

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAÏA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique
Option : Energies renouvelables

Thème



**Etude et Simulation d'un Système de
Pompage Photovoltaïque avec batteries**

Réalisé par :

❖ Mr : BENDJOUDI Faouzi

❖ Mr : LAKHDARI Farid

Encadré par :

M^{me} S.BELAID

Promotion juin 2014

Remerciement

Tout d'abord nous tenons à remercier le bon dieu pour nous avoir guidés à bien mener ce travail.

Nos remerciements les plus vifs et chaleureux vont à notre promotrice M^{me} S.BELAID, pour son aide, sa disponibilité et son soutien.

Nous adressons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions également les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur d'évaluer notre travail.

Dédicaces

Au nom de dieu le Miséricordieux

Je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mon père ;

A ma très chère mère, qui a tout fait pour m'offrir un climat idéal de travail, je ne la remercierai jamais assez, que dieu la protège.

A mes frères : Mustapha et Sofiane ;

A toute ma famille ;

A tous mes amis (es).

Faouzi

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes très chers parents, à
mes frères et sœurs, à toute ma famille et à
tous mes amis.*

farid

Sommaire

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

Chapitre I :Généralités sur le Système du Pompage Photovoltaïque avec Batteries

I.Introduction	3
I.1. Histoire de photovoltaïque	3
I.2. Le solaire photovoltaïque	3
I.2.1. Spectre du rayonnement solaire.....	4
I.2.2. La cellule photovoltaïque	5
I.2.2.1. Le principe de fonctionnement	5
I.2.2.2. Le module photovoltaïque	6
I.2.2.3. Association en série	6
I.2.2.4 Association en parallèle	7
I.2.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	8
a : Avantages du photovoltaïque	8
b : Inconvénients du photovoltaïque.....	8
I. 3. Les différents types de systèmes photovoltaïques.....	9
I.3.1. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	9
I.3.2. Systèmes hybrides	9
I.3.3. Systèmes photovoltaïques autonomes	9
I.3.3.1. Systèmes autonomes sans stockage électrochimique	9
I.3.3.2. Systèmes autonomes avec stockage électrochimique	10
I.4. Les systèmes de pompage photovoltaïque	10
I.4.1. Le pompage au fil du soleil	10
I.4.2. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries).....	12
I.5. Les éléments de stockage	13
a. Les batteries	13
a.1. Les batteries plomb acide	13
I.6. Les convertisseurs statiques	14
I.6.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur)	14
I.6.1.1. Convertisseur Buck (hacheur série):.....	15
I.6.1.2. Convertisseur Boost (Hacheur parallèle).....	15
I.6.1.3.Convertisseur Buck-Boost	16

I.6.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur):.....	17
I.7. Groupe moteur-pompe	17
I.7.1. Moteurs.....	17
I.7.1.1. Moteur à courant continu	17
I.7.1.2 Moteur à courant alternatif.....	18
I.7.1.2.1.Moteur synchrone	18
I.7.1.2.2.Moteur asynchrone.....	19
I.7.2. Les pompes	20
I.7.2.1. Pompe centrifuge	20
a. Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse	21
I.7.2.2. Pompes volumétriques	21
a. Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse	22
I.7.3. Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique :.....	23
I.8. Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale :	23
I.9. Le système de supervision.....	24
I.10.Conclusion.....	24

Chapitre II: Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque avec batteries

II.1.Introduction.....	26
II.2 Description du système à étudier	26
II.3. Modélisation du système.....	27
II.3.1.Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque	27
II.3.2.Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions standards de fonctionnement	30
a. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque	31
b. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque	32
II.3.3.Modélisation du hacheur survolteur	32
II.3.4.Modélisation du convertisseur buck-boost.....	34
II.3.5.Modélisation du bus continu	34
II.3.6.Modélisation du convertisseur DC/AC (onduleur)	35
II.3.7. Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil	36
II.3.7.1 Introduction	36

II.3.7.2. Equation générale d'un moteur asynchrone à cage d'écurueil	37
II.3.7.2.1 Equation des tensions et des flux	37
II.3.7.2.2 Modèle de Park de la machine asynchrone	39
II.3.7.2.3 Commande vectorielle du moteur asynchrone	42
II.3.7.2.3.1.Introduction	42
II.3.7.2.4 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique	44
II.3.8.Modélisation de la pompe	45
II.3.9. Le modèle électrique de la batterie	46
II.4.Conclusion	46

Chapitre III: Dimensionnement et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque avec batteries

III.1.Introduction	47
III.2.Méthode de dimensionnement.....	47
III.3.Evaluation des besoins en eau	47
III.4. Donnée de base	47
III.4.1. Le débit	47
III.4.2. La hauteur manométrique totale	47
III.5. Calcul de l'énergie journalière requise	48
III.6. Choix des composants du système	48
III.6.1. Dimensionnement de la pompe centrifuge	48
III.6.2. Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	49
III.6.3.Dimensionnement de la batterie.....	49
III.7.Adaptation de l'énergie photovoltaïque:.....	51
III.7.1.La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)).....	52
III.7.2. La méthode Perturbation & Observation (P&O):.....	52
III.8. Gestion de l'énergie entre les différents composants du système.....	55
III.9. Conclusion	56

Chapitre IV: Simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries

IV.1. Introduction	58
--------------------------	----

IV.2. Fonctionnement de générateur photovoltaïque à sa puissance maximale.....	58
IV.3. Simulation du système photovoltaïque sans connexion du générateur photovoltaïque.	59
IV.4. Simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries connecté au générateur photovoltaïque	63
IV.4.1. Les résultats de simulation du système globale pour une journée d'été	65
IV.4.2. Les résultats de simulation du système globale pour une journée d'hiver.	73
IV.5. Conclusion.....	78
Conclusion générale	79
Références bibliographiques.....	80
Annexe.....	83

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque avec batteries

Figure (I.1): Spectre du rayonnement solaire 4

Figure (I.2) : Principe de fonctionnement d’une cellule photovoltaïque..... 5

Figure (I.3) : caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ 6

Figure (I.4) : Cellules identiques en série..... 7

Figure (I.5) : Cellules identiques en parallèle 7

Figure (I.6) : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil 11

Figure (I.7): Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil..... 11

Figure (I.8): Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie..... 12

Figure (I.9): principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batterie 13

Figure (I.10) : Hacheur série..... 15

Figure (I.11) : Hacheur parallèle 16

Figure (I.12) : Convertisseur Buck-Boost 16

Figure (I.13): Moteur à courant continu 18

Figure (I.14): Moteur synchrone 19

Figure (I.15): Moteur asynchrone..... 19

Figure (I.16): Pompe centrifuge 21

Figure (I.17) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge 21

Figure (I.18) : Pompe volumétrique. 22

Figure (I.19): Caractéristiques d'une pompe volumétrique 22

Chapitre II: Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque avec batteries

Figure (II.1): Système globale à étudier 26

Figure (II.2) : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode 27

Figure (II.3) : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{STC}=1000W/m^2, T_{STC}=25^{\circ}C$ 30

Figure (II.4): Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{STC}=1000W/m^2 T_{STC}=25^{\circ}C$ 30

Figure (II.5): Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	31
Figure (II.6): Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	31
Figure (II.7): Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	32
Figure (II.8): Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	32
Figure (II.9): Modèle du bus continu.	34
Figure (II.10) : Circuit de l'onduleur relié à la machine	35
Figure (II.11) : Représentation schématique d'une MAS triphasée.....	37
Figure (II.12) : Modèle de Park de la machine asynchrone.....	40
Figure (II.13) : Modèle R-C de la batterie	46

Chapitre III: Dimensionnement et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque avec batteries

Figure (III.1) : Consommation journalière d'un village	50
Figure(III.2) : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque	53
Figure(III.3) : Organigramme de la méthode perturbation et observation	54
Figure (III.4) : Organigramme de gestion d'énergie du système globale	55

Chapitre IV: Simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries

Figure (IV.1) : Allure de la puissance photovoltaïque	58
Figure (IV.2) : Allure de la tension photovoltaïque	59
Figure (IV.3) : Allure du courant photovoltaïque	59
Figure (IV.4) : Allure de la vitesse	60
Figure (IV.5) : Allure du flux	60
Figure (IV.6) : Allure du courant I_{sd}	61
Figure (IV.7) : Allure du courant I_{sq}	61
Figure (IV.8) : Allure de couple électromagnétique.....	61
Figure (IV.9) : Allure des courants statoriques I_{abc}	62
Figure (IV.10) : Zoom sur les courants statoriques	62
Figure (IV.11) : Allure de débit.....	63
Figure (IV.12) : principe de la commande vectorielle.....	63

Figure (IV.13) : Puissance hydraulique	64
Figure (IV.14) : Puissance électrique demandée par la charge	64
Figure (IV.15) : Variation de l'éclairement le long d'une journée d'été.....	65
Figure (IV.16) : Variation de la puissance PV le long d'une journée d'été	65
Figure (IV.17) : Tension aux bornes de la batterie.....	66
Figure (IV.18) : Allure de l'état de charge de la batterie	66
Figure (IV.19) : Allure du courant de la batterie.....	66
Figure (IV.20) : Allure de la tension du bus continu.....	67
Figure (IV.21) : Allure de la vitesse mécanique du moteur	67
Figure (IV.22) : Allure du couple résistant	68
Figure (IV.23) : Allure du débit	68
Figure (IV.24) : Allure de P_{ch} et $P_{pv}+P_{batt}$	69
Figure (IV.25) : Allure de différentes puissances	69
Figure (IV.26) : Allure de la puissance de délestage.....	70
Figure (IV.27) : Allure du mode1.....	71
Figure (IV.28) : Allure du mode 2.....	72
Figure (IV.29) : Allure du mode 3.....	72
Figure (IV.30) : Allure du mode 4.....	72
Figure (IV.31) : Allure du mode 5.....	73
Figure (IV.32) : Variation de l'éclairement le long d'une journée d'hiver	73
Figure (IV.33) : Variation de la puissance PV le long d'une journée d'hiver.....	73
Figure (IV.34) : Tension aux bornes de la batterie.....	74
Figure (IV.35) : Allure de l'état de charge de la batterie	74
Figure (IV.36) : Allure du courant de la batterie.....	74
Figure (IV.37) : Allure de différentes puissances	75
Figure (IV.38) : Allure du mode 1.....	76
Figure (IV.39) : Allure du mode 2.....	76
Figure (IV.40) : Allure du mode 3.....	77
Figure (IV.41) : Allure du mode 4.....	77
Figure (IV.42) : Allure du mode 5.....	77

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique.....	23
Tableau (III.1) : Données de base.....	50
Tableau(III.2): Calcul des différentes puissances.....	51

Nomenclature

Symboles

G: Ensoleillement (w/m^2)

R_s : Résistance série (Ω)

R_{sh} : Résistance shunt (Ω)

I_{ph} : Représente le photo courant (A)

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

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

K : Constante de Boltzmann ($k=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt}

T_j : Température de jonction ($^{\circ}\text{C}$)

V_{co} : Tension en circuit ouvert (V)

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale (V)

P_c : Puissance crête (W_c)

P_{max} : Puissance au point maximum (W)

C_{batt} : la capacité nominale de la batterie (Ah)

I_s : Courant de saturation de la diode (A)

I_{rsh} : Courant de la résistance shunt (A)

I_{sc} : Coefficient d'idéalité

T_c : Température de la jonction ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ref} : Température de référence ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)

FF : Facteur de forme (W/m^2)

P_1, P_2, P_3, P_4 Paramètres constants

G_{ref} : Ensoleillement de référence [w/m^2]

B_{oc} : Coefficient d'incrémentation de la tension ($V/^\circ C$)

α_{cc} : Coefficient d'incrémentation du courant ($V/^\circ C$)

N_s : Nombre de module en série

N_p : Nombre de module en parallèle

R_s : Résistance de l'induit (Ω)

T_{em} : Couple électromagnétique (N.m)

R_{mp} : Rendement motopompe (%)

V_{batt} : Tension de la batterie (V)

I_{batt} : Courant de la batterie (A)

R_b : Résistance interne de la batterie (Ω)

ρ : Masse volumique de l'eau ($\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$)

E_h : Energie hydraulique (Wh)

N_j : Nombre de jours d'autonomie de la batterie

R_b : Rendement de la batterie (%)

Q : Débit de l'eau pompé (m^3/s) ou (m^3/j)

N_b : Nombre de batteries

I_{sd}, I_{sq} : Courant statorique directe et quadratique

I_{rd}, I_{rq} : Courant rotorique directe et quadratique

I_{sabc}, I_{rabc} : Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique

$I_{cc, stc}$: Représente le courant photovoltaïque dans les conditions STC

L_s, L_r : Inductances cyclique statorique et rotorique

I_s, I_r : Inductances de fuite statorique et rotorique

M_{sr} : Inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W)

R_s, R_r : Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique.

V_{sd}, V_{sq} : Tension statorique directe et quadratique

V_{sabc}, V_{rabc} : Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique

Ω : Vitesse mécanique

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statorique direct et quadratique

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

Φ_{sabc}, Φ_{rabc} Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique

Abréviations

DC/DC : Convertisseur continu –continu

DC/AC : Convertisseur continu-alternatif

EDC : Etat de charge de la batterie (%)

PDD : Profondeur de décharge de la batterie (%)

HMT: Hauteur manométrique totale (m)

PPM: Point de puissance maximum

PV: Panneau photovoltaïque

MAS: Moteur asynchrone

GPV: Générateur photovoltaïque

Introduction générale

Introduction générale:

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Le recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus pour la production d'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiale de CO₂. [1]

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. [2]

Aujourd'hui, l'exploitation de l'énergie photovoltaïque offre un approvisionnement en énergie inépuisable mais surtout une énergie propre et non polluante, ce qui constitue un avantage certain. [3]

Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage photovoltaïque ont eu une grande part dans les projets d'application de l'énergie photovoltaïque et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique. [2]

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que la première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules photovoltaïque, la pompe sans batterie «pompe au fil du soleil» utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [4], 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.

Dans ce contexte général, notre étude se porte sur l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batterie. Nous avons structuré notre travail en quatre chapitres:

- Dans le premier chapitre nous présenterons une approche générale sur l'énergie photovoltaïque ainsi qu'une description générale d'un système de pompage photovoltaïque avec batterie.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du générateur photovoltaïque et les différents composants du système de pompage photovoltaïque avec batterie.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons une méthode de dimensionnement basés sur les besoins en eau et à la conception d'un algorithme de gestion pour l'ensemble de l'installation. Comme application, nous traiterons l'alimentation en eau d'un village situé dans la région de Bejaïa.
- Le dernier chapitre sera consacré à la simulation et à l'interprétation des résultats. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur le Système du

Pompage

Photovoltaïque avec Batteries

I. Introduction :

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

I.1. Histoire de photovoltaïque : [5]

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 (Wc). Le Wc est la puissance fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement normalisé de 1000W par m², à une température de 25°C. Le rendement électrique est le rapport puissance lumineuse incidente sur puissance électrique fournie. Les modules existants permettent des rendements électriques compris entre 5 et 15%.

I.2. 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 ou recouverts d'une mince couche métallique. 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 (Wc) 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. [6]

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 million de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, le soleil est allégé de 4 million 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, est appelée la constante solaire, qui est estimée à $1\,367\text{ W.m}^{-2}$. [7] [8]

I.2.1. Spectre du rayonnement solaire : [9]

Le rayonnement solaire permet la vie sur Terre et détermine le climat. Du fait du flux d'énergie existant à l'intérieur du Soleil, la température à la surface avoisine les 5800K, le spectre du rayonnement solaire s'avère donc similaire à celui d'un corps noir de 5800K présentant une structure fine due à l'absorption dans les gaz solaires périphériques froids (raies de Fraunhofer).

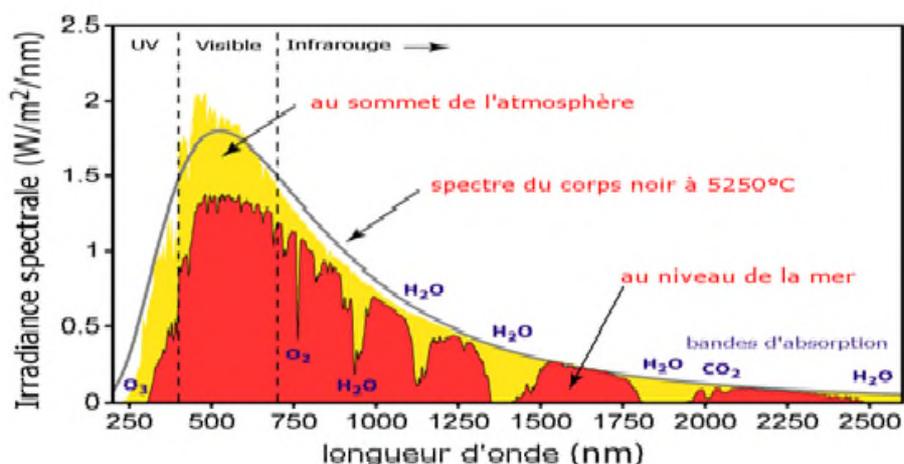


Figure (I.1): Spectre du rayonnement solaire [9]

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3 %, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1,2 \text{ kW/m}^2$. La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus. [10]

I.2.2. La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui représente l'élément de base dans un générateur photovoltaïque, elle est constituée par une jonction PN.

I.2.2.1. Le principe de fonctionnement :

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes, comme nous montre la figure ci-dessous :

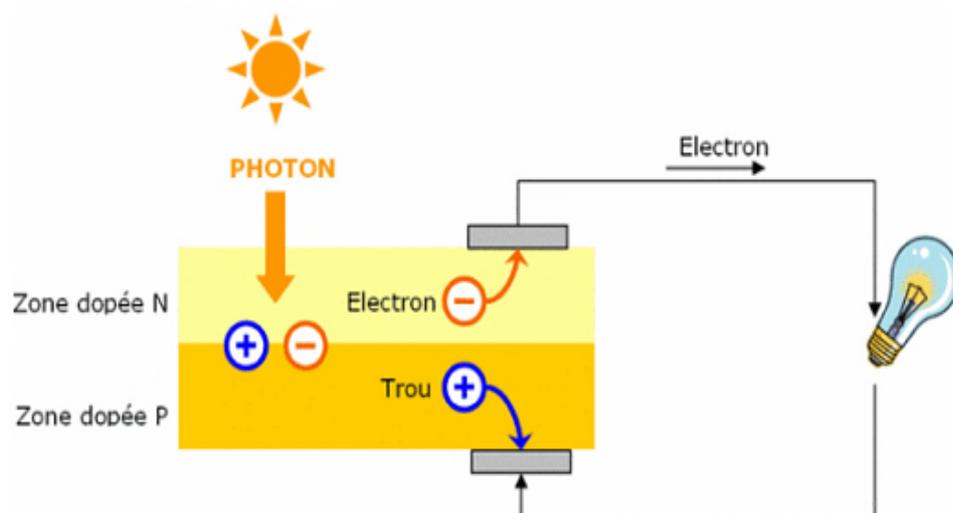


Figure (I.2) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

➤ **La caractéristique courant-tension et puissance-tension :**

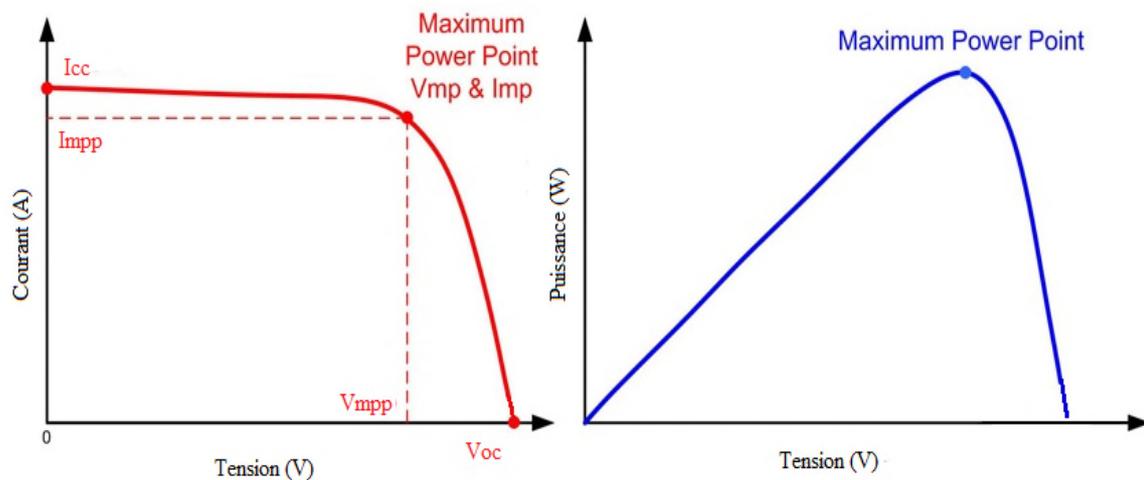


Figure (I.3) : caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$

I.2.2.2. Le module photovoltaïque : [10]

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.2.2.3. 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.

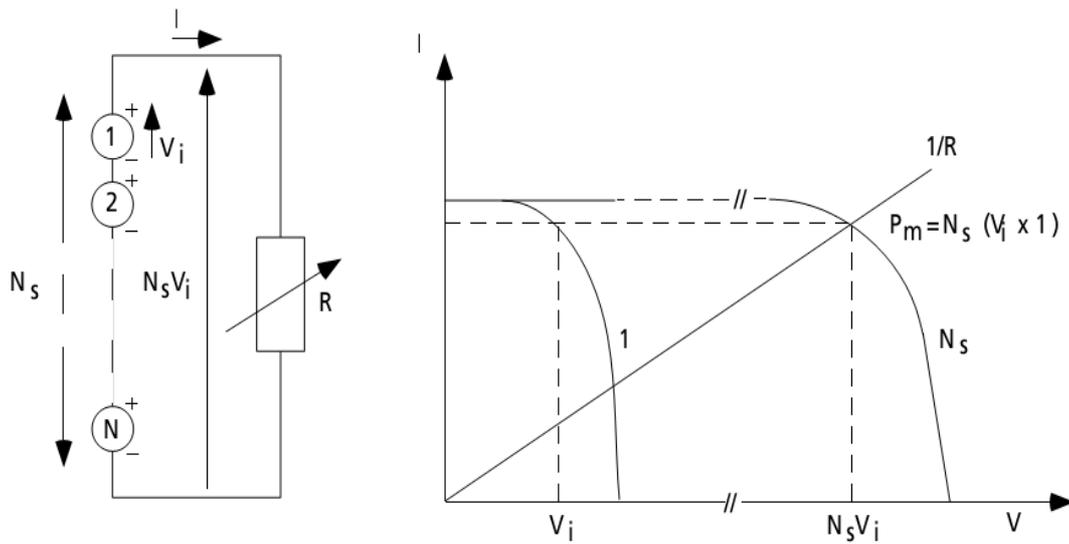


Figure (I.4) : Cellules identiques en série

I.2.2.4. 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.

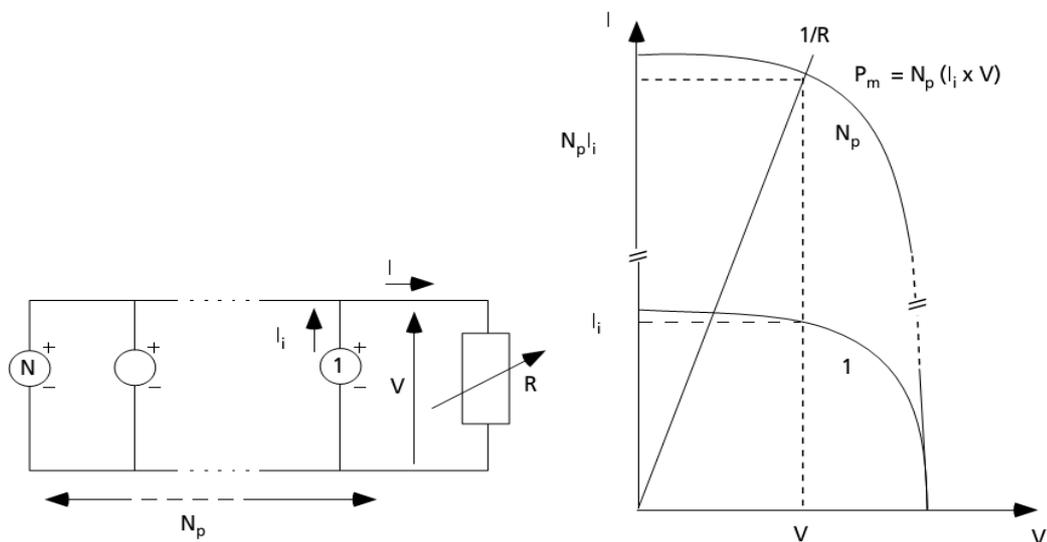


Figure (I.5) : Cellules identiques en parallèle.

I .2.3. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**a : Avantages du photovoltaïque : [11]**

- L'énergie du soleil est la source la plus renouvelable de toutes.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

b : Inconvénients du photovoltaïque : [11]

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques qui reviennent cher.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe.

I. 3. Les différents types de systèmes photovoltaïques :

I.3.1. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau : [12]

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 de bâtiments.

L'intégration d'éléments photovoltaïques dans les structures des bâtiments a 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.3.2. Systèmes hybrides : [13]

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 technique qu'économique.

I.3.3. Systèmes photovoltaïques autonomes : [12]

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.3.3.1. 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.3.3.2. 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.

I.4. Les systèmes de pompage photovoltaïque :

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. [14]

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. La technologie sans batteries a quelques inconvénients, son principal défaut est d'avoir un débit d'eau qui dépend de l'ensoleillement au cours de la journée. Nous allons faire une étude avec l'ajout de batteries dans le système de pompage photovoltaïque.

I.4.1. Le pompage au fil du soleil : [5]

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, comme nous montre la figure ci-dessous :

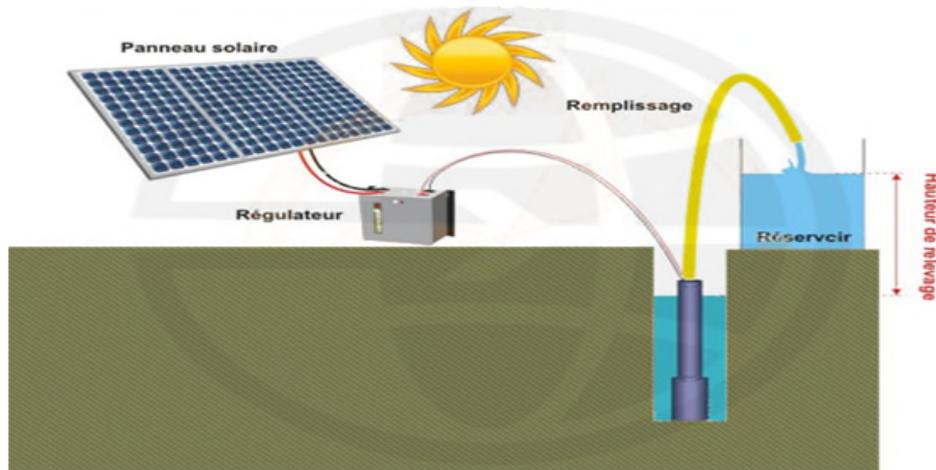


Figure (I.6) : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil

Le principe de fonctionnement d'une telle installation reste relativement simplifié avec des panneaux photovoltaïques alimentant une pompe (de surface ou immergée) assistée par un régulateur contrôleur (pouvant être intégré à la pompe selon le fabricant) qui approvisionnent l'eau lorsque les panneaux sont exposés au soleil.

Le pompage au fil du soleil utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

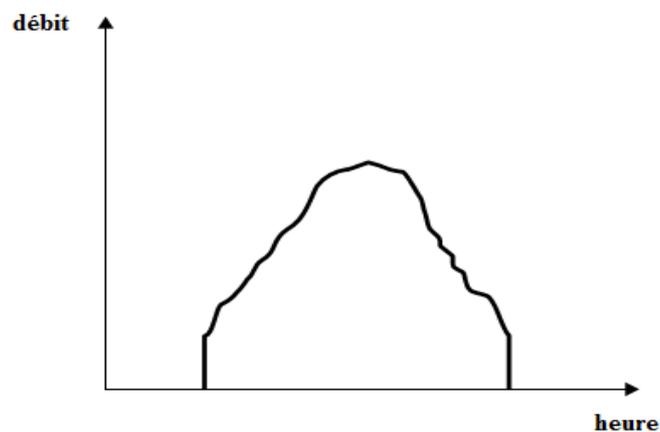


Figure (I.7): Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil.

Cette solution est moins coûteuse, mais ces pompes n'ont pas un débit constant et ne fonctionnent pas en dessous d'un certain niveau d'éclairement (début et fin de journée) figure (I.7), leurs rendement étant plus faible en dehors de la puissance nominale de fonctionnement, il est nécessaire d'installer un adaptateur de charge.

I.4.2. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. [12]

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 :

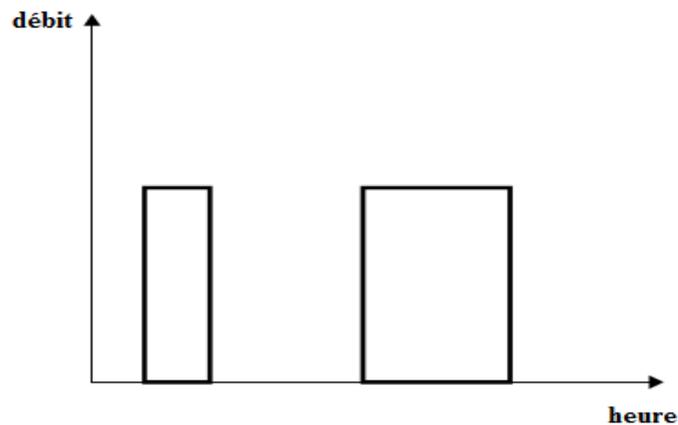


Figure (I.8): Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie. [10]

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.

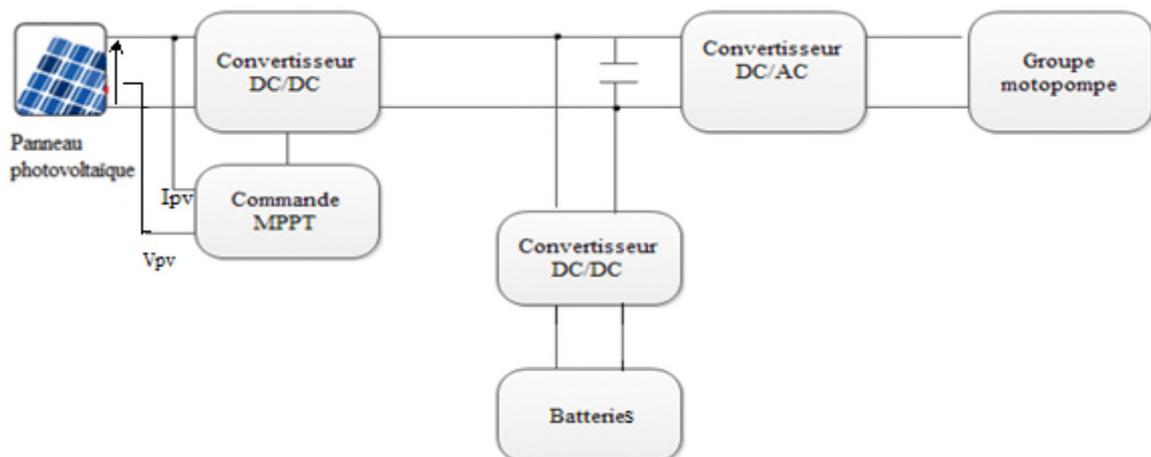


Figure (I.9): principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries

I.5. Les éléments de stockage :

Il existe différents types de stockages comme le stockage électrochimique et le stockage hydraulique...etc.

Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours).

a. Les batteries : [15]

La batterie est souvent intégrée aux générateur photovoltaïque, elle permet le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et elle restitue la nuit où les journées nuageuses 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.

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;
- Solides ;
- Capables de fournir des courants élevés ;
- Sans effet mémoire ;

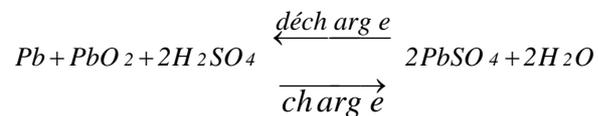
a.1. Les batteries plomb acide :

Les premières batteries les plus utilisées sur le marché ont été les batteries plomb acide dont plusieurs améliorations les rendent encore compétitives. Etant disponible sur une

plage de puissance très étendue, ces batteries peuvent être utilisées dans une large variété d'application. [16]

La batterie au plomb a toujours été la source d'énergie la plus répandue. Elle présente l'avantage non négligeable de présenter le prix de revient le plus faible parmi tous les types de batteries connus. Malgré son grand âge, il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle chimique ou électrique permettant de reproduire assez précisément et dans divers cas de figure son fonctionnement. Les seuls modèles disponibles sont soit assez imprécis, soit seulement utilisables dans certaines conditions d'utilisation bien précises. Elle joue, vu son ancienneté et sa grande diffusion, le rôle d'étalon pour évaluer les caractéristiques des autres batteries.

Son fonctionnement se base sur la réaction d'oxydoréduction suivante :



PbO₂ est l'électrode positive (cathode, pôle +) et Pb l'électrode négative (anode, pôle-), tant en charge qu'en décharge.

Afin d'obtenir la tension désirée aux bornes d'un élément, on connecte plusieurs cellules en série à l'intérieur du module ; par contre, si l'on désire augmenter la capacité et le courant, il faut connecter ces cellules en parallèle.

I.6. Les convertisseurs statiques:

Les convertisseurs statiques sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

I.6.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur):

Les convertisseurs DC/DC dont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé. [17]

I.6.1.1. Convertisseur Buck (hacheur série):

Un convertisseur Buck, ou hacheur série convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

Le schéma de principe du hacheur série est donné sur la figure (I.10).

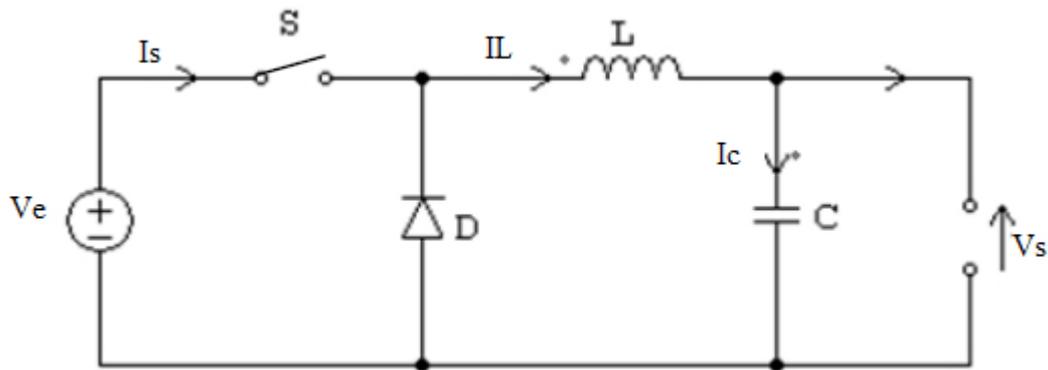


Figure (I.10) : Hacheur série

Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie.

Fonctionnement :

L'interrupteur S est fermé pendant la fraction αt de la période de découpage T. La source primaire fournit l'énergie à l'inductance L. Lors du blocage de S, la diode de roue libre D assure la continuité du courant et la décharge de L.

I.6.1.2. Convertisseur Boost (Hacheur parallèle) : [18]

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Son schéma est donné sur la (figure I.11).

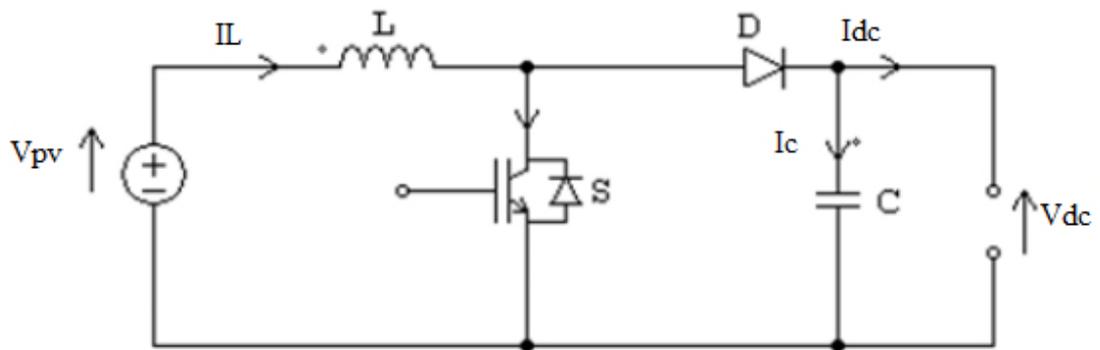


Figure (I.11) : Hacheur parallèle

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

Fonctionnement :

L'interrupteur S est fermé pendant le temps αT . L'énergie est stockée dans L, la diode D est bloquée. Le blocage de S entraîne la décharge de l'inductance.

I.6.1.3. 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.

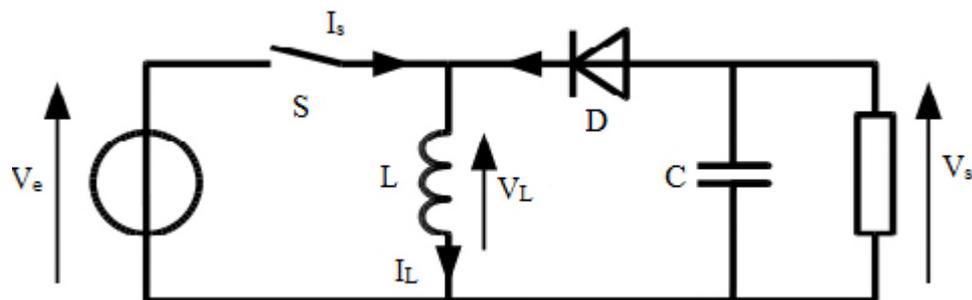


Figure (I.12) : Convertisseur Buck-Boost

Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S:

Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.

Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Comparé aux convertisseurs Buck et Boost, la tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée.

I.6.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur):

La fonction de l'onduleur est de transformer le courant continu produit par le générateur photovoltaïque, en courant alternatifs monophasé ou triphasé.

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance).

I.7. Groupe moteur-pompe :

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

I.7.1. Moteurs :

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. [12]

I.7.1.1. Moteur à courant continu: [13]

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

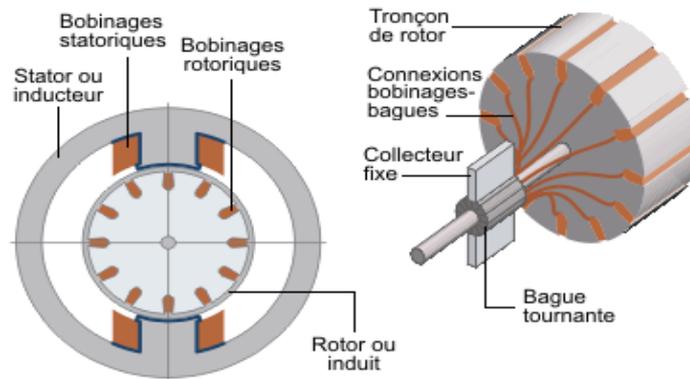


Figure (I.13): Moteur à courant continu.

I.7.1.2 Moteur à courant alternatif : [13]

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.

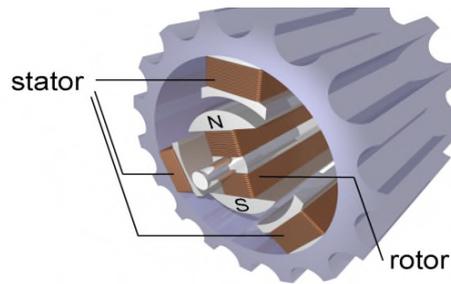
Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs synchrones ;
- Les moteurs asynchrones ;

I.7.1.2.1. 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 1 500 MW.

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



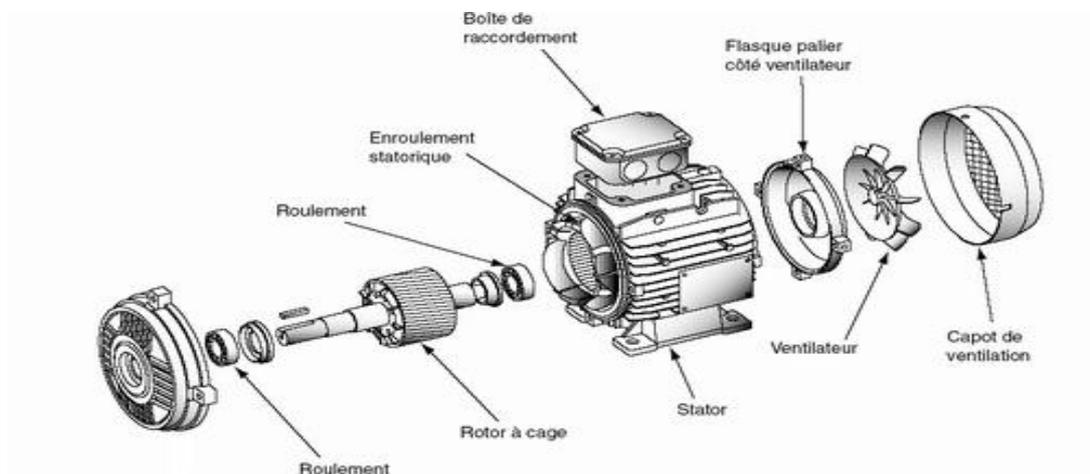
Figure(I.14): Moteur synchrone

I.7.1.2.2. 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 d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques [17].

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 [17].



Figure(I.15): Moteur asynchrone.

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

I.7.2. Les pompes : [12]

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, nous distinguons également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompé ; 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 mètre (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.7.2.1. Pompe centrifuge :

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

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

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.

- la puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.

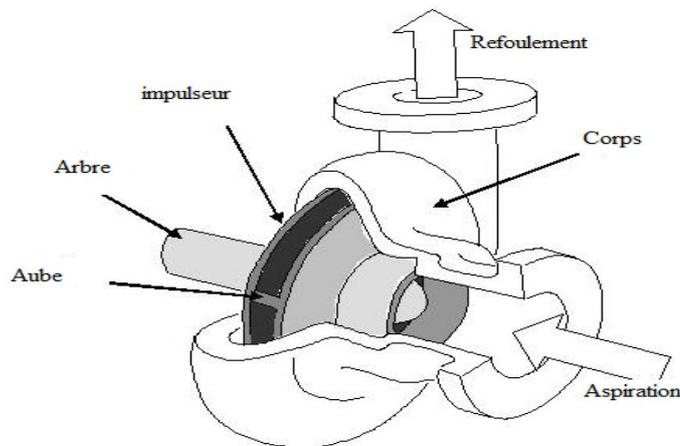


Figure (I.16): Pompe centrifuge

a. Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse

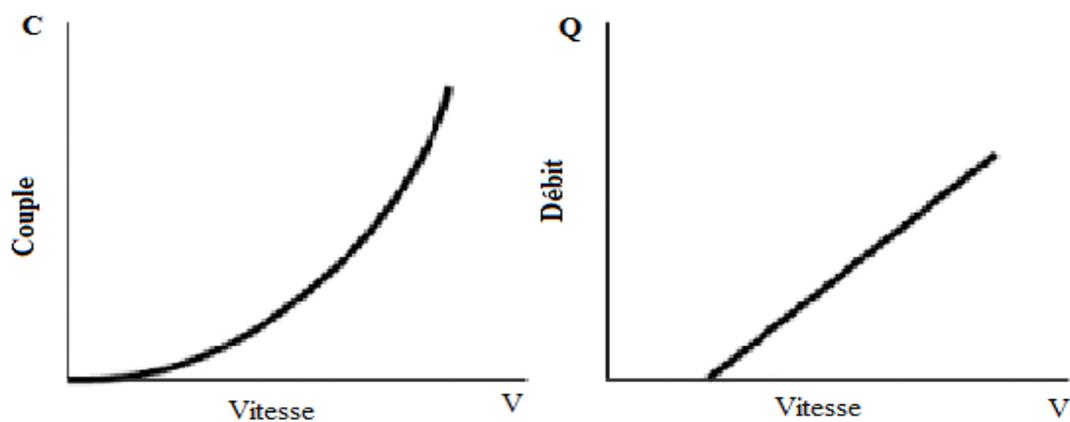


Figure (I.17) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge

I.7.2.2. Pompes volumétriques :

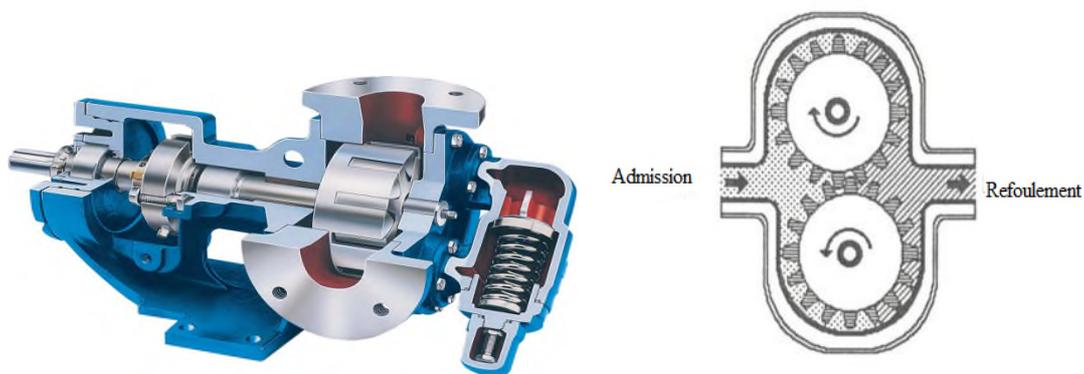
Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.)

Leurs principaux atouts sont les suivants :

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

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

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



Figure(I.18) : Pompe volumétrique.

a. Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse

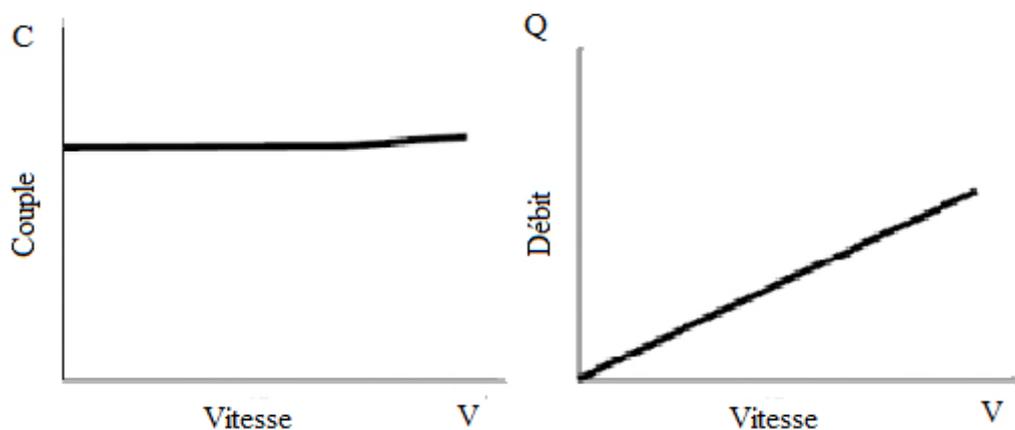


Figure (I.19): Caractéristiques d'une pompe volumétrique

I.7.3. Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique : [20]

Comparaison de base - Pompes centrifuges et pompes volumétriques		
	Pompes centrifuges	Pompes volumétriques
Mécanique	Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparaît, entraînant un débit).	Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression)
Performance	Le débit dépend de la pression variable.	Le débit est constant quelle que soit la pression.
Viscosité	Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité du fait des pertes par frottement dans la pompe	Le rendement augmente avec la viscosité.
Rendement	Rendement optimal en un point. À des pressions différentes, le rendement diminue.	Le rendement augmente avec la pression.
Conditions d'entrée	Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression. Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible.	Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. Auto-amorçage d'une pompe à sec possible.

Tableau (I.20) : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

La pompe centrifuge présente d'innombrables avantages par rapport aux types de pompage, elle a un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en œuvre facile 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.8. Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale :

La conception globale d'un système photovoltaïque optimisé est par nature difficile. Du côté de la source, pour un générateur photovoltaïque, la production de la puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, et aussi la variation de comportement de la charge en fonction de la consommation, ce qui est souvent difficile à prévoir. En effet, sous ces conditions changeantes la puissance extractible est variable. Il est possible : c'est ainsi que naît en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracking). La méthode de suivi de PPM (Point de puissance maximal) est

basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du panneau photovoltaïque, contrairement au contrôle à tension fixe. Le maximum de puissance est atteint par contrôle actif de la puissance, en forçant la dérivée de la puissance par rapport au temps à être nulle. Le MPPT n'est pas basé sur une valeur de référence prédéterminée mais il s'agit d'une recherche de la valeur de référence pour atteindre le maximum de la puissance sur la caractéristique courant/tension. A noter que le MPPT joue un rôle très important parce qu'il maximise le rendement et il réduit le coût. La MPPT peut extraire plus de 97% de puissance photovoltaïque une fois correctement optimisé. [21]

Parmi les solutions MPPT actuellement disponibles, on retrouve la méthode de perturbation et observation (P&O), l'algorithme d'incrémentation de la conductance et l'approche par Logique Floue...etc. [21]

I.9. Le système de supervision :

Dans un système de pompage photovoltaïque avec batterie, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de supervision a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part.

L'algorithme de supervision est basé sur trois scénarios :

- Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux photovoltaïques si énergie photovoltaïque est suffisante,
- Alimentation du consommateur par les panneaux photovoltaïques et le stockage si énergie photovoltaïque est insuffisante.
- Alimentation du consommateur uniquement par le stockage si énergie photovoltaïque est absente.

I.10. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche générale sur l'énergie photovoltaïque avec ces avantages et ces inconvénients et les différents systèmes photovoltaïques. Nous nous intéressons particulièrement au système de pompage photovoltaïque avec batteries. Une stratégie de contrôle et de supervision de ce système est

primordiale. Le superviseur détermine la puissance de réglage à partir de la puissance demandée pour un certain débit et de la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque. La modélisation des différents constituants du système fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II:

Modélisation des éléments du
système de pompage photovoltaïque
avec batteries

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système de pompage photovoltaïque afin de les simuler sous le logiciel (Matlab/Simulink).

II.2 Description du système à étudier :

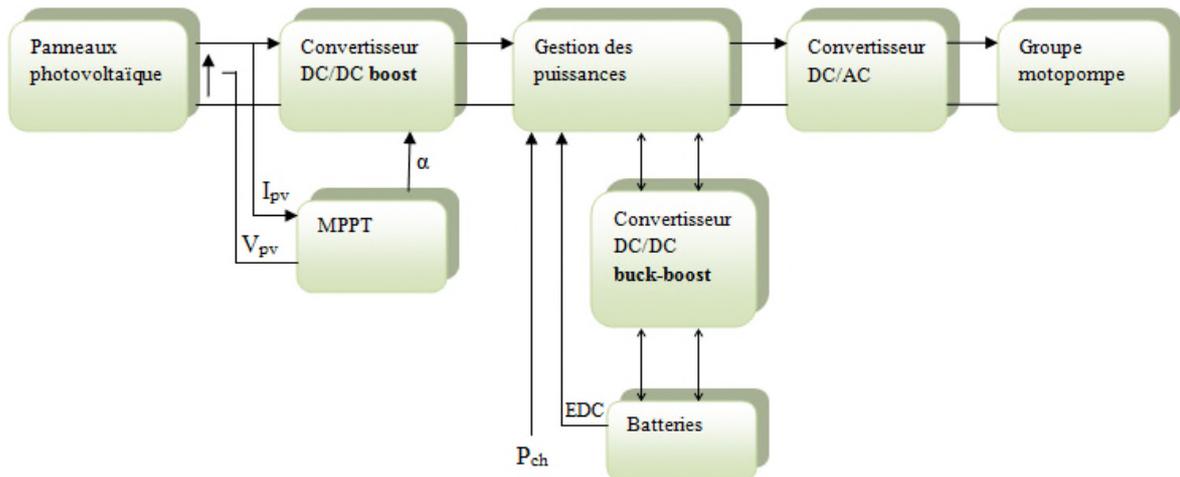


Figure (II.1): Système globale à étudier.

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.

II.3. Modélisation du système :

II.3.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque:

Il existe de nombreux modèles de générateur photovoltaïque qui diffèrent 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 : [21]

- **Le modèle idéalisé:** c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_{sh} étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance R_s étant petite elle est supposé être nul ($R_s = 0$).
- **Le modèle à une diode :** pour tenir compte des chutes de tension dans les zone P et N, on doit ajouter une résistance série dans le modèle idéalisé, une résistance série R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle R_{sh} .
- **Le modèle à deux diodes :** une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons.

Par manque de précision du modèle idéalisé et la complexité des autres modèles plus précisés, le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision [24], il apparaît très adapté pour notre étude.

Nous avons choisi un modèle simplifié, qui est un modèle à cinq paramètres ($I_{cc}, I_{mpp}, V_{co}, V_{mpp}, R_s$), qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

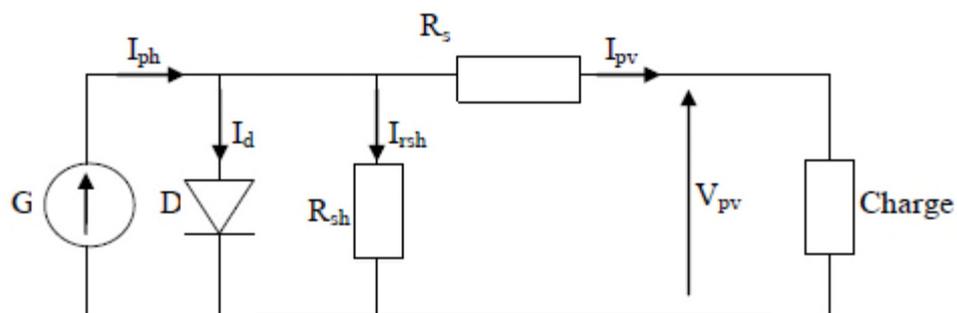


Figure (II.2) : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode.

D'après la figure (II.2), le courant I_{pv} du générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement, est donné par l'équation (II.1) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (\text{II.1})$$

I_{ph} : Représente le photo courant, il dépend de l'irradiation et de la température.

I_d : Représente le courant de diode.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

I_{rsh} : Représente le courant shunt.

L'expression(II.1) s'écrit aussi de cette manière :

$$I_{pv} = I_{cc} \cdot [1 - K_1 \cdot (e^{K_2 \cdot V_{pv}^m} - 1)] \quad (\text{II.2})$$

Où les coefficients K_1 , K_2 , K_3 , K_4 et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (\text{II.3})$$

$$K_3 = \ln\left[\frac{I_{cc} \cdot (1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 \cdot I_{cc}}\right] \quad (\text{II.4})$$

$$K_4 = \ln\left[\frac{1 + K_1}{K_1}\right] \quad (\text{II.5})$$

$$m = \frac{\ln\left[\frac{K_3}{K_4}\right]}{\ln\left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}}\right]} \quad (\text{II.6})$$

Tel que :

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

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

I_{cc} : Courant de court circuit. (A)

V_{co} : Tension en circuit ouvert. (V)

Il est à noter que l'équation (II.2) est applicable que pour un niveau d'ensoleillement G et de température particulière ($G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC}=25 \text{ °C}$). Relatifs aux conditions standards de fonctionnement (STC). Quand l'ensoleillement et la température varient, les paramètres du module photovoltaïque changent suivant ces équations :

$$\Delta T_c = T_c - T_{STC} \quad (\text{II.7})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{STC}} - 1 \right) \cdot I_{cc,STC} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

G_{STC} et G : Représentent respectivement, l'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

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

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température (V).

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température (A).

ΔT_c : Représente la variation de la température (°C).

α_{cc} : Coefficient d'incrément de courant quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnements).

β_{oc} : Coefficient d'incrément de tension quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnements).

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

$$V_{pv,nouv} = V_{pv,STC} + \Delta V_{pv} \quad (\text{II.10})$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv,STC} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.11})$$

Les paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp}) du module sous les conditions standards de fonctionnement c'est-à-dire ($G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC} = 25 \text{ °C}$) sont fournis par les constructeurs de panneaux photovoltaïques. Ces paramètres sont donnés dans le tableau de l'annexe.

II.3.2. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions standards de fonctionnement :

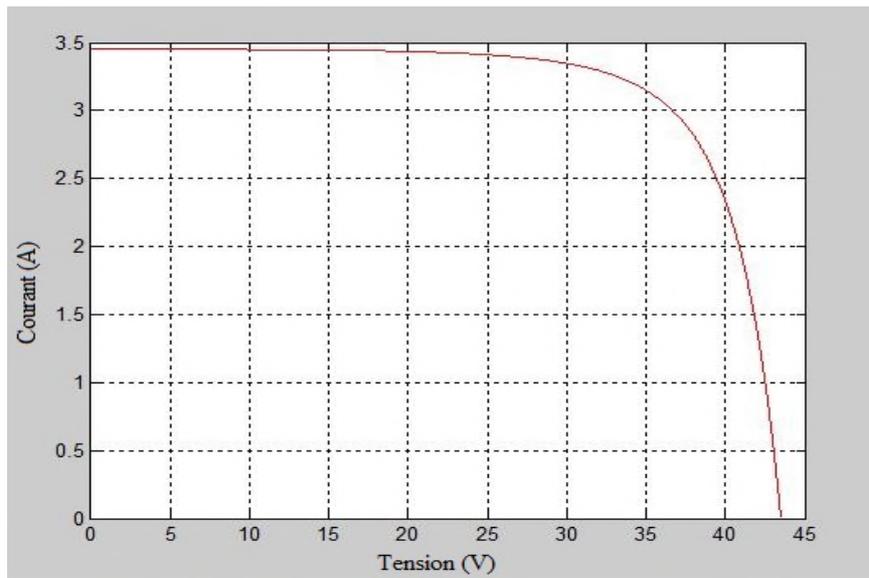


Figure (II.3) : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions: $G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC} = 25 \text{ °C}$

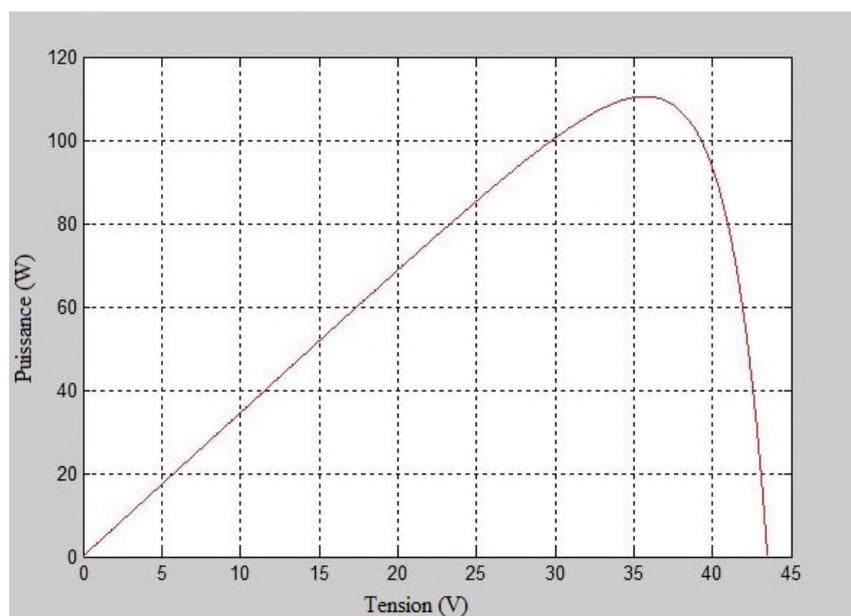


Figure (II.4) : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC}=25 \text{ °C}$

a. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque:

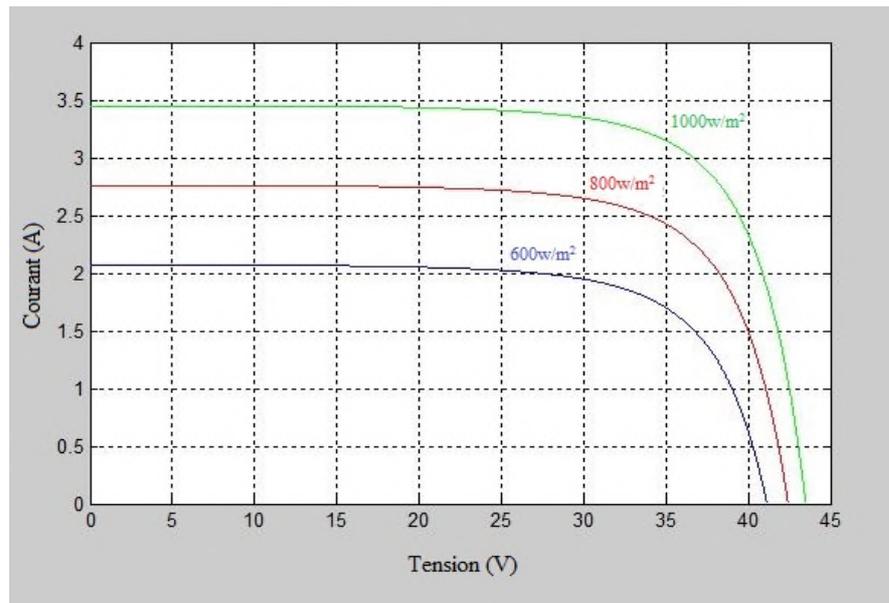


Figure (II.5): Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

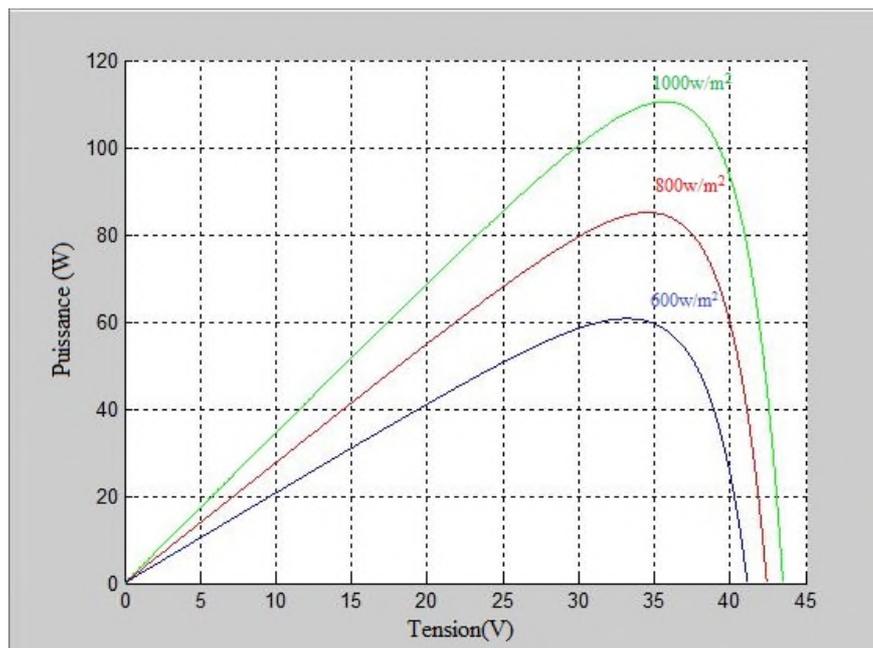
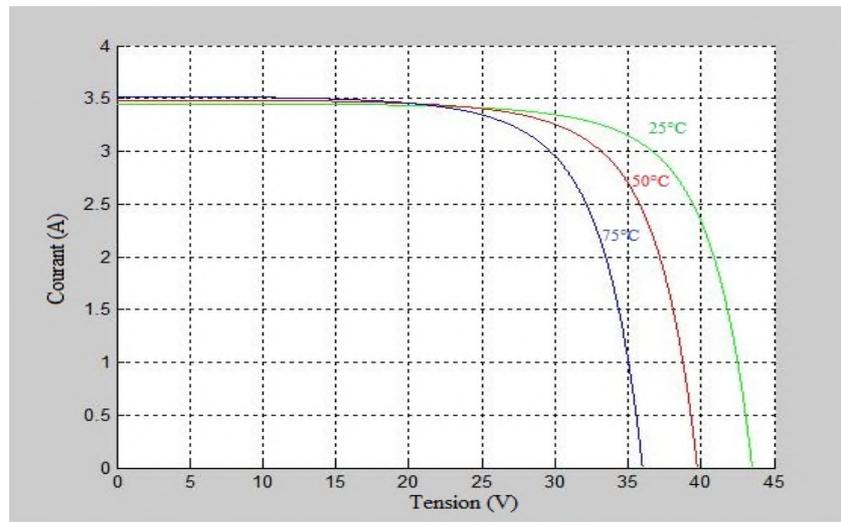


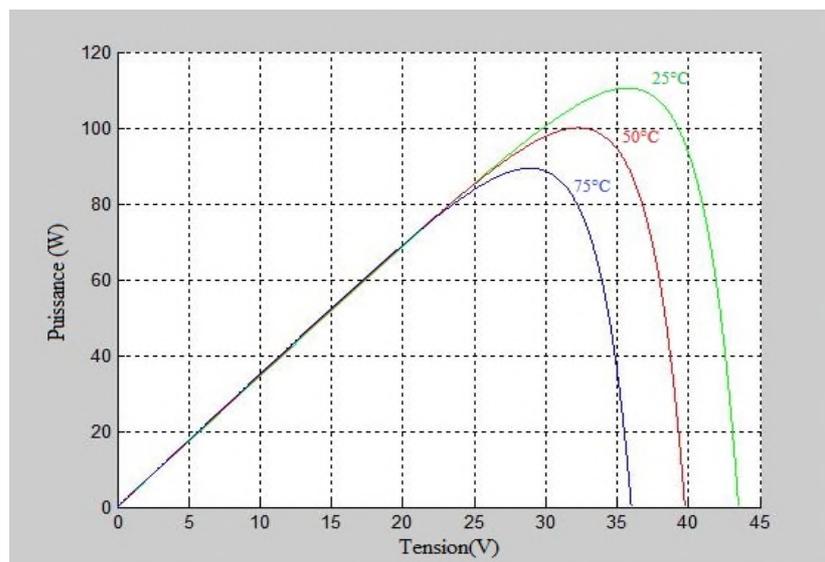
Figure (II.6): Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

La variation de l'ensoleillement influe sur le courant de court-circuit qui diminue quand l'ensoleillement diminue, par contre la tension à circuit ouvert est peu sensible à cette variation, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale.

b. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque:



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



Figure(II.8): Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque. La tension de circuit ouvert diminue, lorsque la température augmente. Par contre le courant de court-circuit est faiblement dépendant de la température, cela se traduit par une baisse de puissance.

II.3.3. Modélisation du hacheur survolteur :

Lorsque l'on désire augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de

principe est montré dans la figure (I.11) [18]. 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 [22].

D'après le schéma du hacheur survolteur de la figure (I.11) :

Lorsque l'interrupteur (S) est fermé:

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.12})$$

$$0 = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.13})$$

Lorsque l'interrupteur (S) est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.14})$$

$$I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.15})$$

En posant $u=1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et $u=0$ pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique.

Nous considérons ici que les interrupteurs sont parfaits. [23]

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - u) \quad (\text{II.16})$$

$$(1 - u)I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.17})$$

Ce modèle est directement utilisable pour réaliser une simulation du convertisseur, dans un environnement de type Matlab/Simulink.

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Son expression est donnée par l'équation (II.18). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α . [24]

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (\text{II.18})$$

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_L \quad (\text{II.19})$$

II.3.4. Modélisation du convertisseur buck-boost :

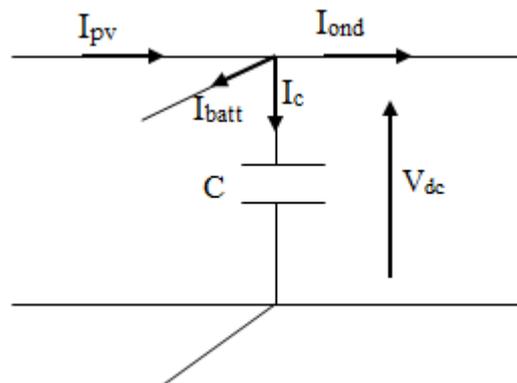
Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant de l'inductance augmente, l'énergie est stockée; et quand le commutateur tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit : [25]

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.20})$$

II.3.5. Modélisation du bus continu :

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.9): Modèle du bus continu.

A partir de la figure(II.9), on peut écrire l'équation suivante :

$$I_c = I_{pv} - I_{ond} \pm (I_{batt}) \quad (\text{II.21})$$

La tension V_{dc} est une fonction du courant I_c :

$$I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.22})$$

Avec : C : La capacité du condensateur.

II.3.6. Modélisation du convertisseur DC/AC (onduleur) :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par générateur photovoltaïque, en courant alternatif monophasé ou triphasé. [26]

Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveau de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable. [26]

Le schéma de cet onduleur est donné dans la figure (II.10) :

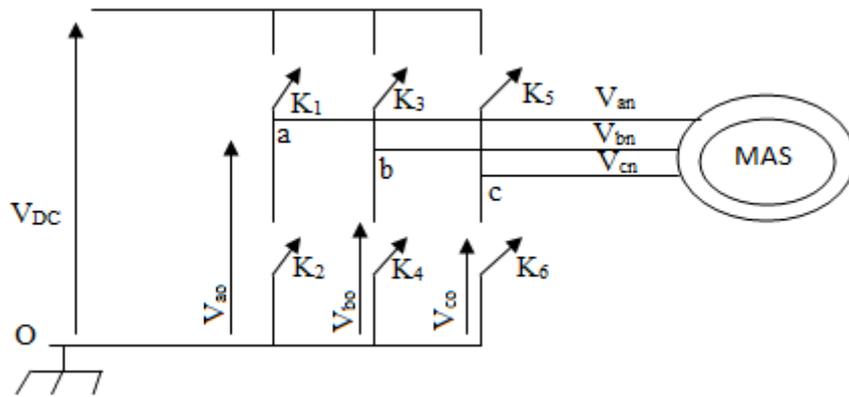


Figure (II.10) : Circuit de l'onduleur relié à la machine.

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations : [26]

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec : V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point «O» comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continues sont données par la relation de CHARLE comme suit : [26]

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} - V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} - V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} - V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Avec : V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et V_{no} est la tension du neutre de la charge par rapport au point «O».

On suppose que la charge est équilibrée c.à.d.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant (II.25) dans (II.24) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.26})$$

En remplaçant (II.26) dans (II.23) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{DC} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{DC} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{DC} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

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

Donc:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{u_0}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

II.3.7. Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil :

II.3.7.1 Introduction :

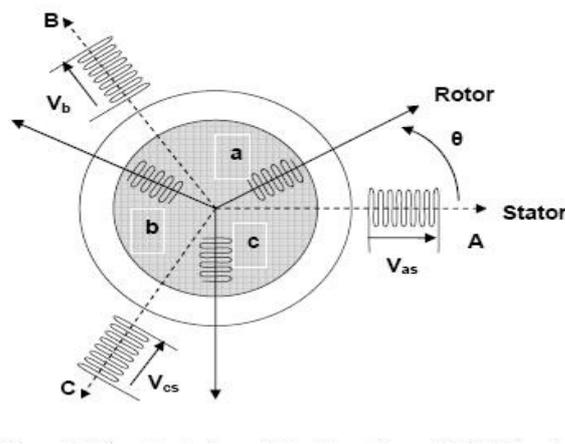
La machine asynchrone (MAS) est une machine électrique utilisée principalement dans les applications industrielles. Ces principaux avantages sont : sa construction simple, son coût de revient peu élevé, sa sûreté de fonctionnement, sa robustesse, et surtout sa maintenance simple et économique. [27]

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation du flux : loi de Lenz-Faraday. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

II.3.7.2. Equation générale d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil :

II.3.7.2.1 Equation des tensions et des flux : [28]



Figure(II.11) : Représentation schématique d'une MAS triphasée

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

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.30})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.31})$$

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 statoriques et rotoriques.

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

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

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

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.31) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.32})$$

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

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_{sabc}, I_{rabc}] \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}] \right) \quad (\text{II.33})$$

Les flux totalisés Φ_{sabc} et Φ_{rabc} des phases statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des inductances sous la forme suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \quad (\text{II.34})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \quad (\text{II.35})$$

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 statoriques (L_s, M_s) et rotoriques (L_r, M_r) sont constantes, seuls les inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases du rotor qui varient. Elles dépendent de l'angle θ telle que :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cdot \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_3 = M_{sr} \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

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

Finalement on peut écrire les équations électriques du moteur asynchrone :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \} \quad (\text{II.37})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \} \quad (\text{II.38})$$

Les équations (II.37), (II.38) aboutissent à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors plus difficile pour cela en fait appel au modèle de Park en vue de sa commande.

II.3.7.2.2 Modèle de Park de la machine asynchrone : [28]

La théorie de la machine asynchrone est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes électriquement perpendiculaires appelés **d** pour l'axe direct, et **q** pour celui de 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 de la saturation sont négligés,
- ✓ Les composantes homopolaires sont nulles.

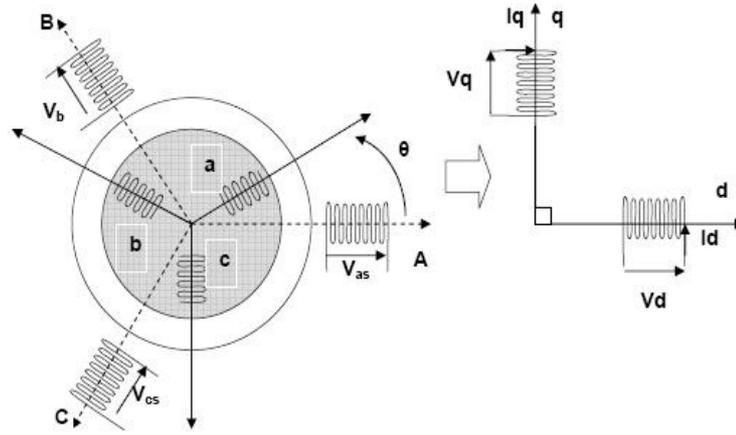


Figure (II.12) : Modèle de Park de la machine asynchrone

Les amplitudes directes (d) et en quadratures (q) des grandeurs statoriques et rotoriques sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

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.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d\Phi_{s0}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \\ V_{r0} = R_r \cdot I_{r0} + \frac{d\Phi_{r0}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.41})$$

Avec :

$V_{sd} \cdot V_{sq}$: Tension statorique direct et quadratique ;

$I_{sd} \cdot I_{sq}$: Courant statorique direct et quadratique ;

$\Phi_{sd} \cdot \Phi_{sq}$: Flux statorique direct et quadratique ;

$I_{rd} \cdot I_{rq}$: Courant rotorique direct et quadratique ;

$\Phi_{rd} \cdot \Phi_{rq}$: Flux rotorique direct et quadratique ;

ω_s, ω_r : Pulsation des grandeurs statoriques et rotoriques [rd/s] ;

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

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

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 toutes les équations du moteur asynchrone :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & M & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & -\omega_s \cdot L_s & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} \cdot I_{sq} - \Phi_{rq} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II.44})$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II.45})$$

II.3.7.2.3 Commande vectorielle du moteur asynchrone :

II.3.7.2.3.1. Introduction :

Le contrôle vectoriel de la machine asynchrone, consiste principalement à commander en régime dynamique et séparément (de façon découplée), le flux et le couple comme c'est le cas (naturellement) pour une machine à courant continu. [29]

Le contrôle vectoriel consiste donc à choisir un système d'axe (d, q), de façon à régler le flux par une composante du courant (I_{sd}) et le couple par l'autre composante (I_{sq}). Ainsi, on peut construire une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux.

Afin d'obtenir les performances souhaitées, la stratégie de commande de machine à courant alternatif consiste donc à rendre le comportement électromécanique similaire à celui d'une machine à courant continu. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit [28]:

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

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [28]. On choisit l'orientation du repère telle que :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

On remplace dans (II.41), on obtient :

➤ Les équations de tension :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \quad (\text{II.47})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \quad (\text{II.48})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (\text{II.49})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rq} + \omega_r \Phi_r \quad (\text{II.50})$$

➤ Les équations de flux :

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \quad (\text{II.51})$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \quad (\text{II.52})$$

$$\Phi_r = M \cdot I_{sd} + L_r \cdot I_{rd} \quad (\text{II.53})$$

$$0 = M \cdot I_{sq} + L_r \cdot I_{rq} \quad (\text{II.54})$$

En supposant que la commande maintienne : $\Phi_{rd} = \Phi_r = \text{constante}$.

A partir de l'équation (II.49), on obtient :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = -R_r \cdot I_{rd} \quad (\text{II.55})$$

Le flux s'exprime en fonction du courant et de la pulsation rotorique à partir de l'équation (II.50) sous la forme suivante :

$$\Phi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot I_{rq} \quad (\text{II.56})$$

La relation (II.56) 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} (avec $\frac{d\Phi_r}{dt} = 0$ et $I_{rd} = 0$) pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir de la relation (II.53), exprimer le courant I_{rd} comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\Phi_r - M.I_{sd}}{L_r} \quad (\text{II.57})$$

Par ailleurs, la relation (II.54) peut s'écrire de la manière suivante :

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot I_{sq} \quad (\text{II.58})$$

L'expression de couple électromagnétique donnée par la relation :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot I_{sq} \quad (\text{II.59})$$

II.3.7.2.4 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique :

Dans la relation (II.55), on remplace I_{rd} par sa valeur exprimé en (II.57), il vient :

$$\Phi_r = \frac{M.I_{sd}}{1+T_r.s} \quad (\text{II.60})$$

Avec :

T_r : Constante de temps rotorique

s : Opérateur de dérivation

La connaissance de ω_s permet d'assurer la validité des équations car le référentiel «d q» doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + p \cdot \Omega$. La vitesse de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique. Dans l'équation (II.56), on remplace I_{rq} par sa valeur donnée en (II.58). Ce qui donne :

$$\omega_r = \frac{M.I_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} + 0.001 \quad (\text{II.61})$$

On obtient finalement :

$$\omega_s = \frac{M.I_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} + p \cdot \Omega + 0.001 \quad (\text{II.62})$$

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

II.3.8. Modélisation de la pompe :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur manométrique, le débit et la vitesse. La hauteur de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique [30].

Dans cette application, la puissance hydraulique de la pompe centrifuge est donnée par :

$$P_h = R_{mp} \cdot P_{ele} = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q \quad (\text{II.63})$$

Avec :

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

P_{ele} : Puissance électrique du moteur asynchrone (W) ;

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe (%) ;

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

ρ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m^3) ;

Q : Débit volumique (m^3/s) ;

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

La pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r .

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II.64})$$

Où :

Ω : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s).

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

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.65})$$

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

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

II.3.9. Le modèle électrique de la batterie:

Le modèle électrique de la batterie comprend une fem. E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance interne (R_s).

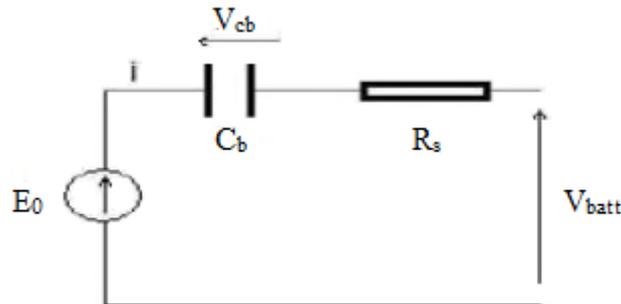


Figure (II.13) : Modèle R-C de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{cb} \quad (\text{II.66})$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \quad (\text{II.67})$$

C_{batt} : la capacité (Ah) nominale de la batterie.

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt} .

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC et DC/AC, la batterie et le groupe motopompe). Nous avons présenté les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque pour des variations des conditions météorologiques.

Chapitre III:

Dimensionnement et gestion de
l'énergie du système de pompage
photovoltaïque avec batteries

III.1.Introduction :

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries, une étude dimensionnelle est nécessaire, pour appliquer une commande afin d'assurer un bon fonctionnement du système.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous permettra de définir la taille des éléments du notre système, de déterminer le nombre de panneaux nécessaires, ainsi que le nombre de batteries, pour satisfaire les besoins quotidiens en eau.

Nous allons aussi présenter un système de gestion, qui a pour but de contrôler l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et de protégé les batteries contre les surcharges et les décharges profondes.

III.2.Méthode de dimensionnement :

Afin d'obtenir un dimensionnement satisfaisant, il faut estimer les besoins en eau, prendre compte des données d'ensoleillements et le rendement du groupe motopompe choisi.

III.3.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 que nous avons estimés nécessaires sont de 60 litres par personne par jour.

III.4. Donnée de base : [31,32]

Le débit d'eau de la pompe et la hauteur manométrique de pompage sont des données nécessaires pour le dimensionnement de la pompe et de ses composants.

III.4.1. Le débit :

Le débit d'eau est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. Le débit est donné en litre par heure (l/h) ou en mètre cube par jour (m³/j).

III.4.2. La hauteur manométrique totale :

La HMT est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Elle peut être calculée comme suit :

$$\mathbf{HMT=Hg+Pc} \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

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

Pc : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites. Ces pertes sont en fonction de la distance des conduites (L), de leur diamètre (dc) et du débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètre de colonne d'eau. Le diamètre des conduites (dc) doit être calculé afin que les pertes de charge pc correspondent au plus à 10% de la HMT.

III.5. Calcul de l'énergie journalière requise :

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

Ce calcul est fonction d'une constante hydraulique (C_H) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé. [33]

Energie requise pour la pompe E_{ele} :

$$E_{ele} = \frac{C_H * Q * HMT}{R_{mp}} \quad \text{(III.2)}$$

Où : $CH = (g * \rho) / 3600$

$$C_H = (9.81 * 10^3) / 3600 = 2.725$$

g : Constante de la gravité (9.81 m/s²).

ρ : La densité de l'eau (1000 Kg/m³).

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe.

III.6. Choix des composants du système :

III.6.1. Dimensionnement de la pompe centrifuge :

Dans notre étude le débit journalier sera de 12.5 m³/j, nous allons pomper cette eau d'un puits dont la HMT est estimée à 20 m. Le rendement du groupe motopompe est de 45%.

III.6.2. Dimensionnement du champ photovoltaïque :

Pour le site de Bejaia, le mois de décembre est le mois où l'ensoleillement est le plus faible, c'est à dire un maximum de 2,2 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 20% attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur [34], dans ce cas la puissance crête (P_{pv}) du champ photovoltaïque se calculera comme suit :

$$P_{pv} = \frac{E_{ele}}{h(\text{ensoleillement})*(1-\text{pertes})}$$

(III.3)

Le nombre de panneaux utilisés peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{pv} \geq ENT \left[\frac{P_{pv}}{P_{pv,u}} \right]$$

III.6.3. Dimensionnement de la batterie :

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

$$C_{batt} = \frac{E_{ele} * N_j}{U_{batt} * \eta_{bat} * PDD}$$

(III.4)

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

$$N_{pv} \geq \frac{C_{batt}}{C_{batt,u}}$$

Avec :

N_j : Nombre de jour d'autonomie de la batterie.

PDD : Profondeur de décharge de la batterie.

η_{bat} : Rendement de la batterie.

U_{batt} : Tension de la batterie.

N_b : Nombre de batterie.

$C_{batt,u}$: Capacité unitaire de la batterie.

Chapitre III: Dimensionnement et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque avec batteries

- Dans notre travail, on a pris comme application, l'alimentation en eau d'un village situé dans une région de la wilaya de Bejaia. La consommation d'eau journalière de ce village est représentée sur le graphe ci-dessous :

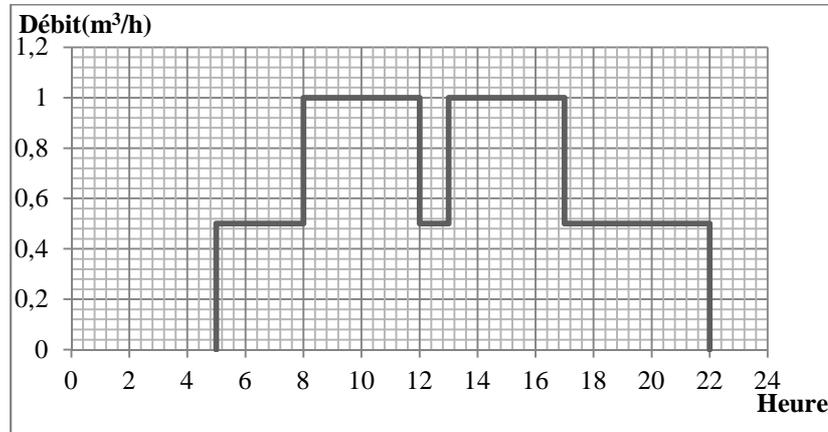


Figure (III.1) : Consommation journalière d'un village

Nous avons établi le tableau de dimensionnement suivant :

Famille	40	Débit	12.5m ³ /jour
Nombre de personne/famille	5	HMT	20m
Litres/personne/jour	60	R _{mp}	45%
Consommation d'eau de la mosquée	500l/jour	η_{bat}	90%
Nombre d'heure d'ensoleillement	2.2	PDD de la batterie	80%
Pertes estimées	20%	Nombre de jour d'autonomie	3
Capacité de la batterie	260 Ah	Tension de la batterie	12 V
Puissance unitaire de panneau	110 Wc		

Tableau (III.1) : Données de base

Le calcul des différentes puissances, le nombre de panneaux et le nombre de batteries à utiliser est présenté sur le tableau suivant :

L'énergie quotidienne requise	1514Wh/jour
Puissance du générateur photovoltaïque	860 W
Nombre de panneaux nécessaire N_{pv}	8 panneaux
Capacité de la batterie	701 Ah
Nombre de batteries N_b	3 batteries

Tableau(III.2):Calcul des différentes puissances

Vu les caractéristiques du moteur asynchrone utiliser ($P_n=746W$, $I_n=3.4A$), les panneaux doivent être brancher en série.

La tension à la sortie du générateur photovoltaïque totale sera:

$$V_{pv_{tot}} = N_{pv} \cdot V_{opt}$$

$$V_{pv_{tot}} = 8 \cdot 35 = 280 \text{ V}$$

Le courant à la sortie du générateur photovoltaïque sera : $I_{pv_{tot}} = \frac{P_{pv}}{V_{max}} = \frac{880}{280} = 3.14 \text{ A}$.

III.7.Adaptation de l'énergie photovoltaïque:

Le générateur photovoltaïque est un générateur de puissance finie pouvant 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 éclairage et une température donnés. La tension et le courant correspondant sont 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.7.1. 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 soient les conditions météorologiques (irradiation, température), la commande du 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 peuvent être utilisées [24]:

- La méthode d'ajustement de courbe,
- La méthode « look-up table »,
- 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,
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones)

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 bon rendement. [24]

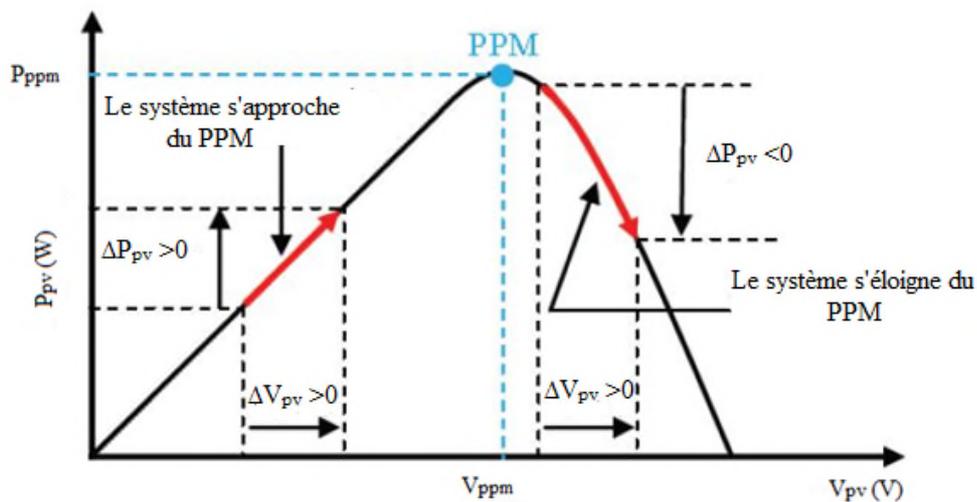
III.7.2. La méthode Perturbation & Observation (P&O): [24]

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 indique 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.2), 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 effectué 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.



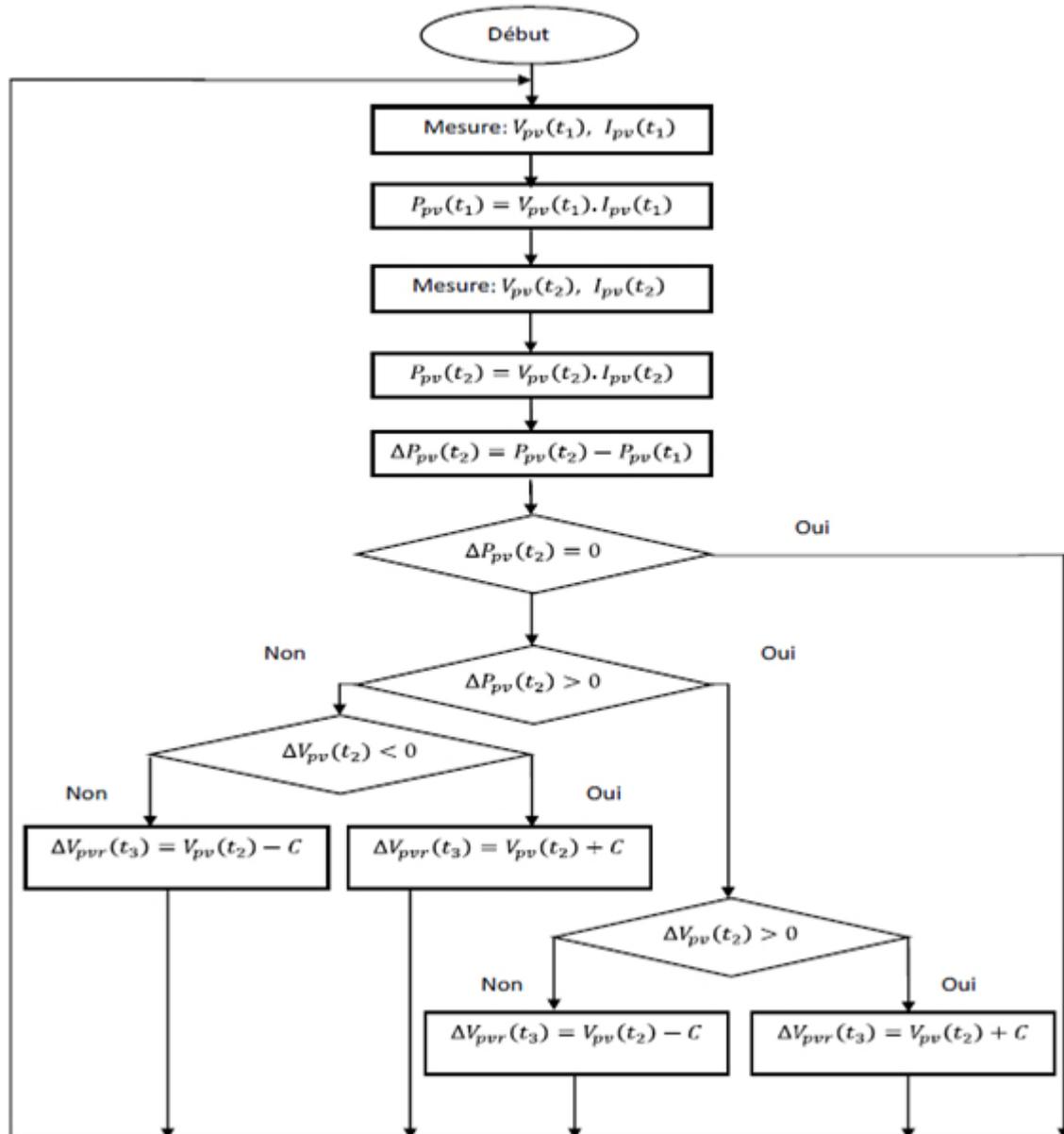
Figure(III.2) : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque.

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 part 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.3) présente le diagramme de l'algorithme P&O.



Figure(III.3) : Organigramme de la méthode perturbation et observation.

III.8. Gestion de l'énergie entre les différents composants du système :

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.4) présente le diagramme de l'algorithme de gestion.

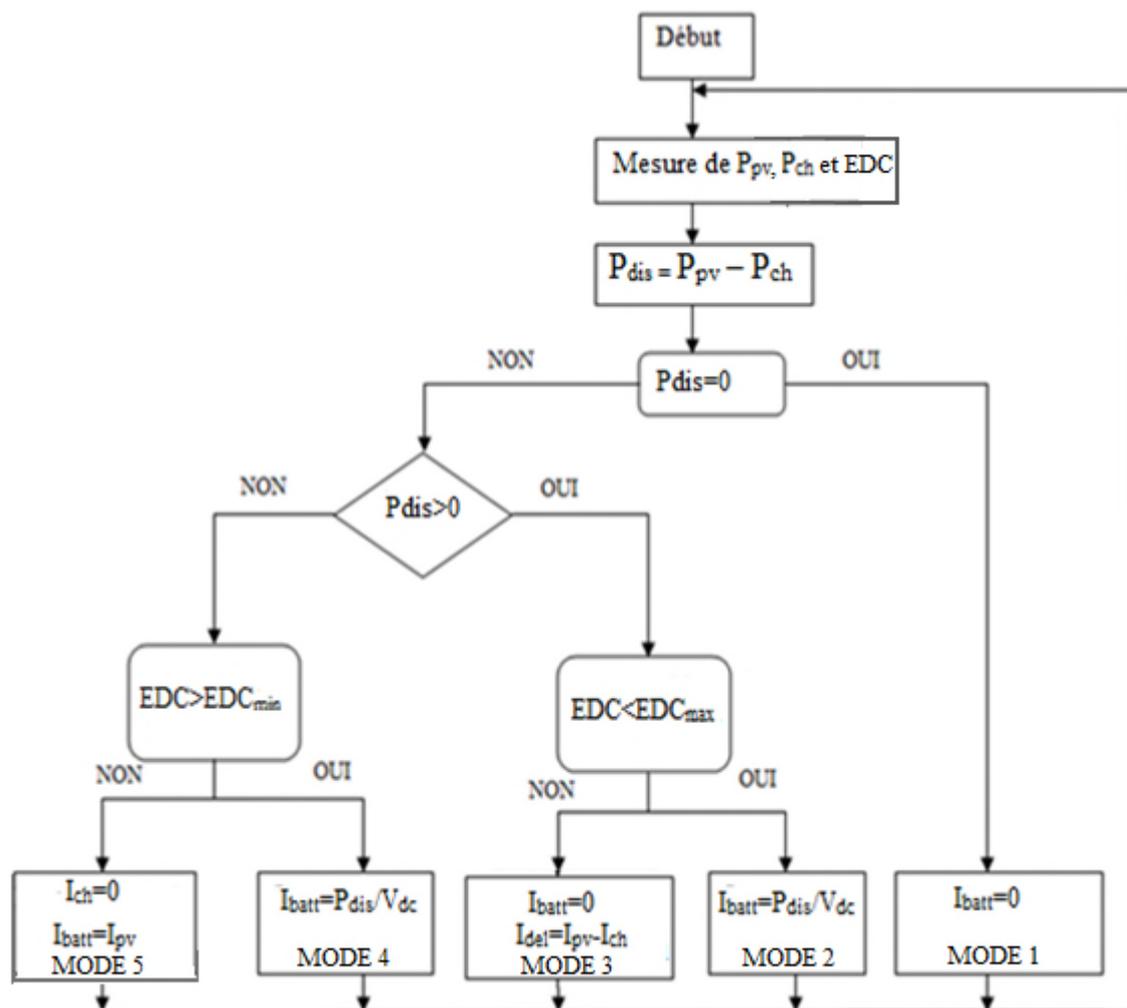


Figure (III.4) : Organigramme de gestion d'énergie du système globale

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 :

$$P_{dis} = P_{pv} - P_{ch} \quad (III.5)$$

➤ **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 supérieur à la puissance demandée par la charge, et que l'état de charge de la batterie est inférieur à EDC_{max} (90%), on alimente la charge et on charge la batterie.
- **Mode 3:** Quand la puissance photovoltaïques est supérieur à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDC_{max} (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 EDC_{min} (30%).
- **Mode 5:** Dans ce cas, la puissance photovoltaïque est insuffisante pour alimentée la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieur à EDC_{min} (30%), donc on déconnecte la batterie, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecté, dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu d'énergie disponible.

III.9.Conclusion:

Ce chapitre a été consacré à la description d'une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.

Pour un besoin journalier en eau de $12.5m^3$, nous avons besoin d'un générateur photovoltaïque de 880W avec trois batterie de capacité de 260 AH

Afin d'extraire un maximum de puissance du générateur PV, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, nous avons choisi la P&O.

Chapitre III: Dimensionnement et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque avec batteries

Nous avons aussi présenté un système de supervision, qui a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système et de réguler le processus de charge/décharge du stockage (batteries).

Chapitre IV:

Simulation du système de pompage
photovoltaïque avec batteries

IV.1.Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons présenter la simulation et les résultats obtenues du système de pompage photovoltaïque avec batteries. Dans un premier temps nous allons montrer le fonctionnement du générateur photovoltaïque avec l'algorithme d'optimisation(P&O). Ensuite les résultats de la commande vectorielle à flux orienté seront présentés.

A la fin, le système complet de pompage photovoltaïque sera simulé et les résultats seront présentés pour une journée (été et hiver), pour évaluer les performances du système de gestion d'énergie déjà présenté.

Les résultats de la simulation sont effectués (sous Matlab/ Simulink) avec un pas de calcul de 10^{-4} s.

IV.2.Fonctionnement de générateur photovoltaïque à sa puissance maximale :

Notre générateur photovoltaïque (GPV) est composé de huit panneaux photovoltaïques connectés en série. Les allures de la puissance PV, de la tension et du courant dans les conditions stc ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$) sont représentées sur les figures ci-dessous :

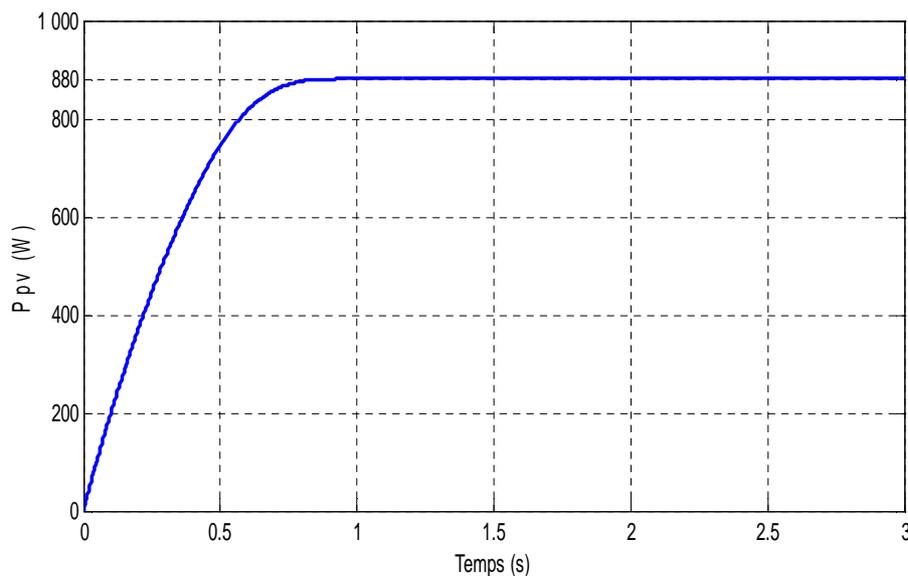
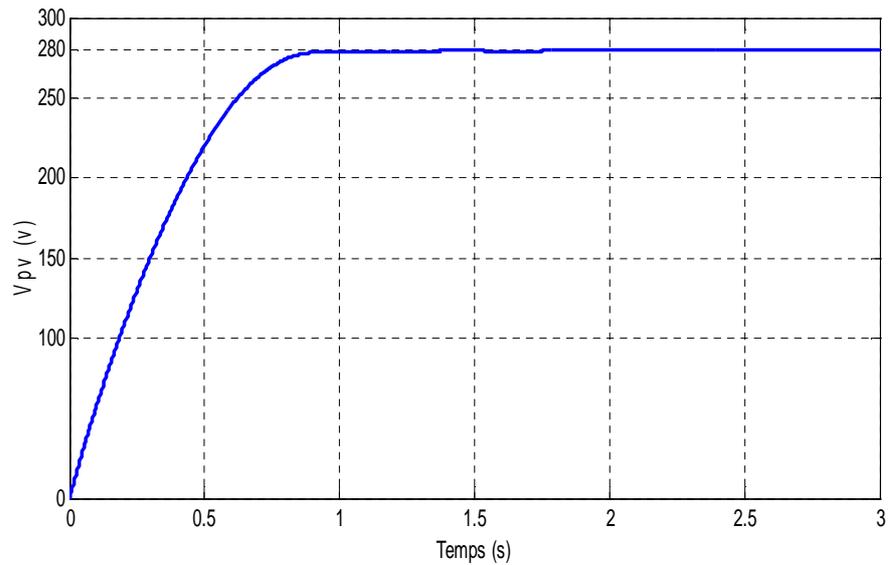
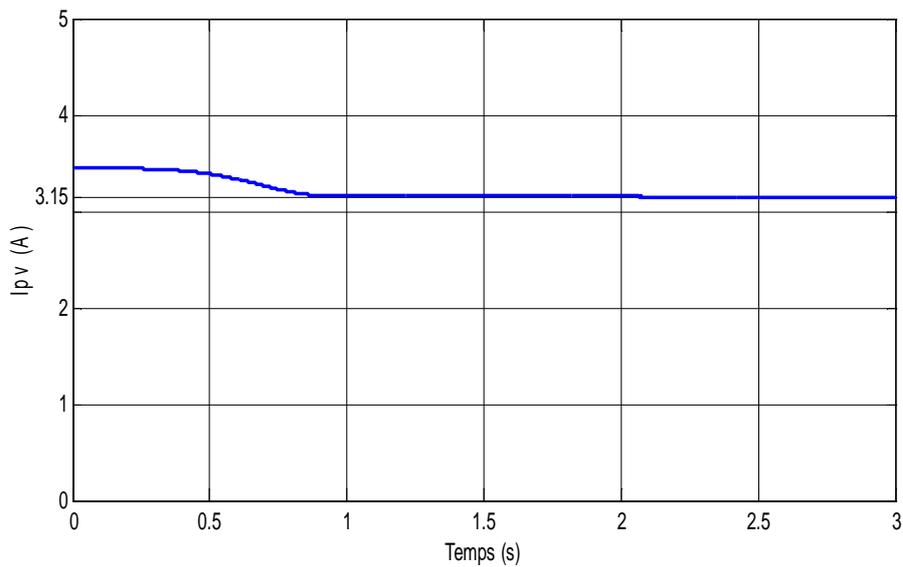


Figure (IV.1) : Allure de la puissance PV

**Figure (IV.2) : Allure de la tension PV****Figure (IV.3) : Allure du courant PV**

D'après les figures (IV.1-3), on voit bien que le générateur photovoltaïque permet d'extraire le maximum de puissance grâce à l'algorithme (P&O), on trouve une puissance de 880 W, avec une tension optimale de 280 V et un courant optimal de 3.15 A.

IV.3. Simulation du système de pompage sans connexion du générateur photovoltaïque :

La commande vectorielle utilisée pour le moteur asynchrone est celle à flux rotorique orienté. On applique un échelon de vitesse de référence 150 rd/s, et à l'instant $t=5s$, on fait

varier la vitesse à 140 rd/s. Cette dernière est comparée à la vitesse du moteur asynchrone, après régulation, le couple électromagnétique est obtenu, qui permet le calcul du courant i_{sq} de référence. Le courant i_{sd} de référence est obtenu après la régulation du flux qui est fixé à une valeur de référence de 0.8 Wb. Le contrôle des courants statoriques se fait par hystérésis pour déterminer les signaux de commande de l'onduleur. Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :

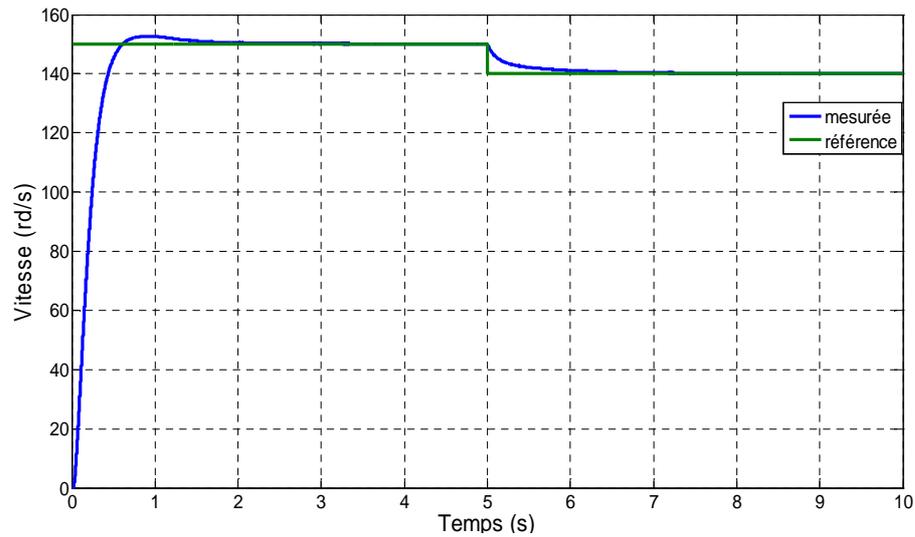


Figure (IV.4) : Allure de la vitesse

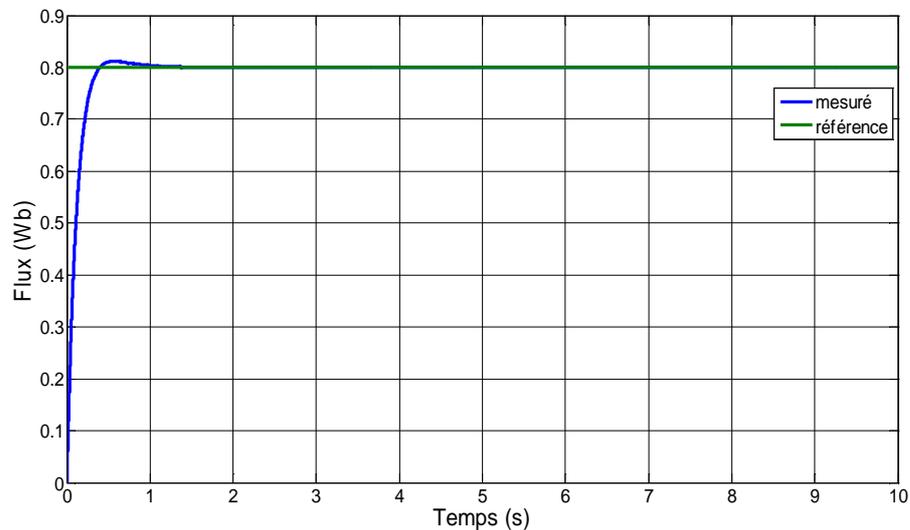


Figure (IV.5) : Allure du flux

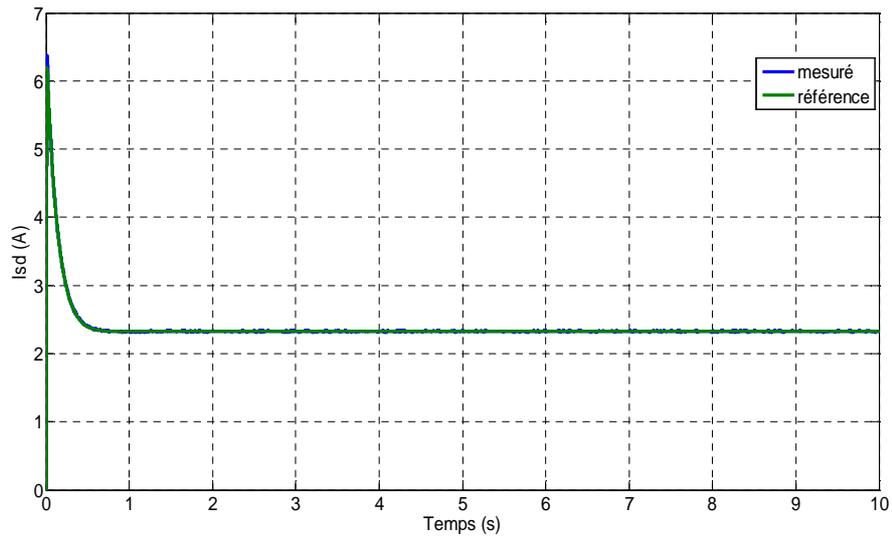


Figure (IV.6) : Allure du courant I_{sd}

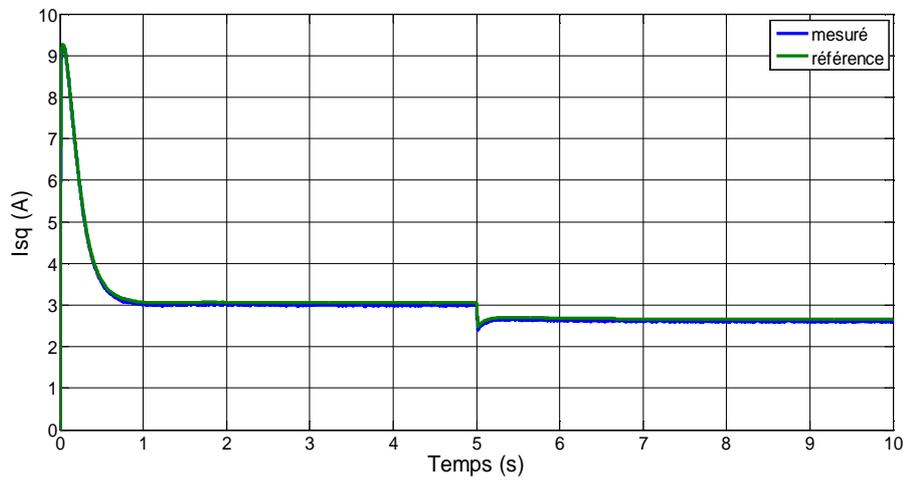


Figure (IV.7) : Allure du courant I_{sq}

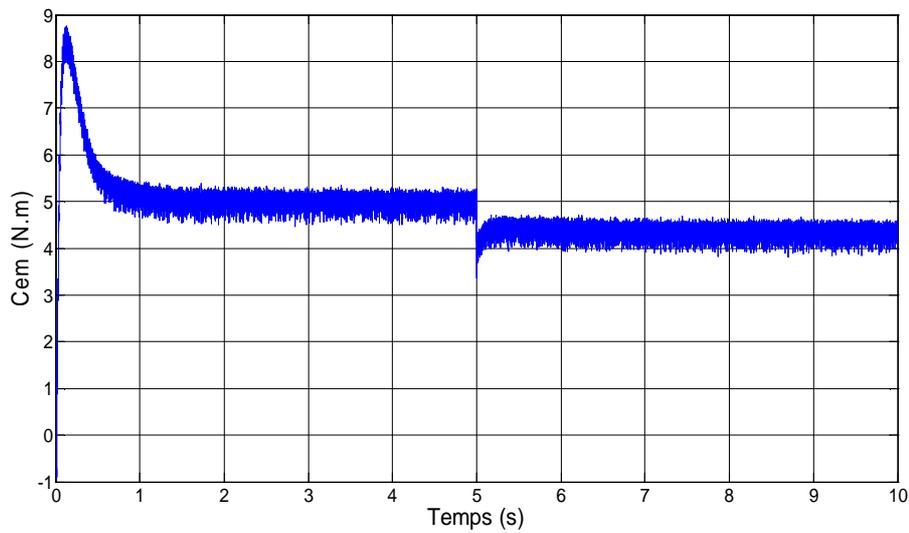


Figure (IV.8) : Allure de C_{em}

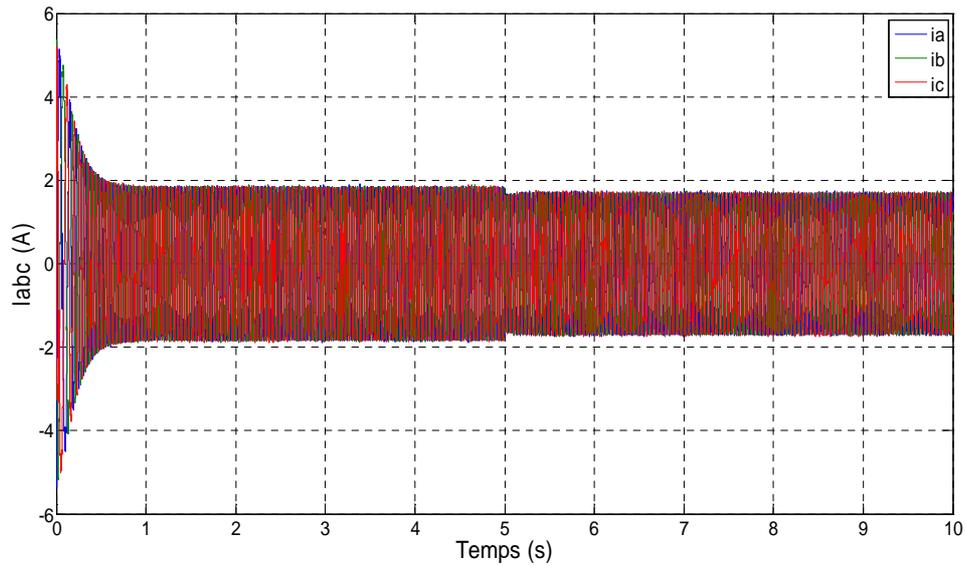


Figure (IV.9) : Allure des courants statoriques I_{abc}

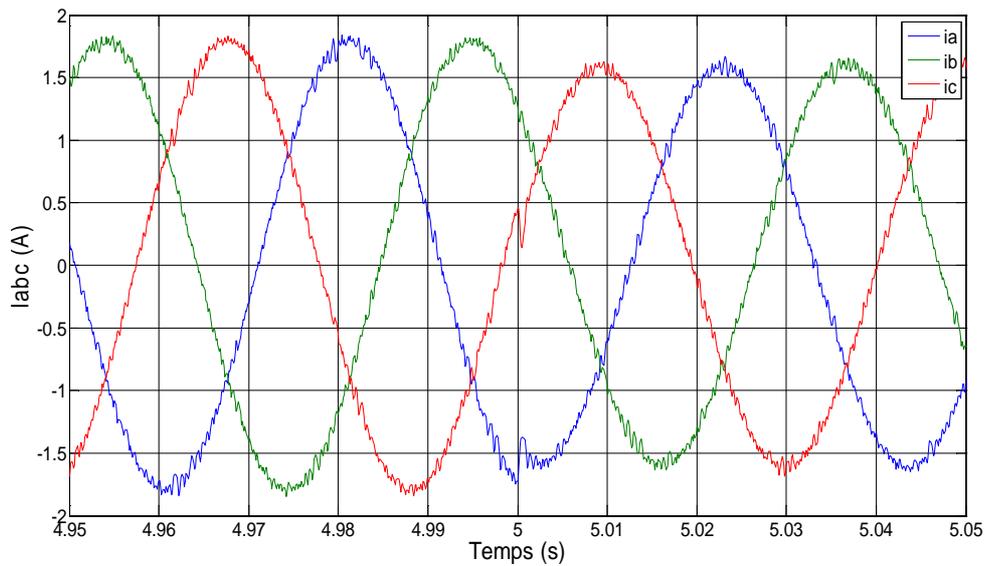


Figure (IV.10) : Zoom sur les courants statoriques I_{abc}

D'après la figure (IV.5), on peut constater que le flux est bien régulé et reste insensible aux variations de la vitesse. La figure (IV.9) montre l'allure des courants statoriques. Sans le zoom, on remarque une variation du courant statorique suite à la variation de i_{sq} figure (IV.7). Avec le zoom, figure (IV.10), on voit clairement l'aspect sinusoïdal des courants.

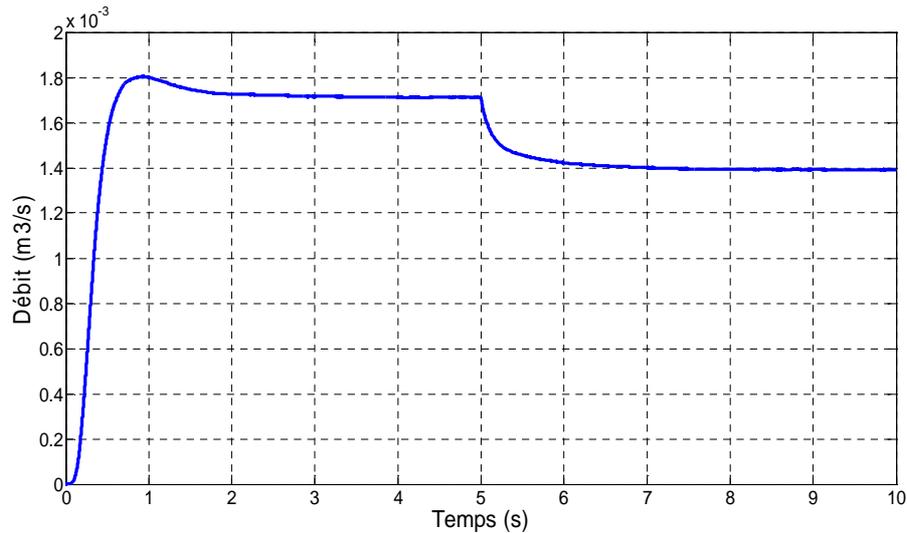


Figure (IV.11) : Allure du débit

D’après les figures (IV.4-11), on constate qu’à l’instant (t=5s), les grandeurs C_{em} , I_{sq} , i_{abc} et Q subissent une variation instantanée, par contre les allures du flux et du courant i_{sd} ne varient pas, cela est dû au découplage entre le flux et le couple imposé par la commande vectorielle.

IV.4. Simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries connecté au générateur photovoltaïque :

Le schéma de principe de la commande vectorielle est présenté sur la figure (IV.12) :

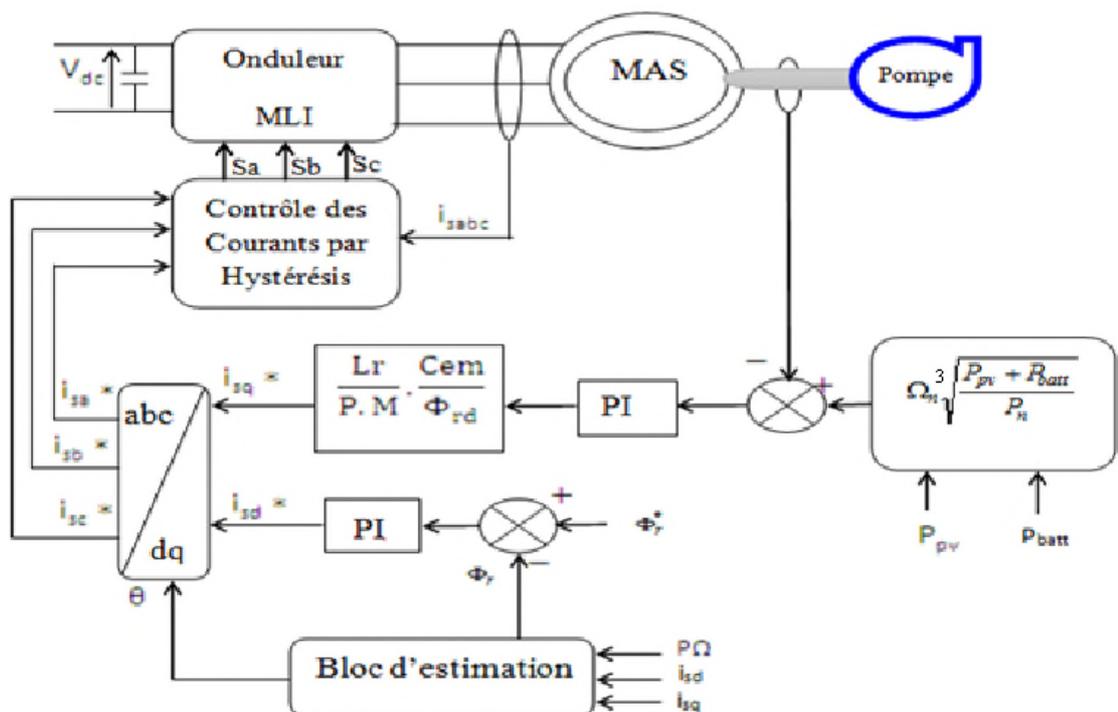


Figure (IV.12) : Principe de la commande vectorielle.

La vitesse de référence est calculée à partir des puissances PV et des batteries, puis comparée à la vitesse du moteur asynchrone, après régulation, le couple électromagnétique est obtenu.

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

A partir du débit journalier présenté sur la figure (III.1), nous avons calculé la puissance hydraulique et à partir de cette dernière, nous avons calculé la puissance électrique que doit consommer le moteur afin de satisfaire la demande en eau des consommateurs.

Les profils de la puissance hydraulique et la puissance demandée par la charge ($P_{\text{éle}}$) sont présentés sur les figures suivantes :

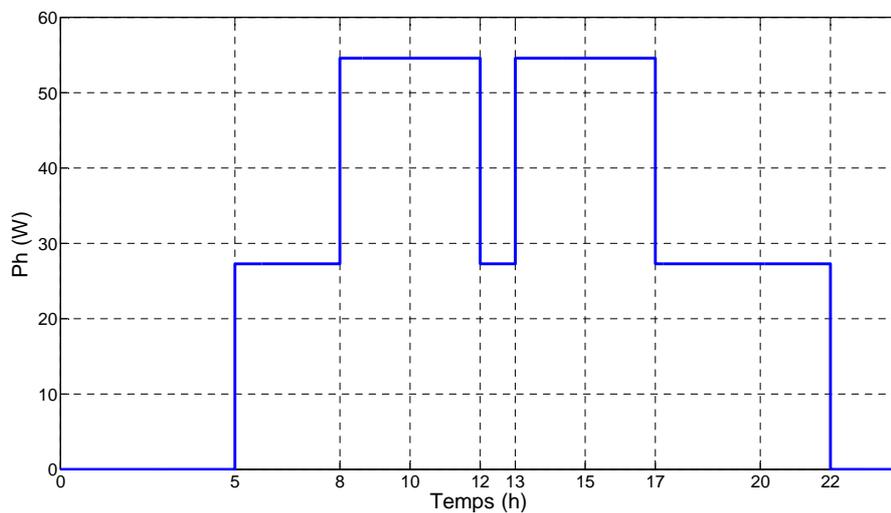


Figure (IV.13) : Puissance hydraulique

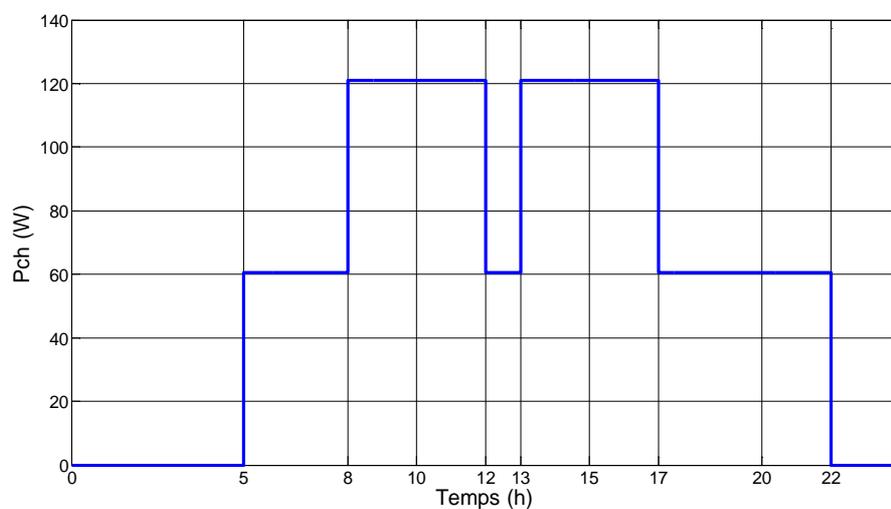


Figure (IV.14) : Puissance électrique demandée par la charge

Le système de pompage comporte un générateur PV, qui est composé de huit panneaux photovoltaïques connectés en série et trois batteries avec une capacité de 780 Ah. Les batteries sont initialement chargées à 60%.

IV.4.1. Les résultats de simulation du système globale pour une journée d'été :

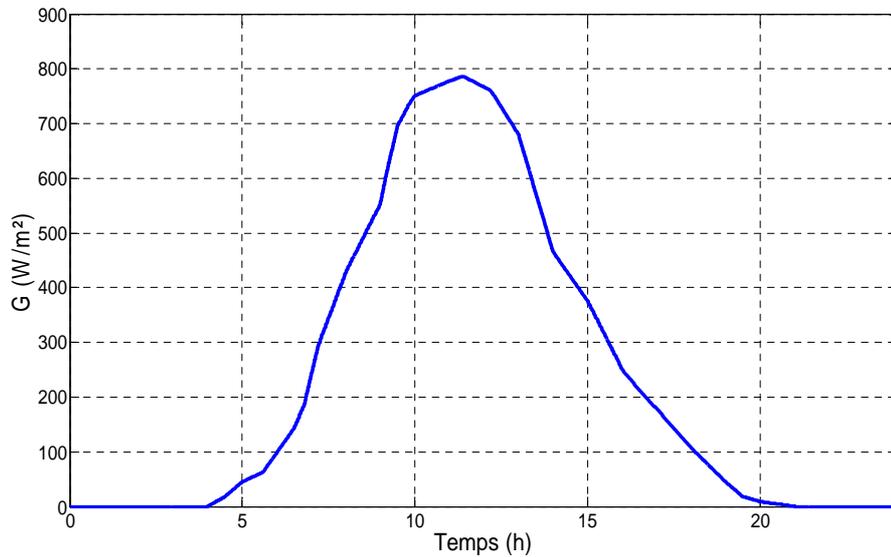


Figure (IV.15) : Variation de l'éclairement le long d'une journée d'été

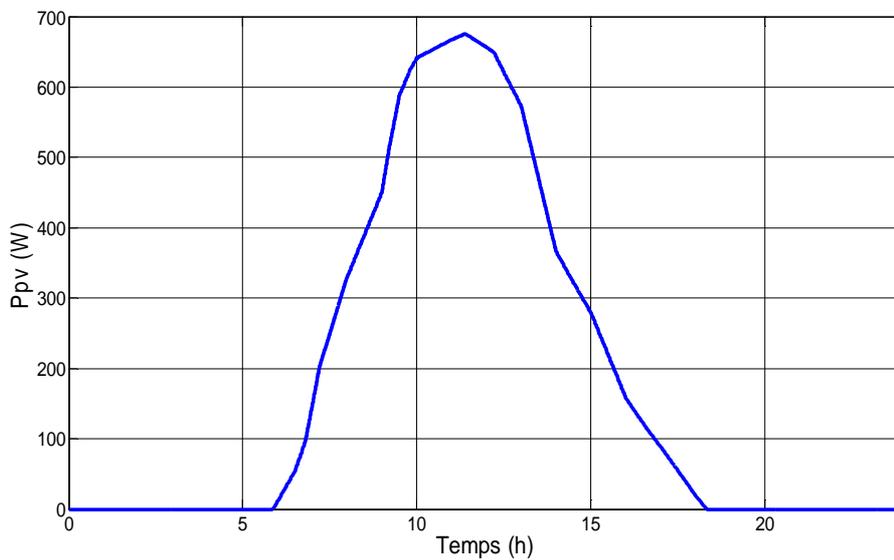


Figure (IV.16) : Variation de la puissance PV le long d'une journée d'été

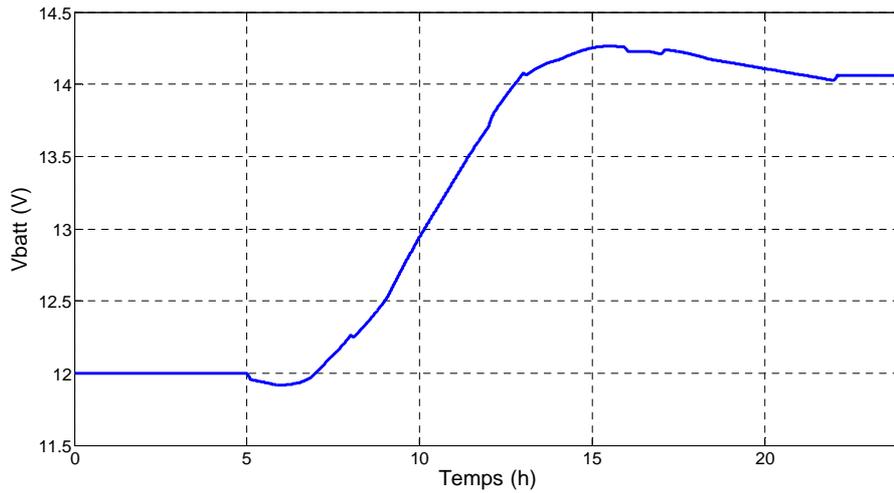


Figure (IV.17) : Tension aux bornes des batteries

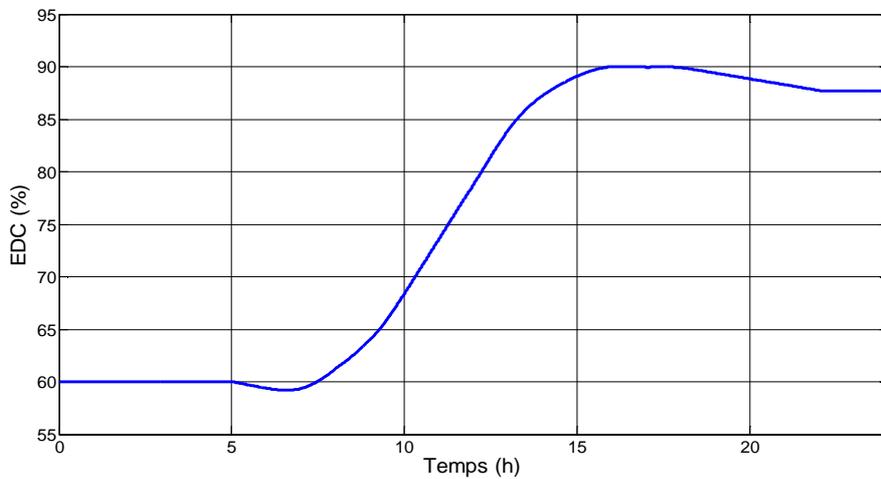


Figure (IV.18) : Allure de l'état de charge de la batterie.

On remarque que l'allure de la tension aux bornes de la batterie figure (IV.17), ainsi que celle de l'état de charge, figure (IV.18), évoluent de la même manière. Donc l'EDC est l'image de la tension.

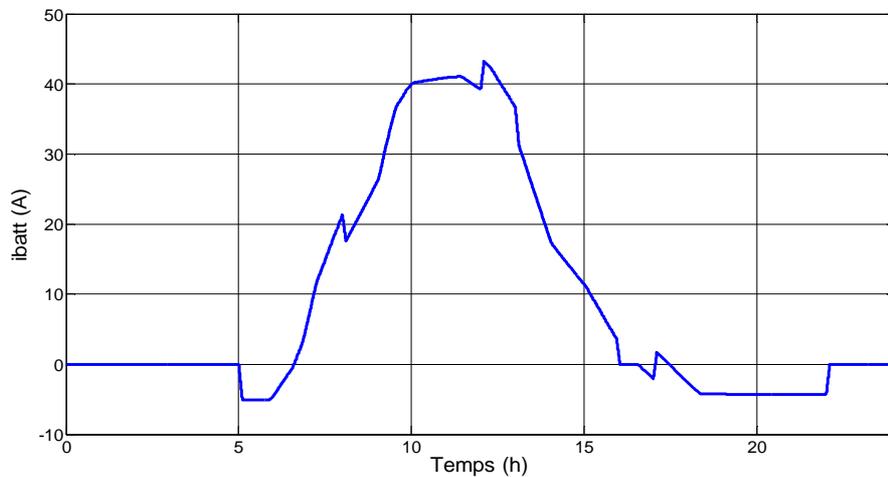


Figure (IV.19) : Allure du courant de la batterie.

La figure (IV.19) présente le courant de la batterie. On peut constater qu'il est positif en cas de charge, et négatif en cas de décharge.

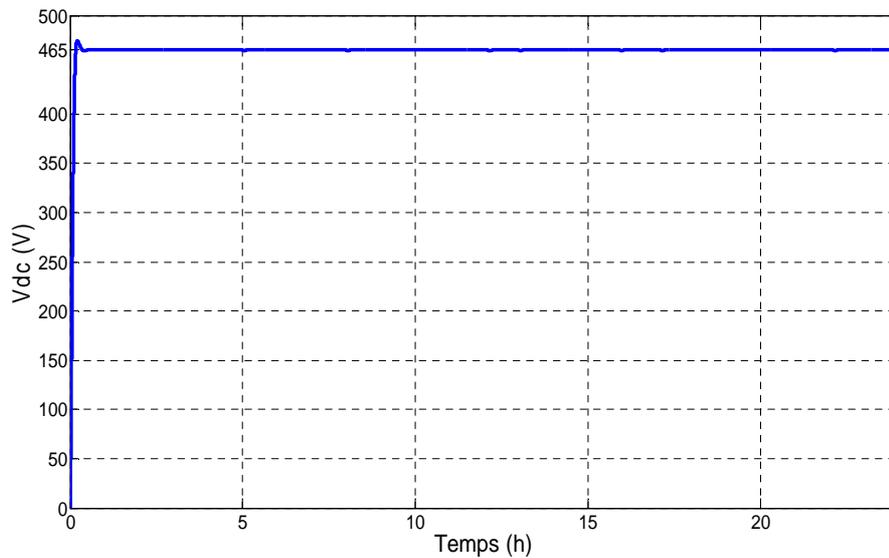


Figure (IV.20) : Allure de la tension du bus continu

La figure (IV.20) présente la tension de bus continu, on remarque que cette tension est bien régulée à sa valeur de consigne de 465 V.

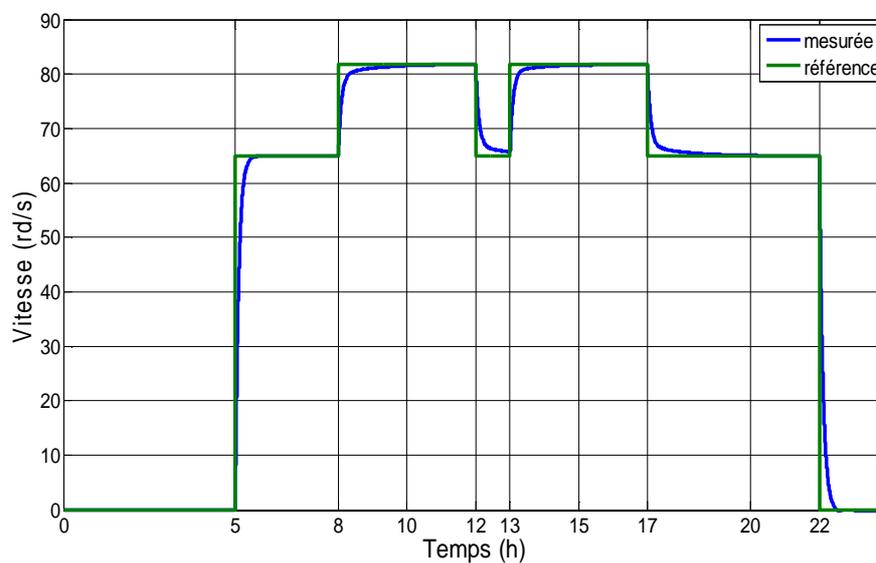


Figure (IV.21) : Allure de la vitesse mécanique du moteur

D'après la figure (IV.21), on constate que la vitesse mécanique du moteur asynchrone évolue suivant la demande de la charge, figure (IV.13).

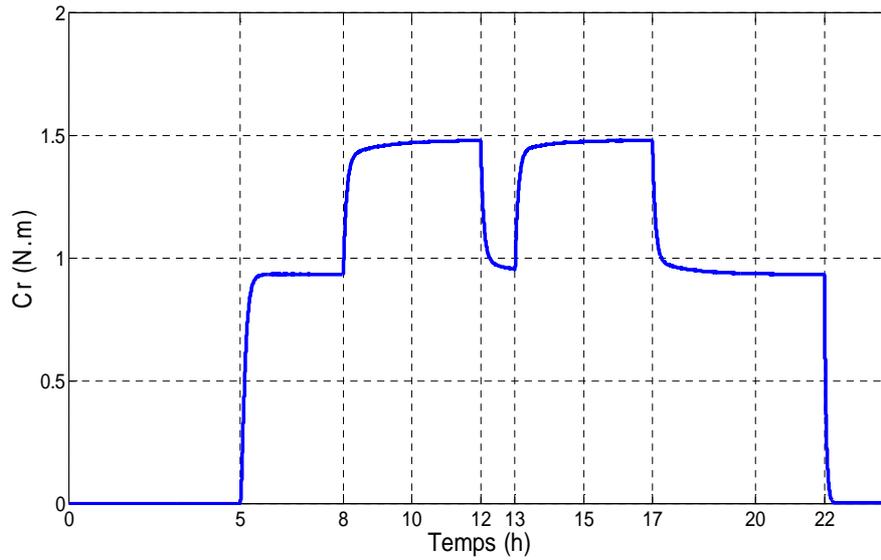


Figure (IV.22) : Allure du couple résistant

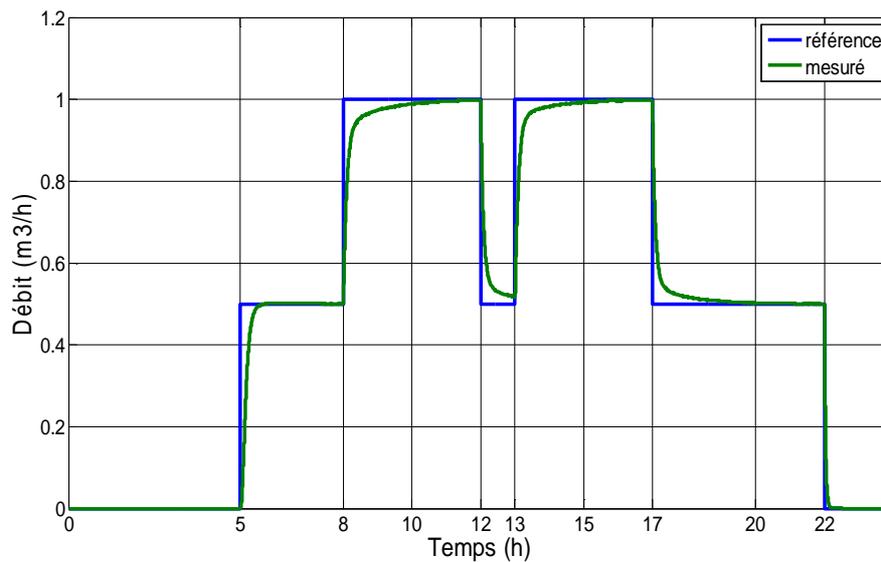


Figure (IV.23) : Allure du débit

D'après la figure (IV.23), on remarque le débit fourni par la pompe est le même à celui demandé par les consommateurs, et il évolue de la même manière que la vitesse mécanique du moteur asynchrone, figure (IV.21), et de couple résistant imposé par la pompe, figure (IV.22).

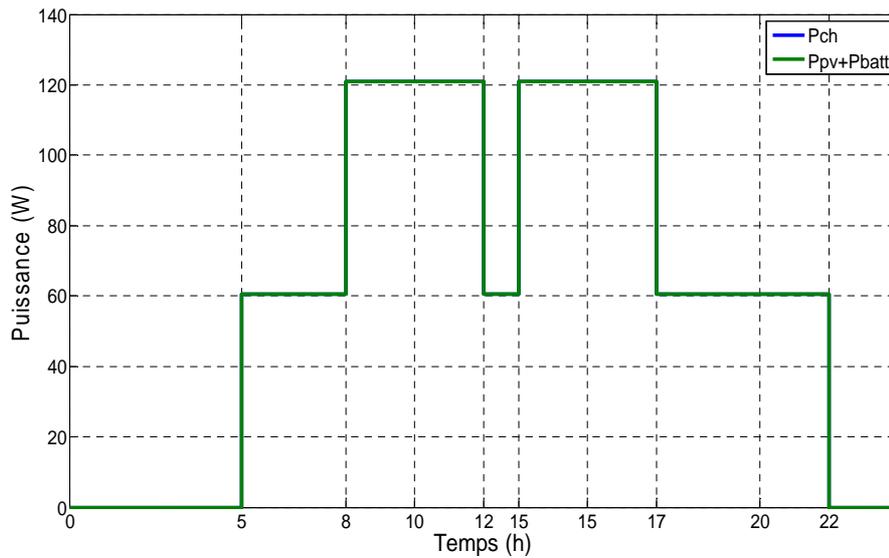


Figure (IV.24) : Allure de P_{ch} et $P_{pv}+P_{batt}$

D'après la figure (IV.24), on voit bien que les allures de la puissance demandée par la charge et la somme de la puissance PV et la puissance de la batterie sont pratiquement superposées.

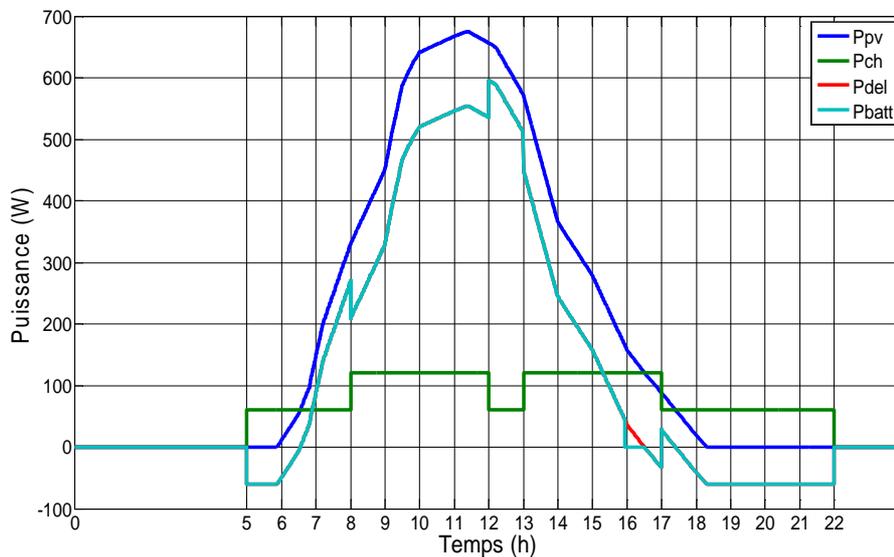


Figure (IV.25) : Allure de différentes puissances.

La figure (IV.25) représente la puissance PV, la puissance demandée par la charge, la puissance de délestage et la puissance de la batterie.

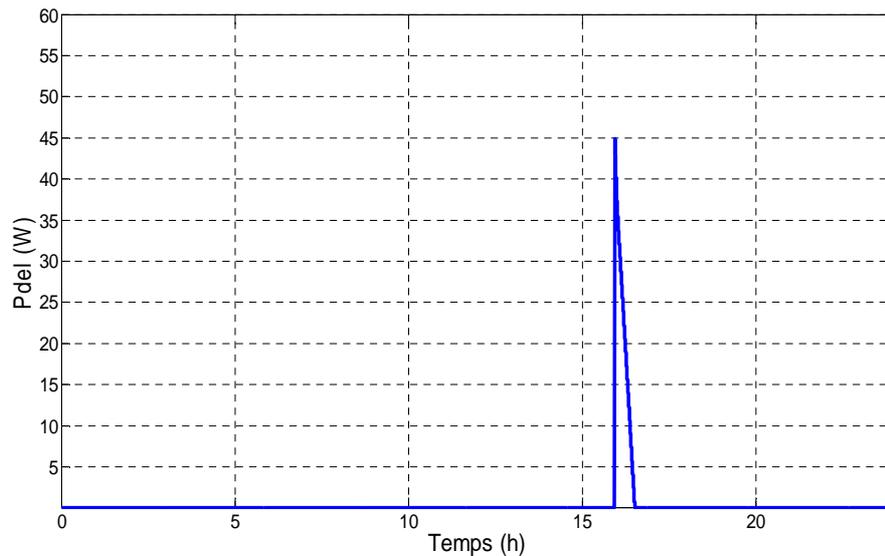


Figure (IV.26) : Allure de la puissance de délestage

La figure (IV.26) représente la puissance de délestage, on déduit à partir des figures (IV.18) et (IV.25) que cette puissance existe seulement si la puissance générée par le GPV est supérieure à celle demandée par la charge et $EDC > EDC_{max}$.

➤ **Synthèse sur le fonctionnement par phase du système de pompage avec l'algorithme de gestion pour une journée d'été :**

Notre système de pompage fonctionne de 5h jusqu'à 22h, selon la puissance de charge que nous avons imposé en fonction du débit demandé par les consommateurs. Les batteries été chargées initialement à 60%.

D'après les figures (IV.18, (IV.19) et (IV.25) représentant respectivement l'EDC, le courant de la batterie et les différentes puissances, on peut déduire les interprétations suivantes sur le fonctionnement par phase du système de pompage avec l'algorithme de gestion.

- **Phase 1 (t=5-6 h) :** On remarque que le GPV n'a pas encore fourni une puissance, donc c'est la batterie qui alimente la charge étant donné le $EDC > EDC_{min}$ (30%).
- **Phase 2 (t=6-6.5 h) :** Ce cas représente la situation où la puissance fournie par GPV est inférieure à celle demandée par la charge, dans ce cas le manque sera compensé par la batterie étant donné le $EDC > EDC_{min}$ (30%).

- **Phase 3 (t=6.5-16 h) :** Ce cas est le plus favorable, car il correspond à une situation où le GPV fournit une puissance largement supérieure à celle de la charge, à cet effet la batterie se charge rapidement étant donné $EDC < EDC_{max}$ (90%).
- **Phase 4 (t=16-16.5 h) :** On voit bien que le $EDC = EDC_{max}$ (Figure IV.17), on considère donc que la batterie est complètement rechargée ; et on la déconnecte. La charge est alimentée par le GPV et le surplus d'énergie est dirigé vers une charge dérivative (délestage).
- **Phase 5 (t=16.5-17 h) :** Ce cas est le même à celui de la phase 2.
- **Phase 6 (t=17-17.35 h) :** La puissance fournie par le GPV est supérieure à celle demandée par la charge, ce qui implique l'alimentation de la charge, et comme le EDC est inférieur au EDC_{max} , la batterie se charge à nouveau.
- **Phase 7 (t=17.35-18.25 h) :** La puissance fournie par le GPV est inférieure à la puissance de la charge, ce qui implique que la batterie se décharge pour compenser le manque de puissance demandée par la charge étant donné le $EDC > EDC_{min}$ (30%).
- **Phase 8 (t=18.25-22 h) :** Dans ce cas, la puissance produite par le GPV est nulle, alors la charge est alimentée seulement par la batterie étant donné le $EDC > EDC_{min}$ (30%).

-Les modes de fonctionnement du système de pompage (PV) avec batteries sont définis dans le chapitre précédent, leurs allures sont représentées sur les figures (IV.27-31), on peut constater que le mode 5 est absent.

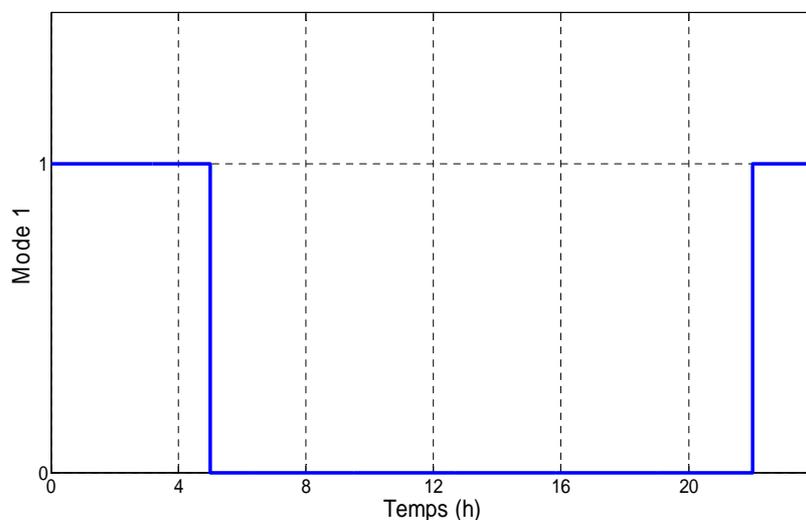


Figure (IV.27) : Allure du mode 1

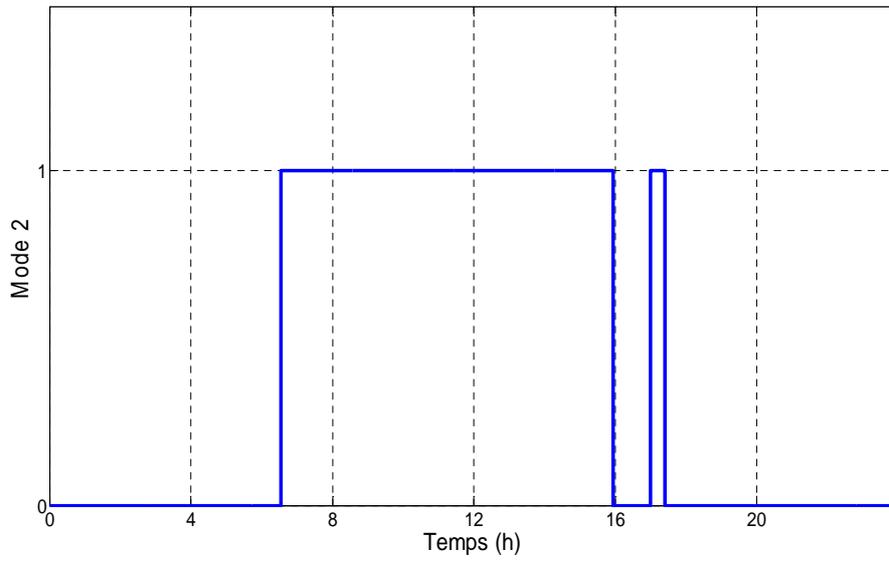


Figure (IV.28) : Allure du mode2

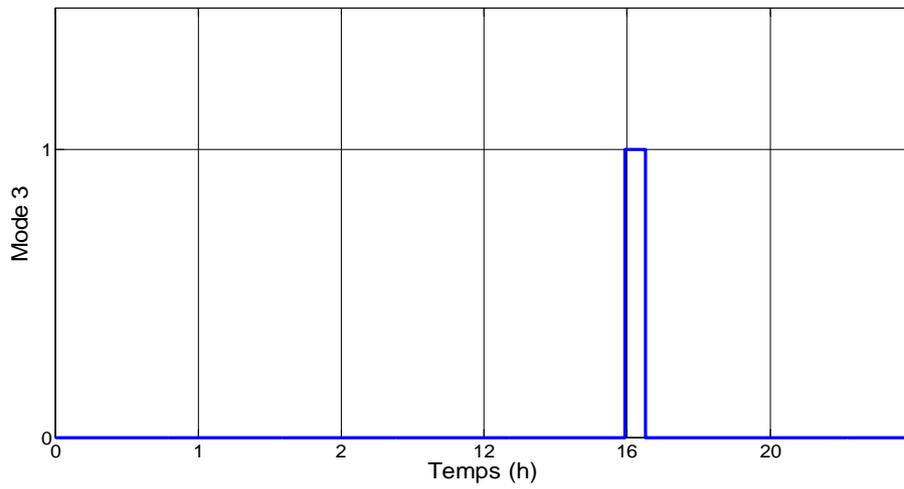


Figure (IV.29) : Allure du mode3

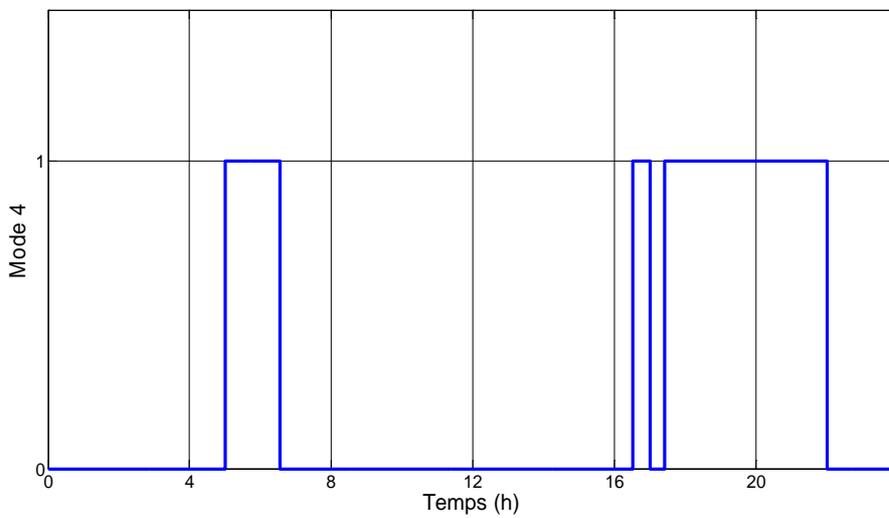


Figure (IV.30) : Allure du mode4

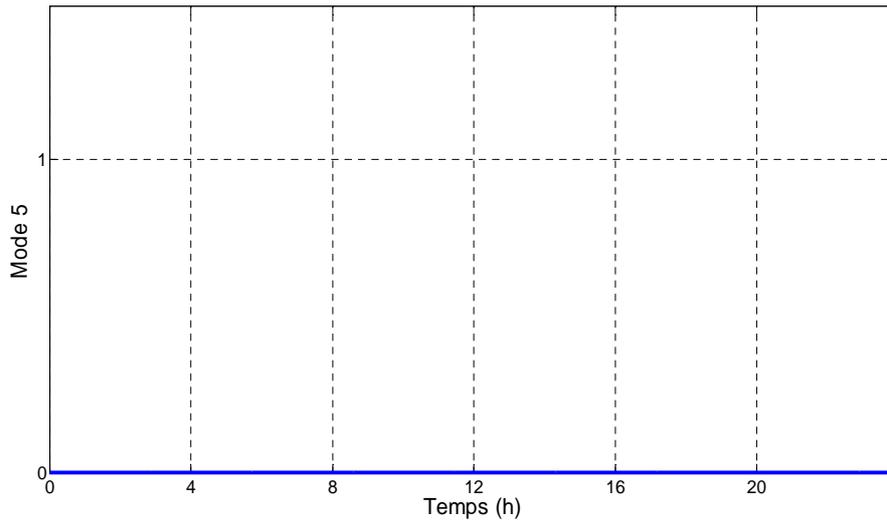


Figure (IV.31) : Allure du mode5

IV.4.2. Les résultats de simulation du système globale pour une journée d'hiver :

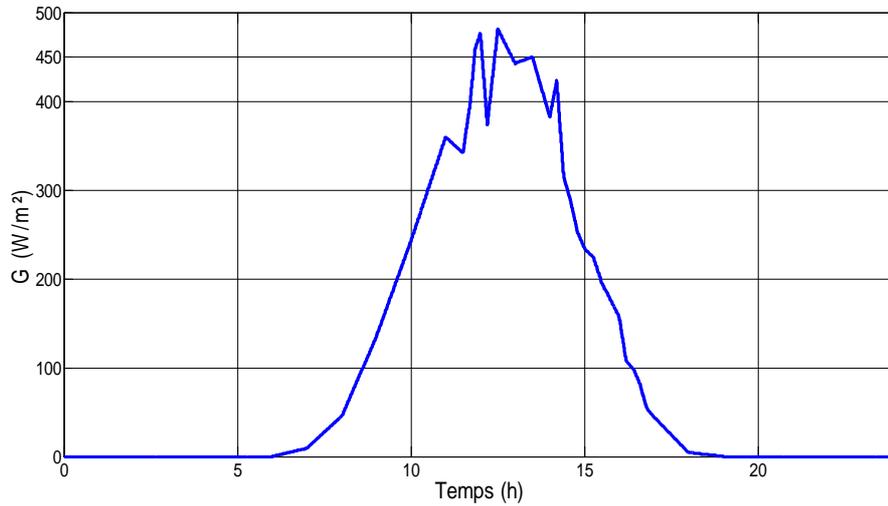


Figure (IV.32) : Variation de l'éclairement le long d'une journée d'hiver.

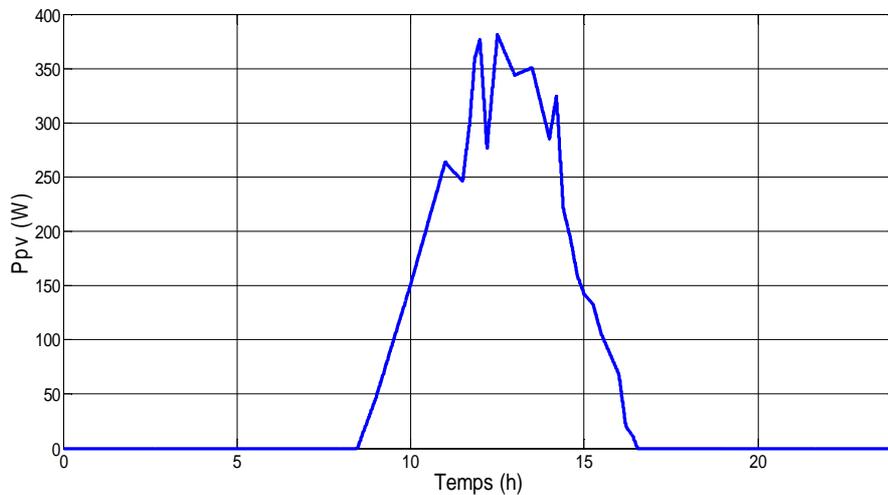


Figure (IV.33) : Variation de la puissance PV le long d'une journée d'hiver

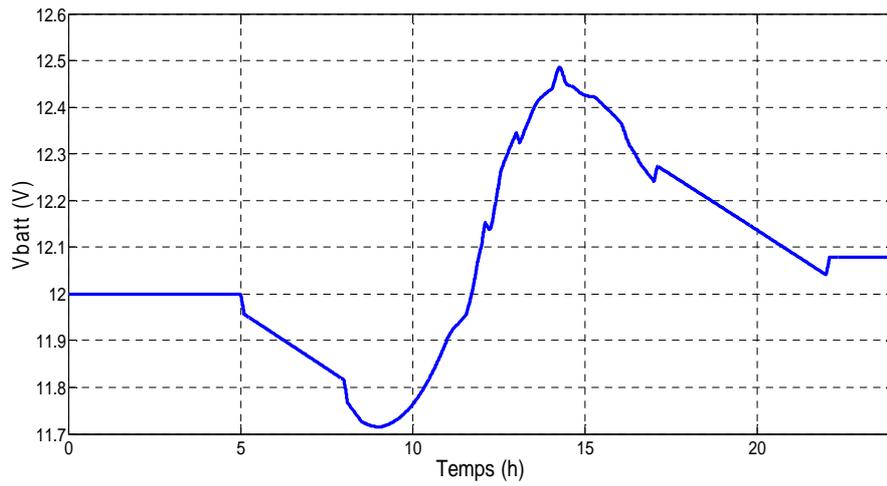


Figure (IV.34) : Tension aux bornes de la batterie.

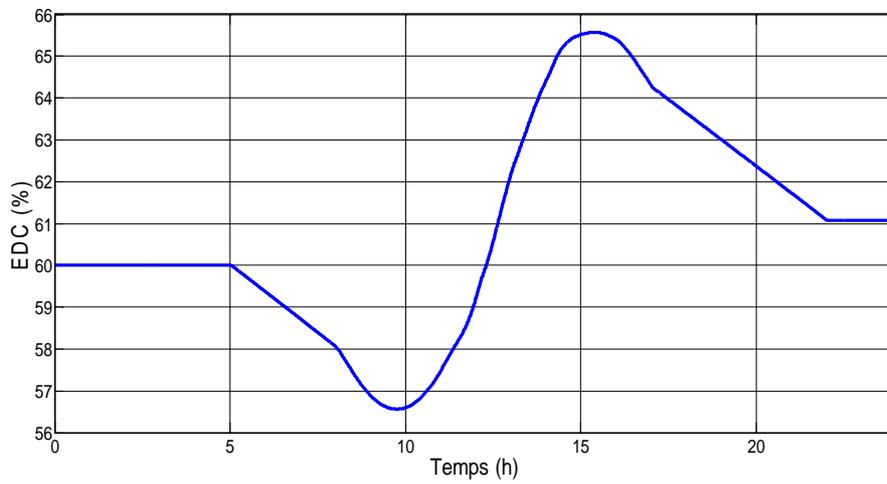


Figure (IV.35) : Allure de l'état de charge de la batterie.

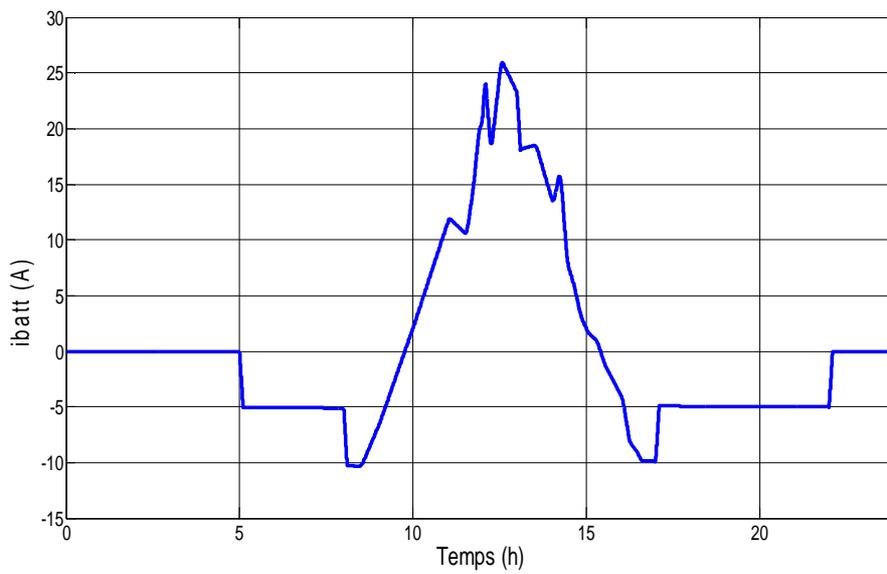


Figure (IV.36) : Allure du courant de la batterie.

Les figures (IV. 32), (IV.33), (IV.34), (IV.35), et (IV.36) représentent respectivement les allures de l'éclairage, la puissance PV, la tension aux bornes de la batterie, l'état de charge de la batterie et le courant de la batterie. Leurs interprétations sont identiques à celles d'une journée d'été, sauf que la batterie se charge moins en hiver qu'en été.

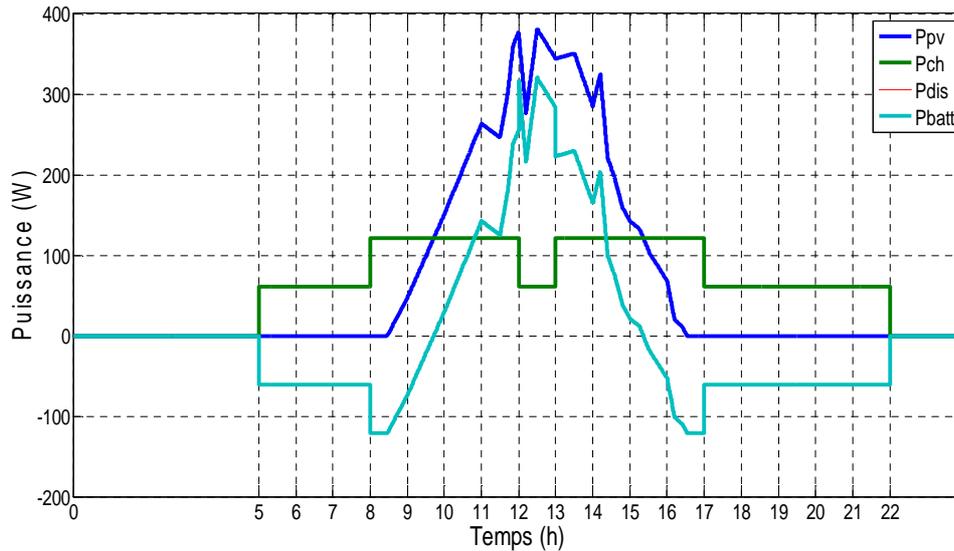


Figure (IV.37) : Allure de différentes puissances.

La figure (IV.36) représente la puissance PV, la puissance de charge, la puissance disponible et la puissance de la batterie pour une journée d'hiver.

➤ **Synthèse sur le fonctionnement par phase du système de pompage avec l'algorithme de gestion pour une journée d'hiver :**

D'après les figures (IV. 35) du EDC, (IV.36) du courant de la batterie et (IV.37) allures des puissances, on a déduit les interprétions suivante sur le fonctionnement par phase de notre système :

Phase 1 (t=5-8.5 h) : On remarque que le GPV n'a pas encore fourni une puissance, donc c'est la batterie qui alimente la charge étant donné le $EDC > EDC_{min}$ (30%).

Phase 2 (t=8.5-9.7 h) : Ce cas représente la situation où la puissance fournie par GPV est inférieure à celle demandée par la charge, dans ce cas le manque sera compensé par la batterie étant donné le $EDC > EDC_{min}$ (30%).

Phase 3 (t=9.7-15.35 h) : Ce cas est le plus favorable, car il correspond à une situation où le GPV fournit une puissance largement supérieure à celle de la charge, à cet effet la batterie se charge rapidement étant donné $EDC < EDC_{max}$ (90%).

Phase 4 (t=15.35-16.5 h) : Ce cas est le même que celui de la phase 2.

Phase 5 (t=16.5-22 h) : Dans ce cas, la puissance produite par le GPV est nulle, alors la charge est alimentée seulement par la batterie étant donné le $EDC > EDC_{min}$ (30%).

Les modes de fonctionnement :

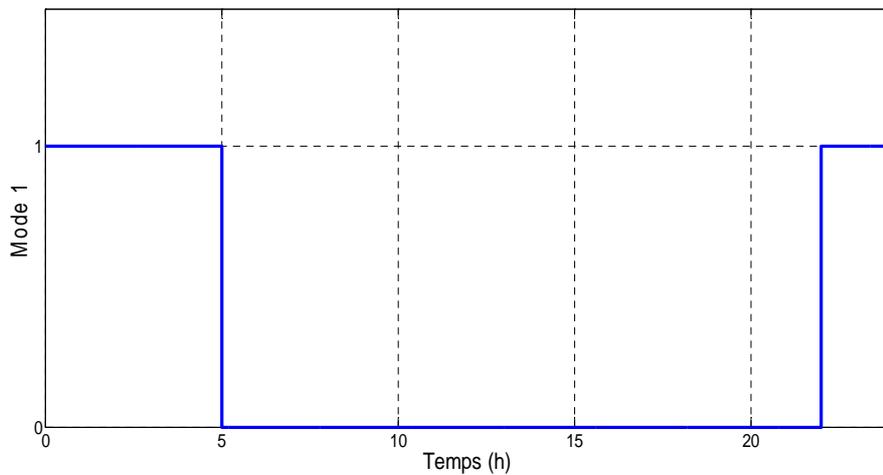


Figure (IV.38) : Allure du mode1.

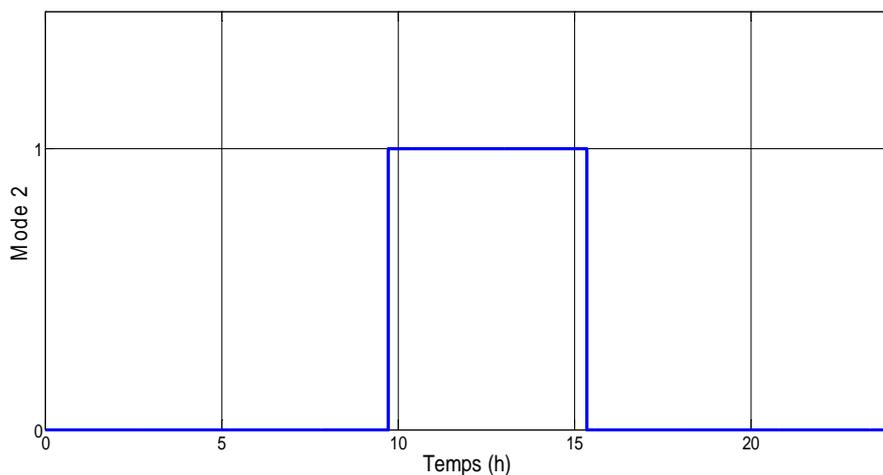


Figure (IV.39) : Allure du mode2.

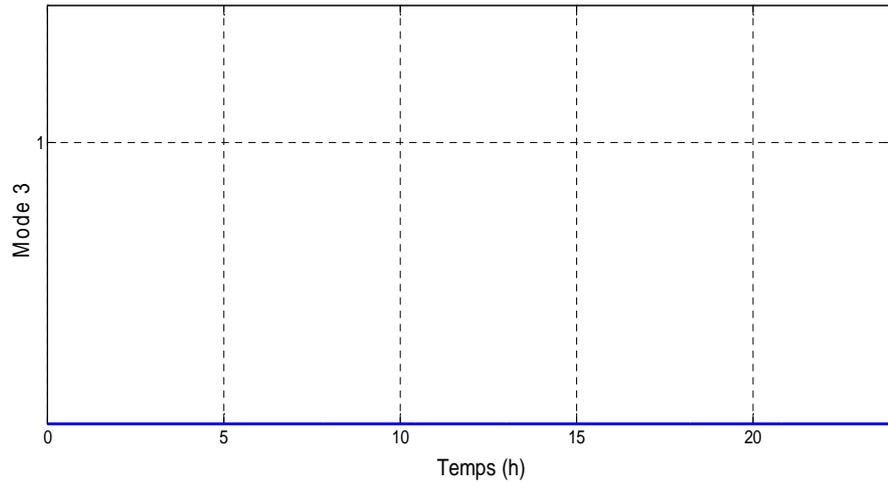


Figure (IV.40) : Allure du mode3.

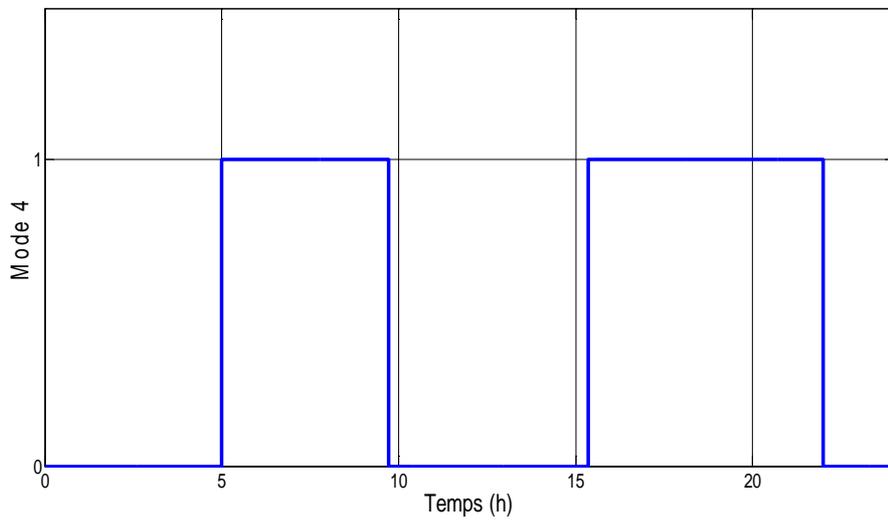


Figure (IV.41) : Allure du mode4.

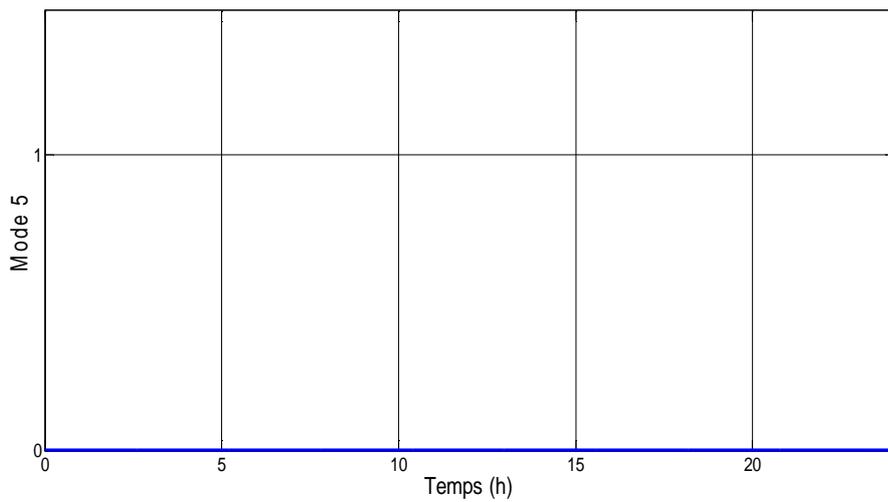


Figure (IV.42) : Allure du mode5.

D'après les allures qui sont représentées sur les figures (IV.38-42), on peut constater que le mode 3 et le mode 5 sont absents.

IV.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation pour différents profils d'ensoleillement pour une journée (été et hiver).

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

Conclusion générale

Conclusion générale :

Notre travail s'est porté sur l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries, auquel nous avons implanté deux algorithmes d'optimisation et de gestion.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'énergie photovoltaïque, ces avantages et ces inconvénients et les différents systèmes photovoltaïques en générale. Nous nous intéressés à l'application pompage avec batteries.

Ensuite, Nous avons présentés la modélisation des différents composants du système. On a présenté le modèle du générateur photovoltaïque à une diode qui présenté un bon compromis entre simplicité et précision. La modélisation de la batterie a aussi été réalisée. Le modèle R-C a été utilisé. Les modèles de la machine asynchrone et de la pompe sont aussi données.

Afin d'exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum, l'algorithme utilisé pour la recherche du point de puissance maximale est la P&O «Méthode de perturbation et d'observation».

Dans le troisième chapitre, nous avons fait le dimensionnement, pour un débit journalier de $12.5 \text{ m}^3/\text{j}$, et nous avons présenté un algorithme de gestion.

Pour le dernier chapitre, on a procédé à la simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries, nous avons appliqué la commande vectorielle ayant pour principe, le découplage entre le couple et le flux. Cette commande nous a permis de contrôler ces deux grandeurs indépendamment, rendant sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Enfin, les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'algorithme de gestion du flux d'énergie face aux variations climatiques.

Les résultats de ce travail nous permettent de dégager les perspectives suivantes :

- L'utilisation d'autres techniques d'optimisations pour l'extraction du maximum de la puissance photovoltaïque.
- La réalisation d'une telle installation, puis effectués des tests afin de valider les résultats de simulations.
- Tester l'efficacité de l'algorithme de gestion sur un système réel.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **F. BRIHMAT** « Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien » Mémoire de Magister. Université de Tizi-Ouzou. 2012
- [2] **D. BOUKHERS** « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.
- [3] **A. HAMMIDAT , A. HADJ ARAB et M.T. BOUKADOUM** « Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie », Revue des Energies Renouvelables. Vol. 8 pp (157 - 166), 2005.
- [4] **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.
- [5] <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/371.htm>
- [6] http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp,2007
- [7] **N. AIT KHELIFA** « Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque utilisant un moteur synchrone à commutation naturelle », Mémoire de Maste2, Université de Bejaïa, 2011.
- [8] **P. BESSEMOULIN, J. OLIVIERI** « Rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » la météorologie série 8-N° 31, pp (42-59), 2000.
- [9] [http://www.newport.com/Introduction-au-rayonnement solaire/411919/1036/content.aspx,1996-2014](http://www.newport.com/Introduction-au-rayonnement_solaire/411919/1036/content.aspx,1996-2014)
- [10] **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.
- [11] <http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com/avantages-inconvenients.htm>
- [12] **A. BELHOCINE et S.ZAIDI** « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012
- [13] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique
- [14] **A. HADJ ARAB, M. BENGHANEM et A. GHARBI** « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque» Revue des Energies Renouvelables. Vol.8, pp (19 – 26), 2005.

- [15] **L.DEBBOU et D.MAGHRIBI** «Commande d'un système hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie» Mémoire d'ingénieur d'état. Université de Bejaïa, 2008.
- [16] **S.LALOUNI** « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batteries » Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2005.
- [17] **M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA** «Le Pompage Photovoltaïque» Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69-73) ,2002.
- [18] **K. EL-Melouani** «dimensionnement d'un hacheur survolteur». Application note de polytech Clermont-Ferrand, FRANCE,2010
- [19] http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck-Boost
- [20] <http://www.blackmersmartenergy.com/fr/comparativedata/centrifugal-pumps-vs-positive-displacement-pumps.html>,2012
- [21] **C.BERNARD, C.SEBRAO-OLIVEIRA, B.LAVAL et C.VAUDOUER** «Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue» Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelable, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [22] **I.Vechiu** «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France,2005
- [23] **S.Lalouni** « étude, commande et simulation d'une chaine hybride (Photovoltaïque-éolienne)de production d'énergie électrique». thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia,2009
- [24] **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
- [25] **T.Markvart et L.Castaber** «photovoltaics fundamentals and applications» preface guide to usage of the handbook by professional groups
- [26] **A.LOUADAH** «Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire d'ingénieur en électromécanique; université de BEJAÏA,2009.
- [27] **C.BERNARD, C. SEBRAO-Oliveira, B.LAVAL, C.VAUDOUER** «panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique flou »,

- Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04- Energie renouvelables, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [28] **K.IDJDARENE** «contribution à l'étude de la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonome» thèse de doctorat électrotechnique, Option: commande électriques université de Bejaia, 2010.
- [29] **D. YAPTA** «Commande vectorielle à flux rotorique orienté de la machine asynchrone : simulation expérimentation » Rapport de projet 2ème année Master, université de Nancy 2010
- [30] **R. Chenni** « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [31] **B.hamidat, B.benyoucef.** « Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems» Renewable Energy Vol: 33, pages: 933-942, 2008.
- [32] **D.Rekioua, A. hamidat, K. Haddouche, L.Katti** « Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque», colloque nationale sur l'énergie Solaire, CNESOL'2006, Université de Bejaia, 29-30 Novembre 2006.
- [33] **J.Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy.** «Le pompage photovoltaïque, Editions multimonde», Québec, Canada, 1998.
- [34] **S.Bensmail** «Contribution à la modélisation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques», Mémoire de Magister, université de BEJAIA, 2012.
- [35] **L. Zarour, R. Chenni, A. Borni et A. Bouzid** « Improvement of synchronous and asynchronous motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control »; journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol.59, N°4, PP 169-177,2008.

Annexe

Tableau 1 : Paramètres d'un panneau photovoltaïque SIMENS SM 110-24 [37].

Paramètre	Valeurs
Puissance maximale du panneau $P_{mpp}(W)$	110
Courant au point de puissance maximale du panneau $I_{mpp}(A)$	3.15
Tension au point de puissance maximale du panneau $V_{mpp}(V)$	35
Courant de court-circuit $I_{cc}(A)$	3.45
Tension de circuit ouvert $V_{co}(V)$	43.5
Coefficient d'incrémentement du courant α_{sc}	0.0014
Coefficient d'incrémentement de la tension β_{sc}	-0.152

Tableau 2 : Paramètres du moteur asynchrone [38].

Résistance statorique $R_s (\Omega)$	4
Résistance rotorique $R_r (\Omega)$	1.143
Inductance statorique $L_s (\Omega)$	0.3676
Inductance rotorique $L_r (\Omega)$	0.3676
Inductance mutuelle M	0.3439
Nombre de pôle P	2
Inertie J (N.m)	0.03
Coefficient de frottement f (N.m.s/rad)	0.0009