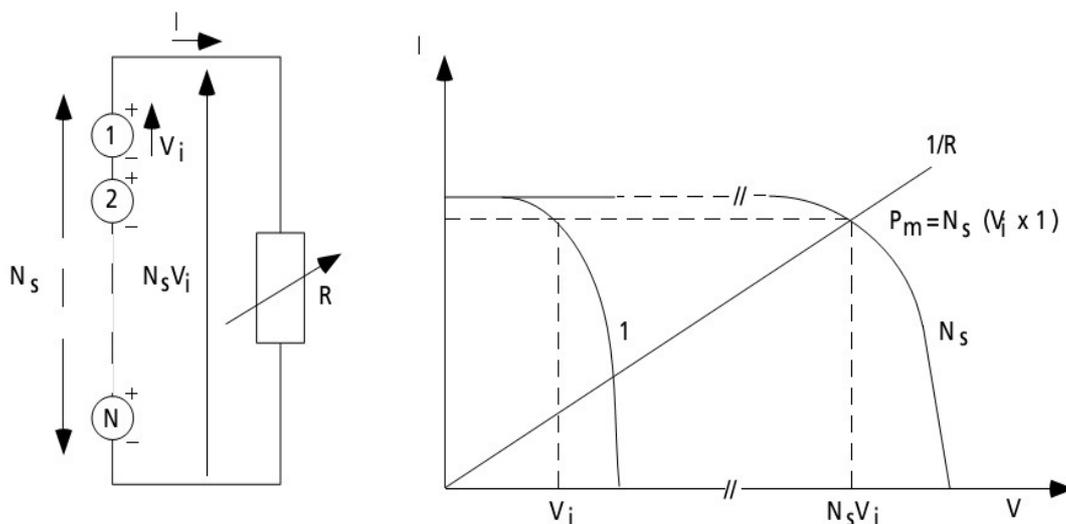


Figure I.8: Cellules identiques en série

I.5.2 Association en parallèle

En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche (voir figure I.9).

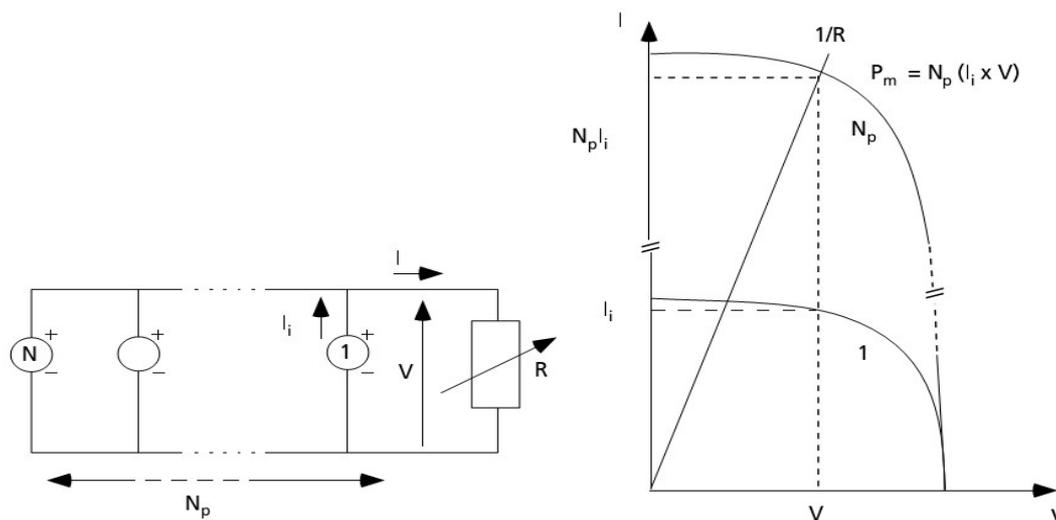


Figure I.9: Cellules identiques en parallèle

I.6 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques [18]

a) Avantages

- Une haute fiabilité.
- L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées.
- Les entretiens sont réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment.

b) Inconvénients

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

I.7 Les différents types de systèmes photovoltaïques

I.7.1 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est l'application la plus envisagée en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et les façades des bâtiments.

L'intégration d'éléments photovoltaïques dans les structures des bâtiments à de nombreux atouts. En étant connectés au réseau, ces systèmes permettent de s'affranchir des problèmes de stockage et de transport de l'électricité. L'excès de production, après transformation en alternatif à l'aide d'un onduleur, est injecté dans le réseau. En période de non production (la nuit), l'électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens.

I.7.2 Systèmes hybrides

Le système hybride est la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables, on prend comme exemple l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, qui permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technico-économique.

I.7.3 Systèmes photovoltaïques autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

I.7.3.1 Systèmes autonomes sans stockage électrochimique

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonome.

La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable en fonction du rayonnement solaire.

I.7.3.2 Systèmes autonomes avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques. [14]

I.8 Utilisation des systèmes solaires [8]

- L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus...).
- Les communications (Stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes, téléphones mobiles, ...).
- La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal (forêts, montagnes...).
- Capteurs isolés (infos météorologique, enregistrements sismiques, recherche scientifique).
- Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques,).
- Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation.

I.9 Les systèmes de pompes photovoltaïques [18]

« L'eau solaire » consiste à capter l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité qui alimente une pompe électrique permettant d'assurer l'évacuation de l'eau. Souvent utilisée dans les zones rurales non desservies par le réseau électrique.

I.9.1 Le pompage au fil du soleil

Le pompage au fil du soleil utilise un réservoir pour stocker de l'eau jusqu'à moment de son utilisation comme le montre la figure ci-dessous (voir figure I.10).

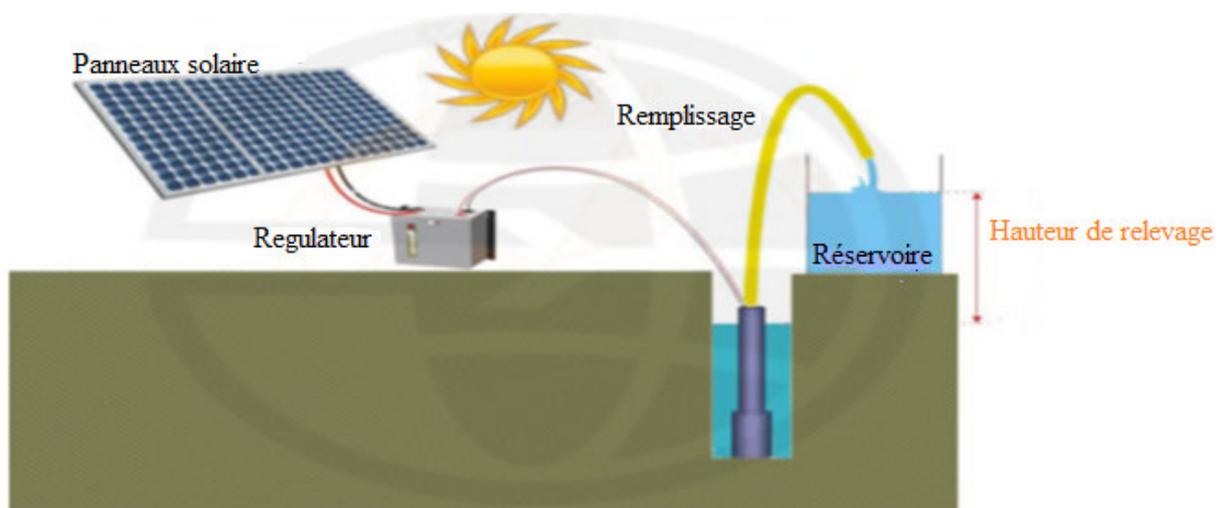


Figure I.10 : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil

Constituer d'un panneau photovoltaïque alimentant une pompe assistée par un régulateur contrôleur, c'est ce qui rend le principe de fonctionnement relativement simple.

➤ **Caractéristique du débit pour le pompage au fil du soleil**



Figure I.11: Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil

Cette solution est moins coûteuse, mais il est impossible de pomper au-dessus d'un certain niveau d'éclairement, la pompe ne pouvant être amorcée sous une certaine puissance fournie. Il y a donc perte d'énergie au début et à la fin de la journée.

I.9.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) [12]

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage.

Le pompage photovoltaïque avec batterie, ce qui va être l'objet de notre travail, permet d'assurer une autonomie énergétique, et un débit constant selon la demande, comme nous montre la figure ci-dessous :

➤ **Caractéristique du débit pour le pompage avec stockage électrochimique**

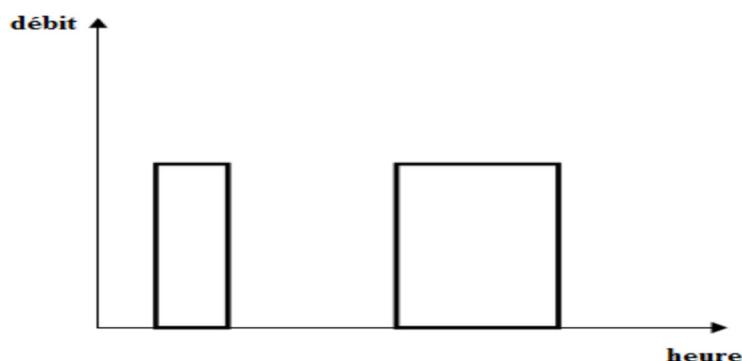


Figure I.12: Caractéristique du débit pour le pompage avec stockage électrochimique

Les batteries permettent de stocker l'électricité afin de la restituer en temps voulu, un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives pour sa durée de vie.

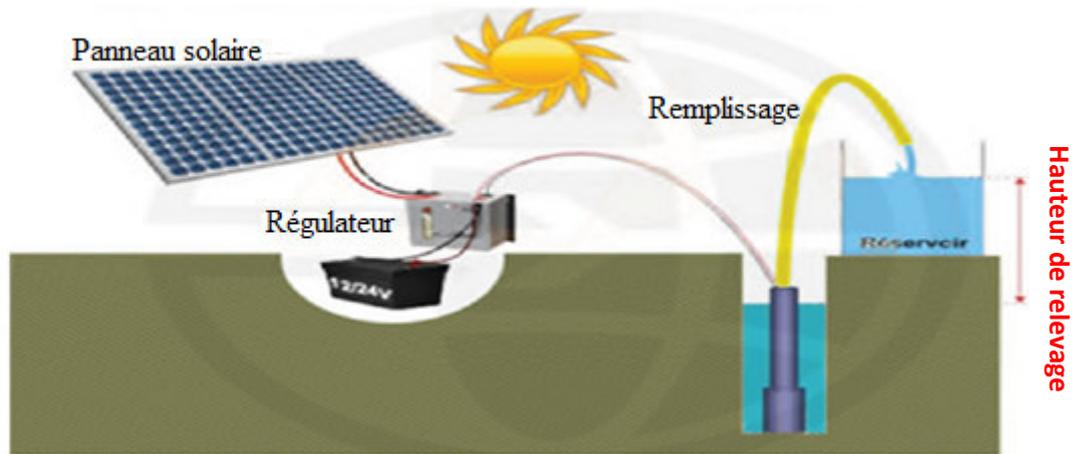


Figure I.13 : Principe de fonctionnement du pompage avec stockage électrochimique [18]

I.10 Les types du stockage

I.10.1 Stockage de l'eau

La tendance actuelle dans le monde est de stocker de l'eau dans des réservoirs. Cette méthode est pratique et peu coûteuse par rapport au stockage électrochimique dans les batteries. En effet, les batteries ont une durée de vie limitée et elles nécessitent des entretiens périodiques et ainsi, le réservoir d'eau peut être dimensionné en fonction de la durée d'autonomie souhaitée.

I.10.2 Stockage électrochimique

Dans certains systèmes de pompage photovoltaïque, l'utilisation des batteries de stockage électrochimique est indispensable pour leurs fonctionnements. Généralement, ces systèmes de pompage nécessitent des tensions de fonctionnement faibles (12 VDC, 24 VDC, etc.).

Egalement, le stockage électrochimique est utilisé pour permettre au système de pompage de fournir de l'eau avec une certaine pression constante impossible de l'assurer avec la méthode gravitationnelle du réservoir d'eau. [8]

I.10.2.1 Les batteries

Les batteries sont souvent intégrées au générateur photovoltaïque, elles permettent le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et restitue la nuit ou les journées nuageuse cette électricité accumulée durant la journée. Il existe différents types de batteries, on peut citer

- La batterie plomb acide.
- La batterie nickel cadmium.
- La batterie sodium chlorure de nickel.
- La batterie lithium-ion.
- La batterie zinc air.

I.10.2.1.1 Principe de fonctionnement des batteries

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées.

Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système.

Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire.

I.10.2.1.2 Caractéristiques générales des batteries

Les accumulateurs destinés aux installations photovoltaïques doivent avoir les qualités suivantes :

- Etre robustes.
- Avoir un bon rendement de charge et de décharge.
- Avoir une faible résistance interne.
- Avoir un taux d'autodécharge faible.
- Maintenance réduite.
- Posséder une grande réserve d'électrolyte.
- Avoir une durée de vie importante.
- Être aptes aux Cyclades.

Dans ce travail notre choix se porte sur les batteries plomb acide vue aux avantages qu'elles présentent :

- Prix qui revient moins cher que les autres types de batteries.
- Elles sont solides.
- Capable de fournir des courants élevés.

I.10.2.1.3 Batterie plomb acide

Premières batteries les plus utilisées sur le marché ont été les batteries plomb acide dont plusieurs améliorations les rendent encore compétitives. Étant disponible sur une plage de puissance très étendue, ces batteries peuvent être utilisées dans une large variété d'application.

I.11 Les convertisseurs statiques [19]

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

I.11.1 Convertisseur DC/AC (Onduleur)

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

Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrées et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en générale ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire.

I.11.2 Convertisseur DC/DC (hacheur)

Les convertisseurs DC/DC permettent d'adapter la source d'énergie électrique a un récepteur donné, ils ont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé. Ces convertisseurs peuvent êtres de type éleveurs de tension « Boost » ou abaisseur de tension « Buck » ou abaisseur-éleveur « Buck-Boost ».

I.11.2.1 Convertisseur Buck (hacheur série)

Un convertisseur Buck permet de convertir une tension continue en une tension continue d'une faible valeur, c'est un abaisseur de tension, la topologie du convertisseur « Buck » est donnée par la Figure (I.14). Les composants clés sont l'inductance (L), le commutateur (S), la diode (D) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de (S) qui fait décharger son énergie à travers la diode sur le charge (R) pour un cycle de période de fonctionnement.

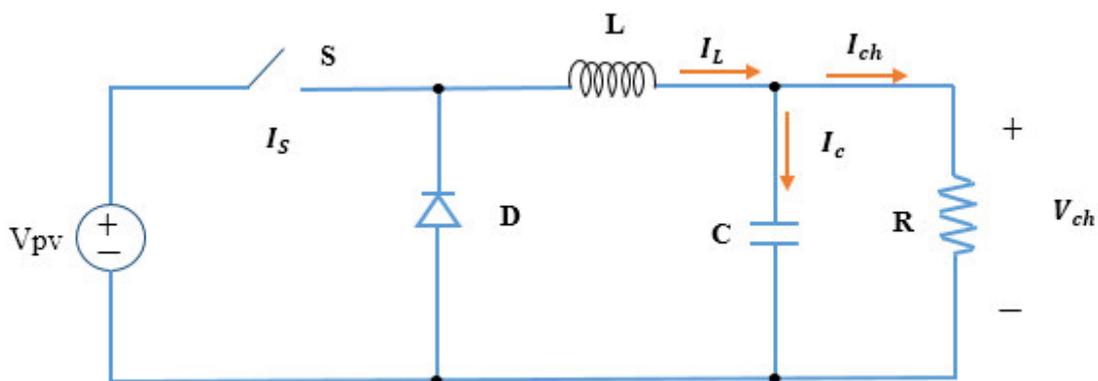


Figure I.14 : Circuit électrique du hacheur « Buck »

I.11.2.2 Convertisseur Boost (hacheur parallèle)

Un convertisseur éleveur dit Boost permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée. C'est pour cela qu'il est dit éleveur de tension (voir figure I.15).

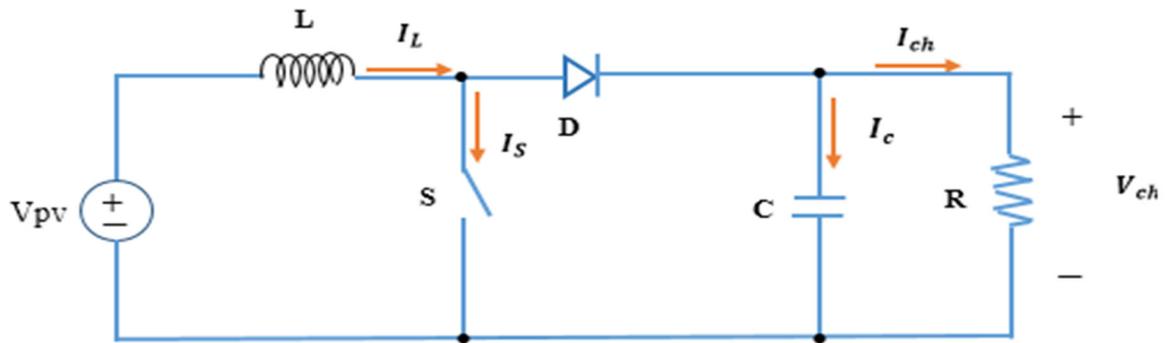


Figure I.15 : Circuit électrique du hacheur « Boost »

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie. Son fonctionnement est comme suit : Au premier temps (αT), l'interrupteur (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie jusqu'à la fin de la première période.

L'interrupteur (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source. Elle sera appliquée sur la charge (R) à travers la diode (D).

I.11.2.3 Convertisseur Buck-Boost [19]

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse (voir figure I.16).

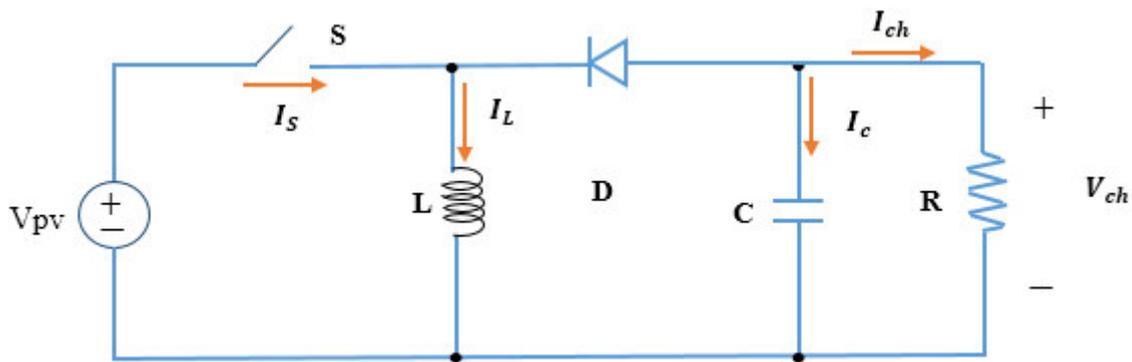


Figure I.16 : Circuit électrique du hacheur « Buck-Boost »

La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Lorsque l'interrupteur (S) est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée; tandis que, lorsque le commutateur (S) tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance (L) est renversée, l'énergie stockée et se transfère vers la charge (R) via la diode (D).

I.12 Groupe moteur-pompe

Un groupe motopompe est un ensemble composé d'un moteur électrique entraînant une pompe hydraulique.

I.12.1 Moteurs [14]

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 des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout moins cher.

I.12.1.1 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, ils sont complexes à réaliser et consomme beaucoup d'énergie.

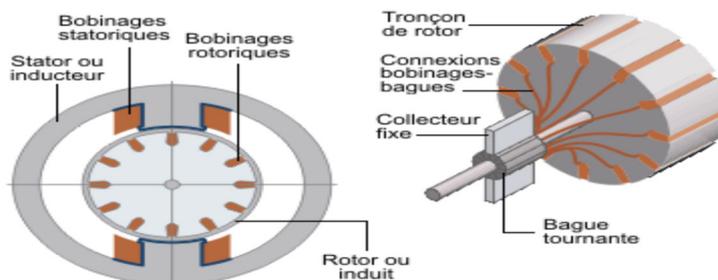


Figure I.17 : Moteur à courant continu

I.12.1.2 Moteur à courant alternatif

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilos Watts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité. [13]

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs synchrones.
- Les moteurs asynchrones.

I.12.1.2.1 Les moteurs synchrones [13]

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors

« Alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1500 MW.

Comme le nom l'indique la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

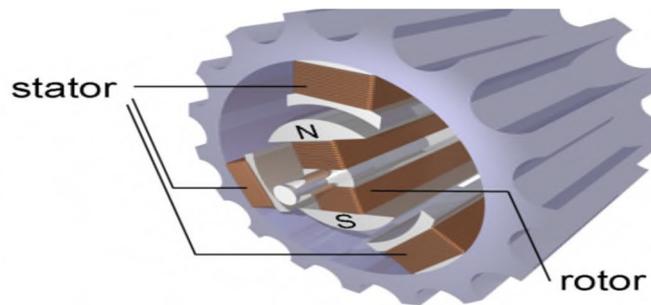


Figure I.18 : Moteur synchrone [14]

I.12.1.2.2 Les moteurs asynchrones

La machine asynchrone connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « Machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique. Le terme « asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. [13]

L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix et d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques.

L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur.

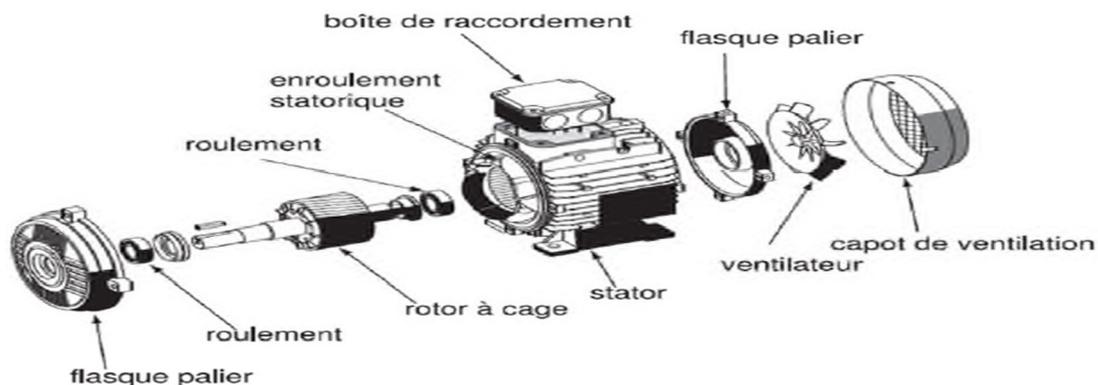


Figure I.19 : Moteur asynchrone [14]

Dans ce travail, on utilise la machine asynchrone parce qu'elle est la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération et la moins coûteuse à la fabrication.

I.12.2 Pompes [17]

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

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

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

I.12.2.1 La pompe volumétrique

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres).

L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long à partir d'un moteur électrique monté en surface.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Tandis que son couple varie en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et il est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT.

La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multipales.

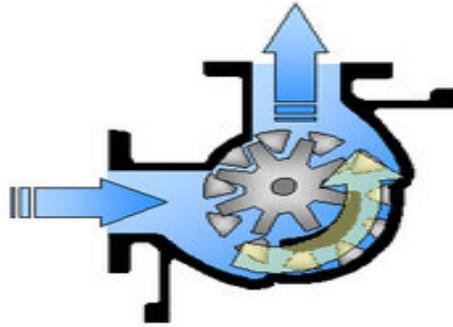
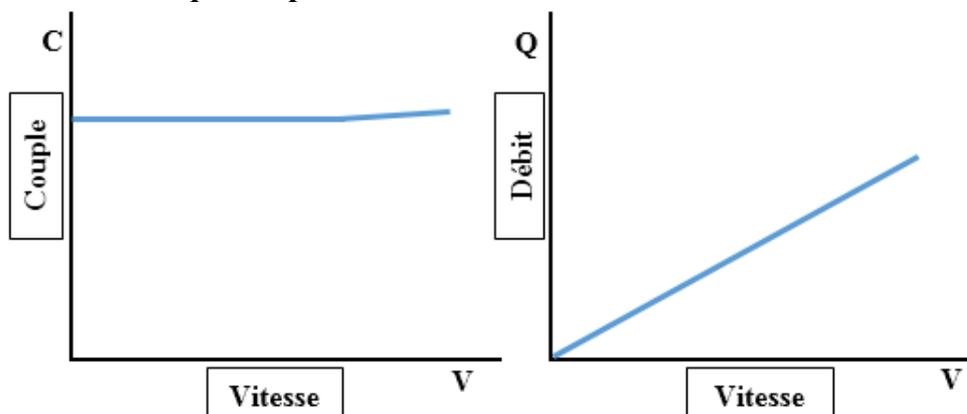


Figure I.20 : Pompe volumétrique [16]

a. Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse.



A) Le couple est pratiquement constant B) Le débit est proportionnel à la vitesse.
en fonction de la vitesse

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

I.12.2.2 La pompe centrifuge

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Afin d'augmenter la pression, donc la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés sur le même arbre de transmission. Chaque étage fait passer l'eau à l'étage suivant en relevant la pression jusqu'à l'étage final, délivrant un volume d'eau à pression élevée (voir figure I.22). Ces pompes incluent les pompes submersibles avec moteur de surface ou submergé, les pompes flottantes et les pompes rotatives à aspiration.

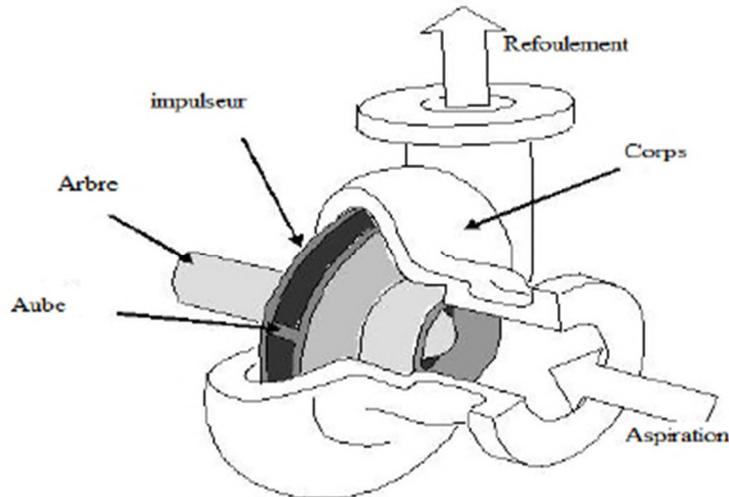


Figure I.22: Pompe centrifuge [20]

a. Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse

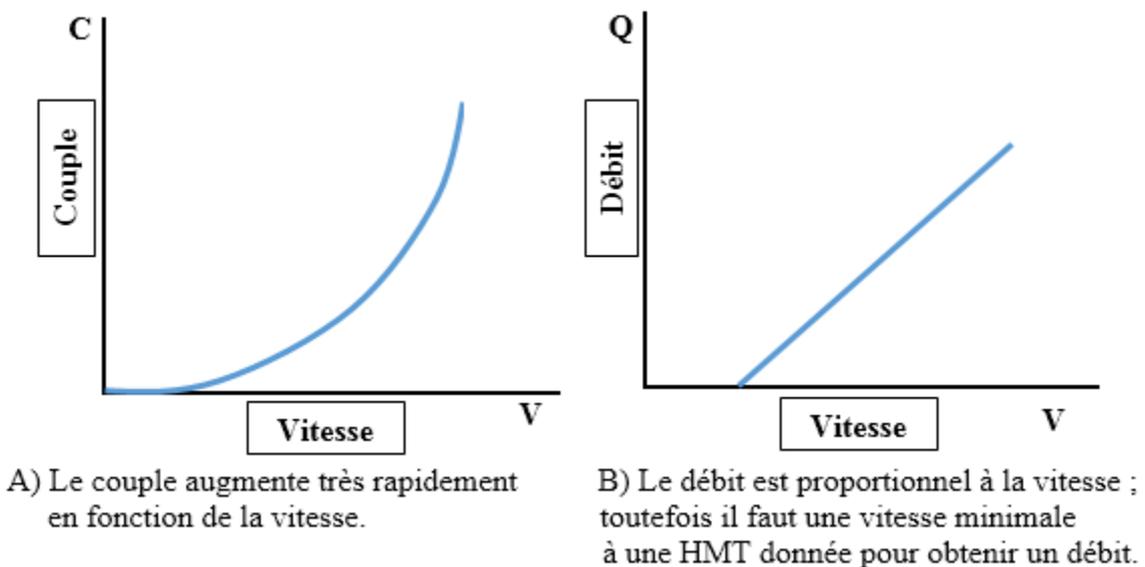


Figure I.23 : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge [21]

Le rendement de la pompe centrifuge est fonction du débit ; elle fonctionne de façon plus efficace à une certaine HMT et à une vitesse de rotation prédéterminée. Il est donc important de bien concevoir le dimensionnement de la pompe selon, les conditions du terrain.

Les pompes centrifuges sont très utilisées pour les applications avec énergie photovoltaïque parce que le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante. De plus, l'exhaure de l'eau domestique se fait traditionnellement à partir de puits, à des profondeurs de 10 à 50 mètres, qui conviennent bien aux pompes centrifuges à étages multiples.

La pompe centrifuge présente d'innombrables avantages par rapport aux autres types de pompe car elle a une construction simple, peu de composant mobile, un service relativement silencieux et une mise en œuvre faible avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché.

Elle s'adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides et elle répond aux exigences spécifiques des installations. Tous ces avantages nous emmènent à choisir comme pompe pour notre système de pompage la pompe centrifuge.

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par des cellules photovoltaïques, ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques.

Notre étude se porte sur le pompage photovoltaïque, elle se compose d'un ensemble de panneaux photovoltaïques, d'un convertisseur DC /DC commandé de sorte à extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, d'un onduleur de tension qui alimente un groupe motopompe constituée d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge, une batterie pour le stockage.

Dans le prochain chapitre la modélisation des différentes parties du système de pompage photovoltaïque sera présentée.

Chapitre II

**Modélisation du système de pompage
photovoltaïque avec stockage**

II.1 Introduction

Après avoir défini les différents composants du système de pompage photovoltaïque (Générateur photovoltaïque, Convertisseur DC/DC et DC/AC, Moteur asynchrone, pompe centrifuge et une batterie de stockage), nous procédons à la modélisation de ces éléments dans ce présent chapitre.

Cette modélisation consiste à établir les équations mathématiques qui régissent le fonctionnement des éléments de système afin de les simuler sous le logiciel (Matlab/simulink).

II.2 Description du système à étudier

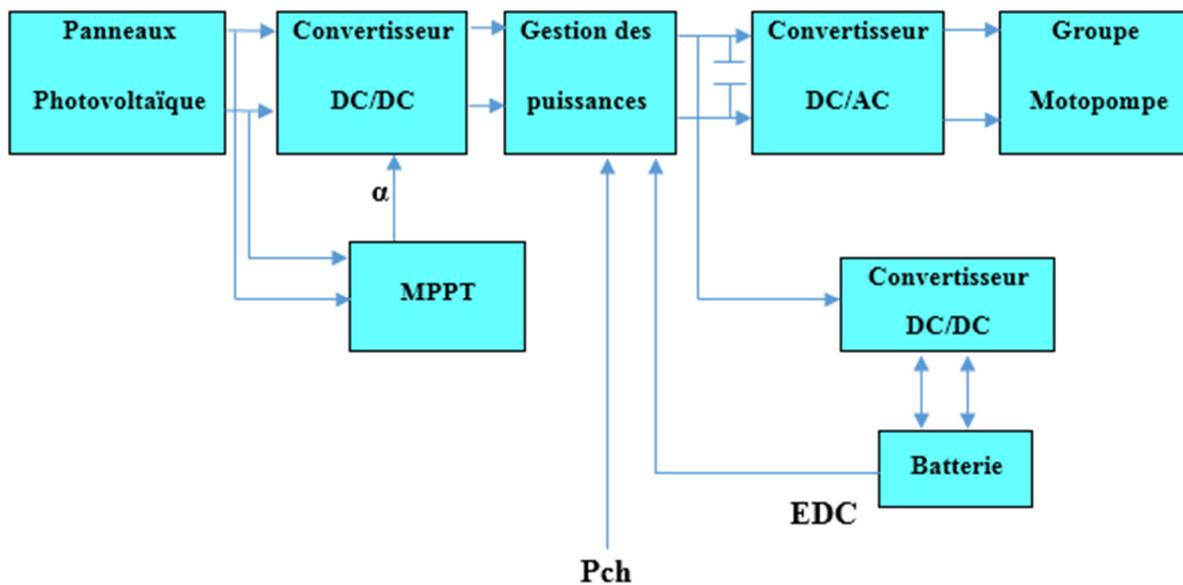


Figure II.1: Système globale à étudier [23]

Le système de pompage photovoltaïque avec batterie peut être comparé à une charge alimentée par une batterie qui est chargée par un générateur photovoltaïque. Ses éléments de base sont :

- Les panneaux photovoltaïques: permettent l'alimentation de la charge (motopompe) et le stockage (batterie).
- La commande MPPT : permet d'extraire la puissance maximale produite par le champ de modules PV.
- La batterie : alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.
- Le système de gestion : assure la gestion du flux d'énergie entre les différents composants et protège la batterie contre la surcharge et les décharges profondes.
- Le convertisseur DC/DC : fournit une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.
- Le convertisseur DC/AC : fournit une tension alternative à partir d'une tension continue.
- Groupe motopompe : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique. [23]

II.3 Modélisation du système [14]

II.3.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Il existe de nombreux modèles de générateur photovoltaïque qui sont différents entre eux par la procédure et le nombre de paramètre intervenant dans le calcul du courant et de la tension, parmi ces modèles on trouve :

II.3.1.1 Le modèle à une diode [24]

C'est le modèle le plus utilisé, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances une en série et une autre en parallèle.

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ de la cellule ou du module photovoltaïque :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ou du module, elle est principalement la résistance du semi-conducteur utilisé.
- La résistance parallèle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

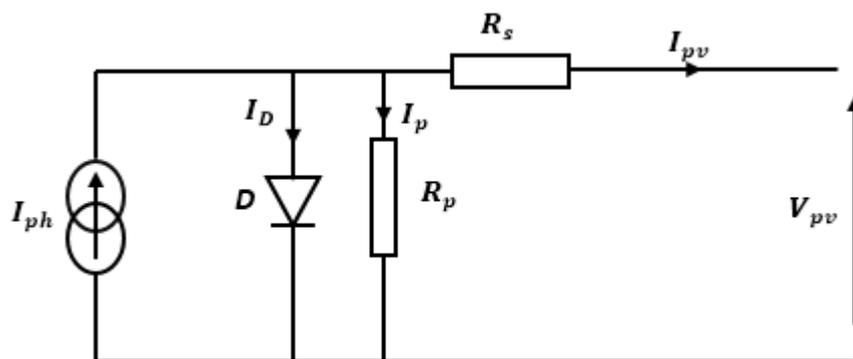


Figure II.2 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle à une diode

➤ **Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff**

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

Tel que :

I_{pv} : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_D : Courant de diode.

I_p : Le courant shunt.

➤ **Le courant produit par la photopile est donné par**

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref})] \quad (II.2)$$

Avec :

E_{sref} , T_{jref} : représentent l'éclairement et la température sous conditions STC.

T_j : température de jonction.

P_1 , P_2 , P_3 : paramètres constants.

La température de jonction T_j est donnée par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E_s \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] \quad (II. 3)$$

Avec NOCT : la température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire et T_a est la température ambiante.

➤ **Le courant de la diode est donné par**

$$I_D = I_{0d} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{K \cdot A \cdot N_s \cdot T_j} \right) - 1 \right] \quad (II. 4)$$

Avec:

I_{0d} : Courant de saturation de la diode (A).

q : Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

k : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ (SI)).

A : Coefficient d'idéalité de la cellule.

N_s : Nombre de cellules connectées en série et/ou en parallèles

$$I_{0d} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right) \quad (II. 5)$$

E_g : Énergie de gap ($1.76 \cdot 10^{-19}$).

P_4 : Paramètre constant.

➤ **Le courant de la résistance shunt est donné par**

$$I_P = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_P} \quad (II. 6)$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante :

$$I_{pv} = P_1 \cdot E_s \left[1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right] - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left[\frac{E_g}{K \cdot T_j} \right] \cdot \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{K \cdot A \cdot N_s \cdot T_j} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_P} \quad (II. 7)$$

II.3.1.2 Modèle à deux diodes [24]

La cellule ou le module photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (figure II.3) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule ou du module, une résistance parallèle et une résistance série.

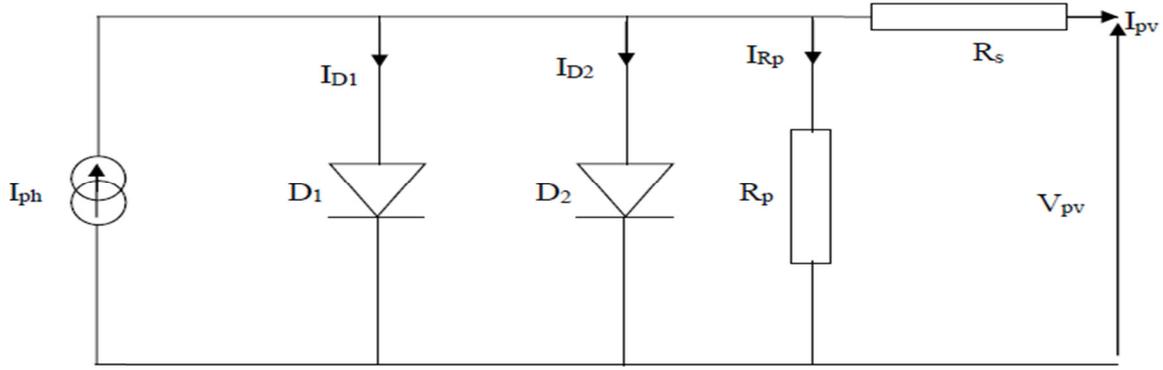


Figure II.3 : Schéma électrique équivalent du modèle à deux diodes

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{Rp} \quad (II. 8)$$

Le courants \$I_{D1}\$ et \$I_{D2}\$ des diodes sont donnés par :

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II. 9)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II. 10)$$

Avec : \$I_{01}\$, \$I_{02}\$ courants de saturation des diodes.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \quad (II. 11)$$

Avec (\$V_{pv}\$ et \$I_{pv}\$) représentent la tension et le courant de la cellule ou du module photovoltaïque, (\$I_{D1}\$ et \$I_{D2}\$) représentent les courants des diodes, \$I_{ph}\$ représente le photocourant, \$R_s\$ la résistance série, \$R_p\$ la résistance parallèle, \$K\$ la constante de Boltzmann, \$A\$ le coefficient d'idéalité de la cellule ou du module photovoltaïque et \$q\$ charge élémentaire.

II.3.1.3 Le modèle explicite [24]

C'est le modèle le plus simple, vu le nombre de paramètres qu'il nécessite. La résolution d'un tel modèle se fait comme suit :

$$I_{pv} = I_{cc} N_p \left[1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{N_s V_{pv}}{C_2 V_{co}} \right) - 1 \right) \right] \quad (II. 12)$$

Où \$C_1\$ et \$C_2\$ sont des paramètres qui peuvent être calculés.

$$C_2 = \frac{\frac{V_{ppm}}{V_{co}} - 1}{\ln \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{cc}} \right)} \quad (II. 13)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{ppm}}{I_{cc}} \right) \exp \left(\frac{-V_{ppm}}{C_2 V_{co}} \right) \quad (II. 14)$$

Avec \$N_s\$ nombre de cellules connectées en séries, \$N_p\$ nombre de cellules en parallèles,

(V_{ppm} et I_{ppm}) représente la tension et le courant du point de puissance maximale, (V_{co}, I_{cc}) représente la tension du circuit ouvert et le courant de court-circuit.

Si $N_s=N_p=1$ On parle d'une cellule, sinon si N_s et/ou N_p supérieur à un «1» donc le modèle représente un module photovoltaïque.

« Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle à une diode »

L'identification des paramètres P_1, P_2, P_3, P_4 se fait à partir des mesures expérimentales et des paramètres standards (STC) $E_s=1000w/m^2, T_a=25^\circ C$.

Tableau II.1 : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110 [23]

P1	P2	P3	P4	A	R _p	R _s
0.00345	$0.58.10^{-5}$	$-0.336.10^{-4}$	31.2367	1	0.614	151.16

❖ Résultats de simulation du modèle à une diode

A. Influence de l'ensoleillement

Pour voir l'influence de l'ensoleillement, nous allons tracer les caractéristiques $P_{pv}-V_{pv}$ et $I_{pv}-V_{pv}$ pour différentes valeurs d'ensoleillements et à une température constante $T_c=25^\circ C$.

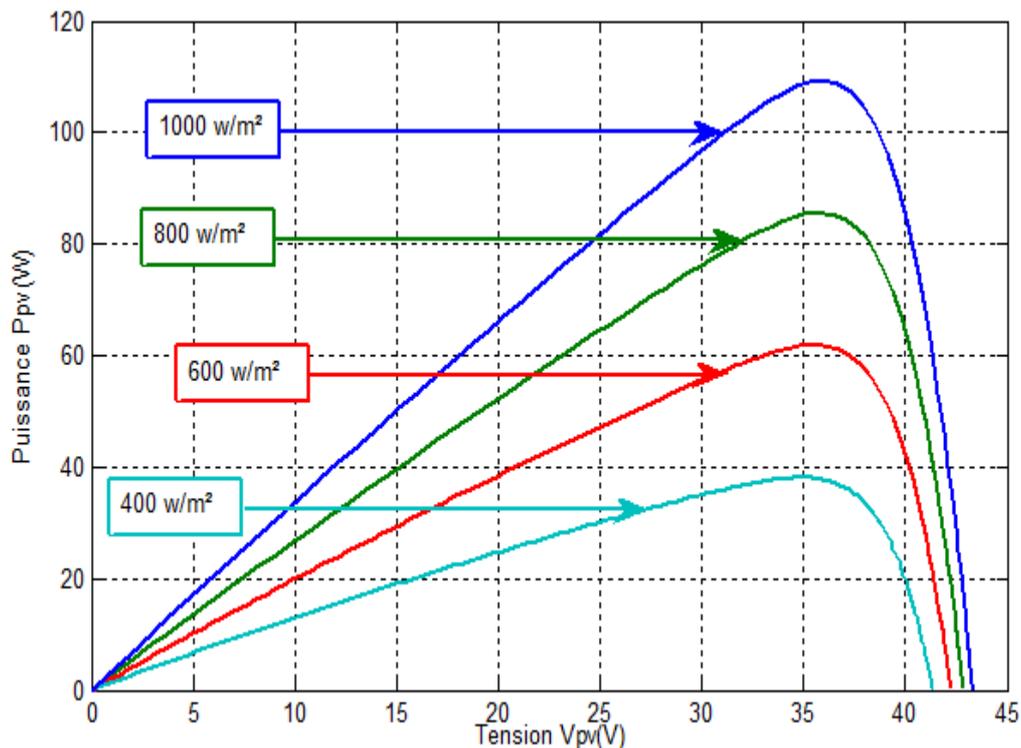


Figure II.4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$

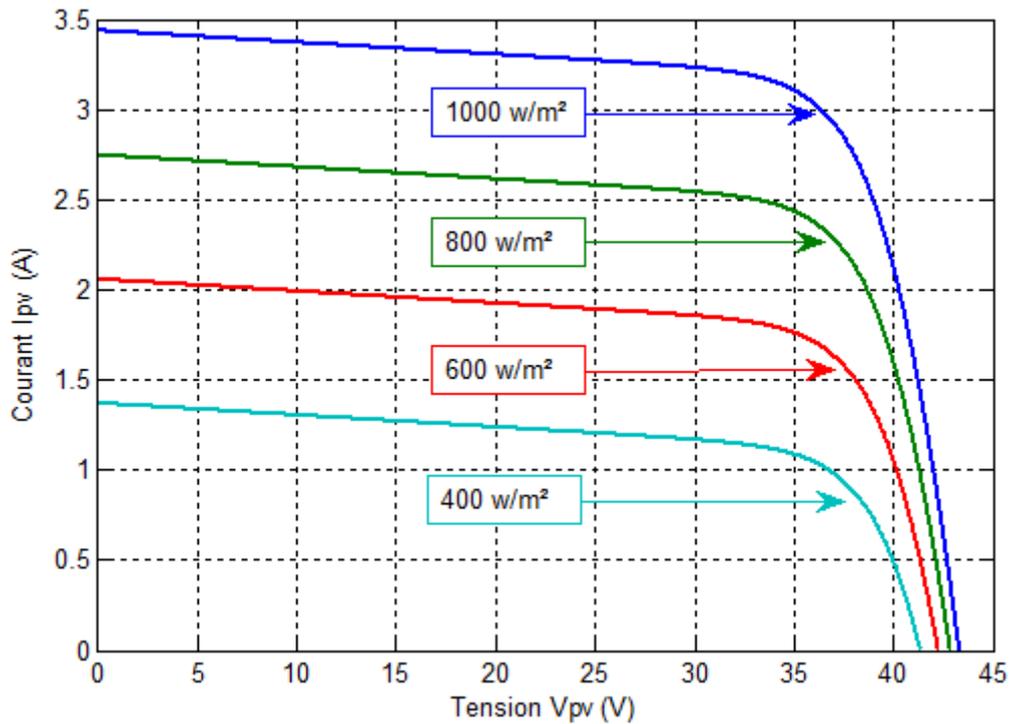


Figure II.5: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

B. Influence de la température

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques $P_{pv}-V_{pv}$ et $I_{pv}-V_{pv}$ pour différents niveaux de température et avec un ensoleillement constant $E=1000W/m^2$.

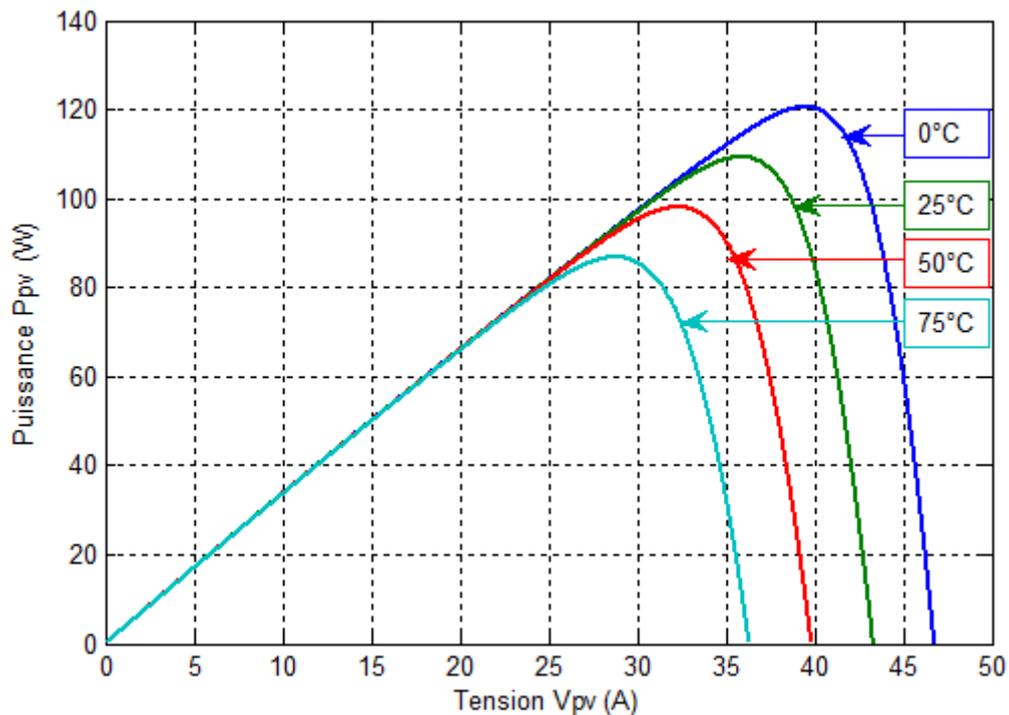


Figure II.6 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$

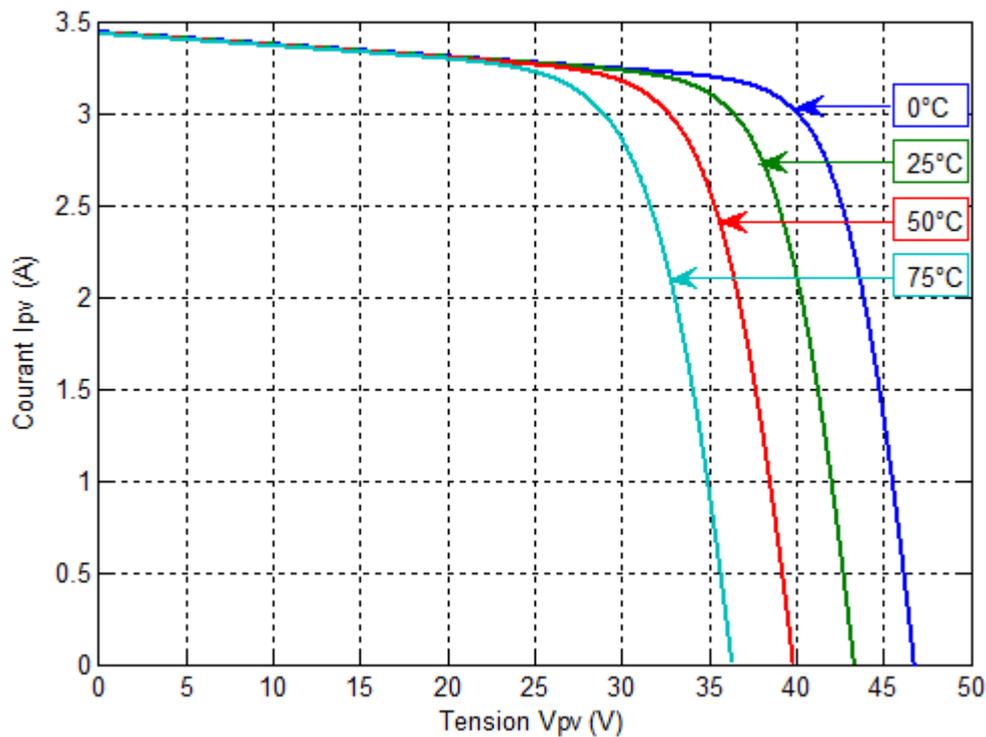


Figure II.7: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

❖ Discussion des résultats

Les courbes obtenues durant cette simulation, nous font remarquer que les caractéristiques $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$ réagissent de manière contradictoire lorsqu'on leur impose des variations en intensité de température et d'ensoleillement.

A-Influence de l'ensoleillement

Une température de 25°C est maintenue constante, l'ensoleillement (E_s) varie. Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (Figure II.4, II.5).

On remarque :

Que l'augmentation de l'éclairement fait augmenter la valeur du courant du court-circuit I_{cc} , et le point de puissance optimale par contre la tension de circuit ouvert V_{co} augment faiblement, contrairement aux effets de température qui sont proportionnellement inverses.

B-Influence de la température

Pour un ensoleillement 1000W/m² maintenu constant, nous varions la température, les figures (II.6, II.7) représentent les résultats de notre simulation obtenue.

On remarque :

Que l'augmentation de la température fait diminuer la valeur de la tension du circuit-ouvert V_{oc} et le point de puissance optimale, par contre le courant de court-circuit I_{cc} diminue faiblement.

II.4 Modélisation de l'hacheur survolteur [14]

Lorsque l'on désire augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser un hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de principe est montré dans la figure (II.8). Ce dispositif de l'électronique de puissance qui est un convertisseur continu-continu nous permet d'adapter la tension aux bornes du panneau photovoltaïque à partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale.

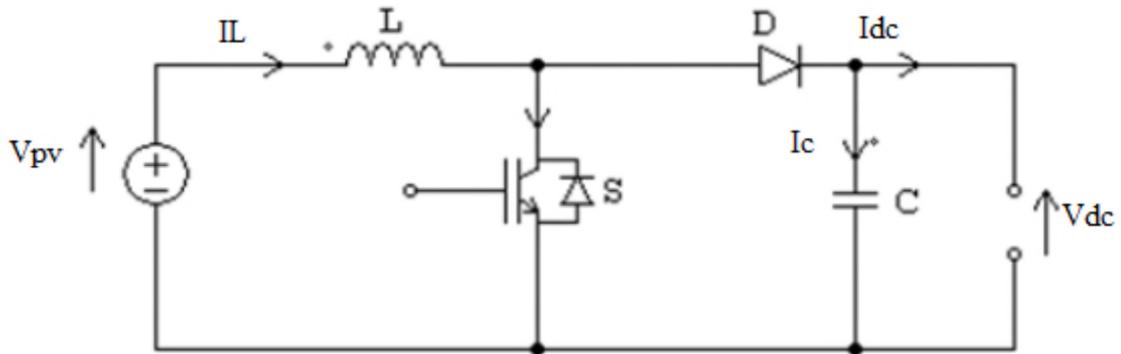


Figure II.8 : hacheur survolteur

D'après le schéma du hacheur survolteur figure (II.8) :

Lorsque S est fermé:

A $t=0$ le condensateur est chargé ;

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II. 15)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} = 0 \quad (II. 16)$$

Lorsque S est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad (II. 17)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} = I_L \quad (II. 18)$$

En posant $\alpha = 1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et $\alpha = 0$ pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations uniques que nous qualifions de modèle instantané.

Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - \alpha) \quad (II. 19)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} = I_L(1 - \alpha) \quad (II. 20)$$

On peut utiliser ce modèle pour réaliser une simulation du convertisseur dans un programme sous Matlab simulink.

En valeurs moyennes, la tension de sortie est en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Son expression est donnée par l'équation (II.21). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α .

$$V_{dc} = \frac{1}{1 - \alpha} V_{pv} \quad (II. 21)$$

$$I_{dc} = (1 - \alpha) I_L \quad (II. 22)$$

II.5 Modélisation d'un hacheur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée [45]. Tandis que lorsque le transistor (T_r) est fermée le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur est ouvert la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode la figure (II.9) représente la structure d'un hacheur de type Buck-Boost.

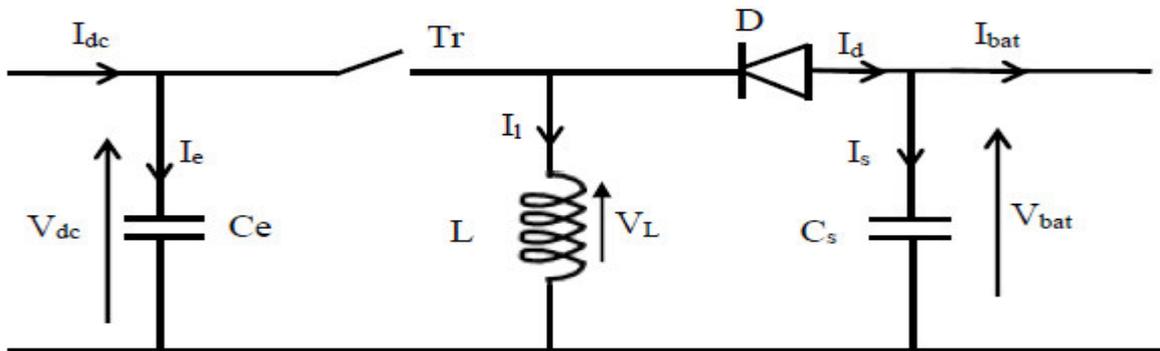


Figure II.9 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (buck-boost)

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

Le rapport cyclique α ajuste la tension et le courant de sortie tel que :

$$V_{bat} = \frac{-\alpha}{(1 - \alpha)} \cdot V_{dc} \quad (II. 23)$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire:

$$I_{bat} = -\frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot I_{dc} \quad (II. 24)$$

II.6 Modélisation du bus continu [14]

Le couplage entre le générateur photovoltaïque, batterie et l'onduleur est fait par l'intermédiaire d'un bus continu. Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.

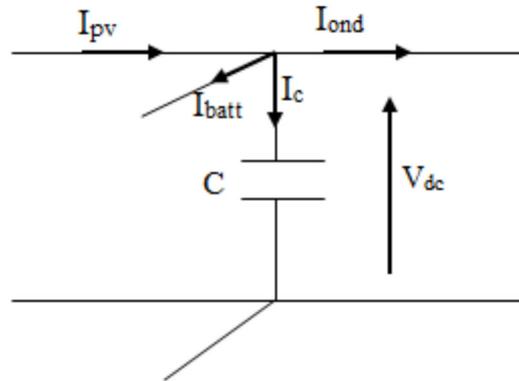


Figure II.10 : Modèle du bus continu

A partir de la figure (II.10), on peut écrire l'équation suivante :

$$I_C = I_{pv} - I_{ond} \pm I_{bat} \quad (II. 25)$$

La tension V_{dc} est en fonction du courant I_C :

$$I_C = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (II. 26)$$

Avec :

C : La capacité du condensateur.

II.7 Modélisation du convertisseur DC/AC [33]

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 représentée par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée.

L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable.

A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.11), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier :

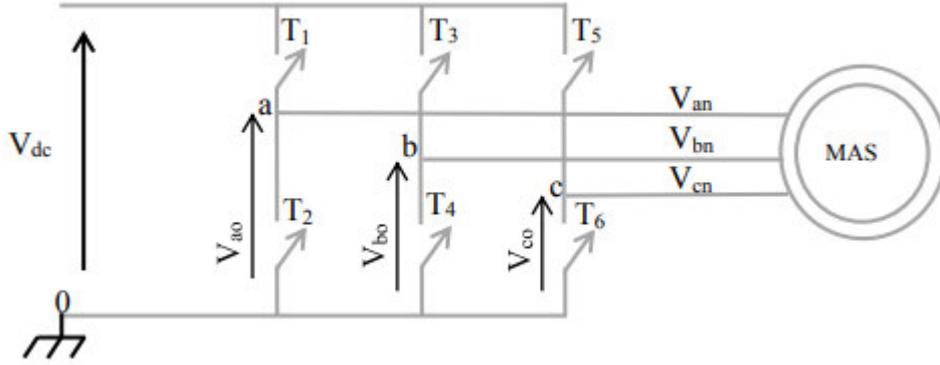


Figure II.11 : Circuit électrique de l'onduleur

Nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé :

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

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point milieu « O » d'un diviseur fictif à l'entrée comme référence pour ces dernières tensions.

Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de CHALE comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

V_{an} , V_{bn} et 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 fictif «O». Dans les hypothèses de travail on a supposé que la charge est équilibré c.-à-d.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.29})$$

En remplaçant (II.28) dans (II.29) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.30})$$

En introduisant (II. 30) dans (II.27) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \end{cases} \quad (II.31)$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{dc} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{dc} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{dc} \cdot S_3 \end{cases} \quad (II.32)$$

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

A partir des équations (II.31) et (II.32), on tire la matrice qui assure le passage du continu vers l'alternatif et qui donne le modèle de l'onduleur par les équations matricielles suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{dc} = S_1 \cdot i_{ach} + S_2 \cdot i_{bch} + S_3 \cdot i_{cch} \quad (II.34)$$

Avec : S_1, S_2, S_3 des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un seul bras.

Pour passer d'un système triphasé au système biphasé il suffit d'appliquer la transformation de Park.

II.8 Modélisation du moteur 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.

II.8.1 Equations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

II.8.1.1 Equations des tensions et des flux [30]

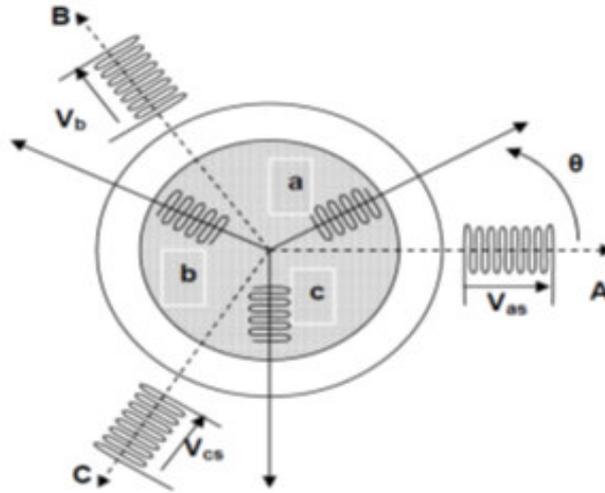


Figure II.12 : Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

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 :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (\text{II.35})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique.

$$[\varphi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\varphi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

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.36) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (II.37)$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique (C_{em}) qui s'écrit:

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_{sabc}, I_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}] \right) \quad (II.38)$$

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

$$[\varphi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \quad (II.39)$$

$$[\varphi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \quad (II.40)$$

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 :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cdot \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_3 = M_{sr} \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.41)$$

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 :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \} \quad (II.42)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \} \quad (II.43)$$

Les équations (II.42), (II.43) aboutissent à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors plus difficile pour cela on fait appel au modèle de Park.

II.8.1.2 Modèle de Park de la Machine Asynchrone [30]

La théorie de la machine asynchrone est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statorique et rotorique à des axes électriquement perpendiculaires appelés **d** pour l'axe direct et **q** pour celui en quadrature. Par raison de simplicité nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale.
- Les effets des pertes ferromagnétiques et de la saturation sont négligés.
- Les composantes homopolaires sont nulles.

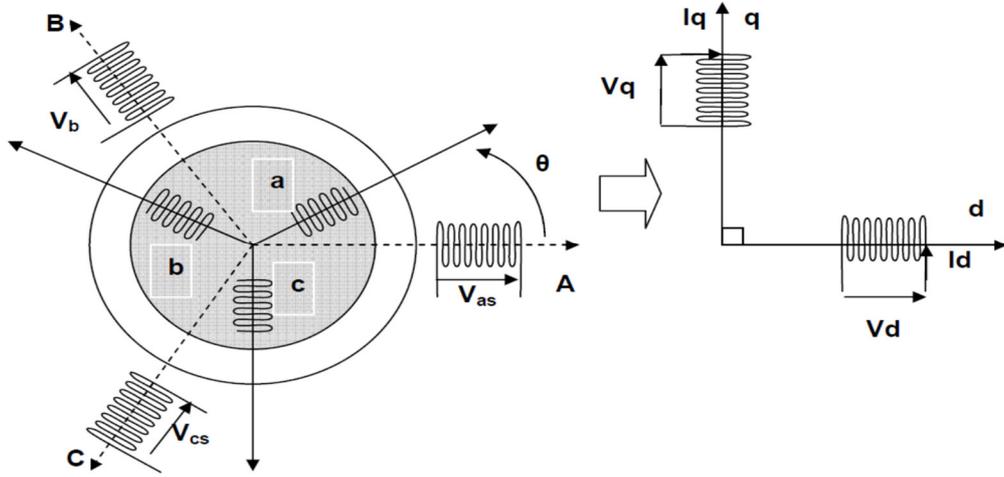


Figure II.13 : Modèle de Park de moteur asynchrone

Les amplitudes directes (d) et en quadrature (q) des grandeurs statorique et rotorique sont fictives, les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 44})$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 45})$$

Ces deux équations peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les courants et les flux.

Les équations de la machine asynchrone dans le système biphasé (d,q) lié au champ tournant sont obtenues en utilisant la transformée de Park.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \\ V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d\varphi_{s0}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{rd} \\ V_{r0} = R_r \cdot I_{r0} + \frac{d\varphi_{r0}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.46})$$

Avec :

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

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

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Flux rotorique direct et quadratique.

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

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$: Flux statorique direct et quadratique.

ω_s, ω_r : Vitesse statorique et rotorique[rad/s].

$\omega = p \cdot \Omega = \omega_s - \omega_r$: Vitesse mécanique[rad/s].

Les flux statorique et rotorique s'expriment dans le repère de PARK en fonction des courants par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

Avec :

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

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

L_s : Inductance de fuite statorique.

L_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Inductance mutuelle.

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

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\varphi_{rd} \cdot I_{sq} - \varphi_{rq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{II.49})$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \omega \quad (\text{II.50})$$

II.9 Modélisation de la batterie [28]

Il existe plusieurs modèles de batterie au Plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises les batteries réagissent différemment et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances.

Notre choix s'est porté sur le modèle dit « CIEMAT » (Research Center for Energy, Environment and Technology, Espagne) relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge.

Le modèle « CIEMAT »

Ce modèle est basé sur le schéma suivant (Figure II.14) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres.

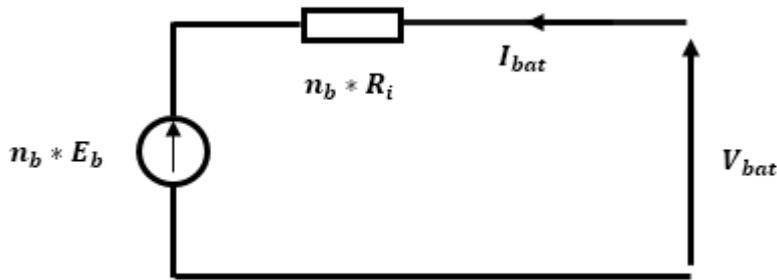


Figure II.14: Schéma équivalent du modèle électrique

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène).

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{V_{bat}} \tag{II.51}$$

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage par le biais de la capacité, il faudrait tenir compte de la température. C'est pourquoi nous proposons le modèle de la capacité donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge, elle est donnée par l'équation (II.52).

$$\frac{C_{bat}}{C_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67 \left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \tag{II.52}$$

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement à C_{10} (C_{10} la capacité en Ah de la batterie en régime de décharge à courant constant I_{10} durant 10h: $C_{10} = 10 \cdot I_{10}$), dans lequel ΔT est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25 °C.

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \tag{II.53}$$

Avec C_{bat} la capacité (Ah) nominale de la batterie et Q_d la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous.

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b \pm n_b \cdot R_b \cdot I_{bat} \quad (II.54)$$

V_{bat} : Tension de la batterie.

I_{bat} : Courant de la batterie.

E_b : La force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie.

R_b : La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes :

✓ Tension en décharge :

$$V_{bat-d} = n_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (II.55)$$

✓ Tension en charge :

$$V_{bat-c} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I_{bat}^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) \cdot (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (II.56)$$

➤ Résistance de la batterie [42]

La résistance interne de la batterie n'est pas une valeur constante, elle varie selon l'état de charge, la température et l'état de vieillissement.

De façon générale la résistance interne d'une batterie augmente quand l'état de charge croît.

De même pour un état de charge donné, la résistance interne d'une batterie augmente quand la batterie vieillit.

a-Résistance en décharge

L'équation de la résistance de la batterie pendant la décharge est la suivante :

$$R_d = \frac{1}{C_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \Delta T) \quad (II.57)$$

b-Résistance en charge

Pendant la charge la résistance de la batterie est la suivante :

$$R_c = \frac{1}{C_{10}} \cdot \left(\frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 \Delta T) \quad (II.58)$$

- **Influence de la température sur la capacité**

La température de la batterie influe énormément sur le comportement des caractéristiques de fonctionnement de base du système de stockage et en particulier sur sa capacité de stockage.

La figure (II.15) montre que l'influence de la température sur la capacité de stockage des batteries.

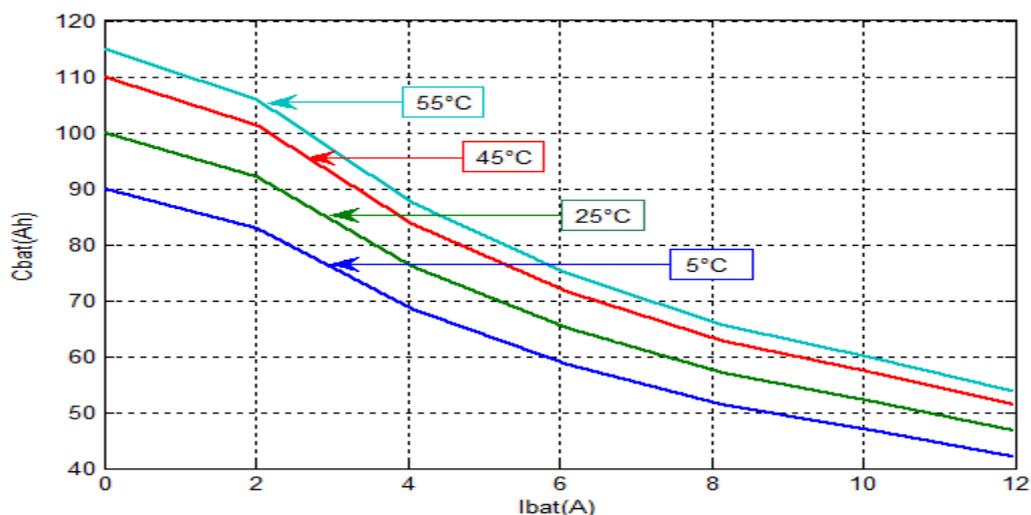


Figure II.15 : Influence de la température sur la capacité

On remarque que l'augmentation de la température est accompagnée d'une remontée modérée de la capacité de stockage et ceci peut diminuer la durée de vie de la batterie.

- **Influence de la température sur l'état de charge de la batterie**

L'influence de la température sur l'état de charge de la batterie représenté sur la figure suivante :

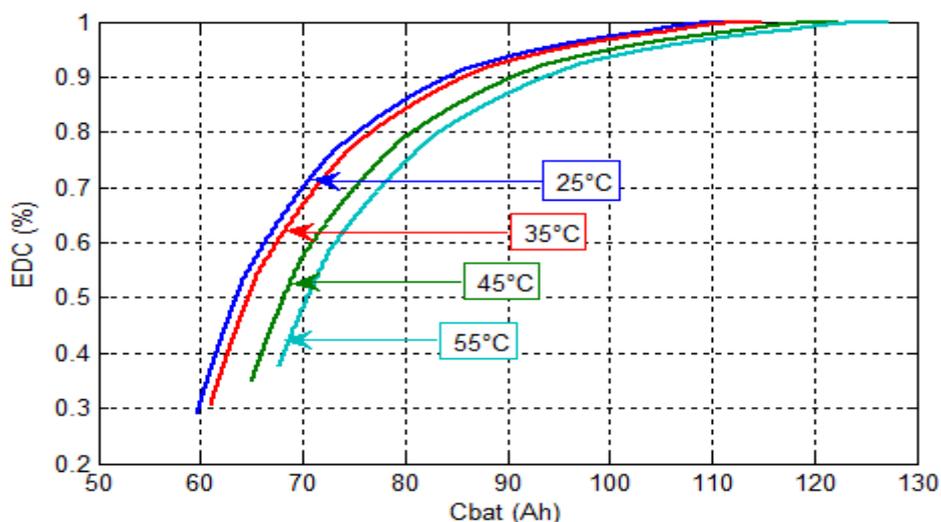


Figure II.16 : Variation de l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie pour différentes températures

D'après cette figure nous remarquons que l'augmentation de la température fait diminuer l'état de charge de la batterie, ce qui veut dire qu'une batterie soumise à une basse température se charge plus rapidement qu'une autre à haute température.

II.10 Modélisation de la pompe centrifuge [30]

L'expression de la hauteur manométrique totale est donnée par le modèle PLEIDER-PETERMAN.

$$HMT = \alpha_0 \omega_r^2 - \alpha_1 \omega_r Q - \alpha_2 Q^2 \quad (II. 59)$$

Avec : $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ des constantes.

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 :

$$HMT = H_g + P_c \quad (II. 60)$$

Avec :

H_g : Hauteur géométrique.

P_c : Les pertes de charges dans les canalisations.

$$P_c = \left(\lambda \frac{D}{d_c} + \xi \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 d_c^4 g} \right) \quad (II. 61)$$

Avec :

λ : Coefficient de régulation de la pression dans la canalisation.

D et d_c : Longueur et diamètre de la canalisation.

ξ : Coefficient des pertes de pression locales dans les différentes connexions de la canalisation.

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

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 \quad (II. 62)$$

Avec K_r un coefficient de proportionnalité $[(\text{Nm/rad} \cdot \text{S}^{(-1)})^2]$ qui est donné par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\omega_n^3} \quad (II. 63)$$

Où :

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

La pompe est entraîné à une vitesse optimale donnée par :

$$\omega_{opt} = \omega_n \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{pv} \cdot \eta}{P_n}} \quad (II. 64)$$

Où :

ω_{opt} : Vitesse optimale du moteur asynchrone (rad/s).

η : Rendement de motopompe.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation de chaque composant du système de pompage photovoltaïque (champ PV, convertisseurs (DC/DC, DC/AC), moteur asynchrone, pompe centrifuge, la batterie).

Cela nous a permis d'élaborer un bloc de simulation du système de pompage photovoltaïque, cette étude montre bien que le modèle du panneau photovoltaïque est en fonction des conditions météorologiques.

Cette modélisation est une étape essentielle qui va nous permettre d'étudier la commande de ce système dans le chapitre qui suit.

Chapitre III

**Optimisation, dimensionnement et gestion de
l'énergie du système de pompage
photovoltaïque avec stockage**

III.1 Introduction

Les problèmes majeurs de l'énergie solaire photovoltaïque sont le prix du générateur qui reste encore élevé et son rendement énergétique relativement bas.

Dans le but d'améliorer le rendement du générateur photovoltaïque (GPV) autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur, plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système photovoltaïque étaient appliqués et des techniques étaient suivies pour avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques on trouve la technique de Poursuite du Point de Puissance Maximale ou (Maximum Power Point Tracker).

Les variations des conditions climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur DC/DC permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale.

Dans ce chapitre nous allons en premier lieu présenter brièvement la technique de Poursuite du Point de Puissance Maximale (PPM), puis on passe à la phase de dimensionnement du système de pompage comprenant un générateur photovoltaïque comme source principale des batteries pour la compensation et un réservoir d'eau en tenant compte de la satisfaction des besoins en eau pour un petit village situé à la wilaya de Bejaia.

Nous allons ensuite présenter la commande vectorielle appliquée pour la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS). Enfin un système de gestion sera présenté qui a pour but de contrôler l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et de protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes.

III.2 Adaptation de l'énergie photovoltaïque [14]

Le générateur photovoltaïque est un générateur de puissance qui peuvent fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale qui donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnés.

La tension et le courant correspondant appelés tension optimale et courant optimum. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner le générateur à sa tension optimale (puissance maximale), cela nécessite une adaptation entre la source photovoltaïque et la charge.

Les convertisseurs statiques adaptés à l'énergie photovoltaïque ont pour objectifs d'adapter l'énergie qui provient des panneaux photovoltaïques pour pouvoir alimenter la charge.

III.2.1 La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT))

Par définition, une commande MPPT associé 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 quels que soit les conditions météorologiques

(irradiation, température), la commande de convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt}, I_{opt}).

Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque plusieurs méthodes sont utilisées :

- la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- la méthode de court-circuit.
- la méthode Perturbation Observation (P&O).
- la méthode d'incrément de conductance.
- la méthode de la logique floue.
- la méthode du neuro-floue.

Le système de poursuite du point de puissance maximale que nous avons choisi est la méthode perturbation & observation (P&O). Vu sa facilité d'implémentation elle permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée.

III.2.2 La méthode Perturbation & Observation (P&O) [38]

La méthode perturbation & observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le PPM, on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

Comme indiqué précédemment, le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi comme l'illustre la figure (III.1), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectuée lorsque la tension décroît.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

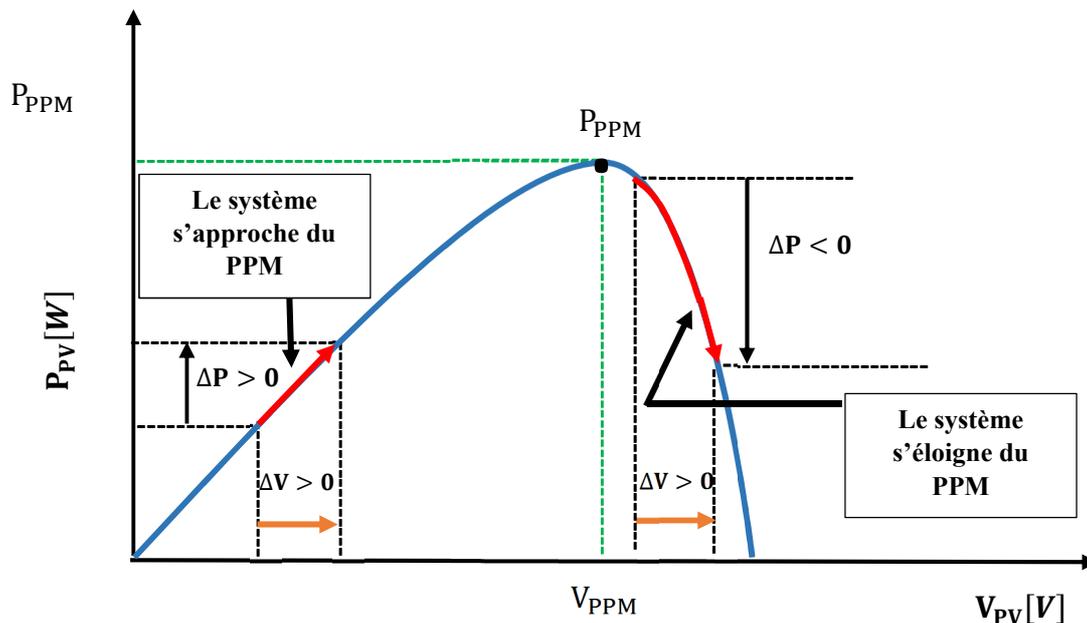


Figure III.1 : Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque

La figure (III.2) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation.

Cependant une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

La figure III.2 présente le diagramme de l'algorithme P&O.

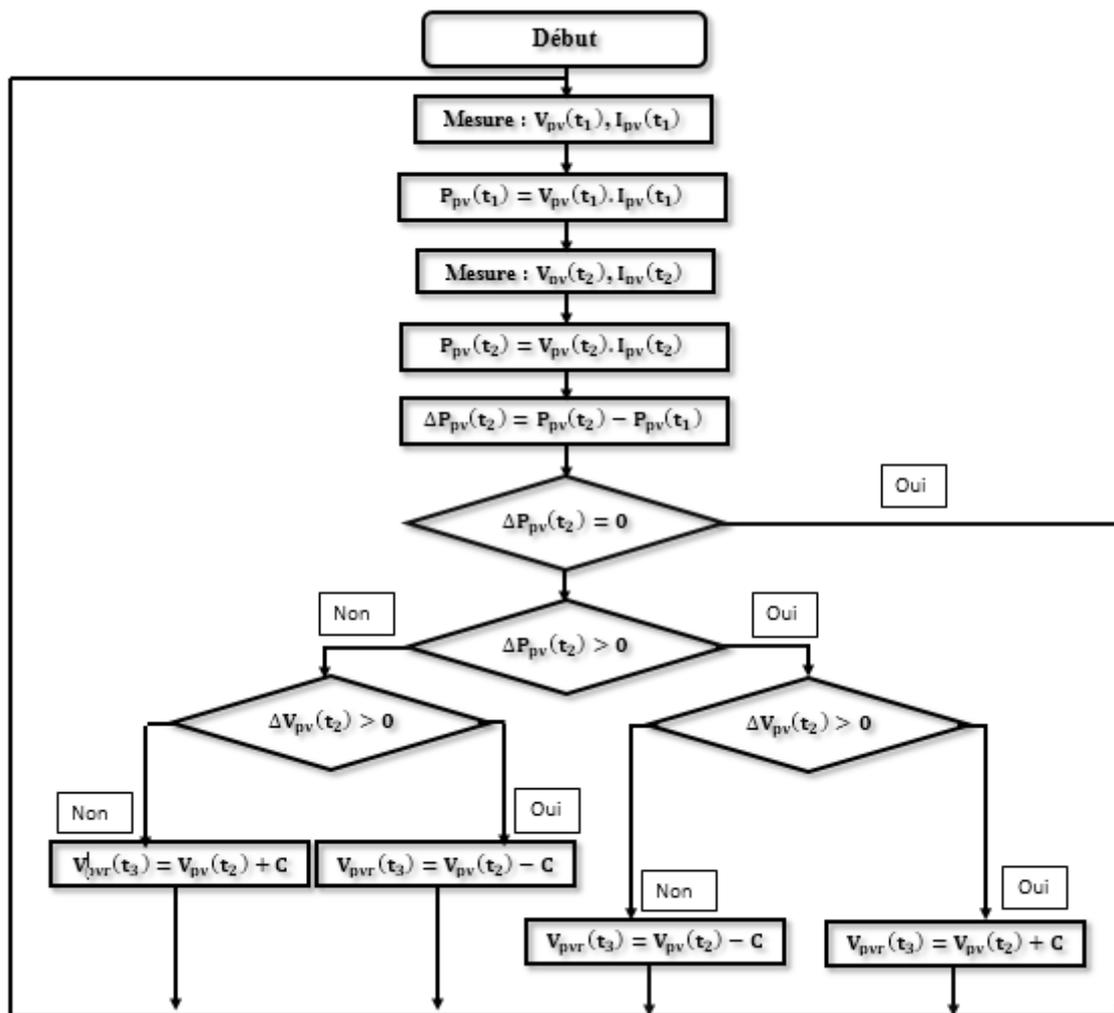


Figure III.2 : Organigramme de la méthode perturbation et observation (« C » est la largeur du pas de perturbation)

III.3 Commande des onduleurs [39]

III.3.1 Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis

Pour chaque bras de l'onduleur les interrupteurs T_i et T'_i ($i = 1, 2, 3$) sont reliés l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur ou le changement de signe de la différence entre le courant de référence et le courant mesuré n'entraîne pas instantanément le basculement du comparateur à cause de l'effet de l'hystérésis, c'est-à-dire que le courant mesuré évolue en augmentant jusqu'à ce que ΔI soit égal à h (h est la largeur de la bande d'hystérésis). Le comparateur bascule ou l'autre Interrupteur rentre en conduction à son tour tant que $\Delta I < h$.

Le contrôle des courants par régulateurs à hystérésis force le courant de phase à suivre le courant de référence. L'imposition des courants sinusoïdaux à la machine garantit un couple électromagnétique non fluctuant, l'approche la plus simple qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence est illustré par la figure (III.2). Les conditions

de commutation des trois commutateurs statiques S_i ($i=1, 2,3$) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques (S_i) correspondants de la façon suivante :

$$S_i = -1 \text{ si } i_i \geq i_{ref} + \Delta i$$

$$S_i = 1 \text{ si } i_i \leq i_{ref} - \Delta i$$

$$S_i = S_{i-1} \text{ si } i_i = i_{ref}$$

Tel que :

i_i ($i=1,2,3$): Représentent les courants des phases statorique (i_a, i_b, i_c).

i_{ref} ($i=1,2,3$): Représentent les courants de référence issus des circuits de commande des trois bras de l'onduleur.

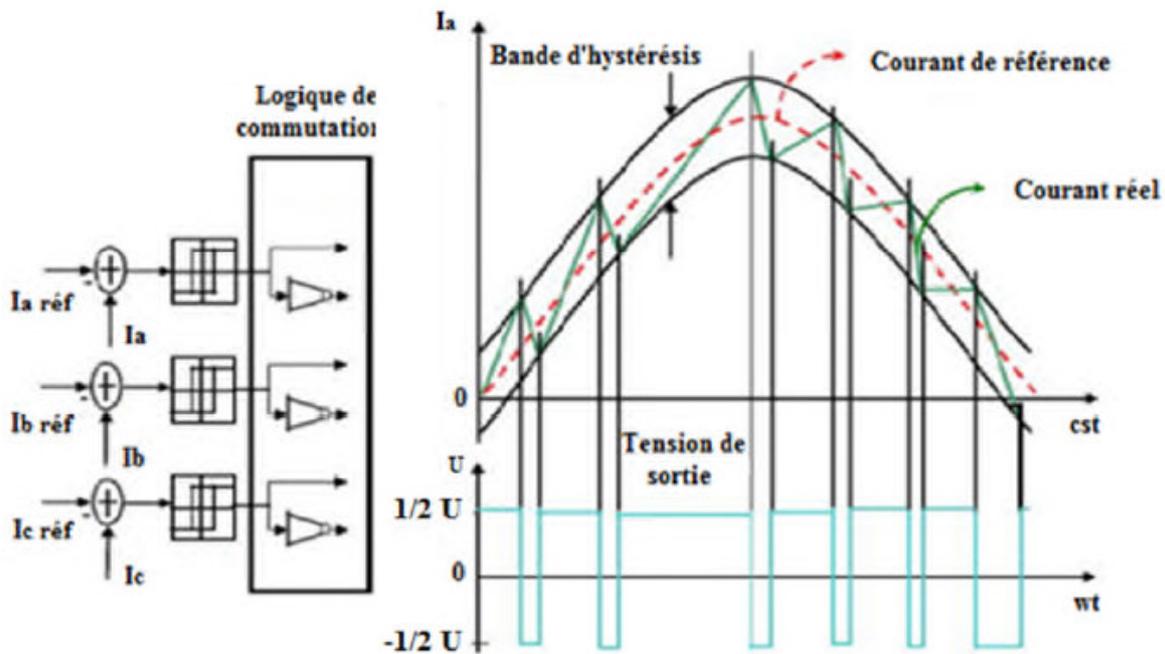


Figure III.3 : Illustration de la bande de courant à hystérésis

III.4 Choix de la méthode de dimensionnement [36]

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système PV.

❖ La méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation

Cette méthode permet d'optimiser le dimensionnement d'un système dans des conditions complexes (fluctuation saisonnières de l'irradiation, ciel nuageux pour plusieurs jours...etc.) grâce à un logiciel adapter. L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut connaître l'irradiation qui correspond aux données horaires sur le site d'installation pour un nombre d'années trop grand (10 à 20ans).

❖ **La méthode de mois le plus défavorable**

Dans cette méthode, on estime l'énergie récupérable pour une période critique d'un mois, appelé le mois le plus défavorable ce mois correspond au mois pendant lequel la valeur de l'irradiation moyenne mensuelle est la plus faible de l'année ou dans certains pays la période d'hivers est rude (le mois de décembre est choisi en Algérie).

❖ **La méthode de la moyenne annuelle**

Cette méthode est très proche de celle du mois le plus défavorable. Elle aussi utilise l'irradiation journalière [KWh/m². j]. Mais pour une moyenne qui s'étant pour toute une année au lieu d'un seul mois. Donc on calcule la moyenne mensuelle de l'énergie (irradiation) récupérable sur un site pour les 12 mois de l'année et on effectue la moyenne annuelle de celle-ci.

✚ **Remarque**

La méthode du mois le plus défavorable présentée est celle qu'on va utiliser dans notre travail.

III.5 Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque [35]

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

III.5.1 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.

III.5.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire [37]

Le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire nous mène à dimensionner la pompe.

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 :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \cdot q_v \quad (III.1)$$

Avec :

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

h : Hauteur manométrique totale atteinte la pompe(m).

q_v : Débit désiré (m^3/S).

ρ : Masse volumique d'eau($1000kg/m^3$).

III.5.3 Détermination de l'énergie solaire disponible [18]

Il est nécessaire de connaître avec une assez bonne précision l'énergie solaire reçue en moyenne par jour sur le site pendant une période donnée.

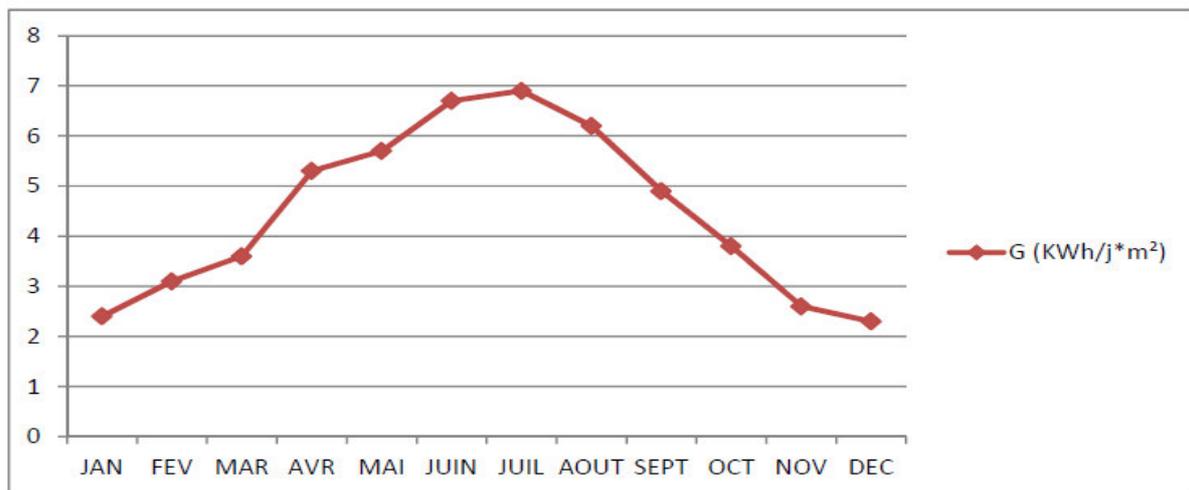


Figure III.4 : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaïa de 1998 à 2007

III.5.3.1 Inclinaison et orientation optimale des capteurs photovoltaïques

L'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.

Les panneaux doivent constamment maintenir un angle droit avec les rayons soleil, si non orientés en plein Sud dans l'hémisphère Nord et plein Nord dans l'hémisphère Sud.

III.5.3.2 Mois de dimensionnement

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, son principe est de réaliser un bilan énergétique sous les conditions les plus défavorables pour le système.

C'est-à-dire, si le système fonctionne durant ce mois il fonctionnera dans les autres mois, donc il nous garantit un fonctionnement annuel.

L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire correspondantes à ce mois serviront pour le choix des composantes du système.

III.5.4 Choix des composantes [37]

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_{ele}), 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 :

$$P_{pv} = \frac{E_{ele}}{\tau_p(1-\sum P_{perdes})} \quad (III.2)$$

Le nombre de panneaux nécessaires se calcule par :

$$N_p \geq \frac{P_{pv}}{P_{ppm}}$$

Avec :

$P_{ppm}=110W$ Puissance maximale délivrée par le générateur pour les conditions standards. ($E_s=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$)

❖ Dimensionnement de la batterie [23]

Le calcul de la capacité (C_{bat}) des batteries dépend de plusieurs données, elle peut être calculée comme suit :

$$C_{bat} = \frac{E_{ele} * N_j}{U_{bat} * \eta_{bat} * PDD} \quad (III.3)$$

Le nombre de batteries utilisées peut se calculer à la manière suivante :

$$N_b \geq \frac{C_{bat}}{C_{bat,u}}$$

Avec :

P_{ele} : Energie électrique requise pour le pompage.

N_j : Nombre de jour d'autonomie.

PDD : Profondeur de décharge de la batterie.

η_{bat} : Rendement de la batterie.

V_{bat} : Tension de la batterie.

N_b : Nombre de batterie.

$C_{bat,u}$: Capacité unitaire.

❖ Dimensionnement du moteur asynchrone

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

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

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 :

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

Avec :

η_{ond} : Rendement de l'onduleur.

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

$$E_{ele} = P_d \tau_p \quad (III. 6)$$

Avec :

E_{ele} : 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:

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

Avec

V : Quantité d'eau requise (m^3).

Q_n : Débit nominal (m^3 / 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 :

$$P_h = \eta_p \cdot P_{mec} \quad (III. 8)$$

Avec :

η_p : Rendement de la pompe.

❖ Dimensionnement du réservoir d'eau [37]

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. Elle 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 :

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

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.

$C_{b\acute{e}ta}$: 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 :

$$L_{rmin} = 1.5N_{fa}(N_{per}C_{per} + C_{b\acute{e}ta} + C_{irr}) \quad (III. 10)$$

❖ Application [50]

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 100 familles de 4 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 30 m³ (selon l'équation III.9), mais nous on va prendre un réservoir de 45 m³ (selon l'équation III.10).

Le calcul des différents éléments du système de pompage photovoltaïque nous a permis de choisir la pompe centrifuge à utiliser, son moteur d'entraînement ainsi que le nombre de panneaux nécessaires pour satisfaire les besoins quotidiens demandés, cela pour :

- Réservoir d'eau V=45 m³.
- Une hauteur h= 10 m.
- Débit nominal Q_n=14m³/h.
- Rendement de pompe η_p=55%.
- Rendement du moteur η_m=85%.
- Rendement de l'onduleur η_{ond}= 95%.
- Pertes qu'on suppose égales à 20%.
- Capacité de la batterie C_{bat}=100 Ah.
- Tension de la batterie V_{bat}=12 V.
- Profondeur de décharge PDD=80%.
- Rendement η_{bat} = 90%.
- Nombre de jour d'autonomie j_{aut}=4jours.

Et pour cela on a choisi l'onduleur suivant :

Tableau III.1 : Caractéristique de l'onduleur choisis [46]

Type d'onduleur	Puissance max (W)	Plage de tension PPM (V)	Fréquence (Hz)
Sunny Boy- 2000HF US 208V	2100	175-480	50

Donc on aura :

Tableau III.2 : Dimensionnement du système de pompage

Puissance hydraulique $P_h(W)$	$P_h = \rho . g . h . q_v$	$P_h = 381.5 W$
Puissance mécanique requise par la pompe $P_{mec}(W)$	$P_{mec} = \frac{P_h}{\eta_p}$	$P_{mec} = 693.6363 W$
Puissance électrique nécessaire pour que le moteur fonctionne $P_{ele}(W)$	$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta_m}$	$P_{ele} = 816.0427W$

Puissance délivrée par l'ensemble des modules P_d	$P_d = \frac{p_{ele}}{\eta_{ond}}$	$P_d = 858.9924W$
Temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau τ_p	$\tau_p = \frac{V}{Q_n}$	$\tau_p = 3.21h$
Energie électrique journalière demandée par la charge E_{ele}	$E_{ele} = P_d \tau_p$	$E_{ele} = 2757.3656 Wh/j$
Puissance du générateur photovoltaïque P_{pv}	$P_{pv} = \frac{E_{ele}}{\tau_p (1 - \sum P_{pertes})}$	$P_{pv} = 1073.7405 W$
Nombre de panneaux nécessaire N_p	$N_p \geq \frac{P_{pv}}{P_{mpp}}$	$N_p \geq 9.76 \rightarrow N_p = 10 \text{ panneaux}$
Nombre de panneaux séries ($N_{p.series}$)	$N_{p.series} = \frac{V_{dc}}{V_{pv}}$	$N_{p.series} = 5 \text{ panneaux}$
Nombre de panneaux parallèles ($N_{branches}$)	$N_{branches} = \frac{N_p}{N_{p.series}}$	$N_{branches} = 2 \text{ branches}$
Capacité de la batterie sans pertes C_{bat}	$C_{bat} = \frac{E_{ele} * N_j}{V_{bat} * \eta_{bat} * PDD}$	$C_{bat} = 1276.5581 Ah$
nombre de batteries à utilisés N_b	$N_b = \frac{C_{bat}}{C_{bat,u}}$	$N_b = 13 \text{ batteries}$

❖ **Groupement en séries-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).

$N_{p. \text{Séries}} = 5$ Panneaux en séries.

$N_{branches} = 2$ branches.

Le schéma de générateur photovoltaïque proposé est présenté sur la figure (III.5) :

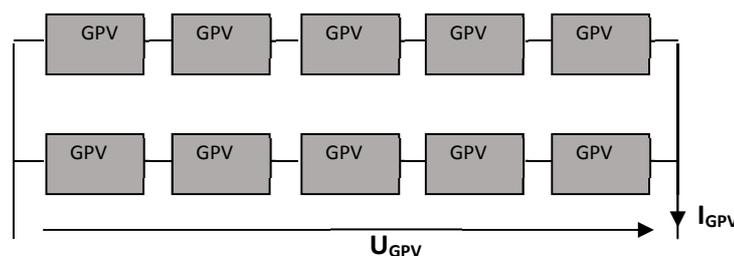


Figure III.5 : Le schéma de générateur photovoltaïque proposé

Avec :

$$V_{\text{GPV}} = N_{\text{p.series}} * V_{\text{mpp}} = 5 * 35 = 175 \text{ V}$$

$$I_{\text{GPV}} = N_{\text{branches}} * I_{\text{mpp}} = 2 * 3.15 = 6.30 \text{ A}$$

$$P_{\text{GPV}} = V_{\text{GPV}} * I_{\text{GPV}} = 245 * 9.45 = 1102.5 \text{ W}$$

III.6 Commande de la machine asynchrone

La machine à courant continu à excitation séparée offre comme principal avantage d'être facilement commandable, le flux et le couple sont découplés et contrôlés indépendamment et grâce à cette propriété, des hautes performances dynamiques peuvent être atteinte. Cependant la présence du système balais-collecteur limite ses domaines d'utilisation (puissance, vitesse).

L'absence du système balais-collecteur est l'un des avantages décisifs pour remplacer la machine à courant continu par celle à courant alternatif et précisément la machine asynchrone.

Toutefois cette machine possède une difficulté au niveau de la commande. C'est-à-dire que le couple et le flux sont des variables fortement couplées et que toute action sur l'une d'elle se répercute sur l'autre. [47]

Cela consiste à introduire la méthode du contrôle vectoriel indirecte par orientation du flux rotorique. La méthodologie consiste en premier lieu à présenter les équations du modèle de la machine sous forme des schémas bloc, puis à adjoindre la commande sur cette dernière formulation.

III.6.1 Mode de réglage de la vitesse du moteur asynchrone

La vitesse du moteur asynchrone dépend de la fréquence d'alimentation qui détermine la vitesse asynchrone. En réalité le rotor tourne à une vitesse N_r peut inférieur à la vitesse de synchronisme N_s .

$$N_r = N_s(1 - g) \quad (\text{III. 11})$$

Avec :

$$N_r = 60 \cdot \frac{f_s}{p} \quad (\text{III. 12})$$

En résulte de ces relations qu'on peut varier la vitesse de la machine asynchrone par :

- Changement de nombre de pair de pôles.
- Changement de la fréquence statorique.
- Changement de glissement.

Pour quoi la commande vectorielle ?

Les machines asynchrones utilisées en asservissement de vitesse dans les applications industrielles subissent actuellement un développement spectaculaire, au détriment des moteurs

à courant continu, qui sont moins performants en terme du couple et notamment beaucoup plus onéreux du point de vue construction et entretien.

La machine à courant continu à excitation séparée offre comme principale avantage, c'est d'être facilement commandable. Le flux et le couple sont découplés et contrôlés indépendamment [37].

- Le courant inducteur I_f est producteur de flux.
- Le courant induit I_a est producteur du couple.

Cependant, la présence du correcteur et des balais a toujours été le point faible de la machine à courant continu. En effet ce commutateur mécanique limite la puissance, la vitesse et son entretien devient plus exigeant.

Face à ces limitations la simplicité de construction, le coût, l'environnement de fonctionnement et la robustesse des machines asynchrones ont toujours attiré les chercheurs. En effet, dans ces machines le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus, ce qui rend la machine difficile à commander, cette difficulté réside dans le fait qu'il existe un couplage complexe entre les variables d'entrées (tension, fréquence) et les variables de sortie (couple, vitesse) en passant par les variables internes de la machine (courant rotorique, flux).

Ainsi grâce à l'autopilotage, la commande d'un moteur asynchrone devient similaire d'un moteur à courant continu et l'absence du collecteur mécanique assure sa robustesse.

La méthode classique de commande dite scalaire, consistant à contrôler le couple par le glissement fréquentiel et le flux par le rapport de la tension d'alimentation à la fréquence ne peut pas donner des performances dynamiques appréciables, bien sûr dans le régime transitoire comme celles d'une machine à courant continu bien réglée.

Pour aboutir à un contrôle de même type que celui de la machine à courant continu, Blaschke avait donné naissance en 1972 une nouvelle théorie de commande des machines à courant alternatif dite commande par flux orienté ou commande vectorielle. Cette dernière est utilisée afin de piloter la machine suivant deux axes orthogonaux : un axe de flux et un axe couple. Ceci est réalisable évidemment à l'extérieur de la machine et au niveau de la commande [37].

III.6.2 Principe de la commande [37]

La théorie de cette commande permet d'assimiler la machine asynchrone (MAS) à une machine à courant continu à excitation séparée. La figure (III.6) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle réalisée sur une machine à induction.

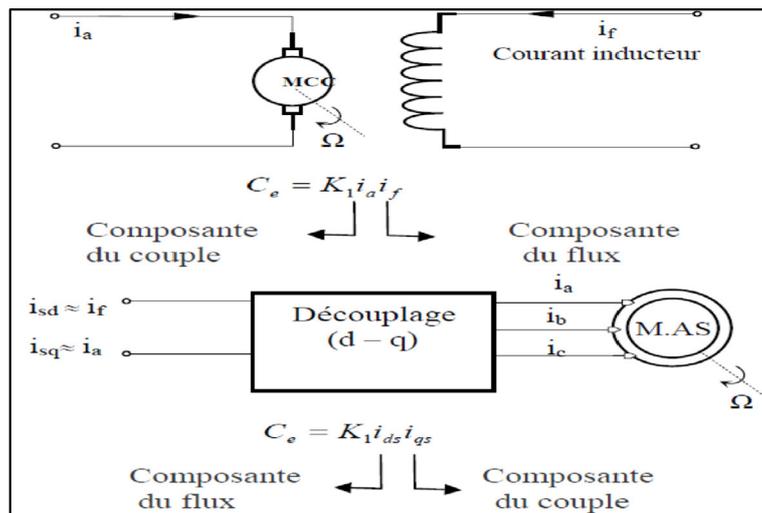


Figure III.6 : Principe de découplage

III.6.3 Choix d'orientation du flux [37]

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe « d.q ».

Un choix judicieux de l'angle d'orientation du repère « d.q » entraîne l'alignement de l'axe d sur la résultante du flux, cet alignement permet l'annulation de la composante transversale du flux comme il est illustré sur la figure (III.7).

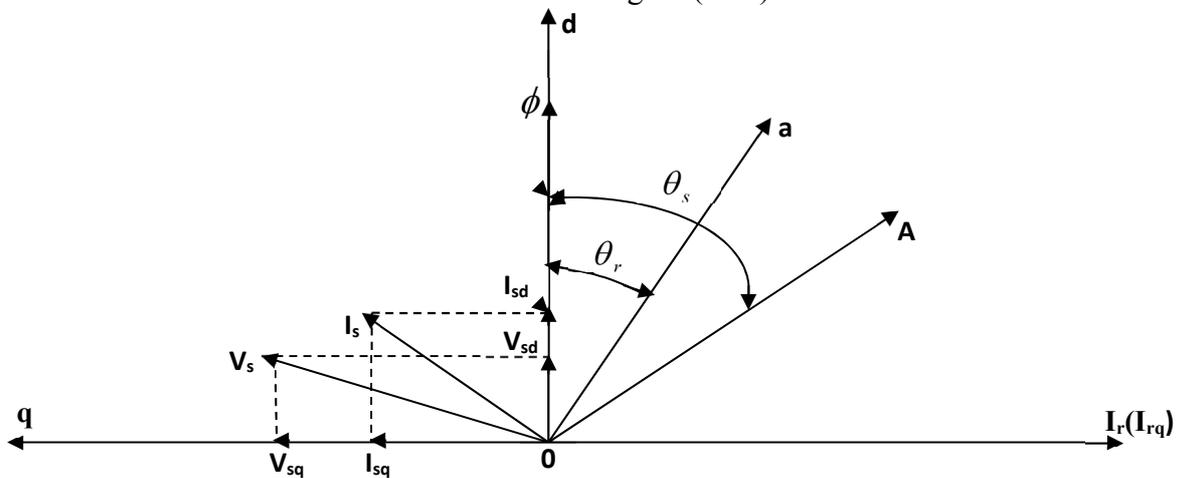


Figure III.7 : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer)

Dans ce cas le flux rotorique est orienté sur l'axe d d'une référence solide au champ tournant de vitesse ω_s , donc on peut remarquer les propriétés suivantes:

- La composante transversale du flux rotorique est nulle.
- L'axe d est aligné systématiquement sur le vecteur du flux rotorique.
- La composante longitudinale du courant rotorique est nulle si le flux rotorique est maintenu constant.

D'après ces propriétés on peut écrire:

$$\begin{cases} \varphi_{rq} = 0 \\ \varphi_{rd} = \varphi_r = \text{cst} \\ I_{rd} = 0 \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

On remplace ce système d'équations dans le système (II.47) on obtient:

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = M I_{sd} = \varphi_r \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

À partir de la dernière équation de système (III.14) on aura l'équation suivante :

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} I_{sq} \quad (\text{III. 15})$$

On remplace le système (III.13) dans l'équation (II.49) on obtient:

$$C_{em} = \frac{PM}{L_r} \varphi_r I_{sq} \quad (\text{III. 16})$$

On remplace l'équation (III.14) dans l'équation (III.16), le couple devient:

$$C_{em} = K_1 I_{sd} I_{sq} \quad (\text{III. 17})$$

Avec :

$$K_1 = \frac{PM^2}{L_r} \quad (\text{III. 18})$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \Omega_s \cdot \varphi_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 19})$$

$$\begin{cases} V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \Omega_s \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III. 20})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\Omega_s - \Omega) \cdot \varphi_{rq} \end{cases} \quad (\text{III. 21})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\Omega_s - \Omega) \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 22})$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 23})$$

$$\begin{cases} \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III. 25})$$

$$\begin{cases} \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 26})$$

D'après l'équation matricielle (III.21) :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r I_{rd} \quad (\text{III. 27})$$

Par ailleurs, l'équation (III.22) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante:

$$\varphi_r = -\frac{R_r I_{rq}}{\Omega_r} \quad (\text{III. 28})$$

La relation (III.28) correspond en fait à la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir φ_r en fonction de I_{rq} pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir de la relation (III.25), exprimer le courant I_{rd} comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\varphi_r - M I_{sd}}{L_r} \quad (\text{III. 29})$$

D'après la relation matricielle (III.26), on peut écrire pour :

$$I_{rq} = -\frac{M I_{sq}}{L_r} \quad (\text{III. 30})$$

III.6.4 Expressions des tensions statorique avec flux rotorique orienté

Suite aux différentes simplifications établies ci-dessus, nous allons ré-exprimer les tensions statorique en fonction des courants statorique et du flux φ_r . Les développements seront effectués uniquement pour V_{sd} sachant que le raisonnement est identique pour V_{sq} .

En dérivant le flux φ_{sd} par rapport au temps, dont l'expression est donnée par (III.23), on obtient:

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} \quad (\text{III. 31})$$

Dans l'équation (III.19), on remplace ensuite φ_{sq} (relation (III.24)) et $\frac{d\varphi_{sd}}{dt}$ par leurs expressions respectives. Cela aboutit à :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - \Omega_s \cdot L_s \cdot I_{sq} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \Omega_s \cdot M \cdot I_{rq} \quad (\text{III. 32})$$

En échangeant les courants rotorique par les relations (III.29) et (III.30), on obtient :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \left(L_s + \frac{M^2}{L_r} \right) \frac{dI_{sd}}{dt} - \Omega_s \cdot \left(L_s + \frac{M^2}{L_r} \right) \cdot I_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (\text{III. 33})$$

Sachant que le coefficient de dispersion s'écrit : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}$ les tensions statorique peuvent s'écrire comme suite :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \sigma L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - \Omega_s \cdot \sigma L_s I_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (\text{III. 34})$$

De manière identique, on peut réécrire V_{sq} sous la forme suivante :

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \sigma L_s \frac{dI_{sq}}{dt} - \Omega_s \cdot \sigma L_s I_{sd} + \Omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \varphi_r \quad (\text{III. 35})$$

Dans ce travail, nous avons choisi d'utiliser des correcteurs de courants par hystérésis. De ce fait, il n'y a pas de consignes de tensions à déterminer et donc la connaissance du modèle interne de moteur n'est pas nécessaire et il n'y a pas besoin de prendre en considération les termes de compensation dans notre système de commande.

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer φ_r et ω_s pour l'application de la transformation de Park. [44]

III.6.5 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique

Seules les grandeurs statorique sont accessibles, les grandeurs rotorique ne le sont pas. Il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statorique. [45]

Donc à partir des équations (III.27 et III.29) et en utilisant la notation de Laplace On obtient:

$$\varphi_r = \frac{M \cdot I_{sd}}{1 + T_r s} \quad (III. 36)$$

Tel que :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III. 37)$$

On obtient aussi des équations (III.28 et III.30) la formule de la pulsation rotorique :

$$\Omega_r = \frac{M \cdot I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} \quad (III. 38)$$

En remplaçant la dernière relation dans l'équation $\omega_s - \omega_r = P \cdot \Omega = \omega$ on aura :

$$\Omega_s = \frac{M \cdot I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} + P \cdot \Omega \quad (III. 39)$$

III.6.6 Calculs des régulateurs [45]

➤ Réglage de la boucle de vitesse

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (III.8):

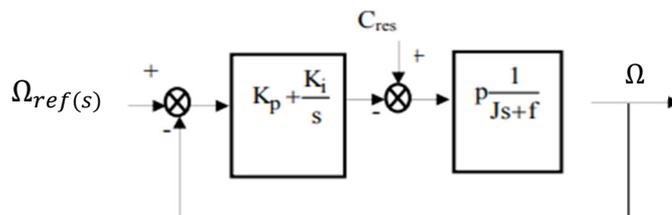


Figure III.8 : Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nul s'écrit :

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{K_p s + K_i}{Js^2 + (K_p + f)s + K_i} \quad (III. 40)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2^{ème} ordre dont la forme canonique est de la forme suivante :

$$\frac{1}{\frac{1}{\Omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\Omega_n} s + 1} \quad (\text{III. 41})$$

Par comparaison et avec un coefficient d'amortissement $\xi = 0.7$ et une pulsation ω_n donnée, on obtient :

$$\begin{cases} K_i = J. \Omega_n^2 \\ K_p = 2. \xi. \Omega_n - f \end{cases} \quad (\text{III. 42})$$

➤ **Régulateur de flux**

Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé. Il convient de régler le flux en agissant sur la composante du courant statorique I_{sd} .

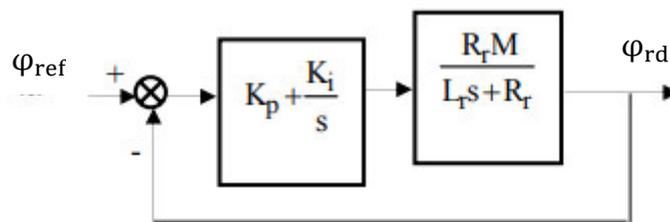


Figure III.9 : Schéma bloc du réglage de flux par un PI

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit:

$$\frac{\varphi_{rd}}{\varphi_{ref}} = \frac{(K_p s + K_i). R_r. M}{L_r s^2 + (R_r. M. K_p + R_r) s + R_r. M. K_i} \quad (\text{III. 43})$$

Avec la même procédure vue précédemment on trouve les éléments du régulateur de flux:

$$\begin{cases} K_i = \frac{L_r \Omega_n^2}{R_r. M} \\ K_p = \frac{2. \xi. L_r. \Omega_n}{R_r. M} - \frac{1}{M} \end{cases} \quad (\text{III. 44})$$

III.7 Simulation du système contrôlé par la commande vectorielle

Dans cette partie on a appliqué la méthode de perturbation et d'observation (P&O) pour optimiser le générateur PV et pour contrôler le moteur asynchrone on a appliqué la commande vectorielle avec une régulation classique (PI).

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

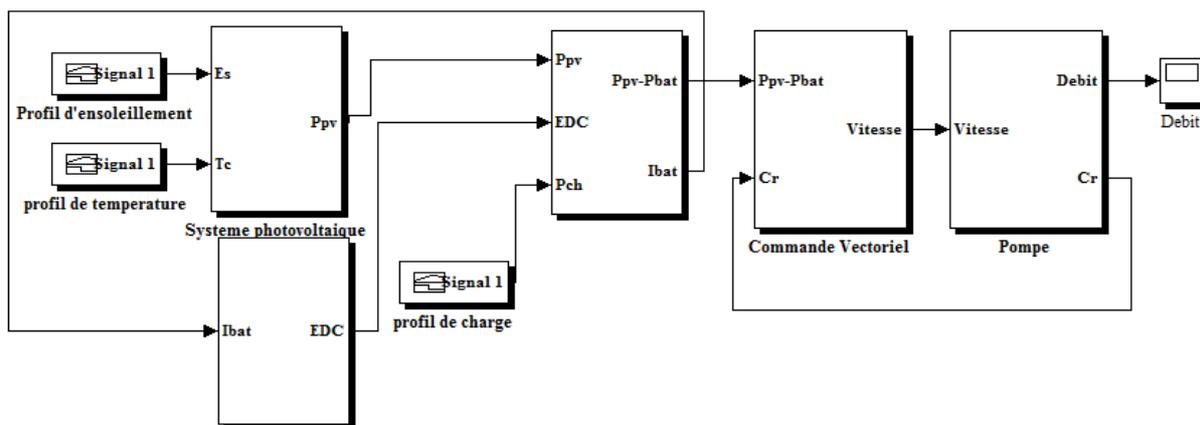


Figure III.10 : Schéma globale du système de pompage photovoltaïque contrôlé par la commande vectorielle

➤ **Premier test** (Fonctionnement sous les conditions constantes)

Les figures suivantes représentent l'évolution des caractéristiques de système de pompage photovoltaïque avec la régulation de la vitesse pour $E_s=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

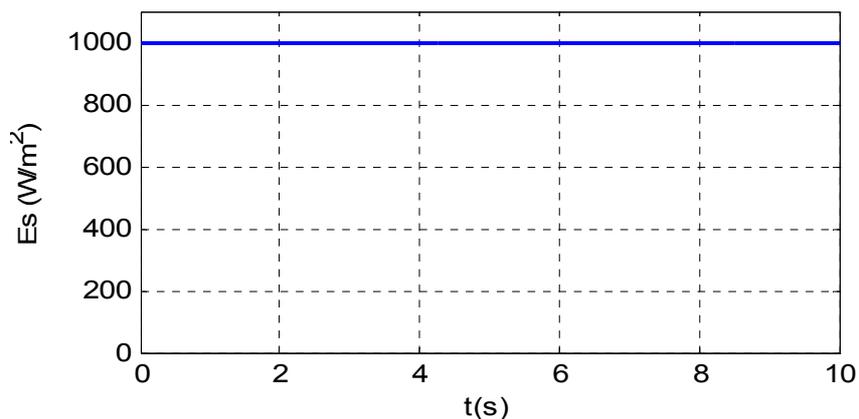


Figure III.11 : profil de l'insolation

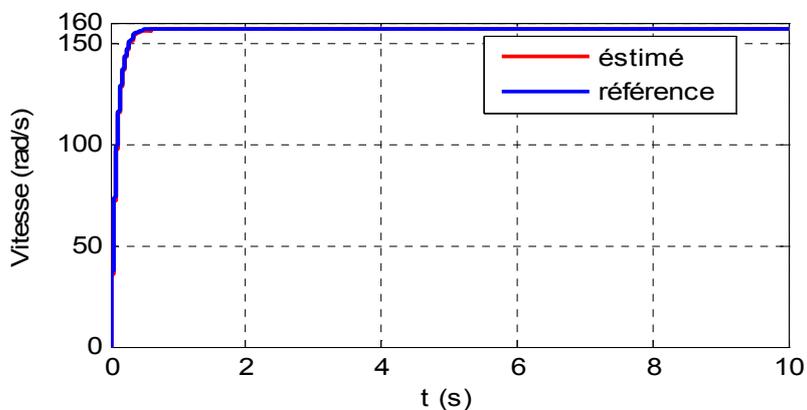


Figure III.12 : Allure de la vitesse pour (1000W/m^2)

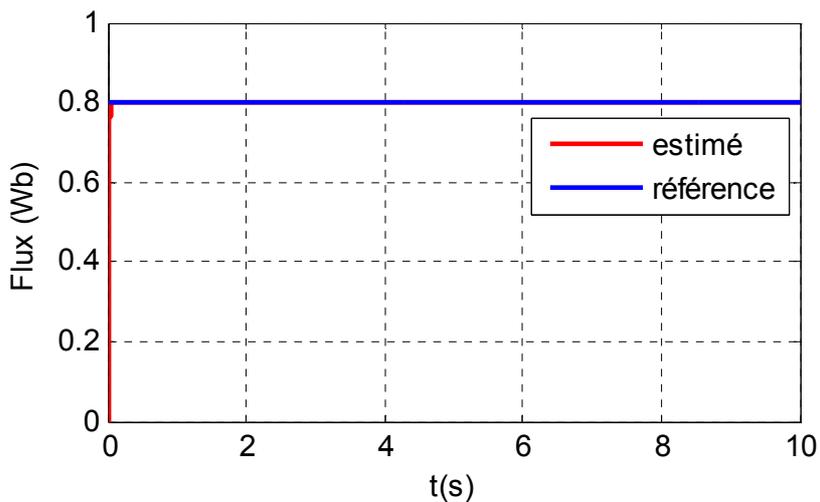


Figure III.13 : Allure du flux pour (1000W/m²)

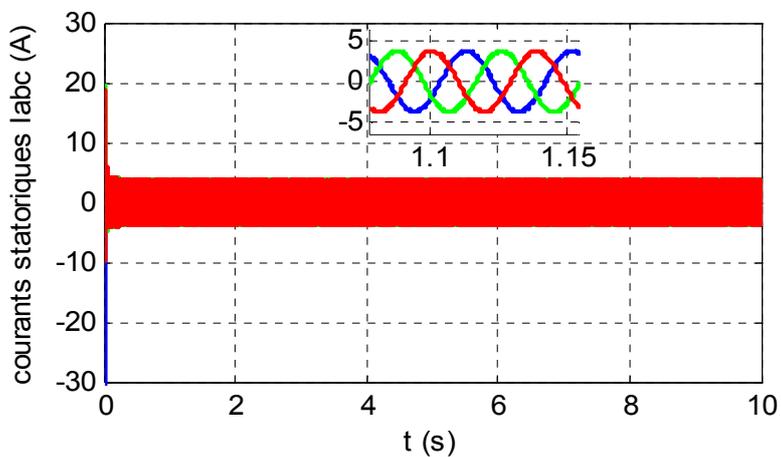


Figure III.14 : les courants statorique pour (1000W/m²)

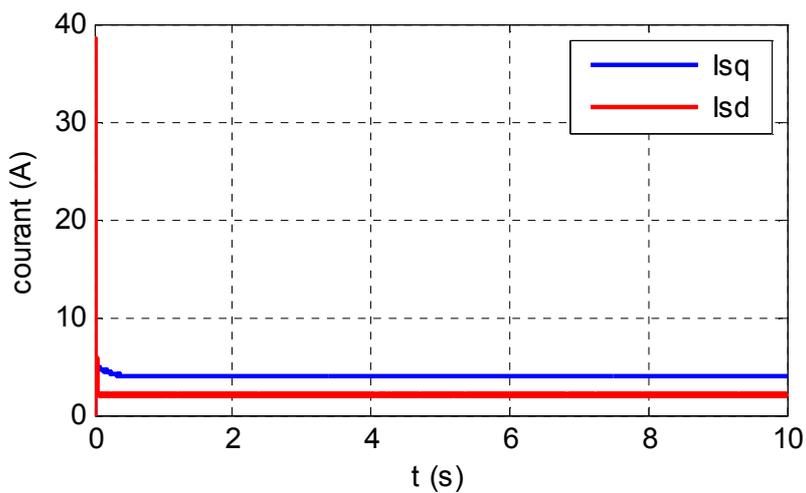


Figure III.15 : Allure du courant quadratique I_{sq} et direct I_{sd} pour (1000W/m²)

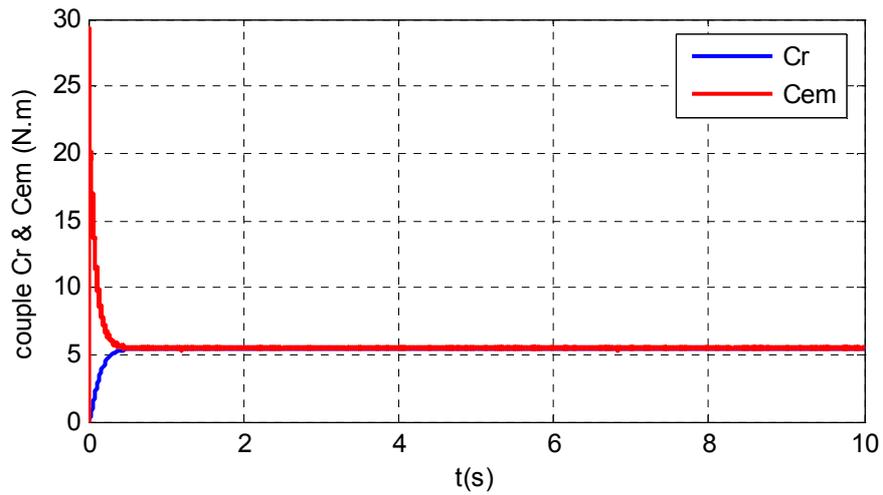


Figure III.16 : Allure du couple électromagnétique Cem, résistant Cr pour (1000W/m²)

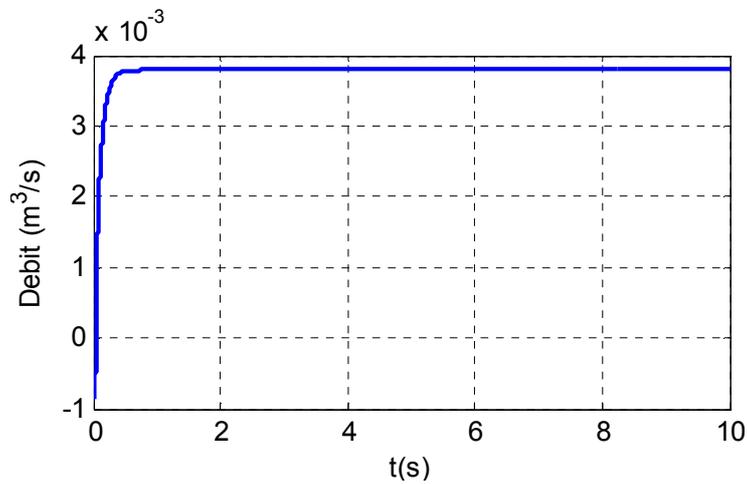


Figure III.17 : Allure du débit pour (1000W/m²)

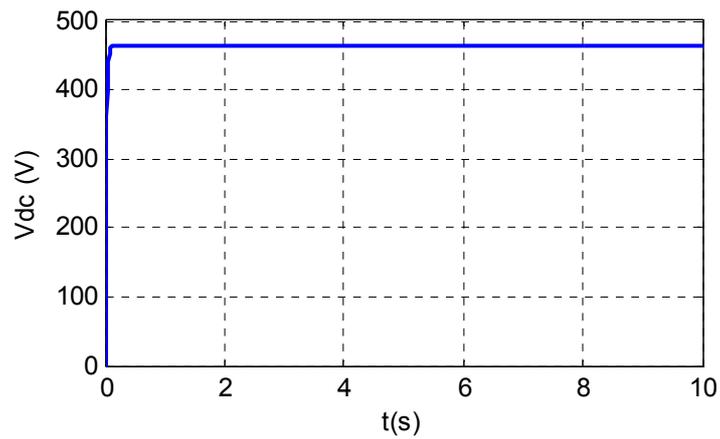


Figure III.18 : Allure de la tension continu à l'entrée de l'onduleur (1000W/m²)

➤ **Second test** (Fonctionnement sous les conditions variables)

Pour comprendre le comportement du système face aux changements d'éclairement on va effectuer une diminution rapide de l'ensoleillement à température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$). On commence par un ensoleillement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et à l'instant $t=5\text{s}$ on bascule à $E_s=500\text{W}/\text{m}^2$:

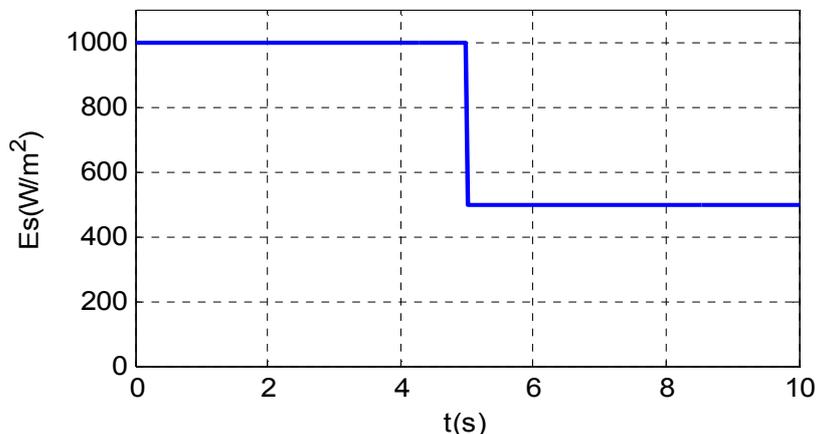


Figure III.19 : profil du l'ensoleillement

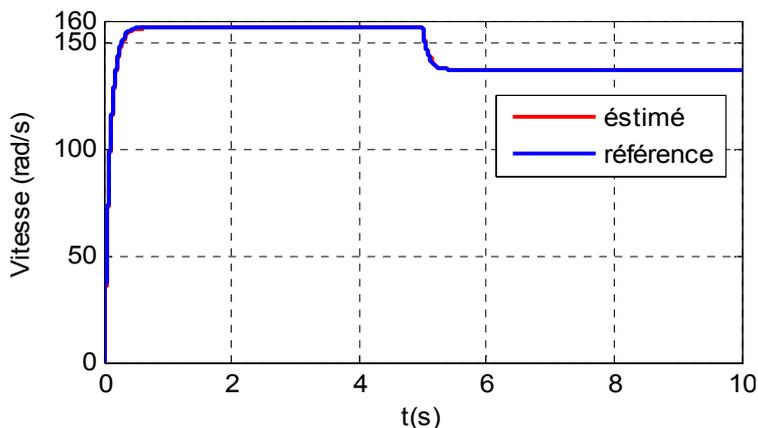


Figure III.20 : Allure de la vitesse pour ($1000\text{W}/\text{m}^2$ et $500\text{W}/\text{m}^2$)

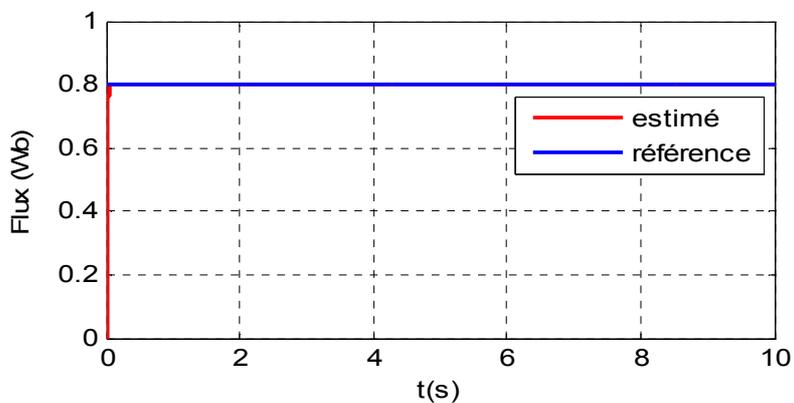


Figure III.21 : flux rotorique ϕ_{rd} pour ($1000\text{W}/\text{m}^2$ et $500\text{W}/\text{m}^2$)

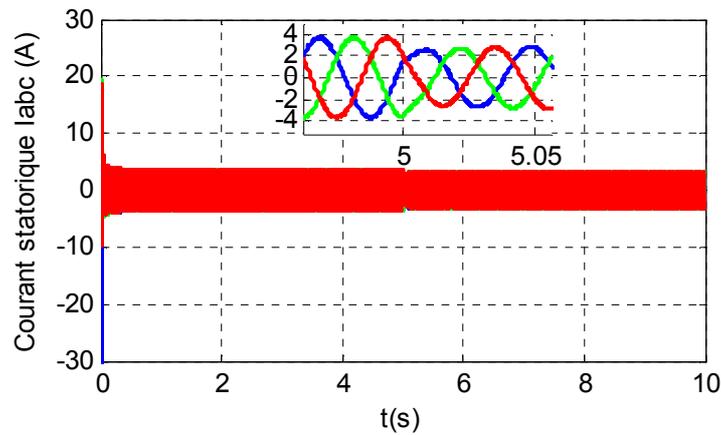


Figure III.22 : les courants statorique pour (1000W/m² et 500W/m²)

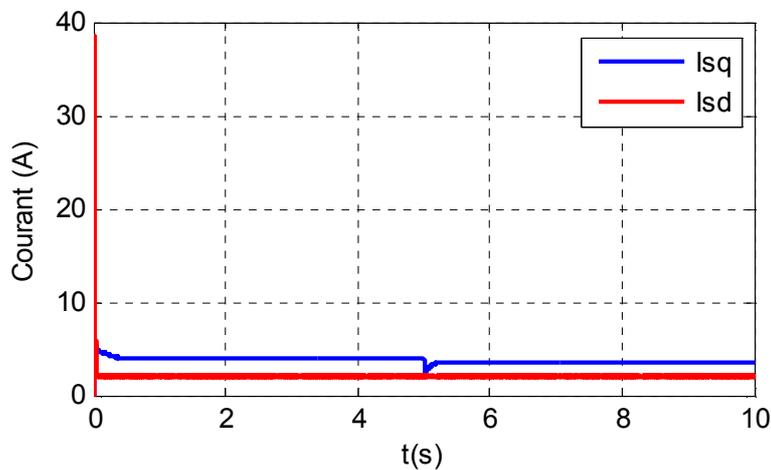


Figure III.23 : allure des courants quadratique I_{sq} et direct I_{sd} pour (1000W/m² et 500W/m²)

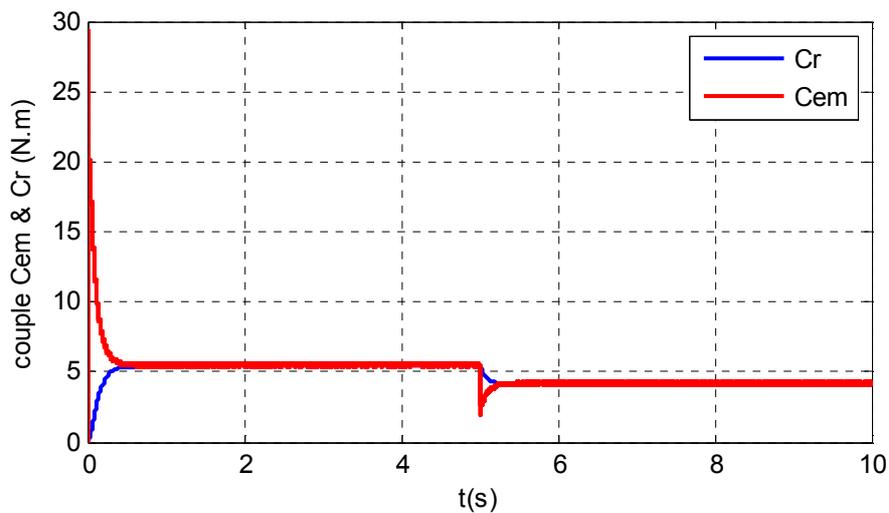


Figure III.24 : le couple électromagnétique C_{em} et résistant C_r pour (1000W/m² et 500W/m²)

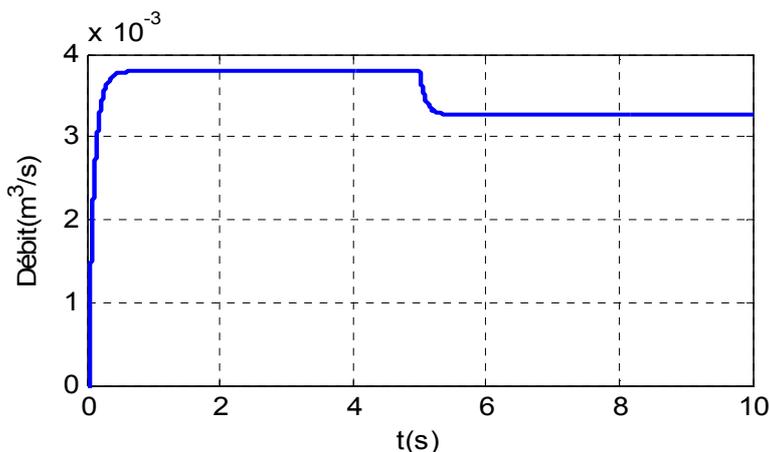


Figure III.25 : Allure du débit pour (1000W/m² et 500W/m²)

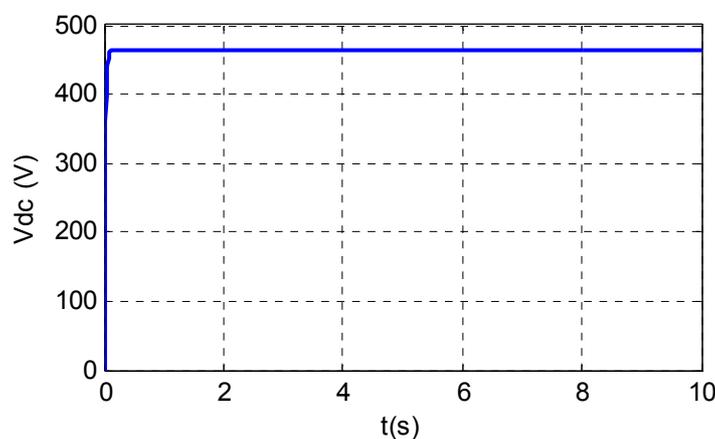


Figure III.26 : Allure de la tension continue à l'entrée de l'onduleur (1000W/m² et 500W/m²)

Interprétation des résultats

- D'après les résultats obtenus dans les figures (III.19, III.20 et III.25), on constate que le débit de système varie avec la variation de la vitesse qui est dû à la variation de l'ensoleillement.
- On constate qu'à l'instant t=5s les caractéristiques C_{em} et C_r (Figure III.24), I_{sq} (figure III.23) et I_{abc} (figure III.22) diminue avec la diminution de l'ensoleillement.
- Les allures du flux et du courant I_{sd} représenté dans les figures (III.21, III.23) ne varie pas cela est dû au découplage entre le flux et le couple imposé par la commande vectorielle.
- On constate également que la tension de bus continu est maintenue constante et suit sa référence quelque soient les variations de l'ensoleillement. (Figures III.18, III.26).

III.8 Gestion de l'énergie entre les différents composants du système [14]

Afin de faire fonctionner le système d'une manière parfaitement autonome, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants.

L'algorithme de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage (protection contre les surcharges et les décharges profondes), pour préserver les propriétés physico-chimiques des batteries et de prolonger leur durée de vie.

La figure (III.27) présente le diagramme de l'algorithme de gestion.

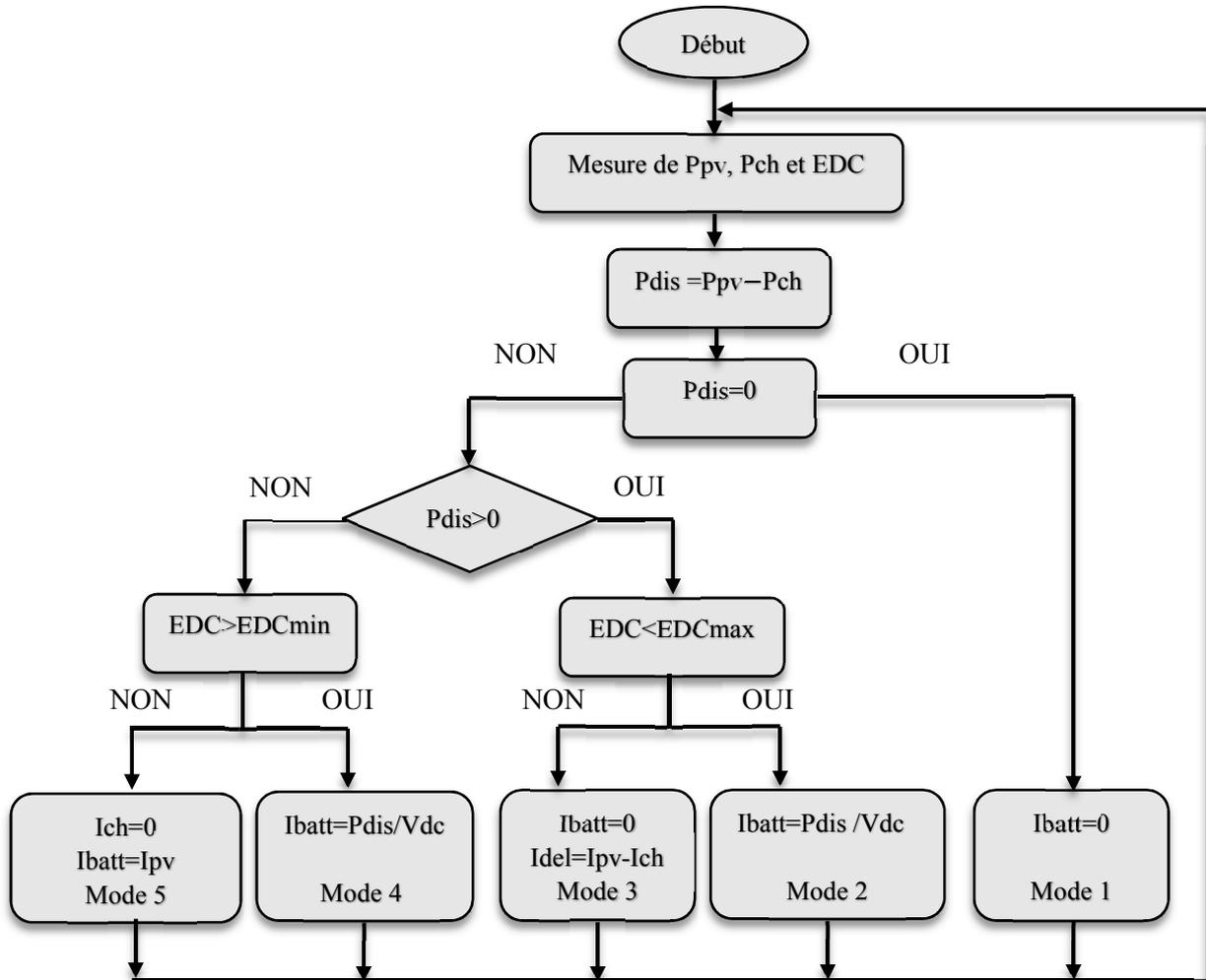


Figure III.27 : Algorithme de gestion d'énergie du système globale

A partir de cet algorithme on peut définir les modes de fonctionnement de ce système de gestion.

Soit P_{pv} la puissance fournie par les panneaux et P_{ch} la puissance demandée par la charge, la différence entre ces deux puissances est noté P_{dis} (puissance disponible) nous obtenons :

$$P_{dis} = P_{pv} - P_{ch} \quad (III. 45)$$

❖ Modes de fonctionnement

✓ **Mode 1:** Dans ce cas la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est égale à la puissance demandée par la charge, ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge.

✓ **Mode 2:** Quand la puissance disponible est supérieure à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est inférieur à EDCmax (90%), on alimente la charge et on charge la batterie.

✓ **Mode 3:** Quand la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDCmax (90%), on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par les panneaux photovoltaïques et le surplus d'énergie sera dirigé vers une résistance de délestage.

✓ **Mode 4:** Ce cas représente la situation où la puissance photovoltaïque est inférieure à la puissance demandée par la charge, donc le manque de puissance sera compensé par la batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDCmin (30%).

✓ **Mode 5:** Dans ce cas, la puissance photovoltaïque est insuffisante pour alimenter la charge et l'état de charge de la batterie est inférieur à EDCmin (30%), donc on déconnecte la batterie et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecter dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu d'énergie disponible.

III.8.1 Simulation du système de pompage photovoltaïque avec stockage

Nous avons simulé le système de pompage PV avec batterie pour une variation de l'éclairement pour une journée d'été et une journée d'hiver.

Le système de pompage comporte un générateur photovoltaïque (10 panneaux de 110W) optimisé par MPPT (P&O) avec l'application de la commande vectorielle avec des régulateurs classique (PI) pour contrôler le moteur asynchrone (MAS) de 750 W et un banc de batteries.

- **Les résultats de simulation du système globale pour une journée d'hiver (00-24h) et une journée d'été (24-48h)**

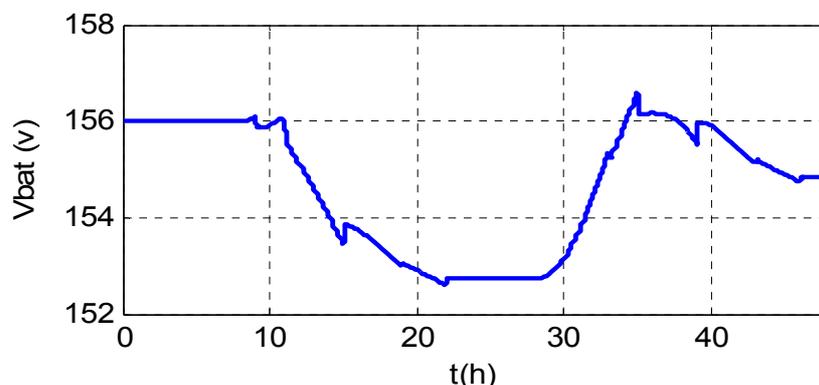


Figure III.28 : Tension aux bornes des batteries

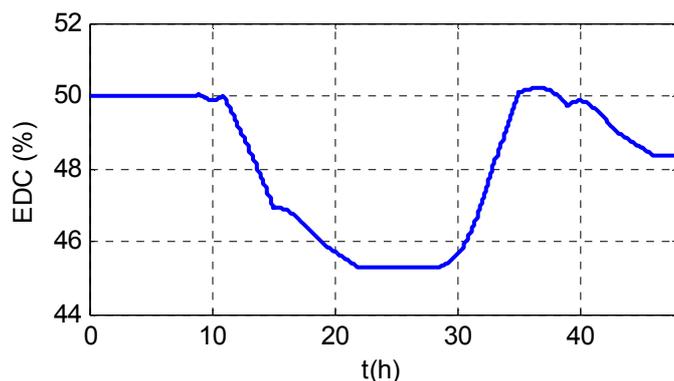


Figure III.29 : Allure de l'état de charge de la batterie

On remarque que l'allure de la tension aux bornes de la batterie (figure III.28), ainsi que celle de l'état de charge figure (III.29), évoluent de la même manière, donc l'EDC est l'image de la tension.

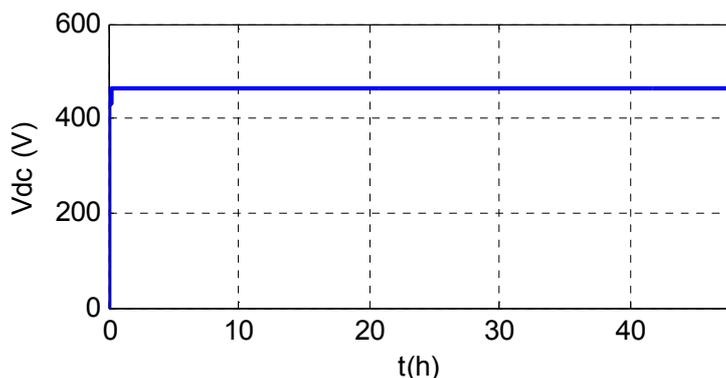


Figure III.30 : Allure de la tension du bus continu

La figure (III.30) présente la tension de bus continu, on remarque que cette tension est bien régulée à sa valeur de consigne de 465 V.

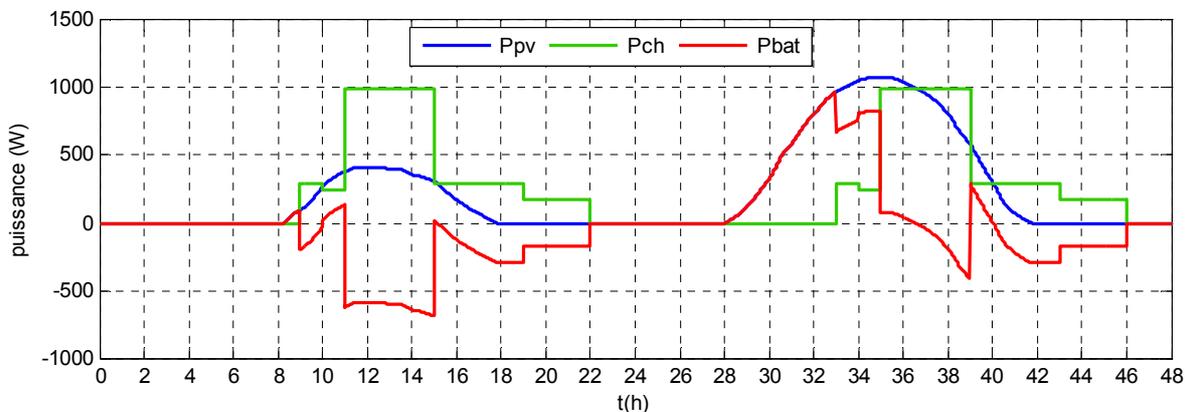


Figure III.31 : Allure de différentes puissances

La figure (III.31) représente la puissance PV, la puissance de charge (P_{ch}) et la puissance de la batterie (P_{bat}) pour une journée d'hiver et une autre d'été.

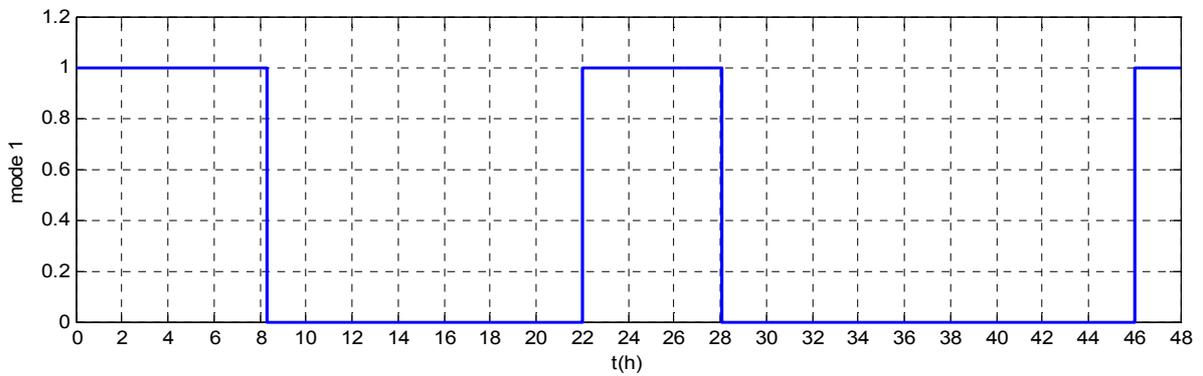


Figure III.32: allure de mode 1

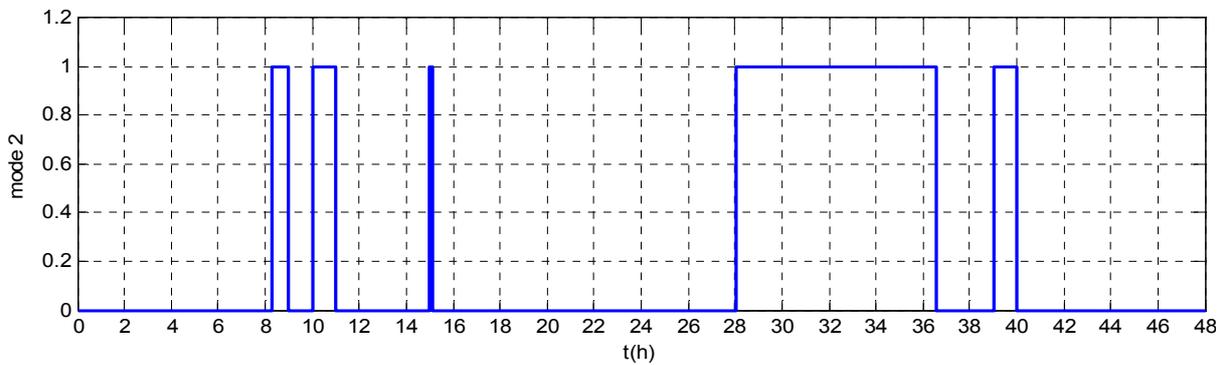


Figure III.33 : allure de mode 2

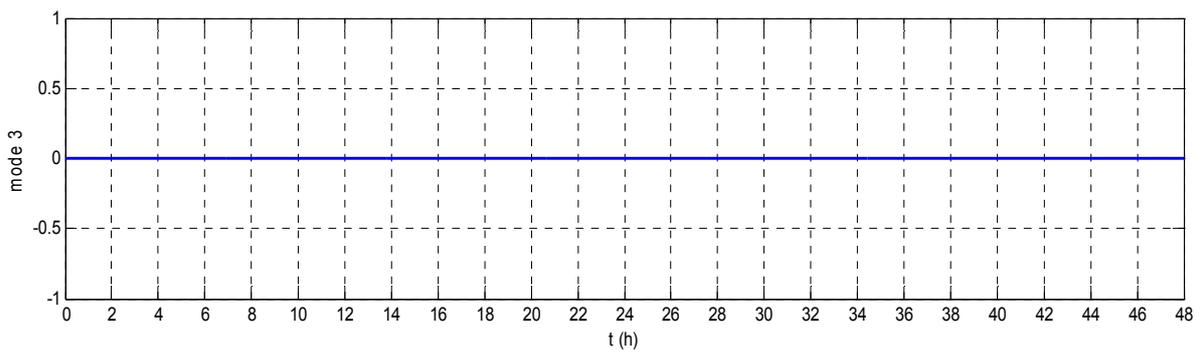


Figure III.34 : allure de mode 3

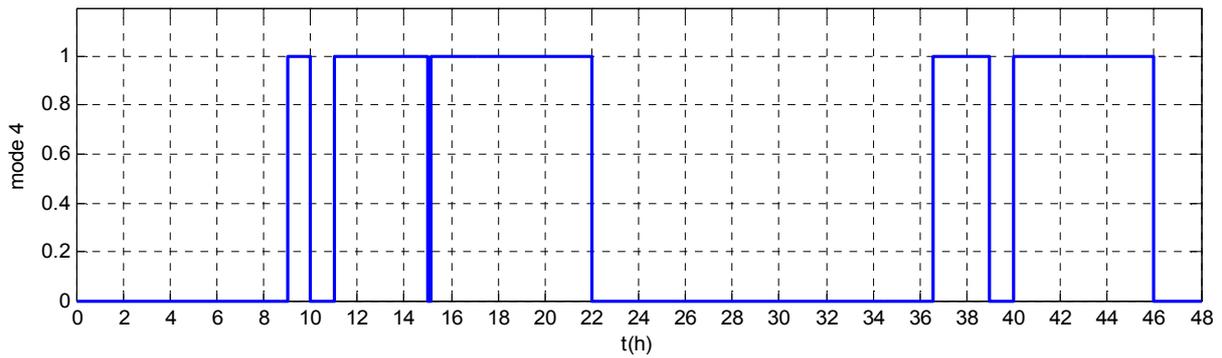


Figure III.35 : allure de mode 4

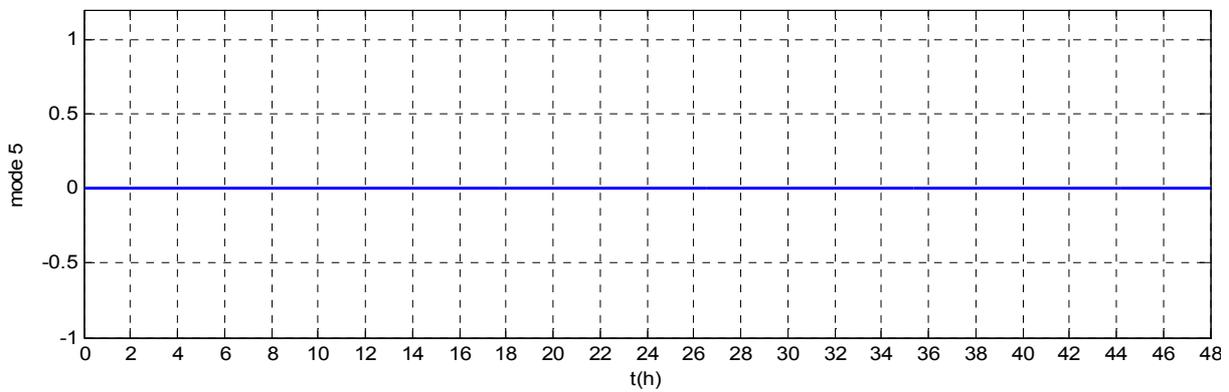


Figure III.36 : allure de mode 5

Les allures des figures (III.32-36) représentent les modes de fonctionnement de la gestion appliquer pour le système de pompage (PV) avec stockage.

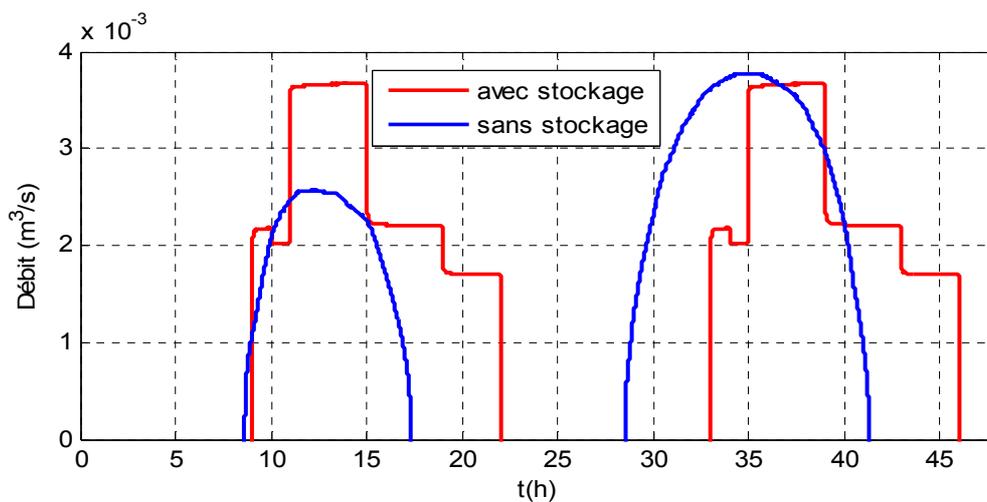


Figure III.37 : Allure du débit

La figure (III.37) montre l'avantage de l'intégration d'un système de stockage par batterie dans le système de pompage photovoltaïque et d'après les résultats présentés dans cette figure on remarque bien que l'allure du débit obtenue avec le système de stockage suit le profil de charge proposé ce qui offre un débit stable et disponible à tout moment même pour des faibles ensoleillement, par contre le débit obtenu avec le système de pompage photovoltaïque au fil du soleil dépend fortement des conditions climatique.

III.9 Conclusion

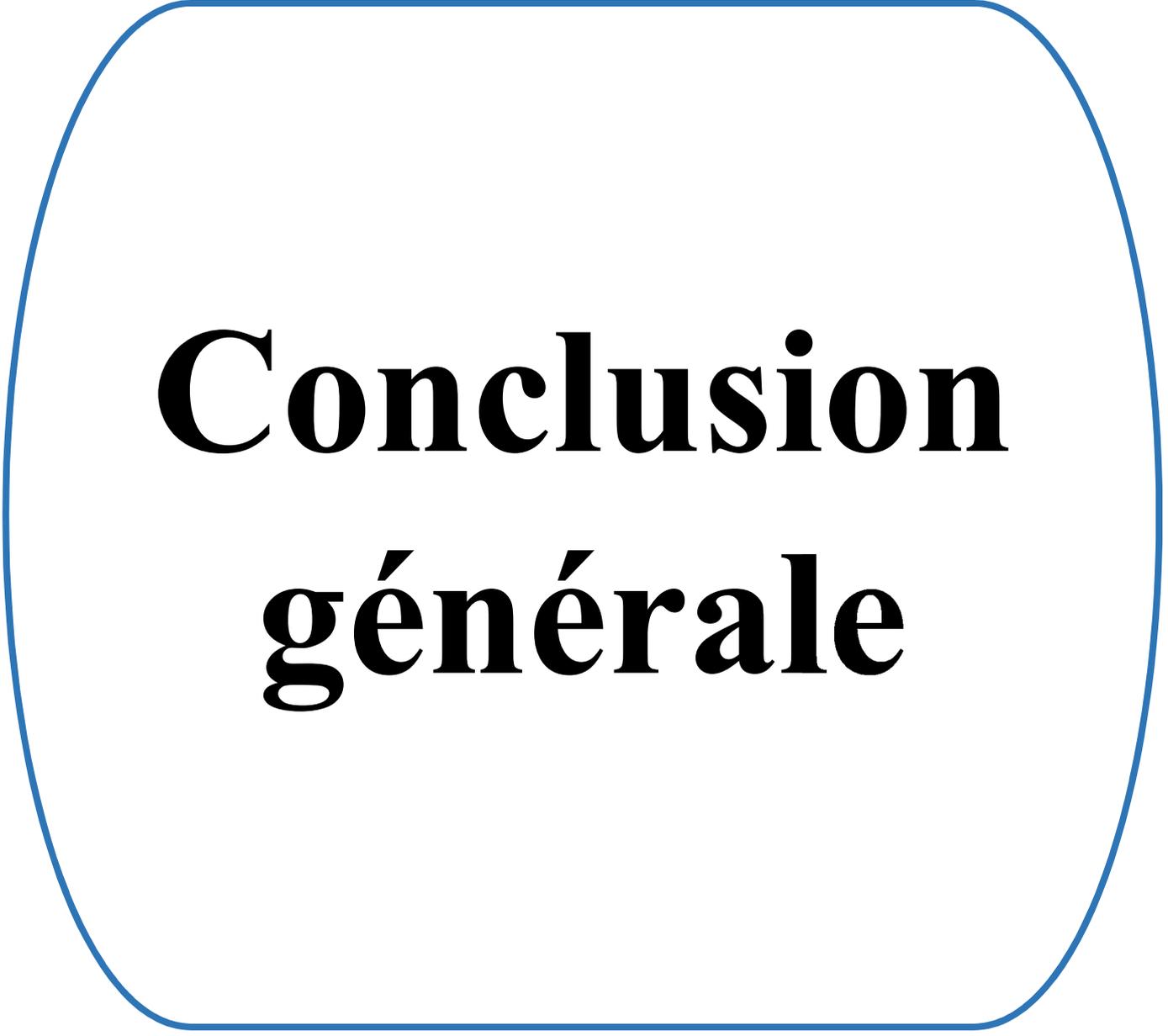
Dans la première partie de ce chapitre, nous avons décrit la commande MPPT qui permet la recherche de point précis de la puissance maximale sous les variations des conditions environnementales, pour cela on a appliqué l'algorithme perturbation et observation "P&O" car cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple et peu de paramètres de mesure.

La deuxième partie est consacré à la description d'une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, tel que pour un besoin journalier en eau de 45 m^3 , nous avons besoin d'un générateur photovoltaïque de 1102.5 W avec 13 batteries de capacité de 100 Ah .

La troisième partie de ce chapitre, est consacrée à la présentation du principe de la commande vectorielle, la théorie de cette commande permet d'assimiler la machine asynchrone (MAS) à une machine à courant continu à excitation séparée. La méthodologie consiste en premier lieu à présenter les équations du modèle de la machine, puis à joindre la commande sur cette dernière formulation.

Une simulation du système globale a été effectuée pour observer l'influence des conditions météorologique sur le système.

Enfin nous avons développé un algorithme de gestion d'énergie qui permet de vérifier à chaque instant l'état de charge et de décharge des batteries et l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques.



Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail c'est porté sur le contrôle vectoriel d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, des convertisseurs d'énergies (DC/DC, DC/AC), d'un groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge) et un réservoir d'eau. Plusieurs points ont été abordés sur l'optimisation de la conversion d'énergie et plusieurs solutions qui permettent d'augmenter le rendement global électrique d'un système photovoltaïque ont été proposées.

La première partie de notre travail a visé des généralités sur les différents composants de système de pompage photovoltaïque avec stockage, à la fin de ce chapitre, nous avons choisi les différents éléments du système à étudier.

En seconde lieu nous avons modélisé ces différents composant de notre système et simulé puis tracer les différents courbes et voir l'influence des conditions métrologique sur la production énergétique et le rendement du système.

Le troisième chapitre consacré à l'optimisation de la puissance délivrée par le GPV en utilisant la commande d'MPPT, et pour cela grâce à la simplicité et le coût on a choisi la méthode perturbation et observation P&O. Puis on a appliqué la commande vectorielle, ayant pour principe, le découplage entre le couple et le flux, et pour maintenir la tension de bus continue à une valeur fixe à chaque fois que l'ensoleillement change. Donc cette commande nous a permis de simplifier et d'offrir un certain découplage de la régulation du couple (vitesse), rendant sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. A la fin on a appliqué un algorithme de gestion nécessaire pour protégé la batterie contre les surcharges et les décharges profondes et aussi pour garder l'autonomie énergétique du système globale.

Cette expérience nous a permis d'acquérir des compétences et d'enrichir nos connaissances dans le domaine du développement. Ceci nous a permis de mettre en œuvre une application assurant les fonctionnalités attendues, donc nous pouvons affirmer l'atteinte des objectifs visés par ce travail.

Références bibliographiques

- [1] **Site :** http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp (consulté mars 2019)
- [2] **Site :** <https://www.soleil.info/uv-meteo/soleil-terre-et-uv/le-spectre-solaire.html>
(Consulté mars 2019)
- [3] **Site :** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectre_solaire.png (consulté mars 2019)
- [4] **Site :** <https://www.google.com/searchq=cellule+monocristallin&tbm=isch&source=univ&sa=X&ved=2ahUKEwih7PiAhWF5> (consulté mars 2019)
- [5] **M. Belhadj** « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome » Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar ,2008.
- [6] **site :** https://www.google.com/search?tbm=isch&sa=1&ei=pnCTXLfsEom_UtzpgNAG&q=cellule+en+silicium+polycristallin&oq=cellule+polycristallin&gs (consulté mars 2019)
- [7] **L. BOUDRAHEM** « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Master, Université de Bejaïa
- [8] **L. MESSAOUDI** « Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Master, Université de Bejaïa
- [9] **S. Makhloufi** « contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes » Mémoire de Master, université hadj Lakhdar Batna.
- [10] **Site :** <https://www.google.com/search?q=cellule+en+silicium+amorphe&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj9sNn6j5PhAhUty4UKHWqVABEQ> (consulté mars 2019)
- [11] **S. BELAID** Cours Energie Solaire photovoltaïque. Université A. Mira de Bejaia 2015.
- [12] **A. BELHOCINE et S. ZAIDI** « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master. Université de Bejaïa, 2012
- [13] **Site :** http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique (Avril 2019)

Références bibliographiques

- [14] **F. BENDJOUDI, F. LAKHDARI** « Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries » Mémoire de Master. Université de Bejaïa ,2014
- [15] **N. BENYAHIA, K. SRAIRI, M. MIMOUNE** « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique » Revue, courrier du savoir vol. N°06, pp. 147- 150, Université Biskra, 2005
- [16] **Site :** <https://www.google.com/search?q=pompe+volumetrique&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi5tuLU2JPhAhWryIUKHbrwAM8Q> (Mars 2019)
- [17] **J. ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER et B. SADASY** « Le Pompage Photovoltaïque» manuel de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA.ISBN 2-89481-006-7, 1998.
- [18] **R. AMROUCHE et S. BEDJOU** « Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Master, Université de Bejaïa.
- [19] **M/Dj. BOUDEHOUCHE, M. OUENNOUGHI** « Gestion D'un Système Photovoltaïque Avec Stockage » Mémoire de Master, Université De Bejaïa.
- [20] **Site :** https://www.google.com/search?q=pompe+centrifuge&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjig7a82JPhAhVL1BoKHTnzBz4_(consulté mars 2019)
- [21] **K. AMOKRANE** « Etude des Performances des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable ». Mémoire de Magister, Université de Bejaïa.
- [22] **Site :** <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/371.htm>(consulté mars 2019)
- [23] **C. LOUAILECHE, L. IMLOUL** « Etude d'un système de pompage Photovoltaïque avec stockage » Mémoire de Master, Université de Bejaïa 2017/2018.
- [24] **M. HAMIDOUCHE, B. MOKHTARI** « Etude d'un système Photovoltaïque » Mémoire master, Université de Bejaïa 2016.
- [25] **ADJATI Arezki** « Etude Des Machines Asynchrones A Double Etoile En Pompage » mémoire de magister. Université Bejaïa 2012
- [26] **S. SALI, A. OUAKLI** « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque », Université de Bejaïa 2017

Références bibliographiques

- [27] **K. MOUHOUBI, K. DEHOUCHE** « Etude et Conception D'un Système de Pompage Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique », Université de Bejaïa 2014
- [28] **M. BENCHERIF** « Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome », Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. 2015
- [29] **A.BESSEM** « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque » mémoire mastère , université Batna 2018.
- [30] **M .ANKI, A. BOUALLAG** «Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque», Université de Bejaïa Juin 2012
- [31] **R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne et T. Kerbache** « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque », Sciences et Technologie, Vol. N°26, page 49-54, décembre 2007.
- [32] **L. BERRAMDANE, Y. BOUASSIDA Mohamed Réda** « Étude d'un système de pompage photovoltaïque (modélisation et simulation) » mémoire de master, université badji Mokhtar- Annaba
- [33] **M. lyazid boudjenah** « Etude d'un système de pompage hybride (éolien , Photovoltaïque) Mémoire de master en électrotechnique; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, Juin 2013.
- [34] **Khokha Tabet (Mme IKHLEF)** «Etude, Modélisation et Optimisation des Systèmes Photovoltaïques, mémoire de Magister; Electrotechnique UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, 13/12/2011
- [35] **A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi** « Dimensionnement des Systèmes de Pompage Photovoltaïque », CDER. Revue des énergies renouvelables. 2005
- [36] **Anne Labouret-Michel Villoz**, « Energie solaire photovoltaïque le manelle professionnelle », édition dunot, Paris2003
- [37] **C. SERIR** « Optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque », mémoire de magister en Electromécanique université A. MIRA Bejaïa, 2012
- [38] **A.T.singo** «système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, FRANCE, 2010

Références bibliographiques

- [39] **M. KHAMI** « Amélioration des performances de régulation d'une machine asynchrone à double alimentation par la technique Neuro-flou » Mémoire de master Université d'Ouargla 2013
- [40] **site** : https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696_(consulté mars 2019)
- [41] **O.GERGOUD** «Modalisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France, 2002.
- [42] **M. Karim** « Etude D'une batterie De Stockage Dans Un Système Photovoltaïque » Mémoire master, Université de Bejaïa 2012
- [43] **R. AZAIZIA**, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux » Mémoire de magistère, Université de Boumerdes, 2008.
- [44] **K. IDJEDARENE** «Contribution à l'étude et la commande de génératrice asynchrone à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes »Thèse de doctorat Université de Bejaia, 2010
- [45] **L. ZAROOUR** « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque éolien hors réseau »; Thèse doctorat. Université Mentouri de Constantine, 2010
- [46] **SUNNY FAMILY** - Medium Power Solutions - The Future of Solar Technology2011/2012
- [47] **D.Siham**, « Commande vectorielle de la M.A.S et introduction aux convertisseurs matricielles», Mémoire d'ingénieur, Université de Batna, 2004.
- [48] **S. AFIR, M. SACI** « Commande non linéaire d'un moteur asynchrone utilise dans un système de pompage photovoltaïque », université de Bejaïa 2018
- [49] **S. BENTOUBA, A. SLIMANI et M.S. BOUCHERIT** « Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des régions du sud d'Algérie » Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda pp, (109 – 112), 2007.
- [50] **K.AMROUCHE, N.BENHACINE** «Etude et dimensionnement d'un système de pompage et multi-sources», université de Bejaïa 2018.

Annexes

Annexe A.1 présenté ci-dessous montre les caractéristiques du module Siemens SM 110/24 utilisé au chapitre II et III.

Annexe A.1 : Caractéristiques du module Siemens SM 110/24

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau P_m	110W
Puissance nominale P_n	110W
Courant au point de puissance max I_m	3.15 A
Tension au point de puissance max V_m	35 V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} (α_{cc})	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} (β_{oc})	-152 mV/°C

Annexe A.2 présenté ci-dessous montre les caractéristiques de la machine asynchrone utilisée dans la simulation au chapitre III.

Annexe A.2 : Paramètres du moteur asynchrone [21]

Paramètres	Valeurs
Résistance statorique R_s (Ω)	4
Résistance rotorique R_r (Ω)	1.143
Inductance statorique L_s	0.3676
Inductance rotorique L_r	0.3676
Inductance mutuelle M	0.3439
Nombre de pôle p	2
Moment d'Inertie J (N.m)	0.03
Coefficient de frottement f (N.m.s/rad)	0.0009
Vitesse nominale (rad/s)	157
Puissance nominale (W)	750

Annexe A.3 présenté ci-dessous montre les caractéristiques de la pompe centrifuge utilisée dans la simulation au chapitre III.

Annexe A.3 : Paramètres de la pompe centrifuge [21]

Paramètres	Valeurs
Hauteur Hg (m)	10
Diamètre d (m)	0.006
La gravitation g (m ² /s)	9.81
La constante λ (m)	0.039
La longueur l (m)	7.4
La constante ζ (m)	6.3
La constante α_0 (m/ (rad/sec) ²)	4.9234e-3
La constante α_1 (m/ (rad/sec) ²)	1.5826e-5
La constante α_2 (m/ (rad/sec) ²)	-18144
Vitesse nominale ω_n (rad/s)	150
Débit nominal de la pompe Q (m ³ /h)	1.5

Annexe A.4 : Les caractéristiques techniques de la batterie [21]

Type SUNLIGHT (plomb acide)	Valeurs
Capacité de la batterie (Ah)	100
Tension de la batterie V_{bat} (V)	12
Profondeur de décharge PDD (%)	80
Coefficient de pertes R_T	0.75
Rendement de la batterie η_{bat} (%)	90
Nombres de jour d'autonomie N_j	04