و ز ا ر ة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس سطيف

UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF-1

UFAS (ALGERIE)

Mémoire

Présenté au département d'Electrotechnique

Faculté de Technologie

Pour obtenir le diplôme

De Magister

Option : Commande Electrique

Par

AOUFI Saliha

Thème

Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque

Soutenu le 28/09/2014 devant la commission d'examen composée de :

KHABER Farid	*Pr. Université de Sétif-1*	*Président*
RAHMANI Lazhar	*Pr. Université de Sétif-1*	*Encadreur*
HEMSAS Kamel Eddine	*Pr. Université de Sétif-1*	*Examinateur*
BOUAFIA . Abdelouahab	*MCA. Université de Sétif-1*	*Examinateur*

REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie le bon dieu tout puissant qui me donne de la foi, du courage et de patience, qu'il m'a donnée durant toutes ces années d'étude.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Pr « RAHMANI Lazhar » pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel durant toute cette période. Qui n'a pas cessée de me donner ses conseils.

Je remercie vont aussi à tous les enseignants d'Electrotechnique qui a contribué à notre formation par ailleurs, ainsi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.

En fin je tiens à exprimer mes reconnaissances à tous mes amis pour le soutien moral et matériel.

Sommaire

RESUME
REMERCIMENTS
LISTE DES SYMBOLES
LISTES DES FIGURES
SOMMAIRE
INTRODUCTION GENERALE…….. 1

CHAPITRE 01 : *ETAT DE L'ART DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES*

1.1 Introduction…..6
1.2 Rayonnement solaire ……..6
1.3 Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque……..8
1.4 Technologies des cellules photovoltaïques ……...9
1.4.1 Technologies de 1ère génération à base de Silicium Cristallin ……..9
1.4.2 Technologies de 2ème génération à base de couche-mince……...9
1.4.3 Technologies de 3ème génération « les cellules organiques……9
1.5- Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïque ……...11
1.5.1-Les avantage……11
1.5.2 Les inconvénients……11
1.6 Applications des systèmes photovoltaïques……...12
1.6.1 Systèmes autonomes……..12
1.6.2 Systèmes hybrides ……...12
1.6.3 Systèmes couplés au réseau……...13
1.6.4 Systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage photovoltaïque)……...13
1.6.4.1 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque……14
1.6.4.1.1 Systèmes de petite puissance (50-400Wp)……..15
1.6.4.1.2 Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 Wp)……...16
1.6.4.2 Technologie des moteurs……...17
1.6.4.2.1 Moteur à courant continu……17
1.6.4.2.2 Moteur à courant continu sans balais……...18
1.6.4.2.3 Moteur a courant alternatif……..18
1.7 Conclusion……20

CHAPITRE 02 : *SIMULATION DES ELEMENTS D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV*

2.1 Introduction……...17

2.2 Générateur photovoltaïque……..17
2.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque……..17
2.2.1.1 Modèle à paramètres constants……..17
2.2.1.2 Résolution de l'équation caractéristique I(V)……...19
2.2.2 Caractéristiques principales du générateur photovoltaïque……..19
2.2.2.1 Caractéristiques Courant-Tension……..20
2.2.2.2 Caractéristique Puissance-Tension……..20
2.2.2.3 Effet de l'éclairement……21
2.2.2.4 Influence de la température……...21
2.2.2.5 Influence de la résistance série……...22
2.2.2.6 Influence du facteur de qualité……...22
2.2.3 Interprétations des Résultats……23

2.2.4 Rendement……23
2.2.5 Facteur de forme……23
2.2.6 Fonctionnement optimale de générateur……24
2.3 Convertisseurs DC-DC ……24
2.3.1 Hacheur élévateur……24
2.3.2 Avantage de convertisseur élévateur……25
2.4 Modélisation et commande de Moteur à courant continu sans balais……25
2.4.1 Moteur à courant continu sans balais……25
2.4.2 Principe de fonctionnement de Moteurs PMBL……26
2.4.3 Caractéristique du PMBLDC……27
2.4.4 Capteurs à effet Hall……27
2.4.5 Modèle mathématique du Moteur BLDC……28
2.4.5.1 La Force Électromotrice……28
2.4.5.2 L'Équation Mécanique du Mouvement……31
2.4.5.3 Couple Électromagnétique ……32
2.4.5.4 Modèle de l'ensemble Machine-Commutateur Electronique……32
2.4.5.5 techniques de commande……33
2.4.5.6 le courant de référence……34
2.4.6 Description de système de commande de moteur PMBLDC……34
2.4.6.1 Logique floue, principes et définitions……35
2.4.6.2 Ensembles floues……36
2.4.6.4 règles floues……37
2.4.6.5 mécanismes d'inférence floue……37
2.4.7 Conception de contrôleur flou (FLC)……38
2.4.7.1 La stratégie de fuzzification……39
2.4.7.2 Etablissement des règles d'inférence……39
2.4.7.3 La stratégie de défuzzification……40
2.4.8 Résultats de simulation……40
2.4.8.1 Résultats sans régulation……40
2.4.8.2 Résultats de simulation de PMBLDC avec contrôleur flou……41
2.4.8.3 Interprétation……42
2.5 Les pompe……43
2.5.1 La pompe centrifuge……43
2.5.2 Caractéristiques de la pompe centrifuge……43
2.5.*2.1* La courbe débit-hauteur……44
2.5.2.2 Courbe de rendement……44
2.6 Conclusion……45

CHAPITRE 03 : *OPTIMISATION DE FONCTIONNEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE*

3.1 Introduction……52
3.2 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale……53
3.3 Principe de la recherche du point de puissance maximal……54
3.3.1 Fonctionnement de boost……54
3.4 Classification d'algorithmes du suiveur de point maximum……57
3.4.1 Méthodes à contre réaction de tension……57
3.4.2 Méthodes à contre réaction de courant……58
3.4.2.1 Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit *Isc*

3.4.2.2 Méthode à courant de référence externe
3.4.3 Méthodes à contre réaction de puissance……..59
3.4.3.1 Algorithme 'perturbation et observation' simple ……..59
3.4.3.2 Méthode par incrémentation de conductance ……..……60
3.4.4 Principe de poursuite du point de puissance maximale par un contrôleur flou
3.4.4.1 Fuzzification…….....62
3.4.4.2 Méthode d'inférence…….....63
3.4.4.3 Défuzzification…….....63
3.5 Résultats de simulation……..64
3.5.1 Hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance……...64
3.5.2 Etude du système solaire avec contrôleur MPPT…….....64
3.5.2.1 Fonctionnement sous des conditions constantes
3.5.2.2 Comportement du système face à un changement de l'éclairement……...66
3.5.2.3 Le fonctionnement sous les niveaux de température changeants…….....67
3.6 Conclusion…….....69

CHAPITRE 04 : *OPTIMISATION DE SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE*

4.1 Introduction……...71
4.2 Description du système de pompage étudié……..71
4.2.1 Choix de motopompe et de générateur PV…….....72
4.3 Couplage direct (GPV - Charge)……...73
4.3.1 Résultats de simulation……..74
4.4 L'optimisation de système de pompage par méthode P & O
4.4.1 Synthèse de fonctionnement de système……...75
4.4.2 Résultats de simulation……..77
4.5 Application de la logique floue …….....80
4.5.1 Résultats de simulation…….....81
4.6 Conclusion…….....82

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE……84

BIBLIOGRAPHIE……..87
ANNEXE……94
ANNEXE A : Pompage à l'aide de moteur PMBLAC…….... .94
ANNEXE B : paramètres……101

LISTE DES SYMBOLES

E_p : L'énergie photonique

h : La constante de Planck

C : La vitesse de la lumière

λ : Longueur d'onde

α : l'élévation du soleil sur l'horizon

I_L : Le courant photonique.

I_0 : Le courant de saturation inverse.

n : Le facteur de qualité.

R_S : La résistance série.

k : La constante de Boltzmann

q : La charge de l'électron

A : Surface effective de générateur

G : Eclairement

T : Température ambiante

U_{Smoy} : La tension moyenne réglable

U_S : La tension de sortie de convertisseur

U_e : La tension d'entrée de convertisseur

D : Le rapport cyclique

V_{0V} : La tension en circuit ouvert du panneau

I_{sc} : Courant de Court-circuit

E : L'erreur

CE : Le changement d'erreur

$\vec{V}$: Vecteur la tension de phase

$\vec{I}$: Vecteur le courant de phase

$\vec{\varphi}$: Le flux magnétique de phase

$\overrightarrow{\varphi_M}$: Le vecteur du flux magnétique

Ep : La force électromotrice

[R] et [L] : sont les matrices résistances et inductances de la machine

θ: La position électrique

θr : La position mécanique du rotor

ke : Le coefficient de la force électromotrice

Wr : La vitesse angulaire

Ce : Le couple électromagnétique développé

Cr : Le couple de charge

f : Le coefficient de frottement

*I** : L'amplitude du courant de phase

W : La vitesse réelle du rotor

Wref : La vitesse de référence

Q : Le débit

H : La hauteur

η_p : Le rendement de la pompe

ρ : La masse volumique de l'eau

k_p : Constante de charge

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE 01

Figure 1.1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil,
Figure 1.2: Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air masse AM
Figure 1.3 Principe de l'effet photovoltaïque
Figure 1.4 : Système hybride
Figure 1.5 : Système PV couplés aux réseaux
Figure 1.6 : Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque
Figure 1.7 : Systèmes de petite puissance
Figure 1.8 : Les systèmes de moyenne puissance

CHAPITRE 02

Figure 2.1 : Modèle équivalent d'une photopile ou cellule photovoltaïque
Figure 2.2 : Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque
Figure 2.3 : Caractéristiques P (V) d'un générateur photovoltaïque
Figure 2.4 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V
Figure 2.5 : Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V
Figure 2.6 : Influence de la résistance série sur les caractéristiques électriques I(V) et P(V)
Figure 2.7 : Influence du facteur de qualité
Figure 2.8: Hacheur élévateur
Figure 2.9 : Moteur à courant continu sans balais
Figure 2.10 : Constitution du Moteur BLDC
Figure 2.11 : Capteur à effet hall
Figure 2.12 : Modèle électrique simplifié du BLDC
Figure 2.13 : Formes typiques des courants et des FEMs
Figure 2.14 : Ensemble moteur-commutateur.

Figure 2.15 : Signaux à effet hall
Figure 2.16 : schéma structurelle de système.
Figure 2.17: Structure de contrôleur flou
Figure 2.18 : partition des entrées et de la sortie du contrôleur flou
Figure 2.19 : Résultats de simulation de PMBLDC
Figure 2.20 : Résultats de simulation de PMBLDC avec contrôleur flou
Figure 2.21 : Courbes *Q-H* pour différentes hauteurs et vitesses
Figure 2.22 : Rendement de la pompe centrifuge.

CHAPITRE 03

Figure 3.1: Système de conversion photovoltaïque
Figure 3.2 : Connexion directe d'un générateur photovoltaïque (GPV) – charge
Figure 3.3 : Etage d'adaptation
Figure 3.4 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS
Figure 3.5: (a) La tension, Le courant, Le rapport cyclique du GPV
Figure 3.6 ; Effet de l'éclairement sur le fonctionnement du Boost
Figure 3.7. : Effet de la température sur le fonctionnement du Boost
Figure 3.8 : Méthode avec Contre-réaction de tension
Figure 3.9 : Méthode 'perturbation et observation'
Figure 3.10 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation
Figure 3.11 : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance
Figure 3.12 : Schéma synoptique général d'un contrôleur flou
Figure 3.13 : simulation du hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance
Figure 3.14 : Puissance de sortie du panneau photovoltaïque
Figure (3.15, 16, 17): simulation de les technique (MPPT), sous des conditions constantes
Figure (3. 18,19): Comparaison des divers signaux MPPT, sous les niveaux décroissants rapidement de l'éclairement.

Figures (3.20, 21) : Rapport cyclique et puissances pour les contrôleurs MPPT Flou, P and O et Inc. pour une diminution rapide de la température.

CHPITRE 04

Figure 4.1 : Description du système de pompage

Figure 4.2 : Le couplage direct

Figure 4.3 : Résultat de simulation du système de pompage d'eau à couplage direct

Figure 4. 4 : Résultat de simulation du système de pompage optimisé par p&o

Figure 4. 5 : Résultat de simulation du système de pompage optimisé par logique floue

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée dans diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible [1].

L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire photovoltaïque(PV) est le pompage de l'eau, en particulier dans les zones rurales qui ont une quantité considérable de rayonnement solaire et n'ont pas accès aux réseaux électrique. Les systèmes PV de pompage utilisent généralement des pompes de faible puissance allant de 200-2000 W. Ils sont largement utilisés pour l'approvisionnement en eau potable pour les ménages, l'apport en eau pour les bétails et l'irrigation à petite échelle.

Un système de pompage d'eau photovoltaïque est généralement alimenté par un système comprenant un générateur photovoltaïque, un groupe moteur-pompe et un réservoir d'eau pour assurer la continuité de l'approvisionnement lorsque l'énergie solaire ne suffit pas.

Deux types de systèmes peuvent être utilisés, le premier est constitué d'un générateur PV couplé directement à un groupe motopompe, le deuxième est composé d'un générateur PV couplé à une motopompe CC ou AC à travers un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour la machine continue et toujours un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT couplé à un convertisseur continu alternatif pour la machine alternative [2], [3].

La configuration la plus usuelle dans le pompage photovoltaïque et à base d'un moteur à courant continu vue la simplicité de son couplage direct avec le générateur photovoltaïque. En effet, les moteurs à courant continu exigent une maintenance continue notamment pour les moteurs à balais (les plus communs) où les balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique notamment dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. L'isolation du moteur ne doit pas

être compromise afin de ne pas la fragiliser aux infiltrations d'eau, ce qui n'est pas évident sur le site. Certains constructeurs offrent des moteurs à balais de longue durée, réduisant ainsi leur entretien à toutes les 5000 heures de fonctionnement mais augmentant par contre les prix de ces moteurs à courant continu déjà élevés [4]. En outre, la présence des balais empêche l'exploitation des moteurs à courant continu dans les applications à haute puissance telles que les forages à haut débit et à haute profondeur [5].

La recommandation d'un moteur à courant continu sans balais et à commutation électronique présente un choix favorable pour un système de pompage solaire vue les avantages des aimants a basse de terres rares d'une part, ainsi que les privilèges qu'offrent la commutation électronique qui en résulte, d'autre part : Haute efficacité, durée de vie plus longue, une faible maintenance de système et rendement optimal.

Dans le présent travail, nous nous sommes fixés l'objectif principal suivant :

- Modélisation ; analyse et optimisation énergétique d'un système de pompage photovoltaïque comportant un générateur PV, un convertisseur continu-continu et un groupe motopompe.

La méthodologie suivie tout au long de ce travail est la suivante :

- Modélisation des composantes d'un système de pompage photovoltaïque
- Proposition d'une technique d'optimisation de la puissance du GPV.
- Simulation de l'ensemble et comparaison entre un couplage direct et un couplage indirect avec optimisation de la puissance du GPV.

Le document a été divisé en quatre chapitres dont le contenu est résumé ci-dessous :

- Le premier chapitre donne une description générale des systèmes photovoltaïques, ainsi que des notions sur les différents systèmes PV et sur les différentes parties constituant notre système de pompage
- Dans le seconde chapitre, on passe en revue le modèle mathématique d'un module photovoltaïque permettant de déterminer la caractéristique tension-courant ainsi que l'influence des paramètres internes et externes sur cette caractéristique (température, ensoleillement, résistance série, facteur de qualité,…). Le moteur PMBLDC sera également modélisé en association avec la commande de vitesse par logique floue. Un modèle d'une pompe centrifuge immergée est proposé et ces caractéristiques seront présentées.

- Le troisième chapitre est dédié au l'étude du convertisseur DC-DC de type survolteur qui jouera le rôle d'un adaptateur d'impédance et dont le rapport cyclique est généré par un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). En effet, trois algorithme d'extraction du point de puissance maximale ont été examinés à savoir : L'algorithme Perturber et observer (P&O), l'algorithme d'Accroissement de la Conductibilité (INC COND), et enfin un algorithme basé sur la logique floue (FLC).
- Dans le quatrième chapitre on a examiné en première partie le couplage direct du champ photovoltaïque avec le moteur PMBLDC. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons considéré le couplage du moteur/pompe avec un convertisseur DC/DC pour l'extraction du point de puissance maximale et un onduleur triphasé. Une étude comparative par simulation sera présentée et commentée.
- Le dernier chapitre sera consacré à une conclusion générale de présent travail, avec des perspectives quant à la continuité de ces investigations.

Chapitre 01
Etat de l'art des systèmes photovoltaïques

CHAPITRE 01

ETAT DE L'ART DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

1.1 Introduction

Le scientifique français, Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Becquerel a observé le comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide conducteur exposé à la lumière [6]. Par la suite en 1905, Albert Einstein à découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. Ce n'est qu'en 1954 que les premières piles solaires produisant de l'électricité firent leur apparition, grâce aux travaux de Bell Laboratoires aux États-Unis [7]. De l'effet photoélectrique à la conception de la cellule photovoltaïque, il a donc fallu attendre un siècle. L'énergie photovoltaïque eut un regain d'intérêt dans les années 1960 lors des premiers lancements spatiaux de satellites puis lors des missions lunaires [8]. Les crises économiques des années 1970, puis les accidents de centrales nucléaires renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables, et en particulier l'énergie photovoltaïque qui s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses.

1.2 Rayonnement solaire

Le soleil, notre plus grande source d'énergie, est une étoile située à une distance moyenne de 149 598 000 Km de la terre. Elle émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 µm [9]. Ce rayonnement est composé de grains de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante [10].

$$E_P = h * c/\boldsymbol{\lambda} \tag{1.1}$$

où

h : est la constante de Planck,

c : est la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde.

Le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre en traversant l'atmosphère. Ceci est dû essentiellement à l'absorption partielle du rayonnement par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Le flux énergétique reçu au sol ne dépasse pas 1200 W/m^2 [11]. Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur de l'atmosphère traversée, on introduit un coefficient appelé nombre d'air masse AM [11]. La figure ci-dessous illustre ce principe.

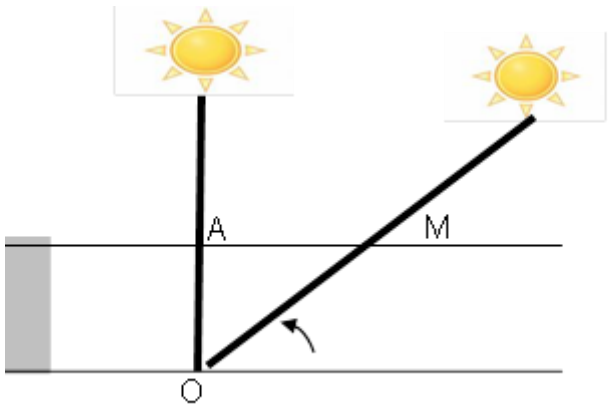


Figure 1.1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion d'air masse AM.

Le nombre d'air masse est obtenu par la relation suivante:

$$AM = 1/\sin(\alpha) \tag{1.2}$$

Avec : α (°) l'élévation du soleil sur l'horizon.

Le concept de nombre d'air masse caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (par exemple 1 353 W/m2 pour AM0); d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques [11]. La figure ci-dessous montre le spectre solaire relevé dans plusieurs conditions selon différentes valeurs d'air masse.

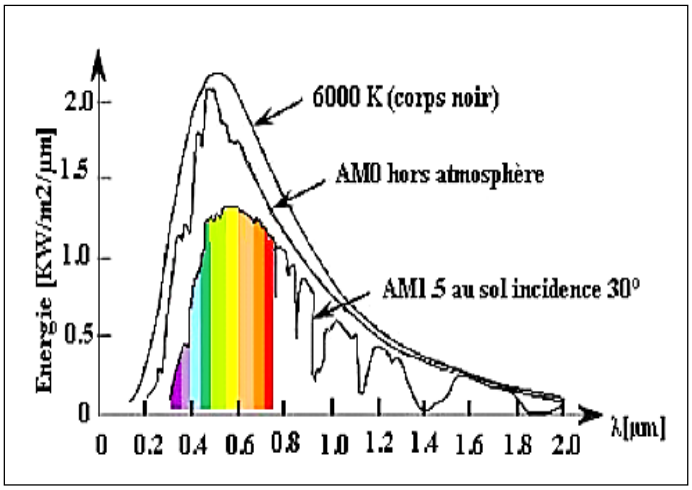


Figure 1.2 : Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air masse AM.

Ainsi les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre AM1.5, une puissance incidente de 1 000 W/m² et une température de 25°C. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) [11].

1.3 Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Cet effet peut être expliqué par le fait qu'un photon reçu du rayonnement solaire, heurte une cellule PV, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome (de la bande de valence à la bande de conduction traversant la bande interdite), créant ainsi un trou qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou [12], comme la montre la figure ci-dessous.

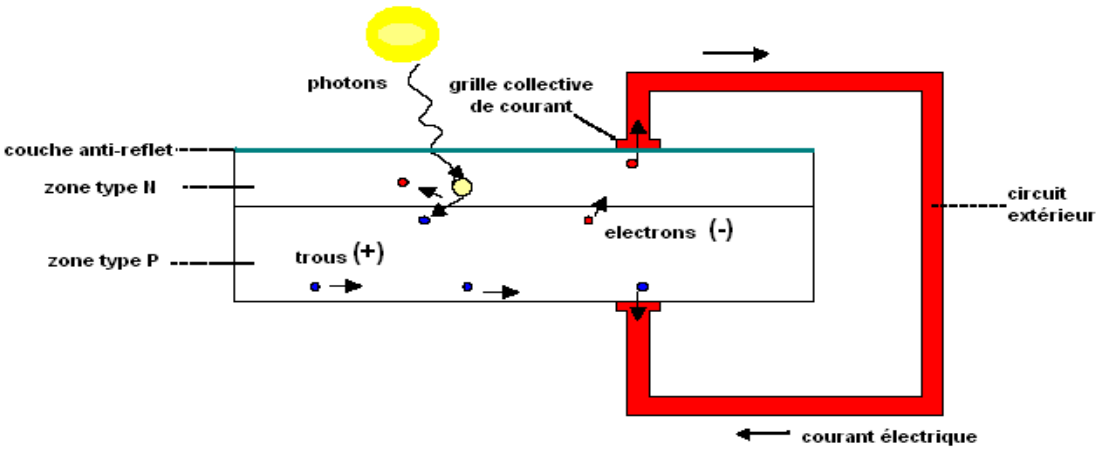


Figure 1.3 : Principe de l'effet photovoltaïque.

La structure la plus simple d'une cellule PV, comporte une jonction entre deux matériaux semi-conducteurs dopés de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges positives. Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne permanent, il se crée donc une différence de potentiel entre les deux couches de la cellule. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les bornes de la jonction à un circuit extérieur [12].

1.4 Technologies des cellules photovoltaïques

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques [12], [13].

a. Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin [12].

b. Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince

Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

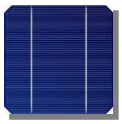
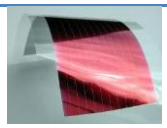
- le silicium amorphe (a-si).
- le tellurure de Cadmium (CdTe).
- le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

c. Technologies de la 3ème génération «les cellules organiques»

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules: les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement [12].

Dans le tableau (1.1), ci-dessous on résume les différentes performances des technologies citées précédemment [14]:

Tableau 1.1 Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium monocristalline	13-17%	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium poly-cristallin	11-15%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules organiques	≤ 5%	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas	

1.5 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

1.5.1 Avantages [3], [13]

1-Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.

2- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc.

Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.

3- Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance:

- ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.

- ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

1.5.2 Inconvénients [3], [13]

- prix: les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiante du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque et de l'ordre de 10 à 15 %,
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continu et de faible voltage (< à 30V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup des appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

1.6 Applications des systèmes photovoltaïques

Les principales applications des systèmes photovoltaïques sont énumérées ci-après.

1.6.1 Systèmes autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés. Une tel installation doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a pas de soleil (la nuit ou en cas de mauvais temps). Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée dans des batteries [13]. Cette installation se compose d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries et éventuellement d'un onduleur.

1.6.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides consistent en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue dans le temps. Les systèmes hybrides fonctionnent tels que, les batteries sont chargées par les panneaux solaires (le jour) et par le générateur éolien (lorsqu'il y'a du vent) [15].

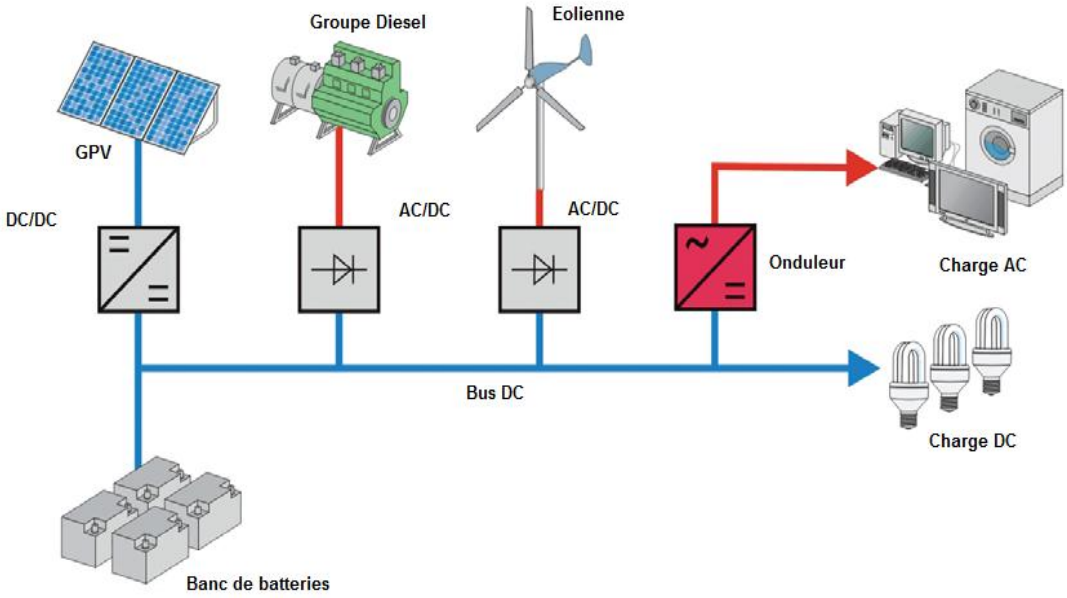


Figure 1.4 **:** Système hybride

1.6.3 Systèmes couplés au réseau

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coûts [16]. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordée au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique. La figure (1.5) illustre le principe d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

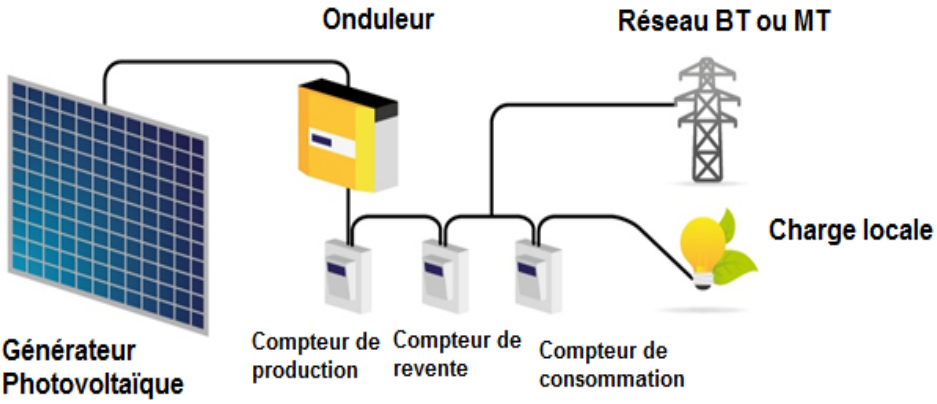


Figure 1.5 : Système PV couplés aux réseaux

1.6.4 Systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage photovoltaïque)

Dans les régions éloignées, désertiques ou montagneuses, l'alimentation en eau potable et d'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations. Le pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et cette énergie a l'avantage d'être présente et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels. Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur du courant électrique qui peut être un convertisseur DC/AC pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour un moteur à courant continu et d'un groupe motopompe [17]. Ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Ce type de stockage de l'eau est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans des batteries. Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules photovoltaïques reliés en série et en parallèle selon la puissance requise. La figure 1.6 présente les différents éléments constitutifs d'une installation solaire de pompage d'eau.

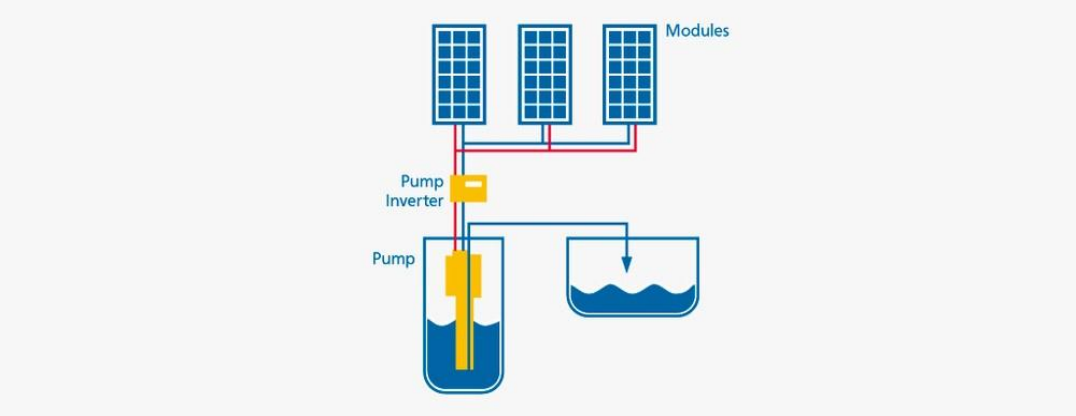


Figure 1.6 : Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque

1.6.4.1 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque

Les éléments d'un système de pompage photovoltaïque doivent être conçus pour fonctionner comme un seul ensemble pour la maximisation des performances globales du système. Différentes solutions peuvent être adoptées pour pomper un certain volume d'eau à une certaine hauteur en fonction des plages de puissance nécessaire dans une application spécifique. Bien que les pompes sont installées en surface on bien flottante, la configuration la plus commune est une pompe immergée installé dans un trou de forage.

La configuration d'un système de pompage PV est déterminée par la définition du type de générateur photovoltaïque, le type de pompe et de type moteur; ainsi que le type de conditionnement de puissance. On peut distinguer les types de systèmes de pompage photovoltaïques suivants:

1.6.4.1.1 Systèmes de petite puissance (50-400W).

Dans ce type de systèmes, il est utilisé principalement un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge ou à déplacement positif [18]. Entre le générateur PV et le moteur/pompe on intercale un convertisseur DC/DC pour améliorer son adaptation [19]. Les applications de cette configuration est généralement destinée au pompage des volumes d'eau pouvant atteindre jusqu'à 150m^3/Jour.

Les principaux constituants de ces systèmes sont:

- Le Générateur photovoltaïque
- le convertisseur DC/DC (facultatif)
- Moteur à courant continu
- Pompe

- Entrepôt de stockage (facultatif)

La figure (1.7) montre un schéma synoptique de ce type de configuration,

Le système de pompage PV à moteur courant continu constitué d'un DC moteur et une pompe. Les types de moteurs à courant continu sont classés selon le champ d'excitation: excitation séparée (aimant permanent), des séries et des moteurs de dérivation. Le choix d'un moteur à courant continu pour un système de propulsion PV est économique parce que le pouvoir des panneaux photovoltaïques en courant continu. En outre, les modules photovoltaïques produisent du courant continu, donc l'utilisation DC moteurs élimine le besoin de convertisseurs de puissance. [20], [21]

La figure 1.7 montre le schéma simplifié d'un système de pompage utilisant le moteur à courant continu. Le couplage est direct (sans stockage électrique) avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique. L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu: un entretien régulier.

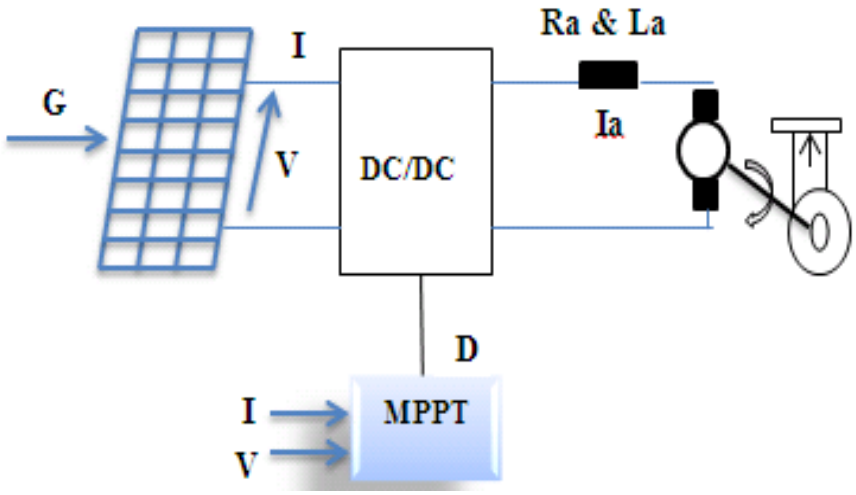


Figure 1.7 **:** Systèmes de petite puissance

1.6.4.1.2 Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W)

Composé essentiellement d'une pompe immergée centrifuge entraînée par un moteur à induction à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable, comme le montre la figure ci-dessous. Un convertisseur DC/DC est généralement intercalé entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC pour l'adaptation d'impédance et la recherche du point de puissance maximale (MPPT) [22]. Ces types de systèmes sont caractérisés par leur haute fiabilité ainsi que de leur large utilisation depuis les premières

installations de pompage photovoltaïque. Les volumes d'eau pouvant être pompés varie entre 150 jusqu'à 1500 m^3/Jour.

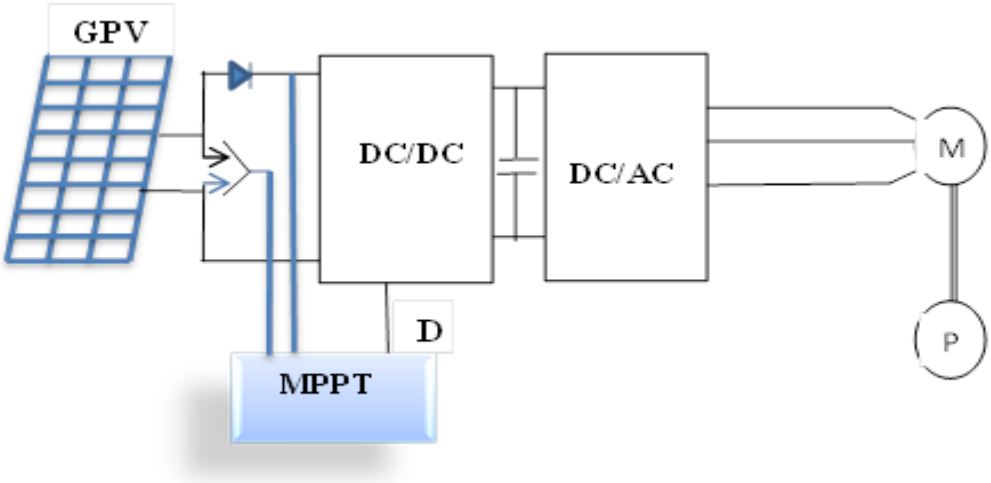


Figure 1.8 **:** Les systèmes de moyenne puissance

Les éléments clés de ces types de systèmes sont :

- Générateur photovoltaïque
- Le convertisseur DC/DC (MPPT)
- Le convertisseur DC/ AC
- Moteur AC
- Pompe immergée
- Entrepôt de stockage (facultatif)

1.6.4.2 Technologie des moteurs

On ce qui concerne la technologie des moteur, il y a trois types de moteur actuellement utilisés pour des applications de pompage photovoltaïques.

- Moteur à courant continue
- Moteur à courant continu à aiment permanant sans balais.
- Moteur à courant alternatif.

1.6.4.2.1 Moteur à courant continu

En termes de simplicité le moteur à courant continu est une option attractive parce que le générateur photovoltaïque produit du courant continu, et moins d'équipement spécialisé sont nécessaire pour traitement de puissance.

Pour un moteur à courant continu conventionnel les pertes d'énergie qui se produisant dans les enroulements est élevé, par conséquence le rendement global est faible. Si des aimants permanents sont utilisés pour produire le champ magnétique, aucune puissance ne sera consommée dans les bobines d'excitation et par conséquent des rendements plus élevés seront obtenu. Cette augmentation de rendement est très appropriée aux systèmes de pompage photovoltaïques. Le problème avec le moteur à courant continu c'est qu'il a besoin des balais pour la commutation. Les balais se détériorent avec le temps et doivent être remplacées après approximativement 1000 heures de l'opération [2], ce qui est très incommode parce que ceci signifie un supplément l'entretien et des coûts.

Plusieurs travaux ont été réalisés dont on peut citer quelques-uns: Appelbaum et Sarm [5] ont examiné le démarrage d'un moteur à courant continu couplé avec une pompe et alimenté par des modules photovoltaïques avec et sans suiveur de point de puissance maximum. Alghuwainem [20] a étudié le fonctionnement, en régime permanent, du moteur à excitation séparé avec un convertisseur élévateur fonctionnant comme un suiveur de point de puissance maximal (MPPT). Anis et al [23] ont trouvé que la charge se compose du moteur à courant continu couplé avec une pompe à volume constant considéré comme une charge non assorti pour les modules photovoltaïques. Weigner et Al [24] ont étudié l'optimisation du rendement global d'un système de pompage photovoltaïque basé sur un moteur à courant continu. Dans [25], Langridge et al ont étudié le fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque direct basé sur un moteur à courant continu sans balais conduisant une pompe à rotor hélicoïdal et la puissance maximale des modules est rendue disponible par une commande appropriée. La tension de référence des modules est basée sur une fraction de la tension à circuit-ouvert. Les performances dynamiques d'un moteur à aimant permanant sans balais alimenté par des modules photovoltaïques, ont été étudiées par Swamy et al [26]. La conception et la réalisation d'un moteur sans balais pour les applications solaires, ont été étudiées par Azoui [27].

1.6.4.2.2 Moteur à courant continu sans balais

Ces dernières années, il y a eu une croissance rapide de l'utilisation du moteur à courant continu sans balais en tant que machine rotative pour les systèmes de pompage photovoltaïques.

Un moteur à courant continu sans balais est une machine électrique tournante où le stator est un stator classique triphasé comme celui d'un moteur asynchrone et le rotor a les aimants permanents montés extérieurs. À cet égard, le moteur à courant continu sans balais

est équivalant à un moteur à courant continu avec le commutateur sont inversé où l'aiment tourne tandis que les conducteurs restent stationnaires.

Dans les moteurs à courant continu avec commutateur, la polarité du courant est changé par les commutateurs est les balais. Par contre, dans le moteur à courant continu sans balais l'inversion de polarité est assurée par les transistors de puissance commutant en synchronisation avec la position de rotor. Donc, les moteurs à courant continu sans balais incorporent souvent les sondes de position internes ou externes pour sensé la position réelle du rotor [28].

Le moteur à courant continu sans balais nécessite une excitation avec un onduleur triphasé de fréquence et amplitude variable. L'onduleur est généralement pour assurer la commutation électronique et la régulation du courant [26], [27].

1.6.4.2.3 Moteur a courant alternatif

Les moteurs a courant alternatif comme le moteur asynchrone ; sont des moteurs sans balais avec un rotor de construction robuste qui permet le fonctionnement fiable et sans entretien. La simplicité de la construction du rotor a également comme conséquence la base du prix du moteur et un rapport puissance /poids plus élevé. C'est l'avantage principal des moteurs asynchrone sur les moteurs à courant continu et l'un des raisons pour lesquelles ce type de moteur est le plus utilisé dans les systèmes de pompage photovoltaïques.

Néanmoins, le moteur à induction sous sa forme standard, contrairement au moteur à courant continu, sont inconvenant majeur est d'être inflexible dans la variation de vitesse. Ce type de moteur à courant alternatif tourne à une vitesse l'égerment inférieur à la vitesse de synchronisme et sa vitesse est déterminée par la fréquence de source d'alimentation et le nombre de pôles du stator. Donc une gamme de variation de la vitesse du moteur asynchrone et seulement possible lorsque la fréquence de la source d'alimentation est possible. Cela signifie que l'utilisation du moteur asynchrone dans les applications photovoltaïque de pompage nécessite un circuit électronique de commande à fréquence variable (onduleur) pour commander la vitesse, et ceci ajoute un coût de plus au système. L'inclusion de l'onduleur dans le système permet des performances excellentes à la vitesse de rotation du moteur.

Plusieurs systèmes de pompage photovoltaïques basés sur le moteur à induction alimentés, soit par une source de tension ou source de courant ont été proposés: Altas et Sharaf [29] ont appliqué la commande de la logique floue avec succès, pour rechercher le point de puissance maximale dans les systèmes de conversion d'énergie PV, et pour transférer

le maximum de puissance disponible à partir d'un GPV à un moteur à induction triphasé alimenté par l'intermédiaire d'un onduleur PWM. Les réseaux de neurones ont été utilisés également pour rechercher la puissance maximale du GPV. Akihiro Oi [30] ont présenté une étude permettant de montrer l'effet de la MPPT sur l'amélioration du rendement global du système de pompage photovoltaïque, en utilisant divers algorithmes de MPPT et les méthodes de contrôle.

Benlarbi [31] a montré l'efficacité des techniques d'intelligence artificielle comparativement aux méthodes classiques, en optimisant un système de pompage de l'eau entraîné par des moteurs à courant alternatif AC et continu DC.

Le tableau 1.2 présente quelques avantages et inconvénients des moteurs électriques [3] :

Tableau 1.2 : résume les avantages et les inconvénients des moteurs mentionner ci-dessus.

Type de moteurs	Les avantages	Les inconvénients
Moteur à courant continu	-Simple et efficace pour les faibles charges. -Ne nécessitant pas un circuit de commande compliqué	Les balais doivent être Remplacé périodiquement
Moteur à courant continu sans balais	Un bon rendement Ne demande pas de maintenance	La commutation électronique ajoute des dépenses de plus et avec le risque de défaillance
Moteur à courant alternative	- De larges gammes disponibles pour de larges gammes de charge -Moins cher que le moteur à courant continu	-Moins efficace que le moteur à courant continu -Nécessités un onduleur

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les fondements de bases de l'énergie solaire photovoltaïque en passant en revue la cellule photovoltaïque qui est à la base de la conversion de l'énergie rayonnée par le soleil en électricité. On a présenté également les principaux applications des systèmes photovoltaïques à savoir : les systèmes autonomes, les systèmes connectés au réseau et enfin les systèmes de pompage photovoltaïque. Les schémas de principes de chaque type de systèmes est donnée pour distinguer le principe de fonctionnement de chaque configuration.

Notre intérêt c'est porté sur les systèmes de pompage où nous avons passé en revue les configurations adoptées afin de nous guider ultérieurement dans l'étude que nous projetions de mener dans ce mémoire. Une revue bibliographique sur les types des moteurs et de pompes est également reportée dans ce chapitre pour comprendre leurs fonctionnements dans un système de pompage photovoltaïque.

Chapitre 02

Simulation des éléments de système de pompage photovoltaïque

CHAPITRE 02

SIMULATION DES ELEMENTS DE SYSTEME DE POMPAGE PV

2.1 Introduction

Les principales composantes d'une chaine de pompage photovoltaïque seront modélisées et simulés dans l'environnement Matlab/Simulink à savoir :

- Le générateur photovoltaïque
- Le convertisseur Continu/Continu
- Le moteur sans balais
- La pompe centrifuge

Nous donnerons dans chaque section le modèle adéquat, son implémentation dans l'environnement Matlab/Simulink et en fin les résultats de simulations.

2.2 Générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [32].

2.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

L'utilisation de circuit électrique équivalant permet de modéliser les caractéristiques de la cellule PV (générateur photovoltaïque élémentaire) [30]. Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre de paramètres intervenants dans la caractéristique courant-tension.

Dans notre cas, nous avons choisi un modèle simple, appelé modèle à quatre paramètres, où les paramètres sont donnés par le fabriquant. Cette méthode est implémentée dans un programme MATLAB et elle est aussi applicable pour la modélisation des modules PV [30].

2.2.1.1 Modèle à paramètres constants

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé pour la modélisation des modules PV. Les courbes I-V globales obtenues par ce modèle sont plus précises. Ce modèle, comme le montre le circuit équivalant ci-dessous, est constitué d'une source de courant représentant le courant généré par les photons du rayonnement solaire souvent appelé (I_L), mise en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série *Rs*. Le courant de sortie (I) est constant lorsque la température et l'irradiation sont constantes [30].

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique I(V) sont:

I_L : Le courant photonique.

I_0 : Le courant de saturation inverse.

Rs: La résistance série.

Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I(V) pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants).

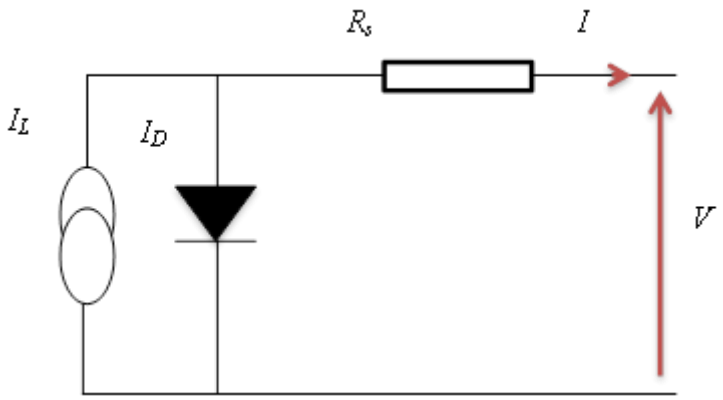


Figure 2.1 **:** Modèle équivalent d'une photopile ou cellule photovoltaïque.

D'après la loi de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est :

$$I = I_L - I_D \tag{2.1}$$

Le courant de la diode est donné par l'équation de Shockley:

$$I_D = I_0 \left[exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nkt} \right) - 1 \right] \tag{2.2}$$

Où:

n : Le facteur de dimension

k : La constante de Boltzmann $(k = 1.381.10^{-23} J/K)$

q : La charge de l'électron ($q = 1.602 \cdot 10^{-19} C$).

Le courant inverse de saturation de la diode s'exprime en fonction des caractéristiques du matériau et de la température comme suit [29]:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{e^{qV_{0c}/nkt} - 1} \tag{2.3}$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristiques I-V au voisinage de V_{0C}. Elle peut être calculée par la formule suivante:

$$R_s = -\frac{dI}{dV} - \frac{nkT/q}{I_0 e^{q\left(\frac{V+R_s dI}{nkT}\right)}} \tag{2.4}$$

Les quatre paramètres inconnus son I_L, I_0, n et R_s ou avec précision les paramètres aux conditions de référence. Alors que R_s et n sont supposés être constants, I_L est en fonction de l'éclairement et de la température des cellules et I_0 est en fonction de la température seulement. Cette dernière peut être déterminée à partir de la température ambiante et avec l'aide des données des essais standard fournies par les fabricants.

2.2.1.2 Résolution de l'équation caractéristique I(V)

La méthode de Newton-Raphson est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires, car la solution de l'équation non linéaire par cette méthode converge rapidement [30].

La méthode de Newton est définie par:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{2.5}$$

Où :

$f'(x)$: est la dérivée de la fonction $f(x)=0$.

Avec : x_n : est la valeur présente et x_{n+1}: est la valeur suivante.

2.2.2 Caractéristiques principales du générateur photovoltaïque

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de test et de simulation. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque Shell SP 75. [30].

Le module est composé de 36 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 75 W.

2.2.2.1 Caractéristiques Courant-Tension

La caractéristique principale du générateur photovoltaïque est la caractéristique I-V qui montre comment un générateur photovoltaïque répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température (figure 2.2). Il y a trois points importants dans cette courbe:

- Le point de fonctionnement optimal auquel le générateur fournit sa puissance maximale (point 5).
- Le point où la tension est égale à zéro et le courant est en maximum (courant de circuit-court, point 4).
- Le point où le courant est égal à zéro et la tension est en maximum (tension de circuit ouvert, point1).

Egalement la caractéristique *I-V* peut être divisée en trois gammes:

- Une gamme où le générateur est considéré comme une source de tension (1-2).
- Une gamme où le générateur est considéré comme une source de courant (3-4).
- Une gamme où ni la tension ni le courant ne sont constants (2-3).

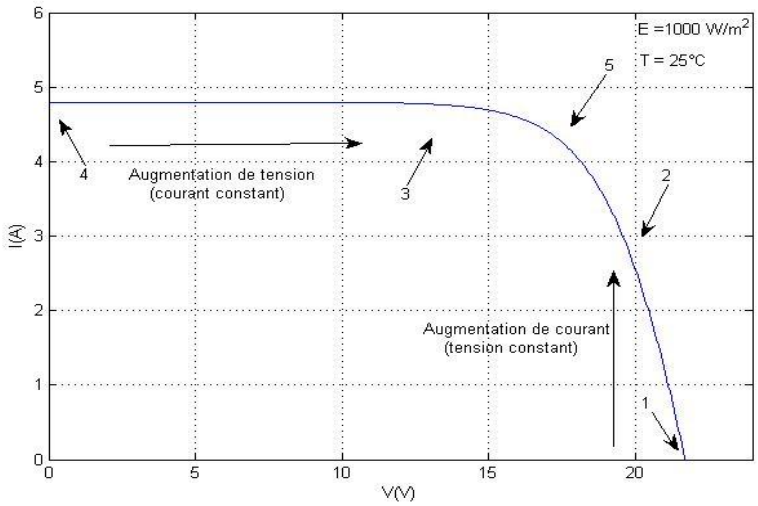


Figure 2.2 : Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

2.2.2.2 Caractéristique Puissance-Tension

La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes (Figure 2.3). Le point « Pm » représente la puissance maximale débitée par le générateur photovoltaïque.

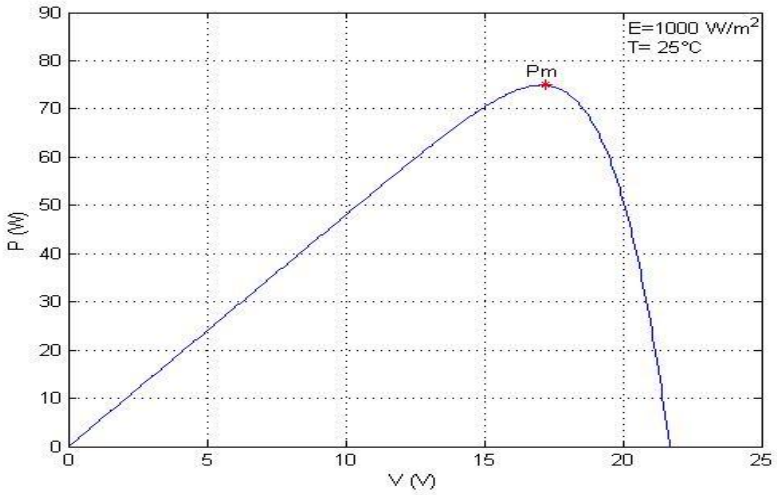


Figure 2.3 : Caractéristiques P (V) d'un générateur photovoltaïque

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse du générateur photovoltaïque est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25°C.

2.2.2.3 Effet de l'éclairement

L'augmentation de l'éclairement est directement proportionnelle à l'intensité du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

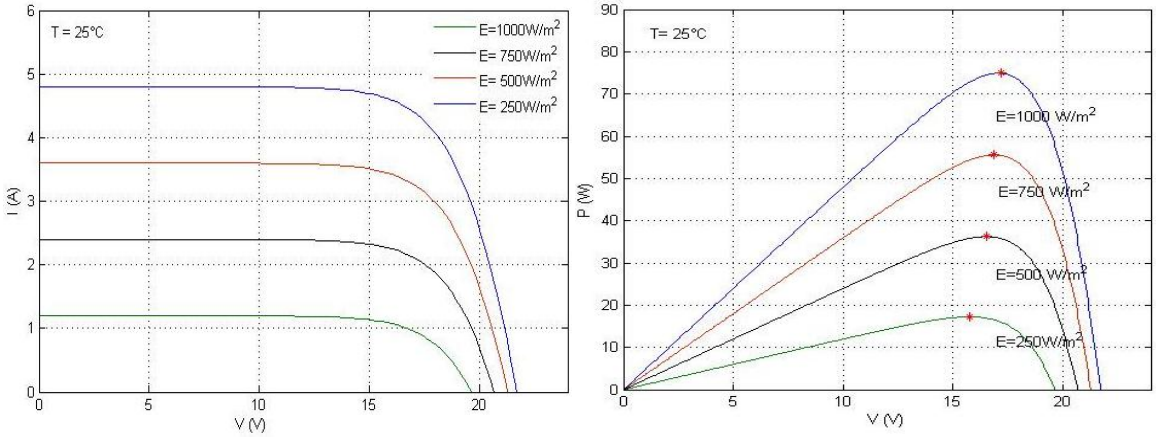


Figure 2.4 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V

2.2.2.4 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement du générateur photovoltaïque. La figure (2.5) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale

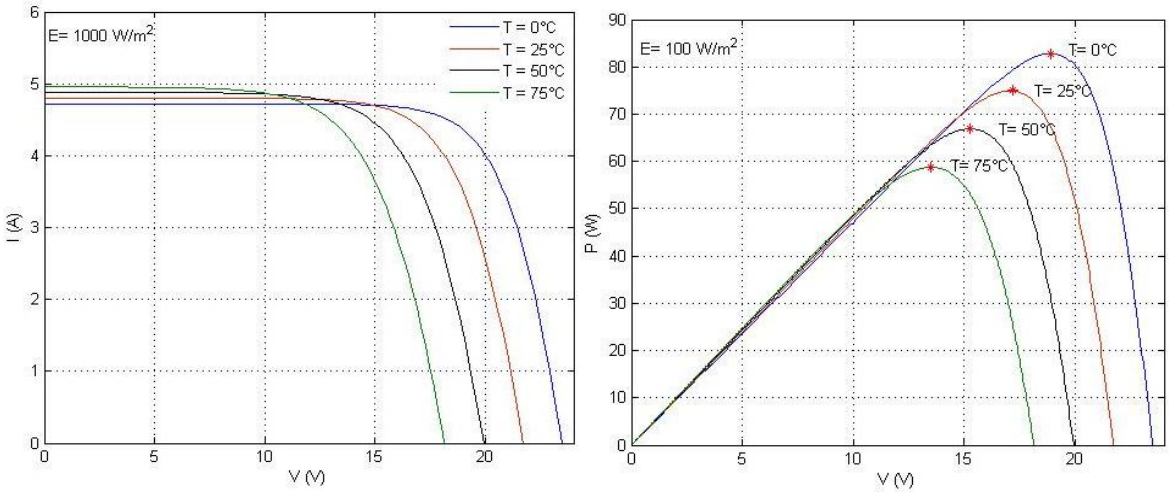


Figure 2.5: Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V

2.2.2.5 Influence de la résistance série

La figure (2.6) montre l'influence de la résistance série sur la courbe I(V). Un générateur photovoltaïque qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance P(V) dans la zone ou le générateur photovoltaïque fonctionne comme générateur de tension constante.

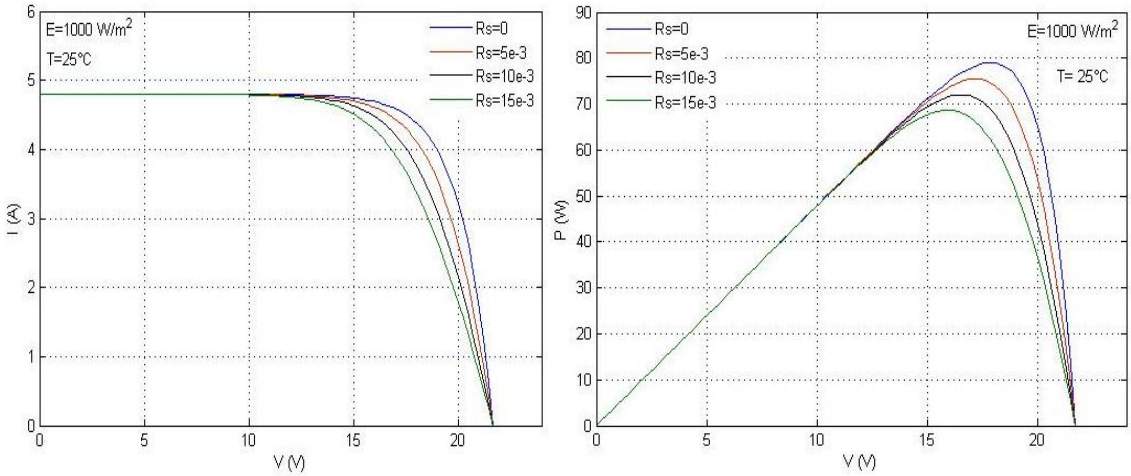


Figure 2.6: Influence de la résistance série sur les caractéristiques électriques I(V) et P(V).

2.2.2.6 Influence du facteur de qualité

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur la zone ou le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

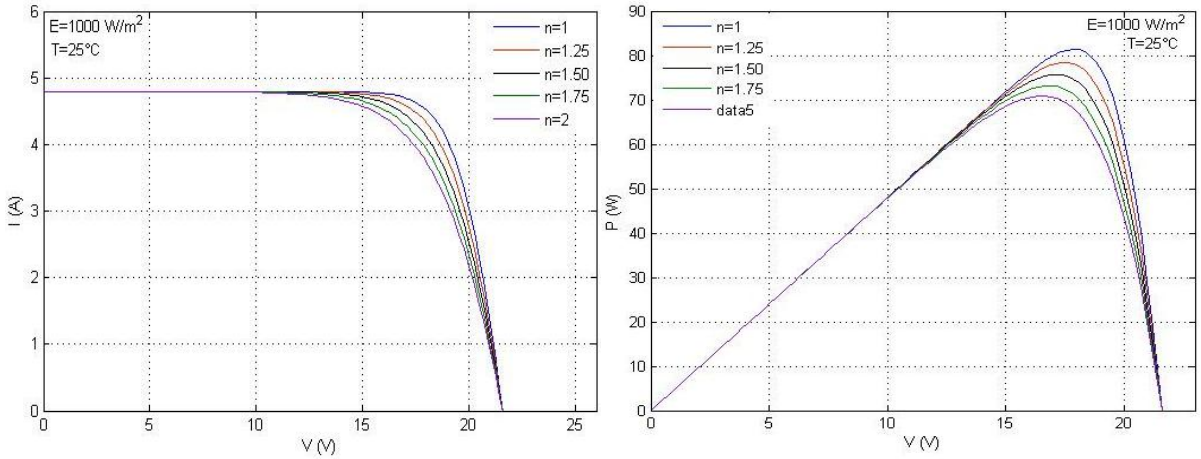


Figure 2.7 **:** Influence du facteur de qualité pour un G=1000W/m² et T=25°C

2.2.3 Interprétations des Résultats

La figure (2.4) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V). A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

La figure (2.5) montre l'influence de la température sur la caractéristique I(V). Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique P(V). Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

2.2.4 Rendement

Le rendement d'un générateur PV est défini comme étant le rapport entre la puissance électrique fournie (puissance que l'on peut extraire au point optimum) à la puissance du rayonnement d'incident [1]:

$$\acute{\eta}_{pv} = \frac{IV}{EA} \qquad (2.6)$$

Où A: surface effective de générateur en m^2.

2.2.5 Facteur de forme

On identifié le facteur de forme, par le rapport de la puissance maximum au produit de courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert [1] :

$$FF = \frac{I_{0p}V_{0p}}{I_{sc}V_{0c}} \tag{2.7}$$

2.2.6 Fonctionnement optimal du générateur

Le point de fonctionnement du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point (*Vopt, Iopt*) permet d'en extraire la puissance optimale disponible dans les conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge vaut alors *Ropt=Vopt/Iopt*.

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales Ropt lorsque les conditions varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire. [33]

2.3 Convertisseurs DC-DC

Le convertisseur DC-DC est l'organe qui doit forcer le GPV a fonctionné dans son point de puissance optimale via l'algorithme d'extraction du MPP. En effet l'algorithme MPPT fixe la tension de référence qui est la tension optimale ou le GPV travail à son maximum de puissance. Ainsi un rapport cyclique D est calculé afin de commander le convertisseur DC-DC.

2.3.1 Hacheur élévateur [34]

Un tel convertisseur (figure 2.8) permet de fixer une tension moyenne réglable *Vsmoy* aux bornes de la source *I* tel que *Vsmoy* > *V*.

La structure du hacheur élévateur (BOOST) est constituée d'une seule cellule de commutation, ainsi que représentée par la figure 2.8. Celle-ci comporte deux interrupteurs à commutation complémentaire. Le premier interrupteur est complètement commandable (Transistor *Th*) en parallèle avec la source de courant d'entrée (*I*) constitué d'une source de tension (*V*) en série avec l'inductance (L_e). Le deuxième interrupteur est à commutation naturelle (Diode *D*) en série avec la source de tension de sortie (V_S) constituée d'une résistance (R_{ch}) en série avec le condensateur (C_S).

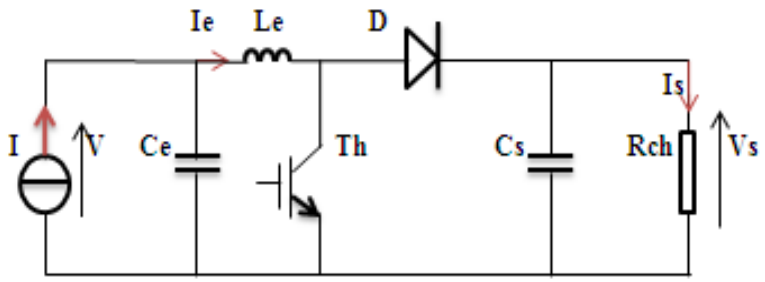


Figure 2.8: Hacheur élévateur

Les expressions de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur ainsi que la valeur moyenne du courant d'entrée du hacheur sont données par [1]:

$$V_{smoy} = V\frac{1}{1-D} \tag{2.8}$$

$$I_s = (1-D)I_e \tag{2.9}$$

2.3.3 Avantage du convertisseur élévateur

Malgré le rendement inhérent élevé du convertisseur BUCK dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur BOOST peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT), puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être plus grand que le convertisseur BUCK. [3]

2.4 Modélisation et commande du Moteur à courant continu sans balais

2.4.1 Moteur à courant continu sans balais

De nos jours les moteurs à aimant permanent sans balais à courant continu (PMBLDC) sont de plus en plus populaires. Le moteur sans balais est ainsi devenu la solution idéale pour les applications d'aujourd'hui, de plus en plus exigeantes en termes de durée de vie et de fiabilité, d'encombrement et de poids, de consommation électrique (rendement), de faible niveau sonore et de variation de débit (asservissement).[35], [36].

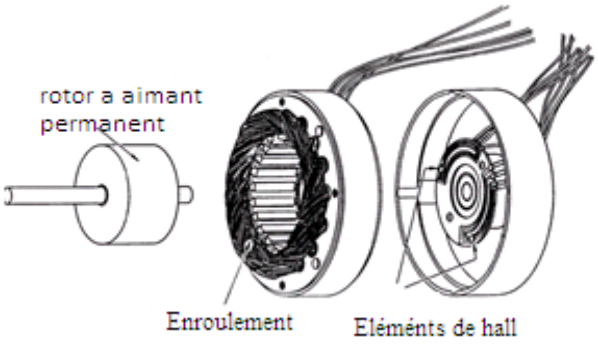


Figure 2.10 Moteur à courant continu sans balais

2.4.2 Principe de fonctionnement de Moteurs PMBL.

Théoriquement, la machine PMBLDC / AC fonctionne sur le même principe que celui de la machine à courant continu conventionnel, sauf que son collecteur est remplacé par un commutateur électronique. Si l'on considère les génératrices à courant continu conventionnelles reliées en parallèle à un réseau à courant continu [35], [36].

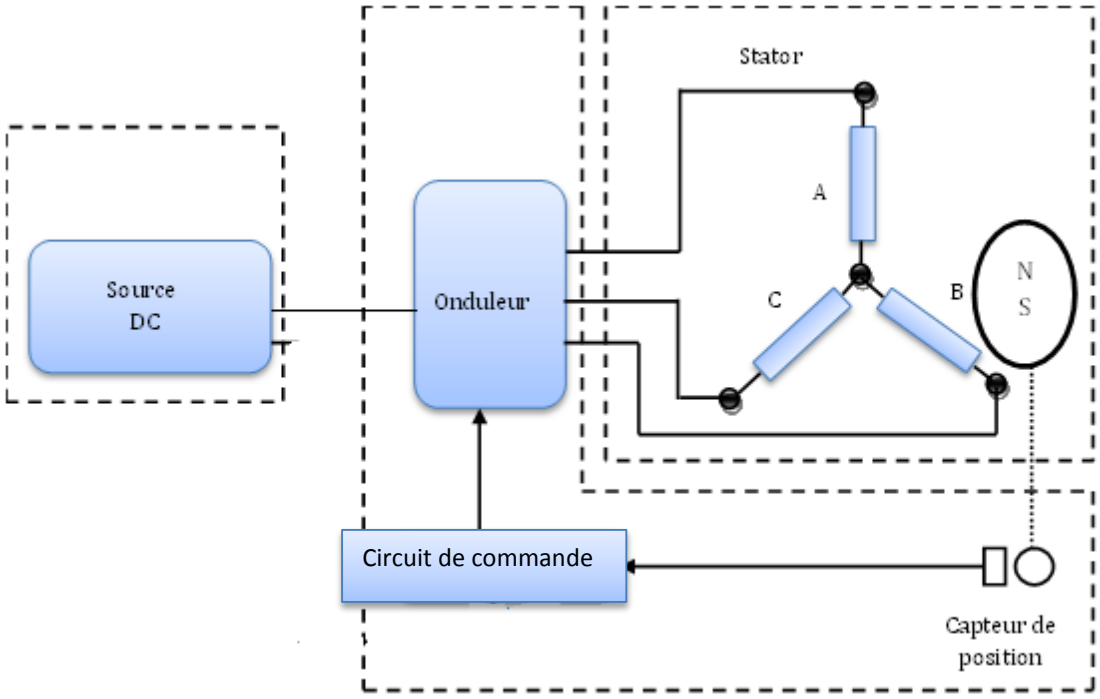


Figure 2.11: Constitution du Moteur BLDC

2.4.3 Caractéristique du PMBLDC

Les moteurs BLDC ont de nombreux avantages par rapport aux moteurs à courant continu brossé et des moteurs à induction. Quelques-uns d'entre eux sont :

- Meilleure vitesse par rapport à la réponse de couple

- Réponse dynamique élevée
- Haute efficacité
- durée de vie longue
- Fonctionnement silencieux

En outre, le rapport du couple délivré à la taille du moteur est plus élevé, ce qui est utile dans les applications où l'espace et le poids sont des facteurs critiques. Idéalement, les moteurs BLDC ont des FEMs de forme d'onde trapézoïdale et sont nourris avec des courants du stator rectangulaires, qui donnent un couple théoriquement constant. [35], [28].

2.4.4 Capteurs à effet Hall

Contrairement à un moteur à courant continu balayé, la commutation d'un moteur BLDC est commandée électroniquement. Pour faire tourner le moteur BLDC, les enroulements de stator doivent être activés dans une séquence. Il est important de connaître la position du rotor afin de comprendre ce qui enroulement sera mis sous tension après la séquence d'excitation. La position du rotor est détectée en utilisant des capteurs à effet Hall intégrés dans le stator. La plupart des moteurs BLDC ont trois capteurs de Hall intégrés dans le stator sur le côté opposé à l'entraînement du moteur. [28], [37] Chaque fois que les pôles magnétiques du rotor passent près des capteurs à effet Hall, ils donnent un signal haut ou bas, indiquant le N ou le pôle S passant à proximité des capteurs. Sur la base de la combinaison de ces trois signaux de capteurs de hall, la séquence exacte de commutation peut être déterminée [38].

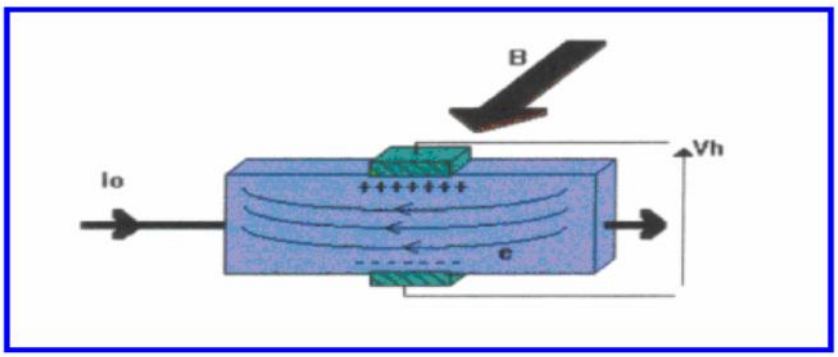


Figure 2.12 : Capteur à effet hall

2.4.5 Modèle mathématique du Moteur BLDC

Les Équations Électriques qui régissent le fonctionnement du moteur BLDC sont données par les équations suivantes [37], [39].

$$\vec{V} = [R]\,\vec{I} + \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \tag{2.13}$$

$$\vec{\varphi} = [L]\,\vec{I} + \overrightarrow{\varphi_M} \tag{2.14}$$

Où :

$\vec{V}, \vec{I}$ et $\vec{\varphi}$ sont des vecteurs représentant la tension, le courant et le flux magnétique pour chaque phase respectivement.

$\overrightarrow{\varphi_M}$: est le vecteur du flux magnétique créé par l'aimant permanent;

[R] et [L] sont les matrices résistances et inductances de la machine données par les matrices 2.15 et 2.16.

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

Les variables d'états sous forme matricielle sont données; ci-après

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \qquad \vec{I} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \qquad \vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}, \overrightarrow{\varphi_M} = \begin{bmatrix} \varphi_{Ma} \\ \varphi_{Mb} \\ \varphi_{Mc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_0 \cos\theta \\ \varphi_0 \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \varphi_0 \cos(\theta - 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Où

φ_0: L'amplitude du flux magnétique créé par l'aimant permanent et θ: l'angle électrique

Alors:

$$\vec{V} = [R]\,\vec{I} + \frac{d}{dt}([L]\,\vec{I} + \overrightarrow{\varphi_M}) \tag{2.18}$$

$$\vec{V} = [R]\,\vec{I} + \frac{d}{dt}([L]\vec{I}) + \frac{d\overrightarrow{\varphi_M}}{dt} \tag{2.19}$$

$$\overrightarrow{Ep} = \frac{d\overrightarrow{\varphi_M}}{dt} \tag{2.20}$$

Où

E_p: représente la force électromotrice.

Pour un enroulement triphasé symétrique et un système équilibré (figure. 2.13), le vecteur des tensions aux bornes des trois phases est donné par:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

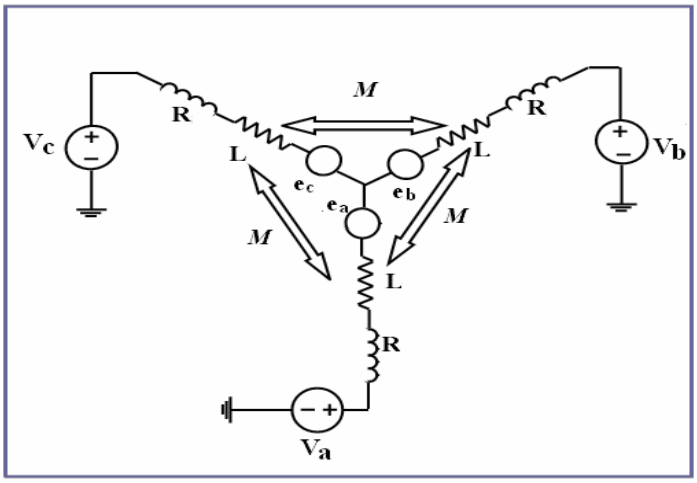


Figure 2.13 Modèle électrique simplifié du BLDC

La position électrique Θ du rotor se déduit directement de la position mécanique du rotor Θ_r mesurée par le capteur) par:

$$\theta = P\theta_r \tag{2.22}$$

Où

P : est le nombre de paires de pôles du moteur, par conséquent, l'expression de la vitesse électrique est donnée par :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = p\frac{d\theta_r}{dt} = p\omega_r \tag{2.23}$$

Les inductances et les mutuelles sont constantes pour les aimants permanents montés sur la surface du rotor cylindrique, lorsque les enroulements sont symétriques, les inductances propres sont identiques; données par:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \tag{2.24}$$

Et les inductances mutuelles sont également identiques; données par:

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = M \tag{2.25}$$

Les équations sous la forme matricielle ; exprimée par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Puisque les enroulements du stator sont couplés en étoile, la somme des trois courants de phase est nulle:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.27)$$

Alors :

$$i_a + i_b = -i_c \quad (2.28)$$

Par conséquent, la tension prend la forme suivante [39], [40]:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Où

$e_a = f_a(\theta) k_e \, \omega_r$ la force électromotrice de la phase *a*

$e_b = f_b(\theta) k_e \, \omega_r$ la force électromotrice de la phase *b* (2.30)

$e_c = f_c(\theta) k_e \, \omega_r$ la force électromotrice de la phase *c*

Avec:

K_e: est le coefficient de la force électromotrice $f_a(\theta)$, $f_b(\theta)$ et $f_c(\theta)$ sont des fonctions dépendant uniquement de la position du rotor [41].

2.4.5.2 La Force Électromotrice

La force électromotrice induite est déterminée par la position angulaire de l'aimant, c'est à dire du rotor, il est très important de remarquer que la valeur crête de la FEM est directement proportionnelle à la vitesse angulaire instantanée du rotor [42] [43]:

$$E_p = k_e \, \omega_r \quad (2.31)$$

Les formes typiques des FEMs induites et des courants dans les trois phases sont illustrées par la figure 2.14:

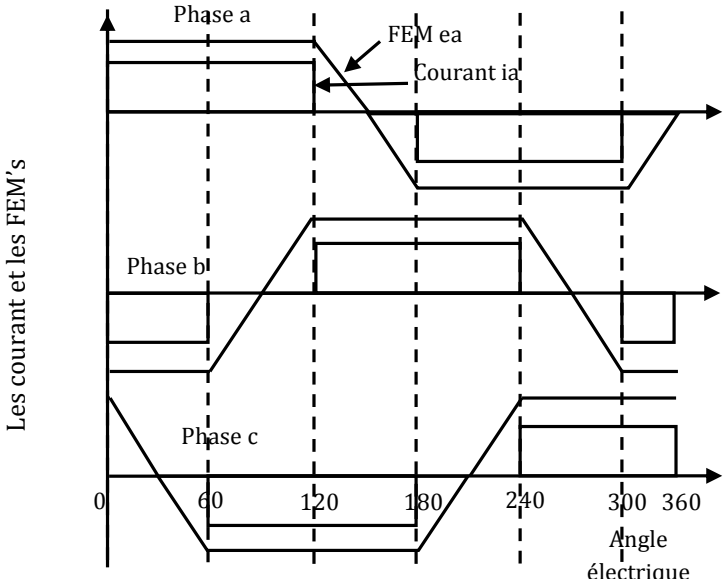


Figure 2.14 : Formes typiques des courants et des FEMs

2.4.5.3 L'Équation Mécanique du Mouvement

Le modèle mécanique du moteur BLDC est donné par l'équation 2.32 :

$$J\frac{d\omega_r}{dt} = C_e - f\omega_r - C_r \tag{2.32}$$

Où :

w_r : est la vitesse angulaire en *rad/s*;

C_e: est le couple électromagnétique développé en *N/m ;*

C_r: est le couple de charge en *N/m ;*

f : est le coefficient de frottement en $N.(m/rad).s^{-1}$

2.4.5.3.2 Couple Électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par le moteur BLDC est donné par [37], [39] :

$$C_e = \frac{e_a\, i_a + e_b\, i_b + e_c\, i_c}{\omega_r} \tag{2.33}$$

2.4.5.4 Modèle de l'ensemble Machine-Commutateur Electronique

Comme mentionné précédemment, le moteur BLDC nécessite un commutateur électronique pour assurer l'alimentation successive des enroulements. Le schéma de principe de ce commutateur électronique est donné par la figure 2.15 [45] [44].

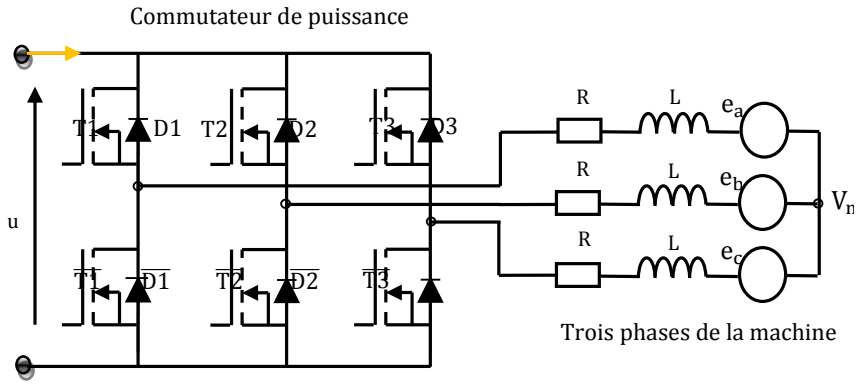


Figure 2.15 : Ensemble moteur-commutateur.

Nous supposons que :

- les trois phases du moteur sont entièrement symétriques et produisent des FEMs induites périodiques de formes trapézoïdales ;
- le temps de commutation entre les phases est séparé avec 60° électrique [39], [46];

Les séquences de commandes des différents interrupteurs de commutateur électronique sont assurées par les signaux de position du rotor donnés par le capteur à effet hall (voir figure 2.16 ci-dessous) [39], [46].

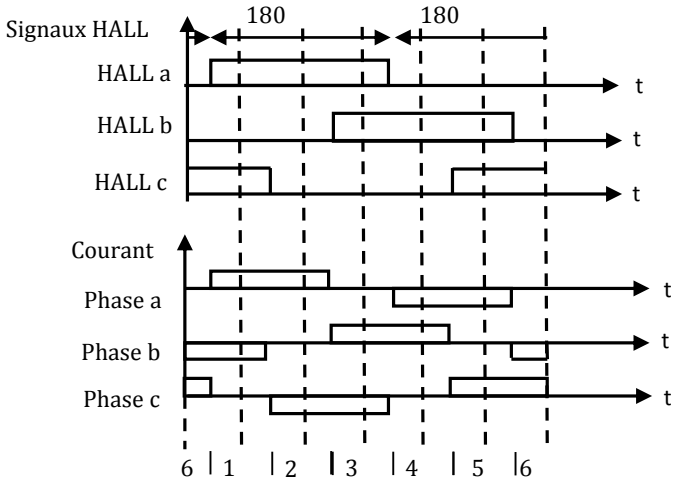


Figure 2.16 : Signaux à effet hall

Les expressions des FEMs induites dans chaque phase du moteur sont résumées dans le tableau 2.1

Tableau (2.1) : Expressions des FEMs des 3 phases e_a, e_b, e_c sur une période

(θ)	$FEM\ e_a$	$FEM\ e_b$	$FEM\ e_c$
$\left(0 \to \frac{\pi}{3}\right)$	$k_e\ \omega_r$	$-k_e\ \omega_r$	$-(6k_e\ \omega_r/\pi)\theta + k_e\ \omega_r$
$\left(\frac{\pi}{3} \to \frac{2\pi}{3}\right)$	$k_e\ \omega_r$	$(6k_e\ \omega_r/\pi)\theta - 3E_p$	$-k_e\ \omega_r$
$\left(\frac{2\pi}{3} \to \pi\right)$	$-(6k_e\ \omega_r/\pi)\theta + 5k_e\ \omega_r$	$k_e\ \omega_r$	$-k_e\ \omega_r$
$\left(\pi \to \frac{4\pi}{3}\right)$	$-k_e\ \omega_r$	$k_e\ \omega_r$	$(6k_e\ \omega_r/\pi)\theta - 7k_e\ \omega_r$
$\left(\frac{4\pi}{3} \to \frac{5\pi}{3}\right)$	$-k_e\ \omega_r$	$-(6k_e\ \omega_r/\pi)\theta + 9k_e\ \omega_r$	$k_e\ \omega_r$
$(\frac{5\pi}{3} \to 2\pi)$	$(6k_e\ \omega_r/\pi)\theta - 11k_e\ \omega_r$	$-k_e\ \omega_r$	$k_e\ \omega_r$

2.4.5.5 techniques de commande

Pour imposer des courants rectangulaires dans les enroulements de la machine, nous choisissons la commande à 120° utilisant un régulateur à hystérésis. [45]

Le principe de cette commande consiste à imposer des courants rectangulaires au plateau de largeur 120° électriques et d'amplitude (I^*) en phase avec les FEMs de phase correspondantes [39], [46].

On distingue six intervalles de 60° électriques (appelés secteurs) de fonctionnement selon la position du rotor. Ces positions sont détectées par les signaux fournis par le capteur à effet hall. Dans chaque secteur, uniquement deux phases de la machine sont alimentées, excepté durant les commutations. [47], [46], [39]

2.4.5.6 le courant de référence

L'amplitude du courant de référence (I^*) est déterminée à partir du couple de référence [46], [45].

$$I^* = C^* / K \tag{2.34}$$

Selon la position du rotor, les courants qui devraient circuler dans les phases, (I_a^*, I_b^*, I_c^*) sont donnés dans le tableau (2.2) ; ci-après :

Tableau (2 .2) : Les courants de la référence

Signal de position du rotor	I_a^*	I_b^*	I_c^*
$0° - -60°$	I^*	$-I^*$	0
$60° - -120°$	I^*	0	$-I^*$
$120° - -180°$	0	I^*	$-I^*$
$180° - -240°$	$-I^*$	I^*	0
$240° - -300°$	$-I^*$	0	I^*
$300° - -360°$	0	$-I^*$	I^*

2.4.6 Description du système de commande du moteur

La conception d'un contrôleur classique (par exemple un PI) préconise la connaissance précise du modèle du système à contrôler. Les valeurs d'entrée doivent être mesurées avec exactitude afin d'éviter les erreurs, contrairement au contrôleur flou qui ne demande aucune de ces deux spécifications. La connaissance du modèle mathématique du processus n'est pas nécessaire. [47]

Le modèle du moteur d'entraînement doit être connu pour mettre en œuvre un système efficace de contrôle. En outre, le contrôleur de logique floue (FLC) a été utilisé pour analyser les commandes du moteur.

Le système de commande proposé, qui contient deux boucles, est représenté sur la figure (2.17). La première boucle est la boucle de régulation du courant qui accomplit un contrôle de couple du moteur BLDC et la deuxième boucle est la boucle de régulation de vitesse qui règle la vitesse du moteur BLDC.

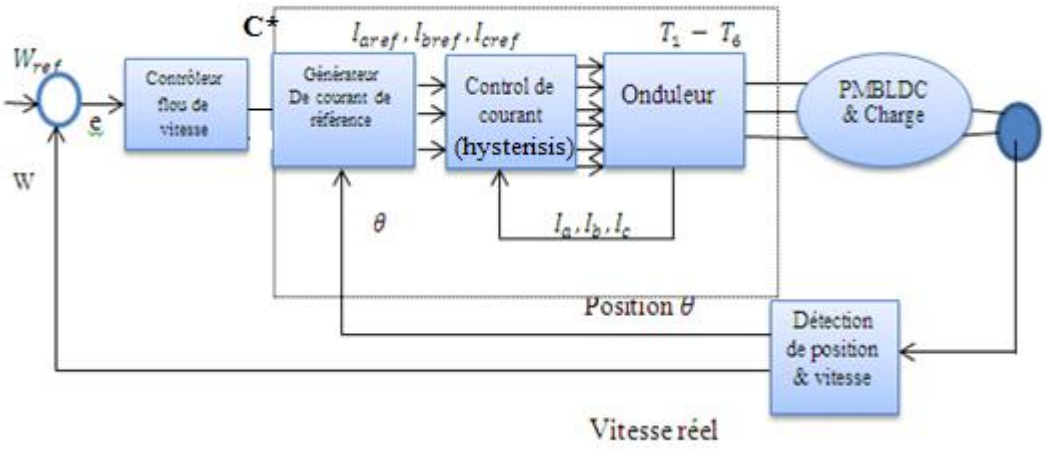


Figure 2.17 **:** schéma structurelle du moteur BLDC avec sa commande

2.4.6.1 Logique floue, principes et définitions.

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développées par Zadeh .A côté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive.

Les quelques points de repères historiques suivants permettent de situer dans le temps le développement de la logique floue et ses applications au réglage. En 1973 Lotfi propose d'appliquer la logique aux problèmes de réglage des processus. En 1974, première application du réglage par logique floue appliquée à une turbine à vapeur. En 1975, E. H Mamdani expérimente un régulateur flou qu'il perfectionne au cours des années suivantes. En 1985 M. Sugéno décrit des applications industrielles possibles en régulation floue, tel que les premiers produits industriels utilisant le principe de la logique floue appliquée à des problèmes de réglage et de commande. En 1995 J. S. R Jang élargit à logique floue aux systèmes à réseaux de neurones et l'intelligence artificielle. [48], [46]

2.4.6.2 Ensembles floues

Si on désigne par *A* un ensemble flou dans un univers de discours *U*, cet ensemble flou est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(X)$, qui prend des valeurs dans l'intervalle [0 1]. Un ensemble flou est une généralisation d'un sous-ensemble ordinaire dont sa fonction d'appartenance prend les deux valeurs 0 ou 1.

La fonction d'appartenance fournie une mesures du degré qu'un élément de *U* soit un élément d'un sous-ensemble flou [46], [49].

Un ensemble flou *A* peut être présenté comme un ensemble de paires ordonnées de l'élément générique *X* et son niveau (degré) d'appartenance:

$$A = \{(X, \mu_A(X))/X \in U\} \tag{2.35}$$

Quand l'univers de discours U est un ensemble continu (exemple : nombres réels), le sous-ensemble floue A est écrit comme suit :

$$A = \int \mu_A(X)/X \tag{2.36}$$

Quand *U* est discret, *A* s'écrit comme suit :

$$A = \sum \mu_A(X)/X \tag{2.37}$$

2.4.6.3 Operateurs de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classiques, on utilise déférentes opérations tel que compléments union, intersection, les mêmes opérations sont également définies dans la théorie des ensembles flous. Donc, la valeur sur l'intervalle [0 1]. Ces opérations ne peuvent pas être définies de la même manière que celles des ensembles classiques. Il existe de nombreuses variantes dans ces operateurs. Cependant les plus répandus sont ceux dites de <Zadeh> décrites ci-dessus.

- On définit l'union et l'intersection de deux ensembles flous A et B, comme respectivement le plus petit ensemble flou contenant A et B, et le plus grand ensemble flou contenu dans A et dans B d'autre part. En d'autres termes:

$$\mu_{A\cup B} = max(\mu_A, \mu_B)$$

$$\mu_{A\cap B} = min(\mu_A, \mu_B)$$

- Le complémentaire d'un ensemble flou A dans un ensemble de référence E est naturellement défini par la relation (nous utiliserons le symbole de négation ¬) :

$$\mu_{A^{\neg}} = 1 - \mu_A$$

2.4.6.4 règles floues

L'outil le plus utilisé dans la logique floue est la base des règles floues. Une base des règles floues est composée de règles qui sont généralement de type:

Opération: **Si** Condition **Et** Condition', **Alors** Conséquence.

Les inférences avec plusieurs règles sont caractérisées par le fait qu'en général plusieurs règles sont (plus ou moins) simultanément vérifiées. L'opération qui doit être effectuée doit tenir compte des différentes conditions et s'obtient par les règles de calcul de la logique floue.

2.4.6.5 mécanismes d'inférence floue

Une base de règles floues comprend donc les règles linguistiques qui font appel à des fonctions d'appartenances. Le mécanisme d'inférences comprend les étapes suivantes:

- Fuzzification : la fuzzification permet de transformer les variables réels numériques d'entrées, en variables floue. Cette première étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état (après la définition des entrées et sorties). Celui-ci déterminé à l'aide des fonctions d'appartenance définie dans le système (projection des variables physique sur des ensembles floue). Dons la

fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles.

- Dégrée d'activation : le dégrée d'activation d'une règle est l'évaluation des prédicats de chaque règle par combinaison logiques des propositions du prédicat.
- Implication : le dégrée d'activation de la règle permet de déterminer la conclusion de la règle, c'est l'implication. Il existe plusieurs operateurs d'implication, mais la plus utilisée est le minimum. L'ensemble de conclusion est construit en réalisant le minimum entre le degré d'activation et la fonction d'appartenance.
- Agrégation : L'ensemble flou global de sortie est construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacun des règles concernant cette sortie. Les règles sont liées entre eux par un opérateur logique <OU> on calcule donc le maximum entre la fonction d'appartenance résultant de chaque règle.
- Défuzzification : la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'operateur ou commander un actionneur. il est nécessaire de passer d'une valeur floue à une valeur numérique, c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes, les méthodes les plus souvent rencontrées étant le calcul du centre de gravité. La méthode du centre de gravité est une des méthodes les plus mentionnées dans la littérature.

2.4.7 Conception du contrôleur flou (FLC)

Le schéma de principe du FLC à deux entrées et une sortie (u) est illustré sur la figure (2.18) L'erreur est calculée en soustrayant la vitesse de référence à partir de la vitesse réelle du rotor de la manière suivante [49]:

$$E = W - W_{ref} \tag{2.38}$$

Ou :

E : est l'erreur, W_{ref} : est la vitesse de référence, et W: est la vitesse réelle du moteur.

La variation de l'erreur est calculée par l'équation 2.39, où $E\,[n-1]$ est la valeur d'erreur précédente.

$$\Delta E = E(n) - E(n-1) \tag{2 .39}$$

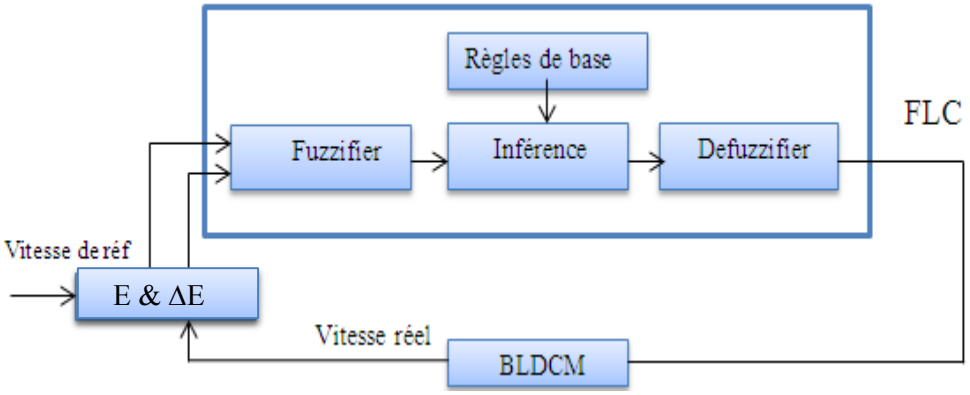


Figure 2.18 : Structure du contrôleur flou

2.4.7.1 La stratégie de fuzzification

Il s'agit du choix des formes des fonctions d'appartenance, et leur répartition sur l'univers de discours. Dans notre cas, nous s'avons choisi de travailler sur des univers des discours normalisé [-1 1], partitionnés en sept classes (sous ensemble flous) pour les entrées et pour la sortie.

La forme la plus utilisée dans la commande floue est la forme triangulaire, pour cela nous utiliserons des fonctions d'appartenance triangulaire.

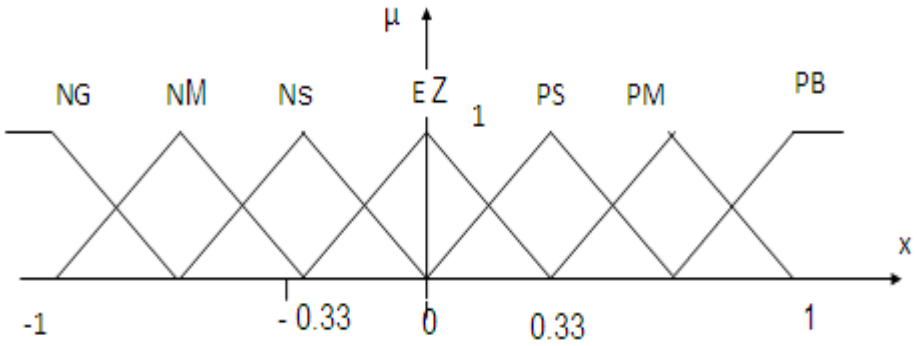


Figure 2.19: partition des entrées et de la sortie du contrôleur flou(fonction d'appartenances)

2.4.7.2 Etablissement des règles d'inférence

Nous s'avons utilisé une base des règles que l'on trouve dans la plupart des applications ou la dynamique du système étudier présente une certaine symétrie autour d'un certain état stable. Le tableau suivant représente les règles de ce régulateur.

Table(2.3) : les regles de regulateur flou [46]

E	ΔE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB		NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM		NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NP		NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PP		NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
PM		NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PG		ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

2.4.7.3 La stratégie de défuzzification

En cette étape (la défuzzificaion), une valeur réelle de la variable de sortie u est obtenue en employant la méthode du centre de gravité.

2.4.8 Résultats de simulation

2.4.8.1 Résultats sans régulation

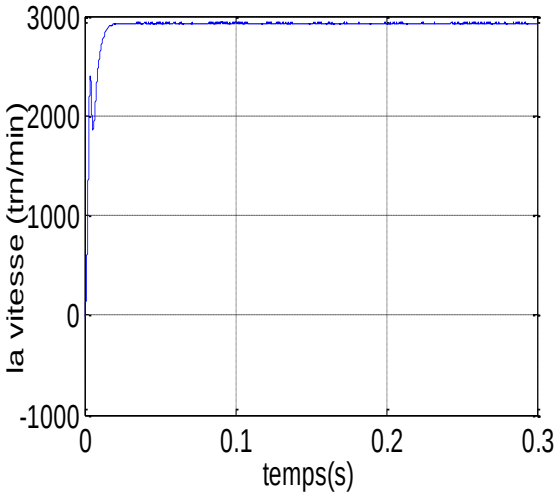


Figure 2 .20.a: la vitesse du rotor

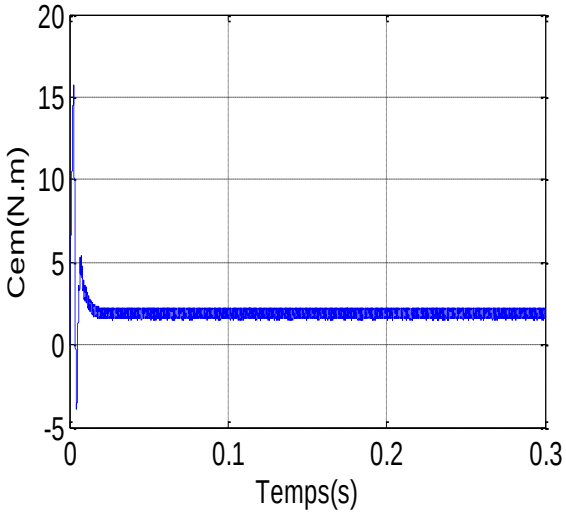


Figure 2.20.b**:** Le couple électromagnétique

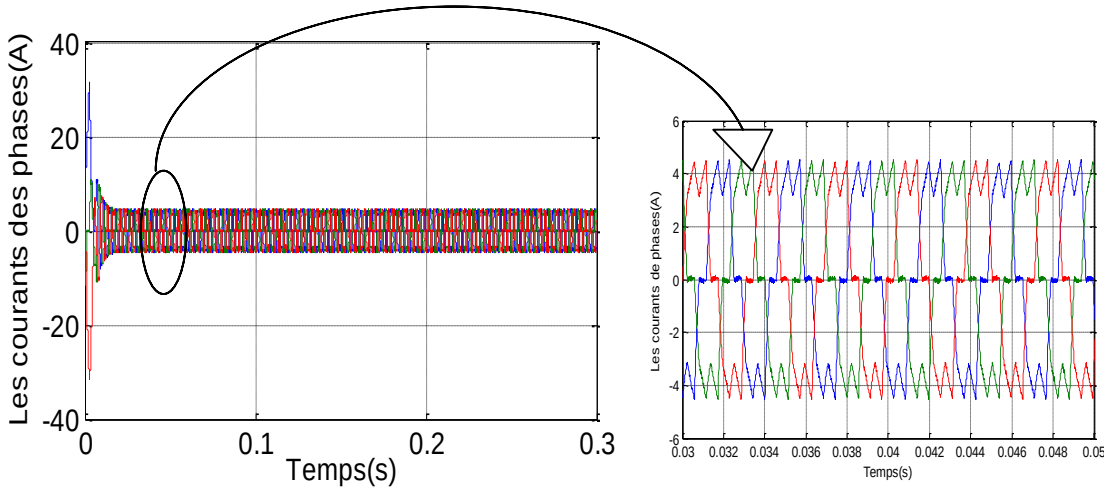


Figure 2.20.c**:** les courants des phases

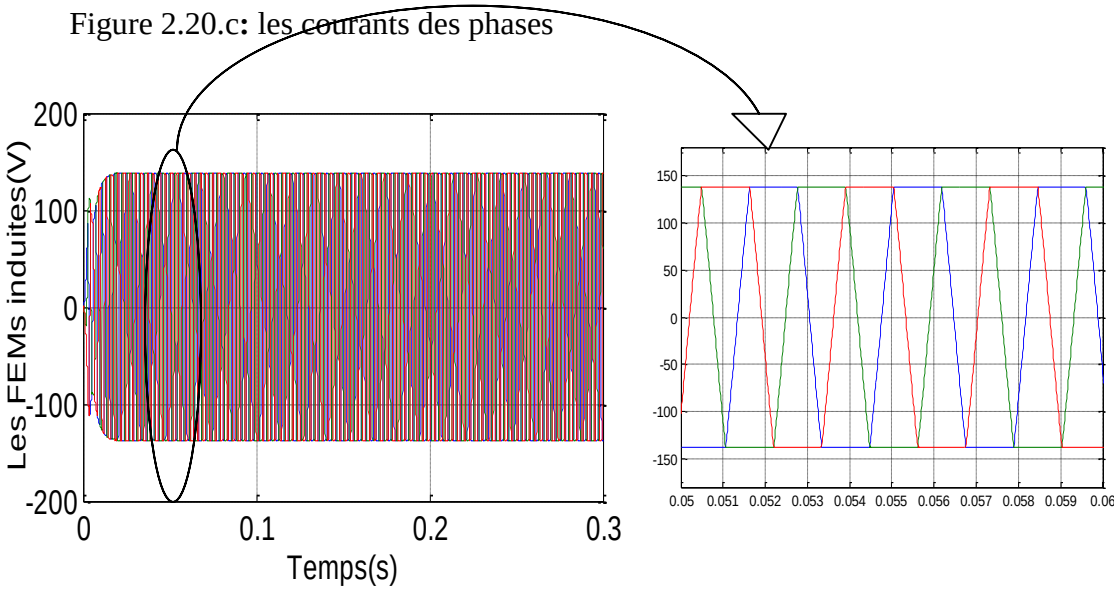


Figure 2.20.d: les fems induites

2.4.8.2 Résultats de simulation de PMBLDC avec contrôleur flou

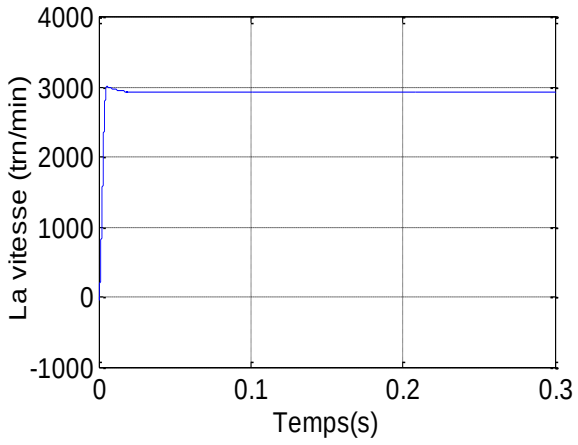


Figure 2.21.a**:** la vitesse du rotor

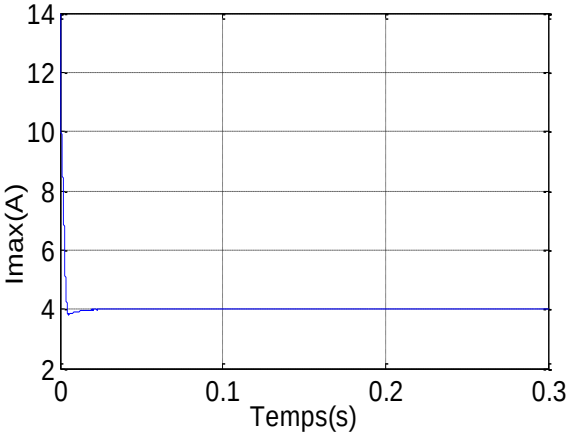


Figure 2.21.b**:** le courant maximal

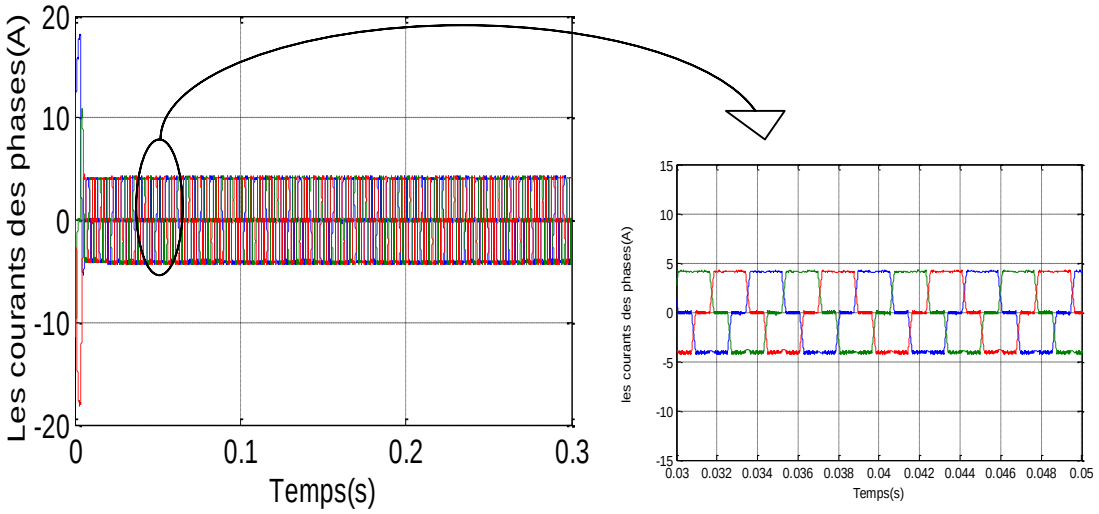


Figure 2.21.c**:** les courants des phases

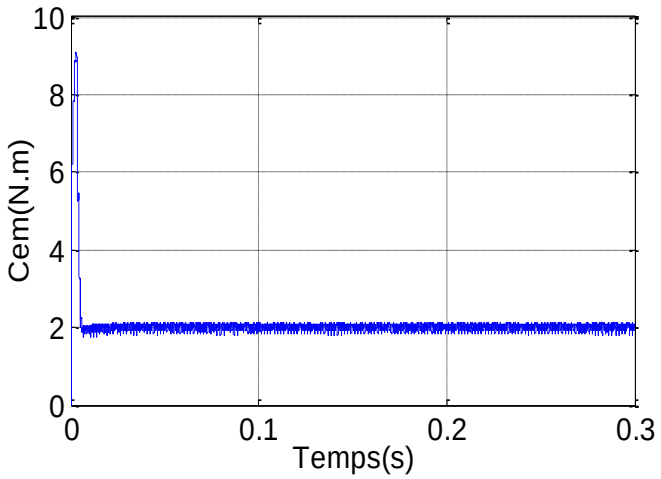


Figure 2. 21. d: Le couple électromagnétique

2.4.8.3 Interprétation

La figure (2.21) montre les réponses dynamiques de la vitesse, le courant, du couple et d'Imax, respectivement. La valeur de référence du courant maximal (Imax) est calculée à partir de la référence du couple constant généré, par conséquent, il est utilisé dans le bloc de commande d'hystérésis.

Sur la figure (2.20.c), le courant de phase qui est d'abord présenté sans régulation ou le courant présente des grandes ondulations. Ces dernières sont dues aux changements des séquences après un régime transitoire. Le courant dans ce cas atteint une valeur de 20A puis diminue en stabilisant à la valeur 4.4 A .Avec le régulateur flou, le courant se stabilise auteur d'une valeur de référence 4A. La réponse du système est plus rapide.

Les courants de phase réels obtenus par l'algorithme de commande d'hystérésis sont synchronisés avec leurs homologues des formes d'onde de la FEM. Les formes des FEMs générées en fonction de la position du rotor sont montrées dans la figure (2.20.d)

Le couple suit le couple résistant appliquée. On voit sur la figure (2.20.b) les ondulations du couple autour de la valeur 2 N.m. L'effet du régulateur flou sur la réponse figure (2.21.d) est bien clair. Le système devient plus rapide.

La vitesse sans régulation. Les oscillations au niveau du cette dernière sont très claire. Elles sont dues aux séquences de commutation. La vitesse atteint sa valeur nominale 300 (rad/sec).

Les oscillations sont disparu la vitesse suit celle de la référence 314(rad/ses). Le temps de monté est de 0.005s plus rapide que le précédent (0.01s). Avec absence de dépacement pour le régulateur flou.

Le réglage de la vitesse du moteur BLDC a montré que la commande par la logique floue assure des bonnes performances dans le cas d'une présence des perturbations externes.

2.5 Les pompes

2.5.1 La pompe centrifuge

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

La puissance consommée, proportionnelle à Q * HMT, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). [50], [2]

2.5.2 Caractéristiques de la pompe centrifuge

2.5.*2.1* La courbe débit-hauteur

La courbe débit hauteur, ou courbe *Q-H*, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction du débit. Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois (03) paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse:

En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN ". [51]

$$H = C_1 w^2 - C_2 wQ - C_3 Q^2 \tag{2.40}$$

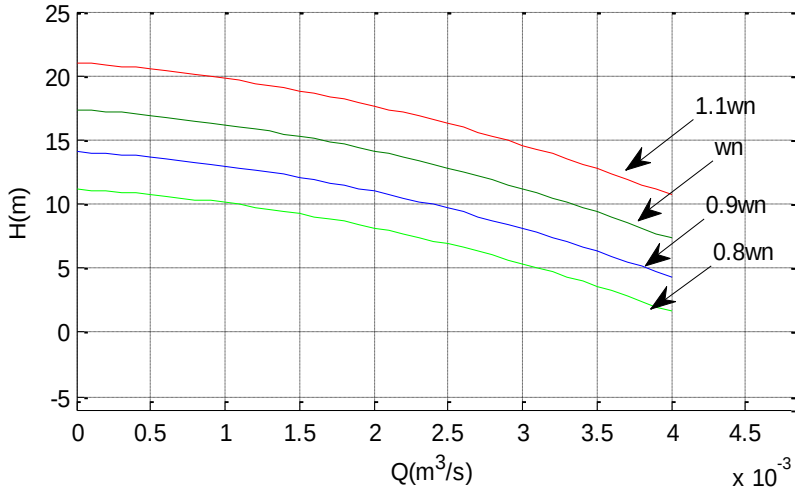


Figure 2.22 : Courbes *Q-H* pour différentes hauteurs et vitesses

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique en Watt est donnée comme suit [52]:

$$P_H = \rho * g * Q * H \tag{2.41}$$

L'autre expression à considérer est celle de la puissance en Watt absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprimée par :

$$P = 9.81 * Q * H / \acute{\eta}_p \tag{2.42}$$

Où η_p: est le rendement de la pompe et ρ la masse volumique de l'eau (1000 kg /m^3).

2.5.2.2 Courbe du rendement

Pour les groupes électropompes (pompe + moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement global, comme on peut tracer la courbe de rendement hydraulique en utilisant la formule:

$$\acute{\eta}_h = \frac{P_{hydraulique}}{P_{arbre}} \tag{2.43}$$

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 70 %.

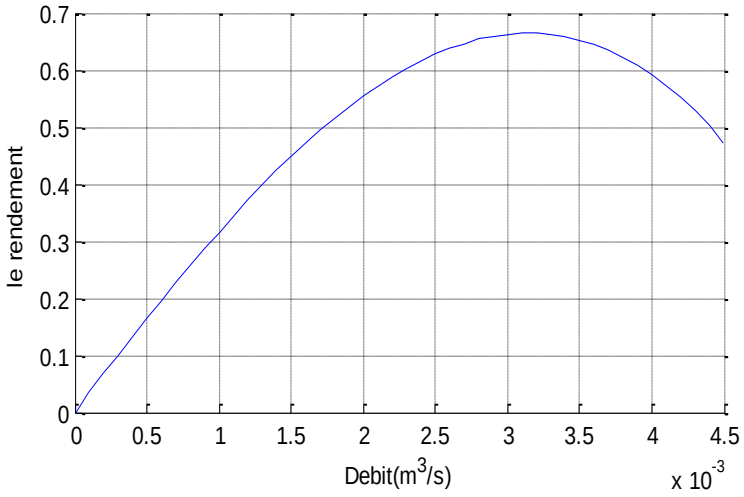


Figure 2.23: Rendement de la pompe centrifuge.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, le comportement électrique du module, générateur et cellule solaire photovoltaïque, Les simulations des caractéristiques principales du générateur photovoltaïque sont présentées.

Aussi nous avons abordée le système Motopompe, à commencer par la modélisation de la PMBLDC en se basant sur les équations électriques et mécaniques qui régissent le comportement de la machine,

On a présenté la commande floue de la machine à courant continu sans balais à aimant permanent (PMBLDC), et consacré à la pompe centrifuge, pour déterminer la marge admissible pour le fonctionnement du groupe motopompe.

Le générateur photovoltaïque(GPV) et son influence par la température et l'éclairement, la nécessité d'un convertisseur DC /DC entre un GPV et une charge pour la poursuite du point de puissance maximum, et l'algorithme MPPT, font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 03

Optimisation de fonctionnement du générateur photovoltaïque

CHAPITRE 03

OPTIMISATION DE FONCTIONNEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

3.1 Introduction

La stratégie de gestion de l'énergie photovoltaïque y compris le système de conversion d'énergie est un élément très important dans l'amélioration de l'efficacité. Une des stratégies de conversion d'énergie en cours de développement est la méthode pour trouver la puissance maximale du module PV qu'on appelle méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) [1]. La méthode MPPT trouve automatiquement la tension maximale ou le courant maximal du module PV au cours de lesquelles il fonctionnera pour atteindre le maximum de puissance sous certaine température et irradiation. Pour obtenir de bonnes performances, de nombreuses méthodes sont proposées pour être mises en œuvre dans le système de PV. Sur la base de l'algorithme de commande, ces méthodes de MPPT proposées peuvent être classées en méthodes classiques et intelligents. [53], [54]

Le système de conversion photovoltaïque est basé sur des blocs modulaires, comme représenté dans la figure (3.1) :

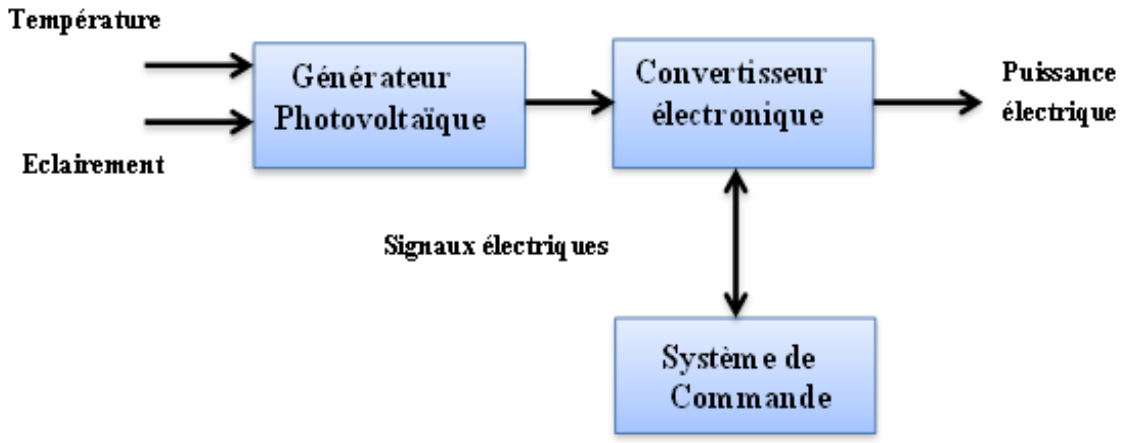


Figure 3.1 **:** Système de conversion photovoltaïque

Dans ce chapitre nous présenterons d'abord l'ensemble hacheur système de commande et, étudier le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, à savoir rechercher le point de puissance maximale (*MPPT*).

3.2 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale.

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés doit prendre en compte la nature même de la source. Pour un générateur photovoltaïque (*PV*), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Il faut donc arriver à concilier ces comportements avec ceux propres à une charge, qu'elle soit de nature continue (*DC*) comme des batteries ou bien alternative (*AC*) comme le réseau électrique 240V/50Hz. Dans ces conditions, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des deux caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge résistive *R*, [55], comme illustré dans la figure 3.2.

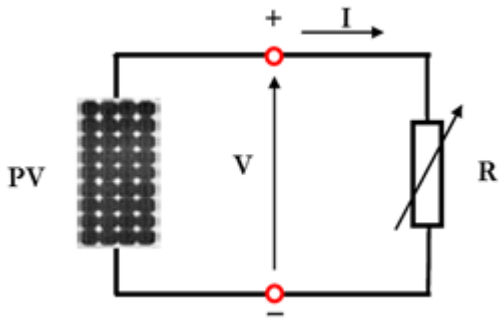


Figure 3.2 : Connexion directe d'un générateur photovoltaïque (GPV) – charge

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale [56], [32].

La technique adoptée classiquement consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge comme décrit dans la figure 3.3 ci-dessous. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible [55].

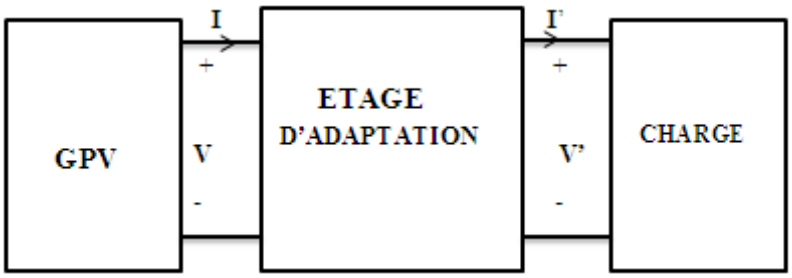


Figure 3.3 : Etage d'adaptation

3.3 Principe de la recherche du point de puissance maximal

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la figure 3.4. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance maximale disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS (IPV et VPV).), [34]. Dans la section suivante, nous présentons un bilan sur les différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature.

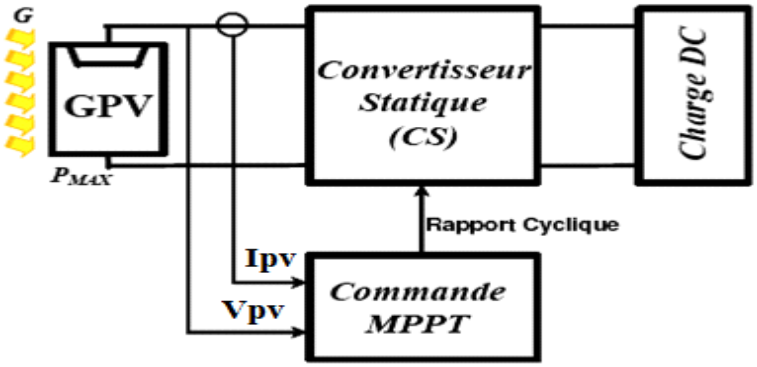


Figure 3.4: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC

3.3.1 Simulation du hacheur Boost avec MPPT

Les résultats de simulations montrés ci-dessous, ont été effectués pour un éclairement de 1000 W/m^2, une température de 25°C et une tension de sortie du bus continu fixé à 350V.

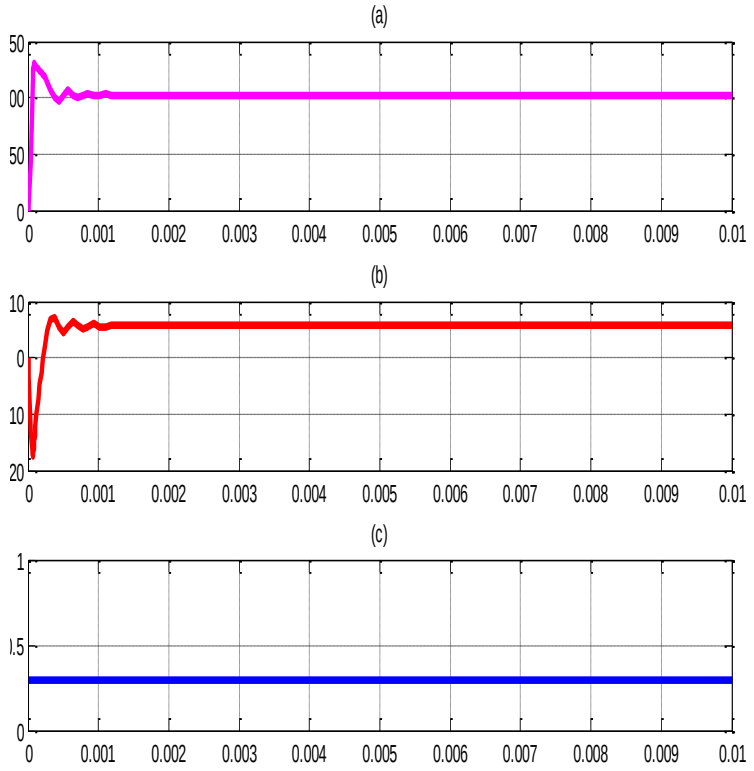
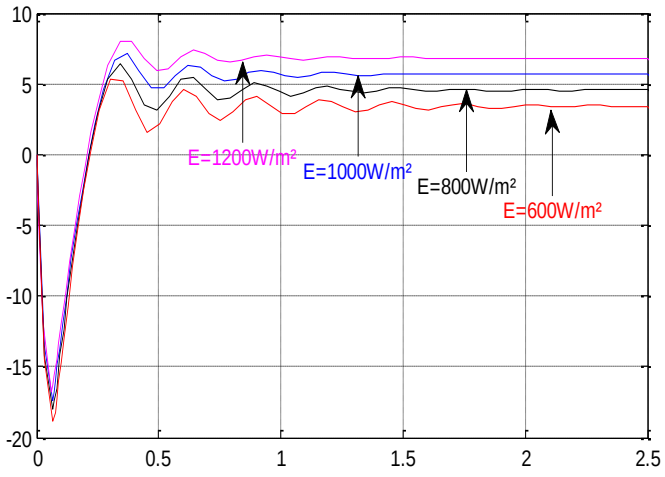


Figure 3.5: (a) La tension aux bornes du GPV ; (b) Le courant fourni du GPV ; (c) Le rapport cyclique D.

On remarque qu'en régime permanant la tension et le courant du GPV sont fixés au MPP. La figure 3.5 montre le rapport cyclique permettant au convertisseur DC-DC de forcer le GPV de fonctionner en ce point.

Les résultats de simulation montrant l'effet de l'éclairement sur le point de fonctionnement optimale du GPV est illustré dans la figure 3.6 ci-après:

(a)



(b)

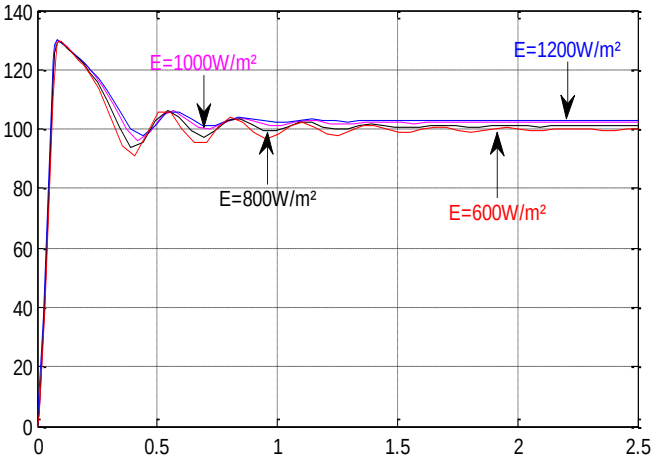
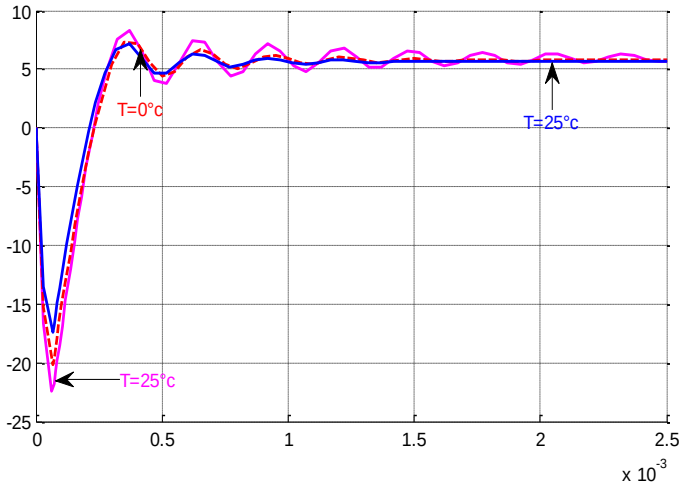


Figure 3.6: Effet de l'éclairement sur le fonctionnement du Boost : (a)Le courant fourni du GPV ; (b) La tension aux bornes du GPV.

Cette simulation nous montre clairement que le paramètre optimal variant en fonction de l'éclairement est le courant généré par le GPV. Par contre la tension optimale reste pratiquement constante.

Les résultats de simulation montrant l'effet de la température sur le point de fonctionnement optimal du GPV sont illustrés dans la figure 3.7 :

(a)



(b)

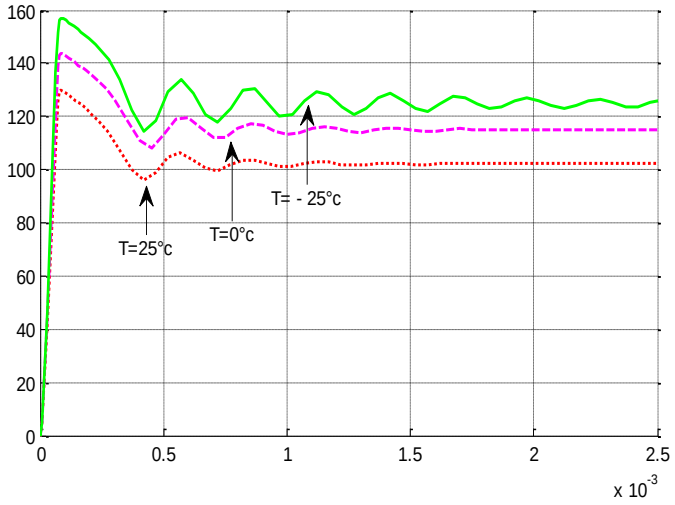


Figure 3.7 **:** Effet de la température sur le fonctionnement du Boost : (a)Le courant fourni du GPV ; (b) La tension aux bornes du GPV.

Cette simulation nous montre clairement que le paramètre optimal variant en fonction de la température est la tension aux bornes du GPV. Par contre le courant optimal reste pratiquement constant.

3.4 Classification d'algorithmes du suiveur de point maximum

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

3.4.1 Méthodes à contre réaction de tension

Dans ce cas on se base sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur.

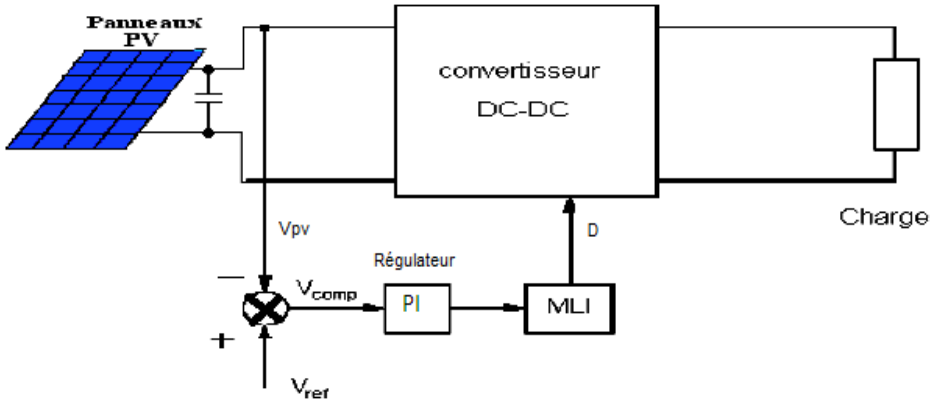


Figure 3.8: Méthode avec Contre-réaction de tension

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence: [1], [57], [58], [59].

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode à tension de référence en fonction de V_{0C}
- Tension de référence externe (Cellule pilote)

3.4.2 Méthodes à contre réaction de courant

3.4.2.1 Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit I_{sc}

Le courant de court-circuit du panneau solaire permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau. Le courant optimal est proportionnel au courant de Court-circuit, cette proportionnalité est presque constante en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. La fonction $Imp=f(Isc)$ est pratiquement linéaire et elle est de forme $Imp=k*Isc$. [1]

3.4.2.2 Méthode à courant de référence externe (Cellule pilote)

Dans cette méthode, l'utilisation d'une cellule pilote comme source d'information de courant de court-circuit de l'ensemble des panneaux est impossible par le fait de court-circuiter en permanence cette cellule cause un échauffement supplémentaire qui va fausser l'information générée par cette cellule et emmener sa destruction rapide. [57]

3.4.3 Méthodes classiques de commande MPPT

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $P_v=f(V_p)$ obtenue directement de la caractéristique du (GPV)). Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque $\frac{dp_v}{dV_p} = 0$ [60], [61].

Le point de puissance maximale (PPM) est présenté dans la figure 3.9 :

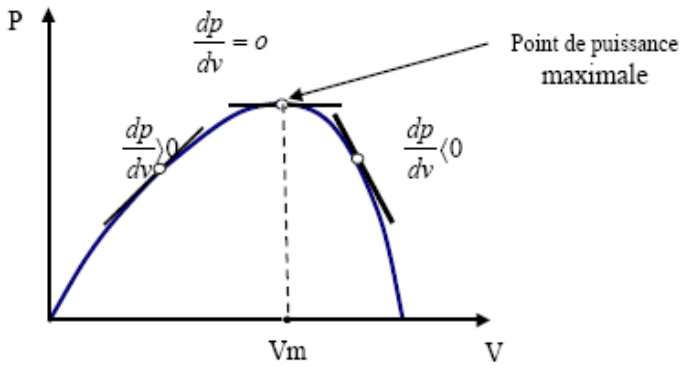


Figure 3.9 : Méthode 'perturbation et observation

3.4.3.1 Algorithme 'perturbation et observation' simple (P and O simple)

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de *Vref* où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie de panneau [60]. La figure 3.9 donne l'organigramme de cet algorithme.

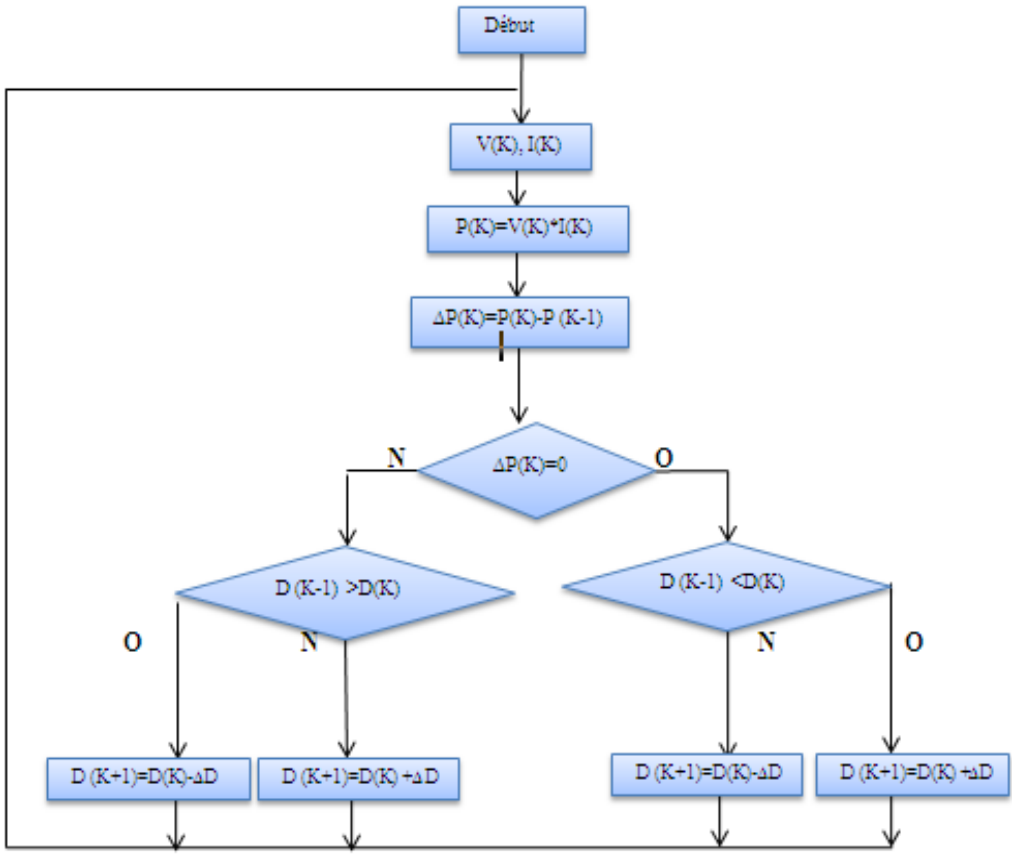


Figure 3.10: Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation

Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par Hussein et al [62], Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précèdent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.

3.4.3.2 Méthode par incrémentation de conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro [60], [61]. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP_V}{dV_p} = \frac{d(V_p * I_{pv})}{dV_p} = I_{pv} + V_p \frac{dI_{pv}}{dV_p} = 0 \qquad (3.1)$$

$$\frac{dI_v}{dV_P} = -\frac{I_{pv}}{V_p} \tag{3.2}$$

Le terme (I_{pv} / V_p) représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque, et (dI_v / dV_p) représente le terme d'incrémentation de conductance. Par conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l'inégalité de l'équation (3.1) indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum (PPM) [54].

$$\frac{dI_v}{dV_P} = -\frac{I_{pv}}{V_p}, \left(\frac{dP}{dV} = 0\right)$$

$$\frac{dI_v}{dV_P} > -\frac{I_{pv}}{V_p}, \left(\frac{dP}{dV} > 0\right)$$

$$\frac{dI_v}{dV_P} < -\frac{I_{pv}}{V_p}, \left(\frac{dP}{dV} < 0\right)$$

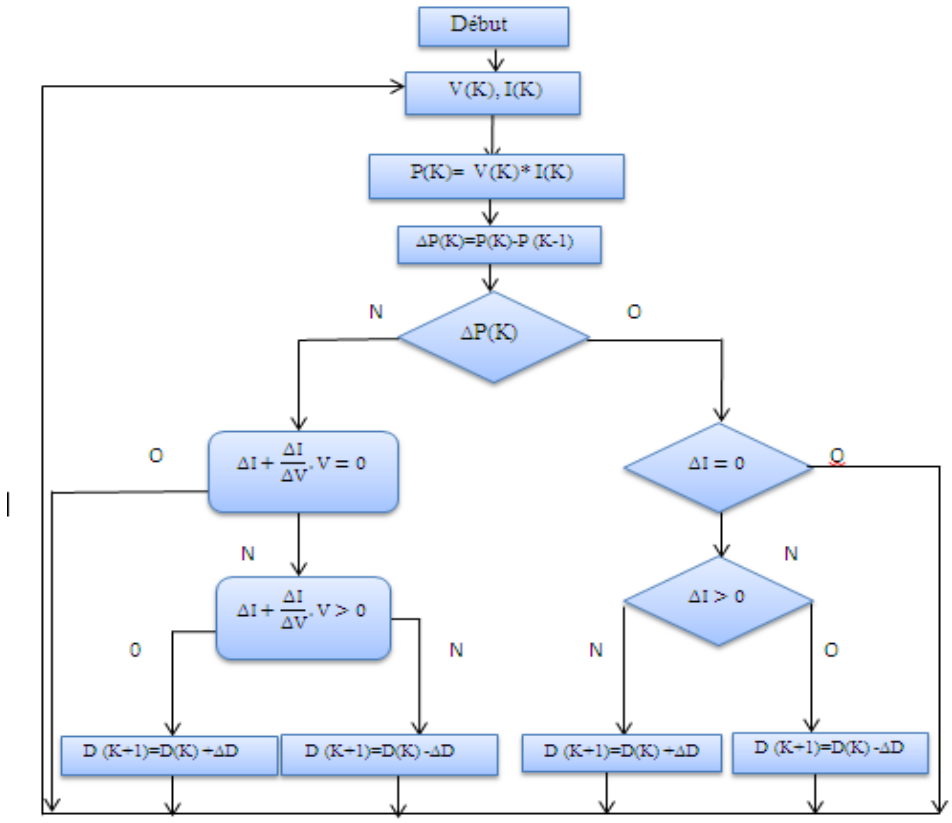


Figure 3.11 : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance

3.4.4 Principe de poursuite du point de puissance maximale par la logique floue

Dans ce qui suit, on va détailler les étapes de conception du contrôleur flou.

Dans un but de poursuivre le PPM; comme dans toutes les méthodes précédentes un convertisseur DC/DC (continu-continu) est généralement utilisé entre la source d'entrée (le générateur PV) et la charge.

Le contrôleur flou comporte les trois blocs suivants : Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire, ensuite l'inférence où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification cent roide [51], [63]. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la Figure ci-après:

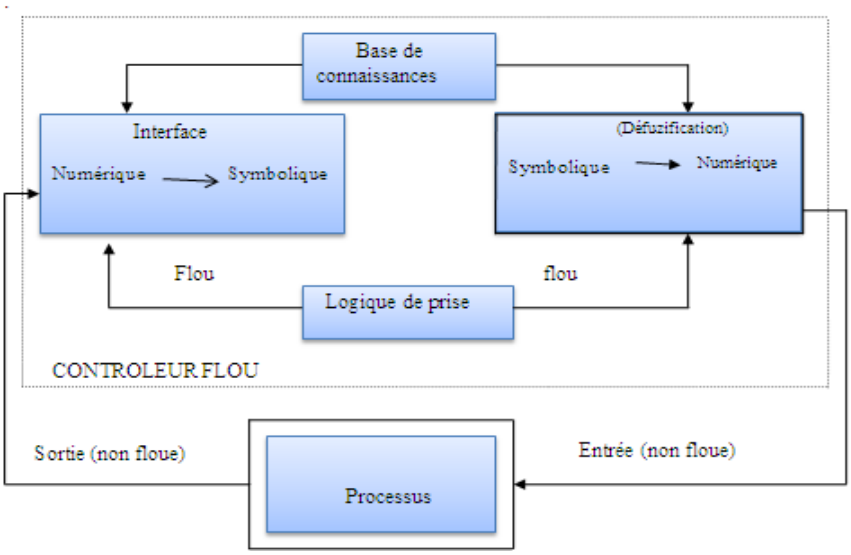


Figure 3.12 **:** Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

3.4.4.1 Fuzzification :

La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères concernant deux variables d'entrées de contrôleur proposé, à savoir l'erreur(*E*) et le changement d'erreur(*CE*), à un instant d'échantillonnage k [63], [48].

Les variables *E* et là *CE* sont exprimés comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \tag{3.3}$$

Où *P(k)* et *V(k)* sont la puissance et la tension de module PV, respectivement. Par conséquent, *E(k)* est zéro au point de puissance maximale du module PV.

Ces variables d'entrée sont exprimées en termes de variables ou étiquettes linguistiques telles que le *GP* (grand positif), *PP* (petit positif), *Z0* (zéro), *PN* (petit négatif),*GN* (grands négatifs) en employant les sous-ensembles flous de base.

3.4.4.2 Méthode d'inférence

Le tableau 3.1 montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur (*E*), le changement de l'erreur (*CE*) et le changement du rapport cyclique (*dD*) au convertisseur. Dans le cas de la commande flou, la règle de commande doit être conçue pour que la variable d'entrée *E* doive toujours être zéro.

Tableau 3.1 : règles floues (matrice d'inférences) [48]

E \ CE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	ZE	ZE	PG	PG	PG
NP	ZE	ZE	PP	PP	PP
ZE	PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP	NP	NP	NP	ZE	ZE
PG	NG	NG	NG	ZE	ZE

3.4.4.3 Défuzzification

La défuzzification peut être fonctionné normalement par deux algorithmes :

- la méthode de critère maximale (MCM)
- la méthode Centre une gravité

3.5 Résultats de simulation

3.5.1 Hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance

Le hacheur élévateur est commandé en boucle ouverte avec un rapport cyclique constant *(D=0.4)* Le schéma de simulation du hacheur dans l'environnement Matlab/Simulink est illustré dans la figure ci-dessous.

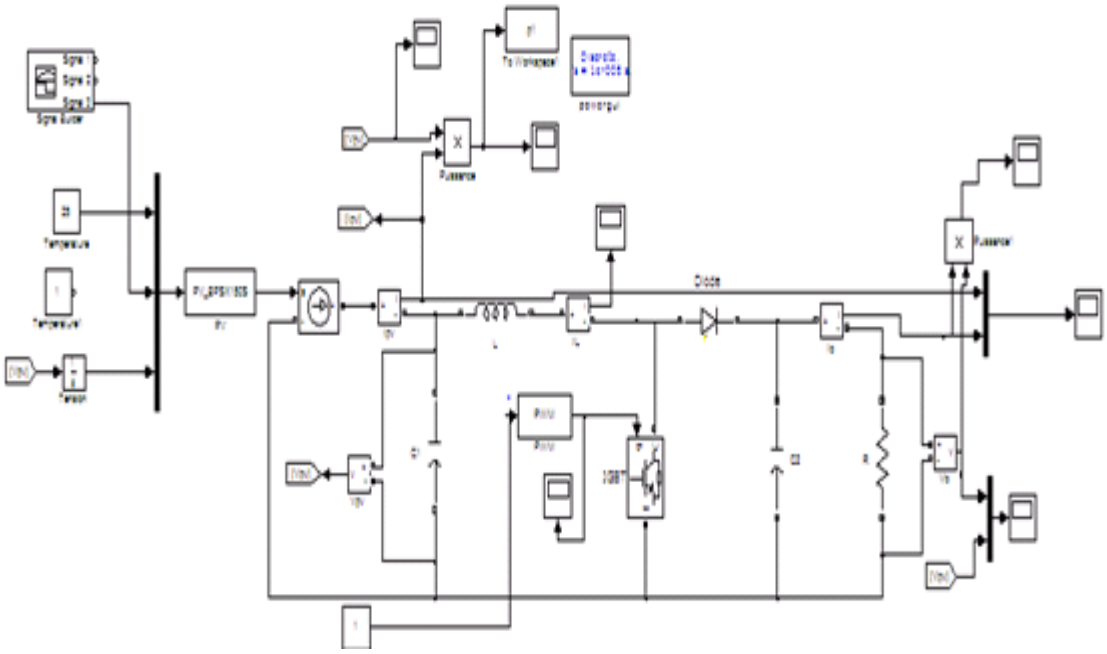


Figure 3.13: Schéma de simulation du hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance pour un rapport cyclique de 0,4.

Pour un éclairement de 1000 W/m^2, une résistance de charge de 7 Ω et un rapport cyclique de 0,4, la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque fluctue autour de la valeur de 55 W (figure 3.14).

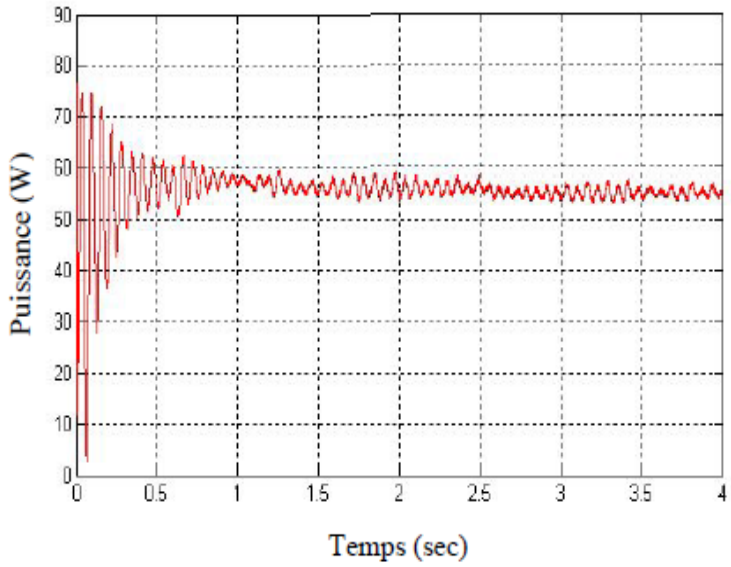


Figure 3.14 : Puissance de sortie du panneau photovoltaïque
(Hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance)

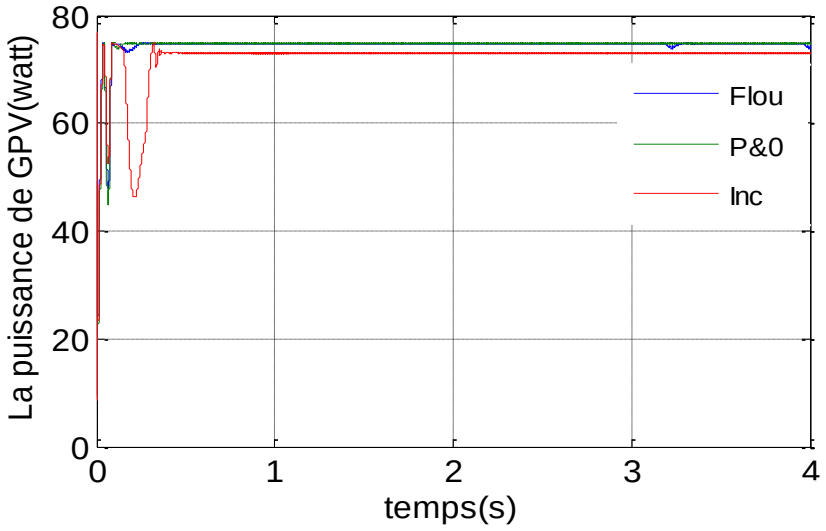
3.5.2 Etude du système solaire avec contrôleur MPPT

3.5.2.1 Fonctionnement sous des conditions constantes

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température=25°C et l'ensoleillement=1000W/m². Le but de ces simulations est de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point MPP. Il sert aussi à évaluer les pertes dues aux oscillations autour de ce point.

Les techniques à commande numérique de MPPT (P&O, Inc.- Cond, et logique flou) ont été simulées utilisant un convertisseur survolteur dans un environnement des niveaux d'ensoleillement constante. Un panneau solaire standard de **36** cellules solaires a été relié en série et par le convertisseur DC-DC relié à la charge résistive R =7Ω . La température de cellules a été maintenue à une valeur constante du 25°C tandis que l'ensoleillement égale à 1000 w/m².

Dans ce cas de simulations les paramètres (température T et l'ensoleillement G) sont maintenus constants. Les figures (3.15 ,16 ,17) montrent les signaux de la puissance de sortie du panneau solaire et sa tension de fonctionnement, et du rapport cyclique commandée par le contrôleur flou en utilisant un convertisseur survolteur. La sortie initial du MPPT a été placé à (*D=0.25*). Pendant les premières 4 secondes approximativement la tension monte rapidement à un niveau d'environ 17.4 V, où elle stabilise. Le MPPT parvient à ajuster le rapport cyclique *D* très rapidement tels qu'un résultat de puissance stable est atteint. Après ce point la puissance de sortie ne change pas puisque le panneau solaire fonctionne sous conditions constantes.



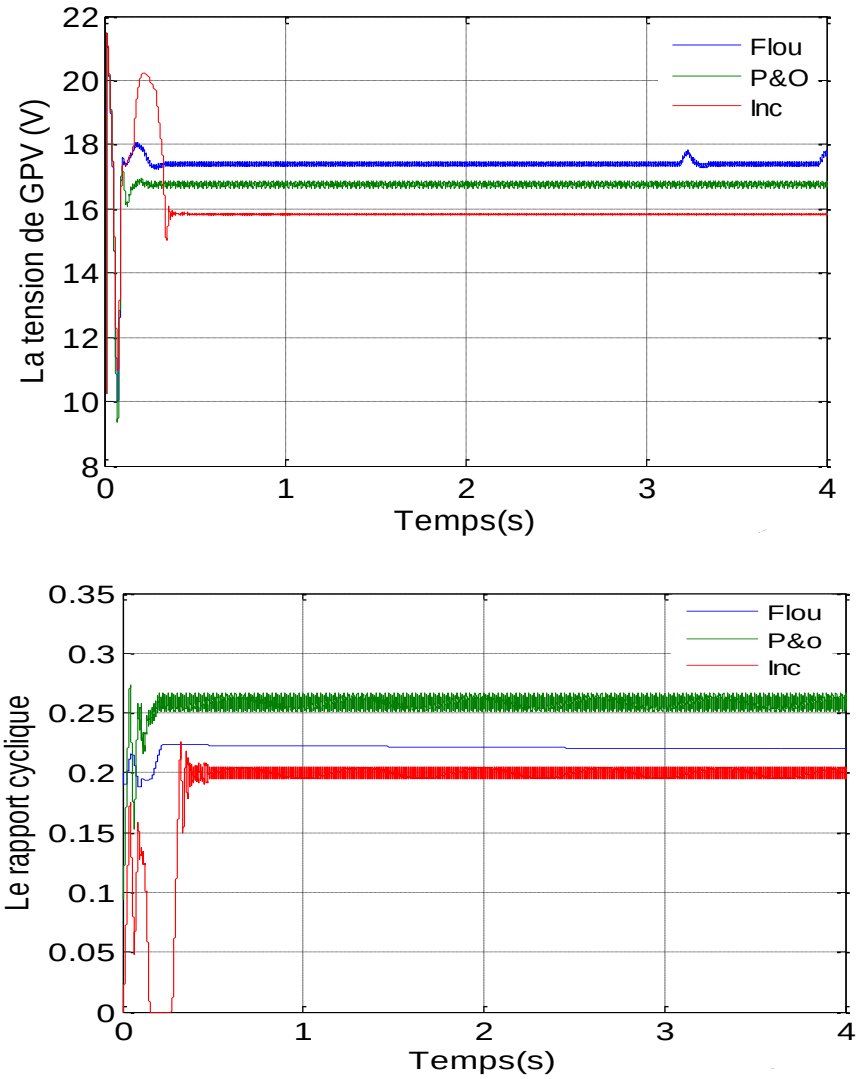
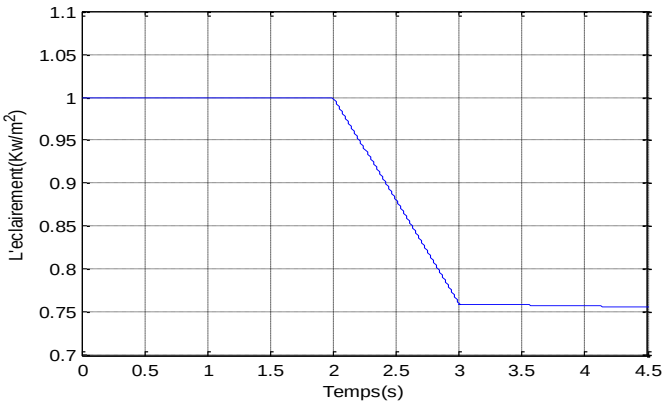


Figure (3.15, 16, 17):comparaison de la simulation de la technique (MPPT) entre la logique floue et P&O et Inc.-Cond avec un convertisseur survolteur. À un ensoleillement de 1000w/m2 pour une charge résistive (R= 7).

3.5.2.2 Comportement du système face à un changement de l'éclairement



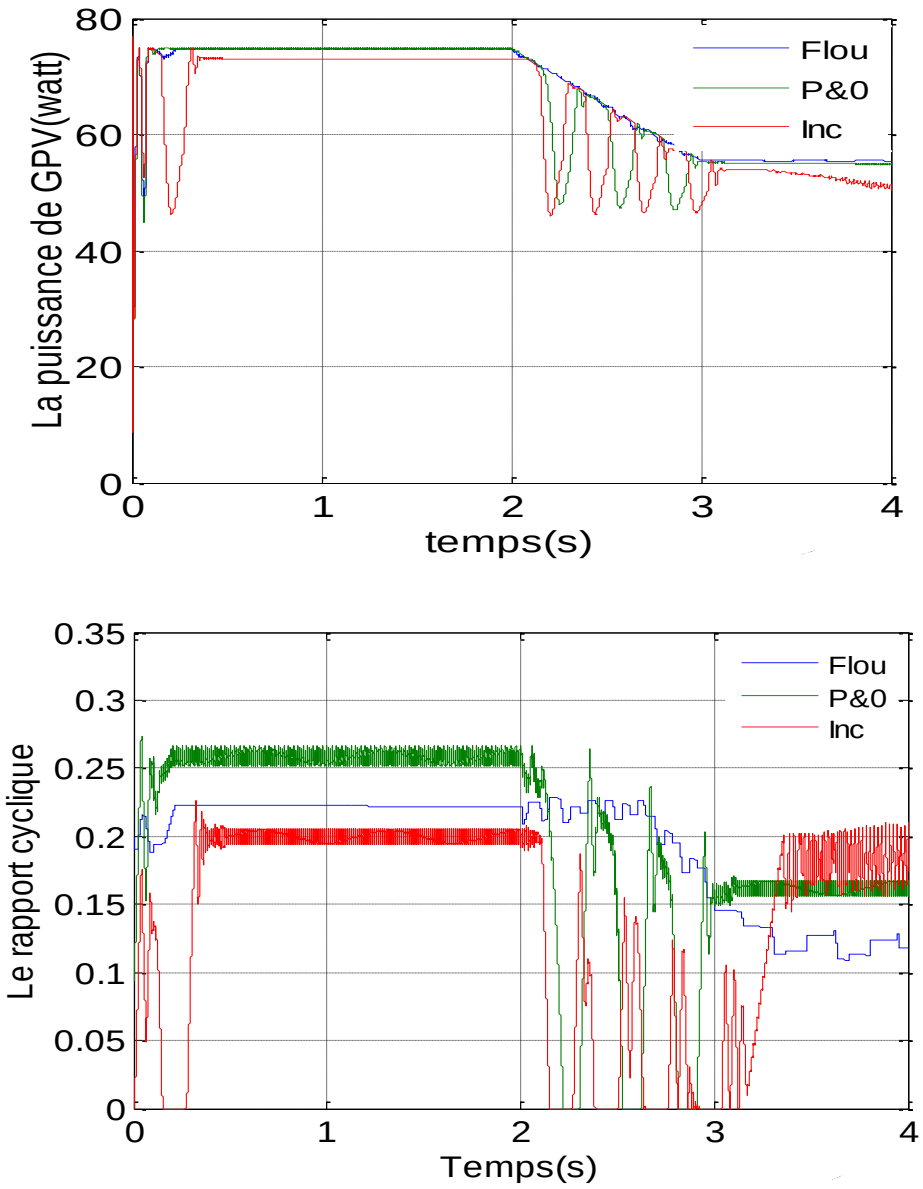


Figure 3. 18,19: Comparaison des divers signaux MPPT pour la puissance, et la variable de commande D sous les niveaux décroissants rapidement de l'éclairement.

Une diminution lente de 1000W/m² à 750W/m² de l'ensoleillement dans un intervalle de 1s (voir figure 3.18) avec une température constante de 25°C est simulée. Cette diminution d'ensoleillement cause bien sûre une diminution de la puissance pour les deux systèmes.

Dans ces conditions, pour le contrôleur MPPT P and O et inc-cond on remarque l'effet de la diminution rapide de la puissance causée par une diminution de l'ensoleillement. Dans ce cas cette technique continue à perturber le système dans la même direction alors qu'il est dans le mauvais sens, ce qui engendre une déviation du point de fonctionnement du vrai MPP.

Cette déviation une fois l'ensoleillement stabilisé prend quelque temps pour être récupéré, et cause un retard, ce qui implique une chute d'efficacité du système.

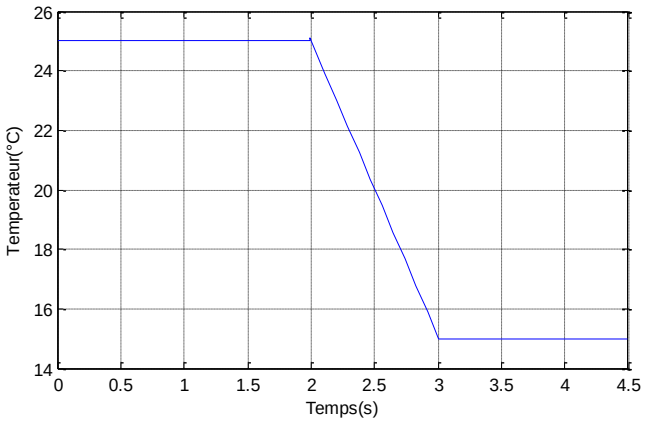
La technique de la logique floue présente l'avantage de travailler: une fois le point de puissance maximale capturé. Cela est bien lisible sur la figure précédente.

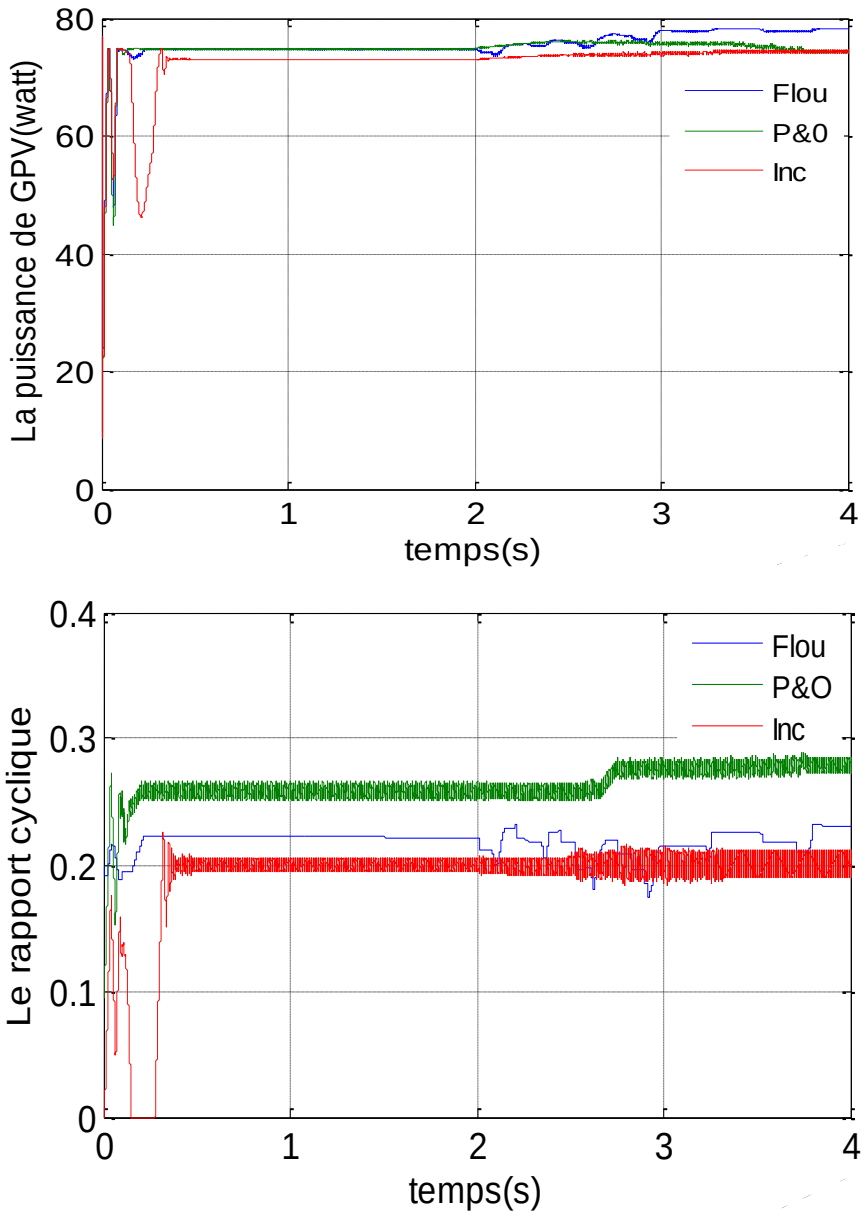
La courbe du rapport cyclique du contrôleur flou montre des oscillations importantes générées par cette technique à cause du changement du pas d'incrémentation important utilisé. C'est le résultat des règles floues lorsqu'une grande pente est détectée, mais cela conduit à l'augmentation de la vitesse de réponse du système.

3.5.2.3 Le fonctionnement sous les niveaux de température changeants

Les figures (3.20, 21) montre les signaux du rapport cyclique de la PWM et la puissance pour les trois contrôleurs MPPT Flou, P and O et inc-cond pour une diminution rapide de la température de 25°C à 15°C dans 1 sec, avec un ensoleillement de 1000W/m. La remarque tirée est que le contrôleur flou poursuit parfaitement l'augmentation linéaire de la puissance, tandis que les autres contrôleurs fait un retard.

On fait subir le système PV à une diminution de la température de 25°C à 15°C durant un temps de 1s avec un ensoleillement de 1000W/m². Cette diminution rapide produit une augmentation rapide de la puissance du système avec le contrôleur flou, avec un taux important d'ondulations dans la phase transitoire du changement du rapport cyclique. Le contrôleur flou étudié se comporte parfaitement vis-à-vis de ce changement. Tandis que la méthode P and O effectue un retard bien lisible sur la figure 3.21.





Figures 3.20, 21 **:** Rapport cyclique et puissances pour les contrôleurs MPPT Flou, P and O et Inc. pour une diminution rapide de la température de 25°C à 15°C durant un temps de 1s avec un ensoleillement de 1000W/m².

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a appliqué différentes commandes MPPT sur l'association panneau photovoltaïque-hacheur-charge résistive afin de définir leurs caractéristiques notamment vis-à-vis la variation des conditions climatiques (l'éclairement et La température). Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque et de la charge, pour différentes valeurs d'insolation et de température, ont été obtenus en simulant les contrôleurs

MPPT flou, P and O et Inc.

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur p and o mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a des meilleures performances, temps de réponse rapide et l'erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Chapitre 04
Optimisation de système de pompage photovoltaïque

CHPITRE 04

OPTIMISATION DE SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE

4.1 Introduction

Dans ce chapitre l'optimisation du système motopompe est effectuée par l'intégration entre l'onduleur et le générateur photovoltaïque un hacheur qui garantit l'extraction de la puissance optimale et ce grâce à l'algorithme MPPT.

En effet, ainsi nous avons comparé deux algorithmes d'extraction de la puissance maximale à savoir, l'algorithme P&O et l'algorithme floue. Une comparaison de la performance de ces deux algorithmes a permis de conclure sur les hautes performances de la logique floue aussi bien en régime transitoire qu'au régime permanent

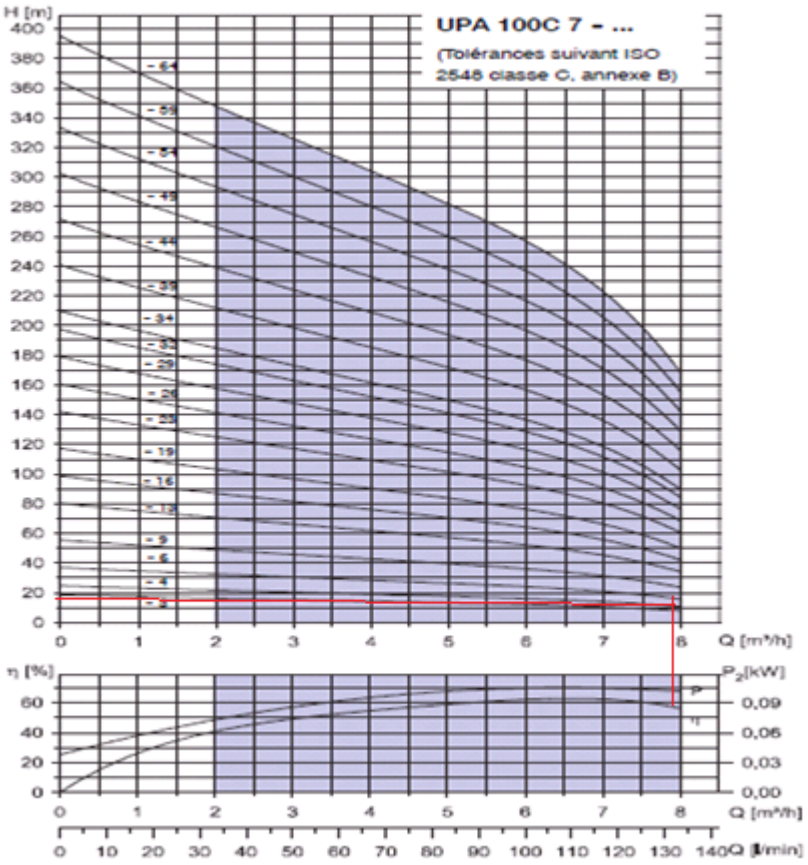
4.2 Description du système de pompage étudié

Ce système contient un contrôleur interne de courant à hystérésis et une boucle de régulation de vitesse externe pour le fonctionnement optimal du groupe motopompe, un algorithme de poursuite du point de puissance. La fonction MPPT est assurée par un convertisseur DC/DC de type élévateur.

4.2.1 Choix de la motopompe et du générateur PV

Le choix de la puissance de la pompe a été dicté par la puissance de moteur, lui-même dicté par un choix arbitraire de débit (2.75l/s. 14m). Les abaques donnée par la figure nous on permit le choix de la pompe [64]. Dans le tableau donné ci-dessous :

Groupe UPA-100c	Puissance Nominale de moteur KW
3	0,37
4	0,55
6	0,75
9	1,1
13	1,5
16	2,2
19	2,2
23	3,0
26	3,0
29	3,7
32	3,7
34	4,0
39	5,5
44	5,5
49	5,5
54	7,5
59	7,5
64	7,5



- Le générateur photovoltaïque utilisé dans cette étude est à la base de BPSX75. [31]. Le module est composé de 36 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 75 W.

4.3 Couplage direct (GPV - Charge)

Le système de pompage à couplage direct, est un système simple, fiable et moins coûteux parce qu'il n'inclut pas de régulateurs de tension. Ses avantages ont mené à son utilisation très répandue à travers le monde.

Le générateur n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, c'est la charge elle-même qui fixe le point de fonctionnement. Pour garder la quantité d'énergie débitée par le générateur à la valeur maximale, il faut forcer le système à fonctionner au maximum de la Caractéristique P-V du générateur.

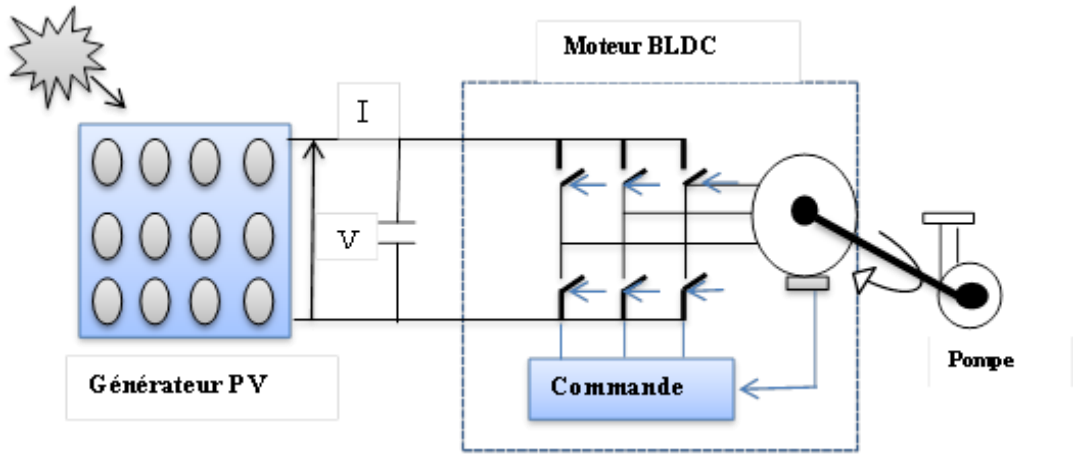
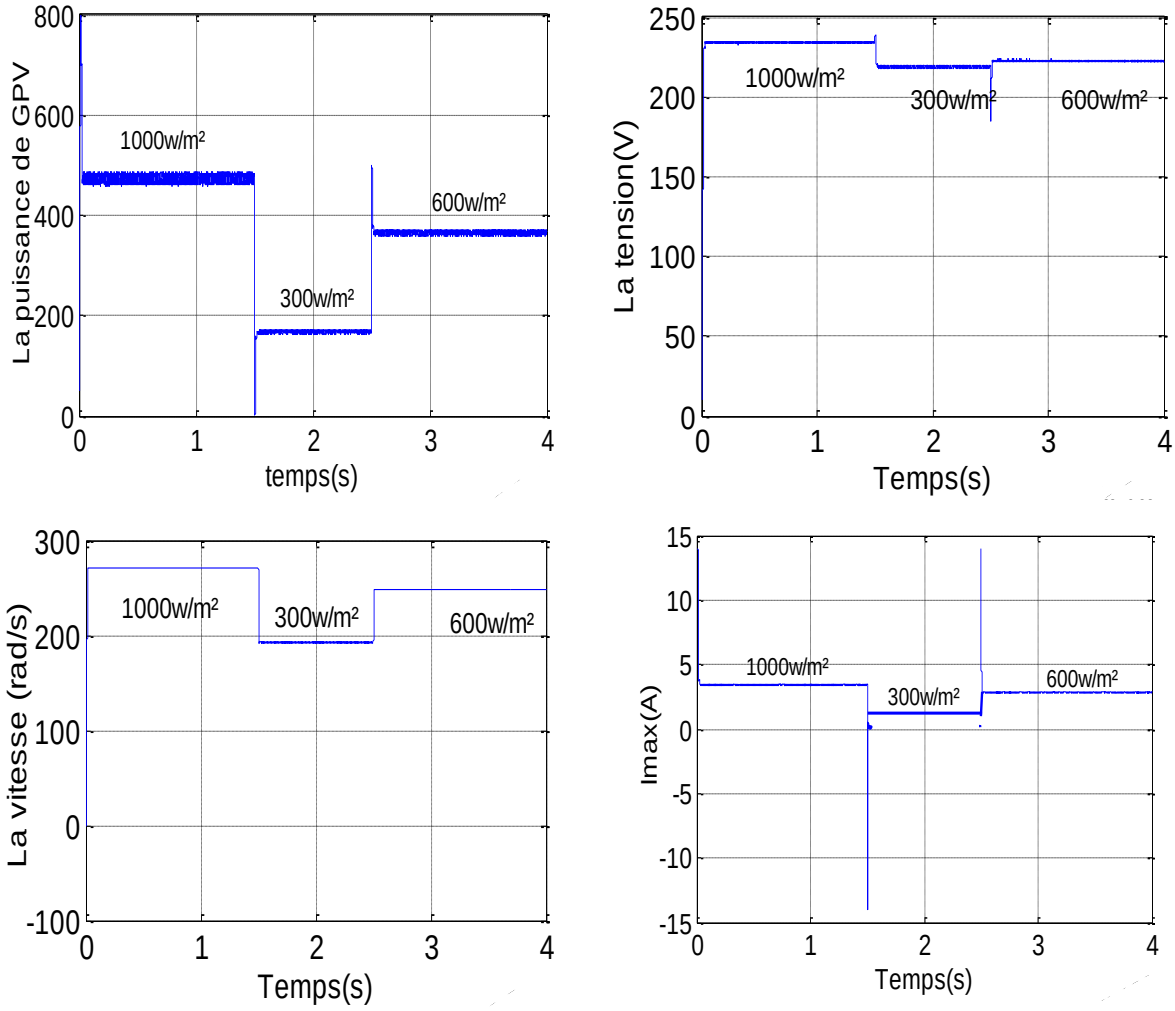


Figure 4.2 **:** Le couplage direct

- Les nombres de panneaux série et parallèle seront :

$$N_s = 16 \;\; N_p = 1 \qquad\qquad P_{Gpv} = 16 * 1 * V_{max} * I_{max} = \; 1200\; W$$

4.3.1 Résultats de simulation de couplage direct



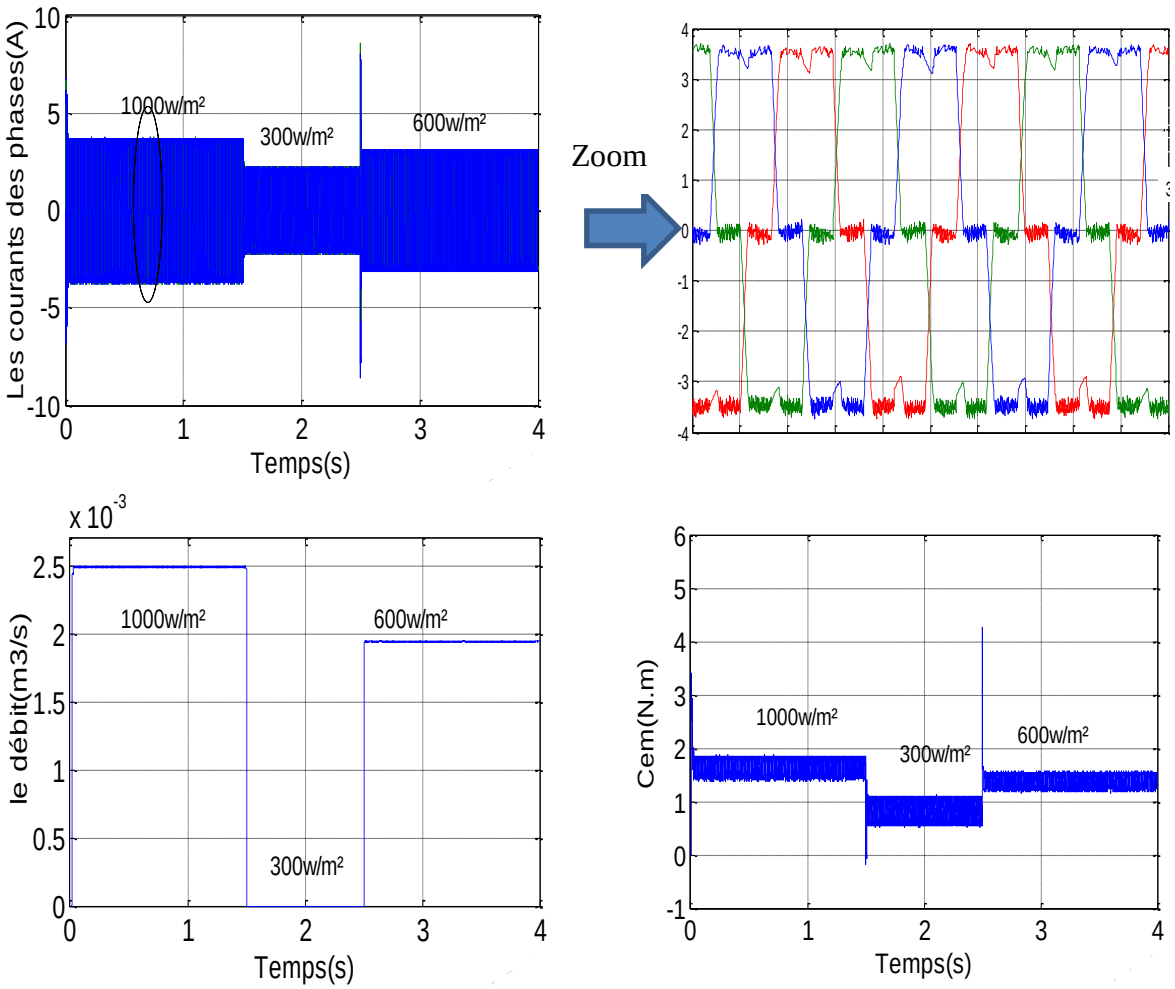


Figure 4.3 : Résultat de simulation du système de pompage d'eau à couplage direct (Générateur PV –- onduleur – PMBLDC – Pompe).

Malgré les avantages du couplage direct, tels que la simplicité, le coût faible et la possibilité de bonnes performances, il reste néanmoins que ce type de couplage n'est possible que dans des conditions spécifiques (température, éclairement, type et paramètres de la charge). Alors, il faut faire appel à des techniques plus sophistiquées dans la majorité des applications.

4.4 L'optimisation de système de pompage par méthode P & O

La technique d'optimisation utilisée, soit la méthode de perturbation et observation Cette technique consiste en la maximisation de puissance électrique et ce, pour le générateur photovoltaïque et pour la quantité d'eau pompée pour des paramètres climatiques données (éclairement, température). Le sheama de principe donnée ci-après :

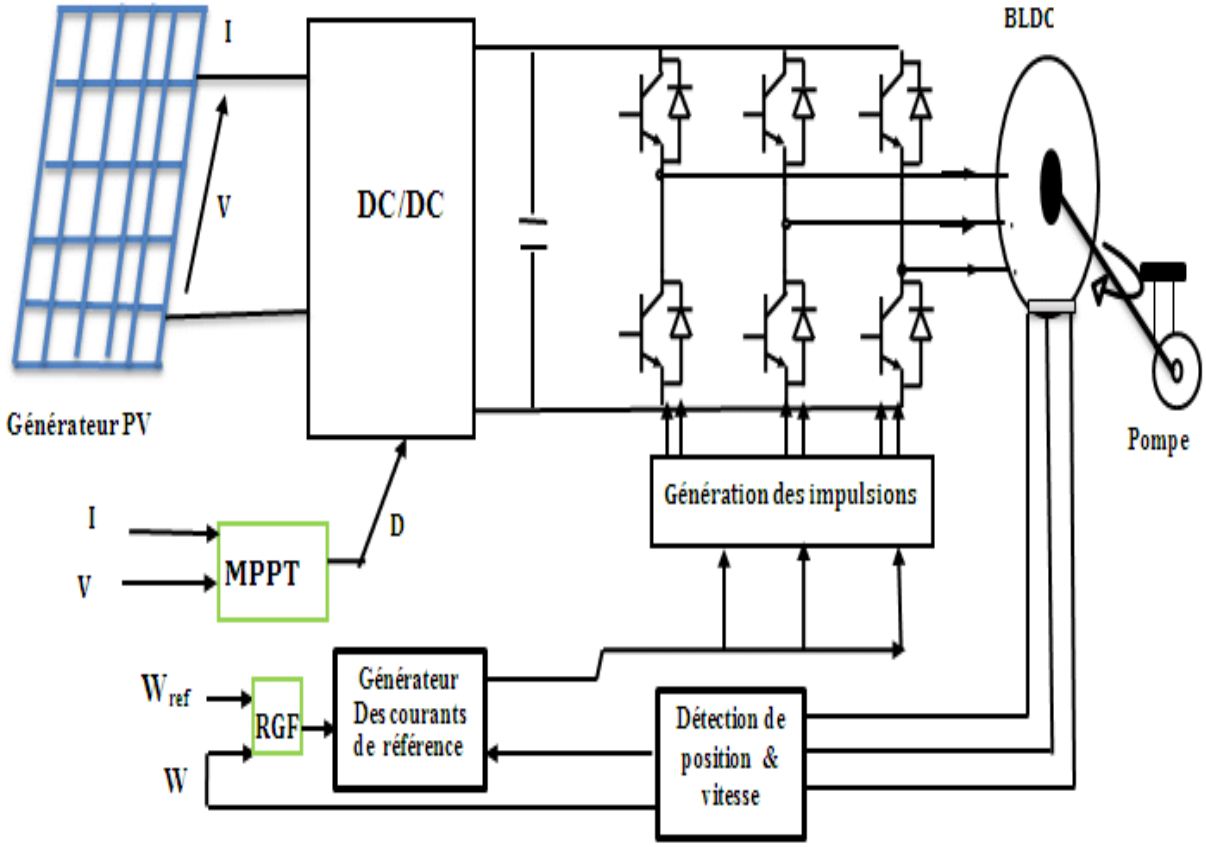


Figure4.1 : couplage indirect

4.4.1 Synthèse de fonctionnement du système

L'algorithme de recherche du point de fonctionnement à la puissance maximale se fera de la façon suivante: Déterminer, pour un éclairement et une température donnée, la caractéristique I(V) du générateur et le point de puissance maximale.

Déterminer la vitesse optimale de référence de la machine en fonction des caractéristiques du générateur photovoltaïque, qui sont elle-même fonction de l'éclairement et de la température et ce, à travers de la procédure suivante :

$$P_p = k_p * w^3 \tag{4.1}$$

$$P_{mec} = \frac{P_p}{\eta_p} \tag{4.2}$$

η_p : Le rendement de la pompe

P_p : La puissance de la pompe.

La puissance de moteur lui aussi peut être déterminée en fonction du rendement comme suit:

$$P_m = \eta_m * p_c \tag{4.3}$$

η_m : Rendement du moteur

P_c : Puissance à la sortie du convertisseur.

La vitesse optimale en fonction des valeurs maximales du courant et de la tension du générateur photovoltaïque est :

$$w_{ref} = \sqrt[3]{\frac{\eta_h * \eta_c * \eta_m * \eta_p * I_{max} * V_{max}}{k_p}} \tag{4.4}$$

Cette vitesse sera la référence de la boucle de régulation de vitesse.

4.4.2 Résultats de simulation

Selon les simulations effectuées, on a pu remarquer que pour le système de pompage, la vitesse rotorique suit sa référence avec un faible décalage en régime de démarrage. Quant au couple électromagnétique du moteur, il oscille autour du couple résistant de la pompe après un régime transitoire. Même remarque constatée pour les courants de phases (suit la valeur de référence).

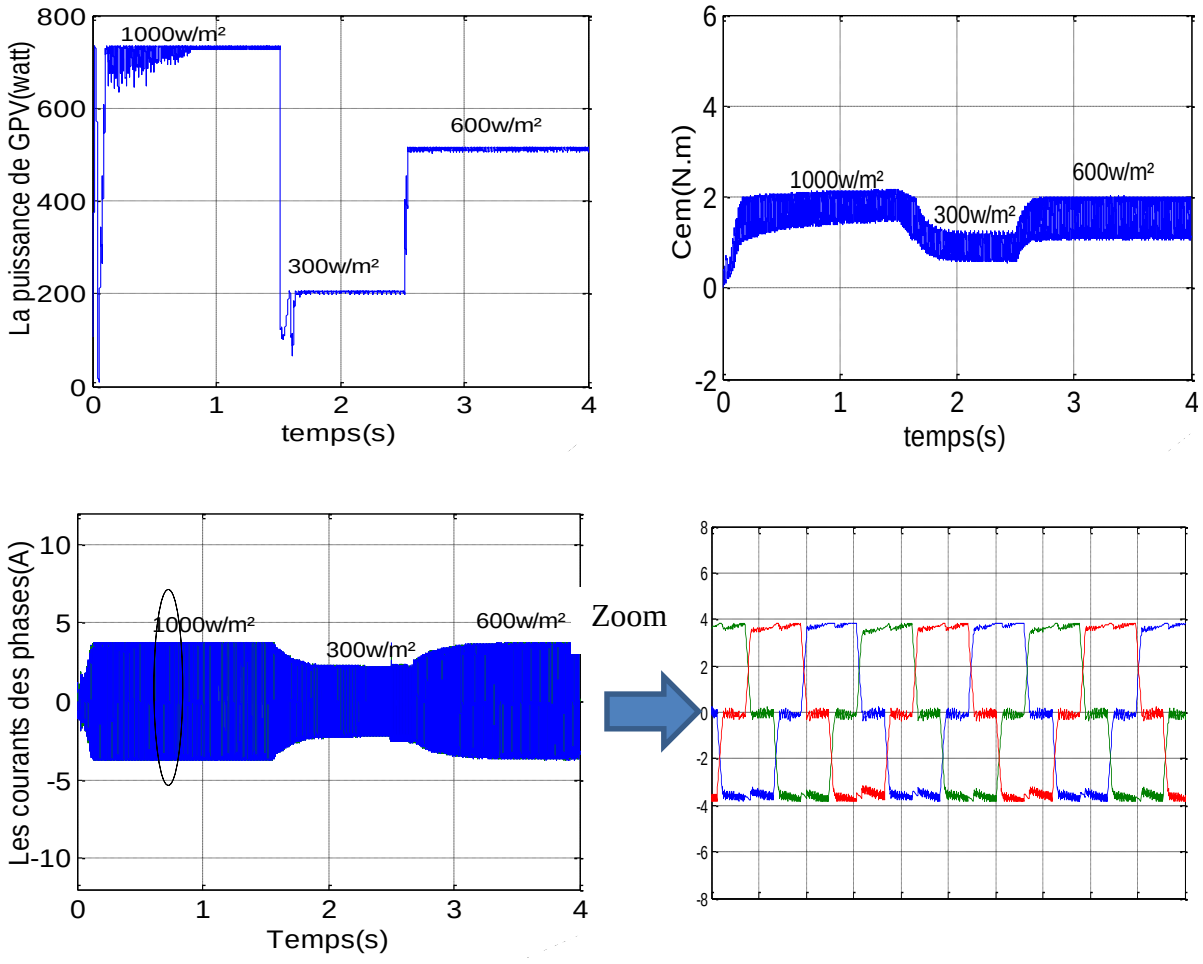
Pour les conditions climatiques donnés (1 kW/m2, T=25°C), le système de pompage à couplage direct, a besoin de 16 panneaux photovoltaïques associés en série pour produire une tension de 230 V à l'entrée de l'onduleur et une puissance de 750W assurant un débit d'environ 2.75 l/s pour une HMT de 14 m.

Pour les mêmes conditions climatiques (1 kW/m2, T=25°C), le système de pompage muni d'un hacheur élévateur avec commande MPPT, a besoin de 10 panneaux photovoltaïques (10 panneaux associés en série sur deux branches) pour produire une tension de 2 30 V à l'entrée de l'onduleur et une puissance de 750W assurant un débit d'environ 2 ,8l/s pour une HMT de 14 m.

Les résultats de simulation illustrés par les figures 4.4 concernent le groupe motopompe (PMBLDC + pompe) alimenté par un GPV fonctionnant en régime dynamique, c.à.d. lorsqu'il y a une variation brusque de l'éclairement.

Après un temps de réponse t = 0,3 s, les grandeurs (vitesse, tension et puissance du GPV) se stabilisent, après chaque niveau d'éclairement appliqué. On constate aussi qu'il y une oscillation pour les différents grandeurs à cause de la technique de MPPT parce ce dernier oscille aussi autour de point de puissance maximale surtout pour les faibles éclairements.

Plus les commutations au niveau de l'onduleur de tension et du hacheur et par la loi de commande qui impose les temps de commutation. Ceci augmente le temps de réponse du système. Les résultats montrent qu'il existe un gain entre le mode du couplage direct et le couplage optimisé selon les trois niveaux d'éclairement appliqués. (1000w/m², 300w/m², 600w/m²).



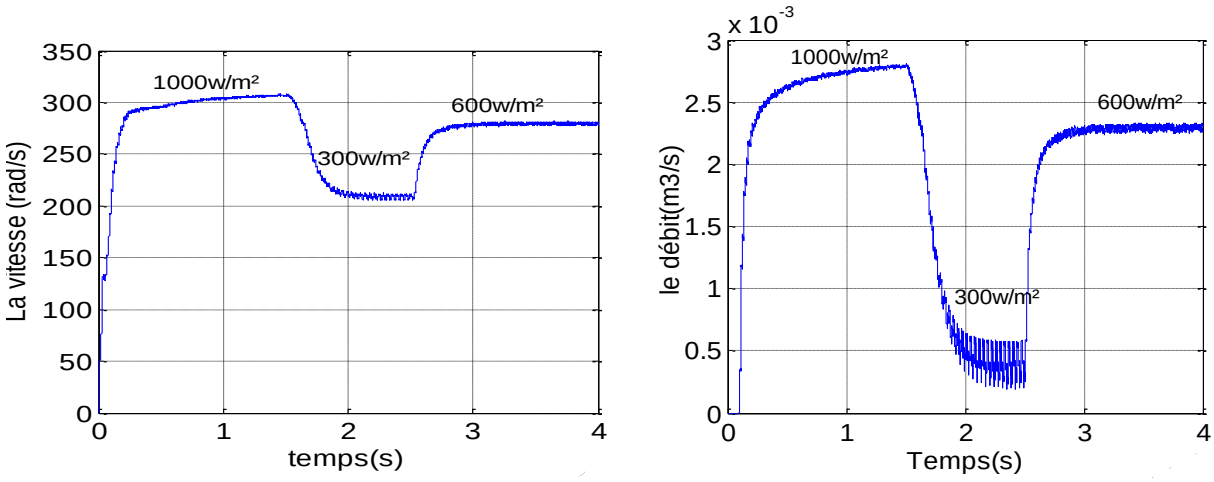


Figure 4 .4 : résultats de simulation de couplage indirect avec P&0

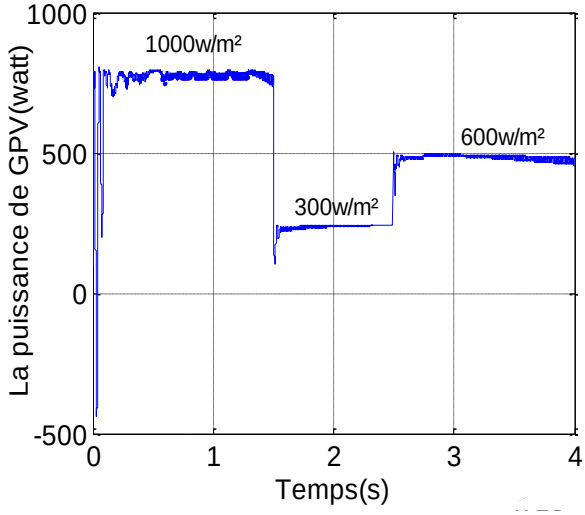
- G=1000W/m², (figure 4.4.) où la valeur de la puissance maximale du GPV est de 730 W correspondant un courant optimal de 3.8A varie autour d'une valeur de référence, ainsi qu'à une vitesse de 300 rad/s. On en déduit donc un gain de 9.08 % pour la vitesse, 46.6 % pour la puissance, 11,70 % pour le couple et 6.6% pour le courant de phases, et de 2.75% pour le débit de pompe, entre les deux modes de couplages.

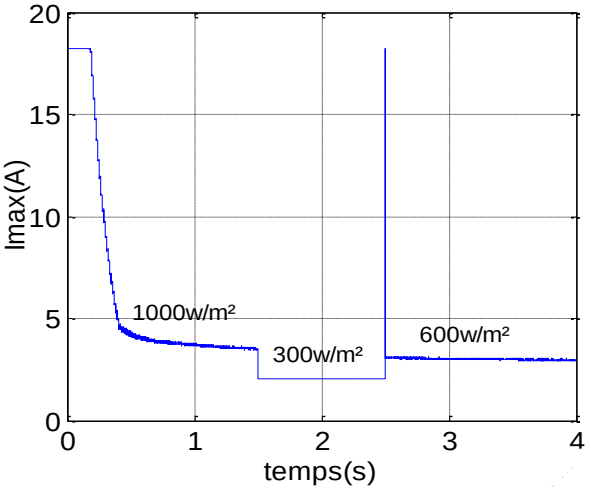
- Pour une diminution d'éclairement de 300 W/m², il y a une diminution de puissance électrique maximale jusqu'à 205 W, un courant optimal de 2 A. De même la vitesse et le couple ont diminué respectivement d'environ 209 rad/s et 1.1A, ce qui correspond à des pourcentages de 11.88%, 25%, 33%,29.4% et 20%, respectivement pour la vitesse, le courant, la puissance, couple et débit.

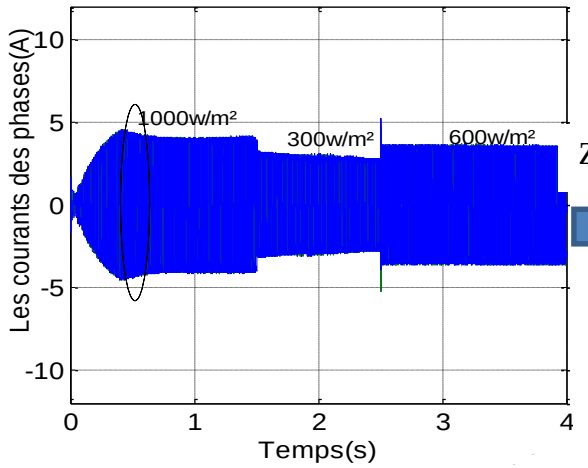
- Une autre augmentation brusque d'éclairement de 600 W/ m², qui donne une puissance électrique maximale est de500W, correspondrait à un courant optimal de 3.4 A respectivement. De même, la vitesse et le couple auront des valeurs d'environ 260 rd/s et de 1.6 N.m respectivement. On en déduit donc un gain de 25% pour la puissance, 4% pour la vitesse et 14% pour le débit.

4.5 Application de la logique floue

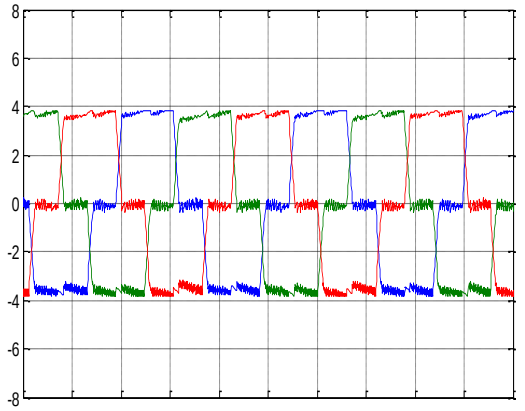
4.5.1 Résultats de simulation

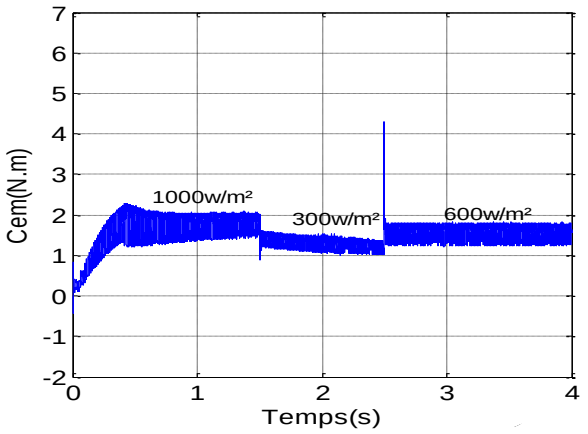


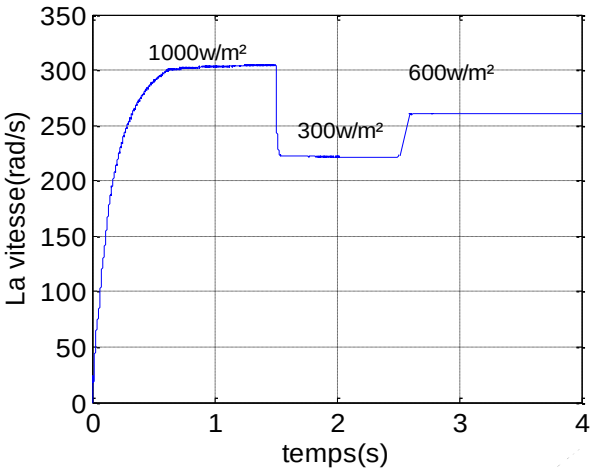




Zoom







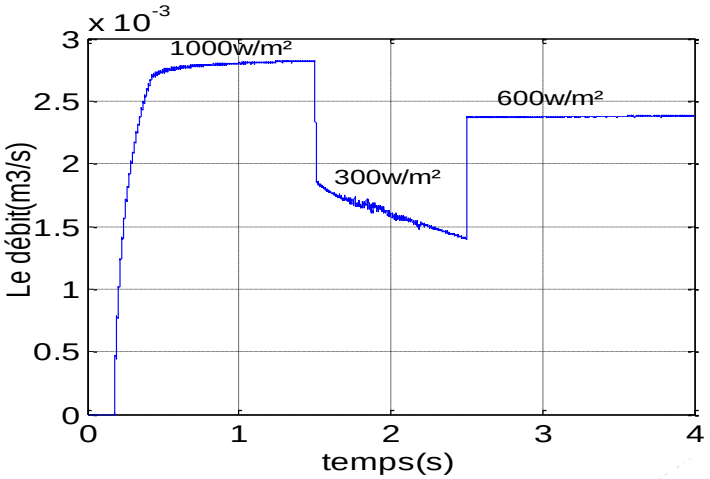


Figure 4.5: Résultat de simulation du système de pompage d'eau

(Générateur PV – Hacheur Boost avec MPPTfloue - Onduleur – PMBLDC – Pompe)

4.5.2 Interprétation

Les résultats de simulation illustrés par les figures 4.5 représentent les allures de puissance délivrée par le GPV, ainsi que la tension, le courant.la vitesse, le couple électromagnétique, le débit de pompe et le courant maximal de sortie du régulateur.

A partir des caractéristiques ci-après et en vérifiant le principe de la commande floue de vitesse, La figure montre les réponses dynamiques de la vitesse, du couple et de Imax, respectivement. La valeur de référence du courant maximal (Imax) est calculée à partir de la référence générée du couple constant On choisit les deux coefficients, d'erreur et la variation d'erreur, pour permettre de changer la sensibilité du régulateur flou sans en changer la structure. Ce sont ces derniers qui fixeront les performances de l'optimisation et la forme des différentes grandeurs, que ce soit au niveau d'ondulation ou du temps de réponse.

Toutes les grandeurs (vitesse, puissance et courant du GPV), se stabilisent après un temps de réponse t = 0,3 s, après chaque niveau d'éclairement appliqué. Ainsi on constate qu'il y une oscillation pour les différents grandeurs à cause de la technique du MPPT et de la fréquence du hachage, mais on constate qu'il y a une amélioration remarquable.

Si nous appliquons, chaque 1.5 s, trois niveaux d'éclairement tels que G=1000 W/m², G=300W/m² et G=600 W/m² successivement avec une température constante de T=25°C, selon les résultats de simulation illustrées sur les figures 4.5., on remarque une augmentation remarquable (puissance, tension, courant, vitesse et débit) comparativement avec celles non optimisées pour les trois niveaux d'éclairement appliqués.

Au premier palier d'éclairements, l'optimisation n'a presque aucun effet sur les différentes grandeurs étudiées mais on remarque que la puissance prendre la valeur maximale 760 w. Une diminution brusque d'éclairement à 300W/m² ferait chuter la vitesse d'environ 225 rad/sec et la valeur du courant de moitié, alors que l'optimisation augmenterait les différentes grandeurs (courant, puissance, vitesse, couple), d'environ 64%, 28%, et 20.44% et 44.44%, respectivement. Pour le troisième palier d'éclairement (600W/m²), l'optimisation augmenterait les différentes grandeurs (courant, puissance, vitesse, couple), mais de façon plus réduite par rapport au deuxième palier, d'environ 12%, 35%, et 4.9%,25% respectivement.

Donc l'optimisation est meilleure pour les faibles éclairements, jusqu'à 800 W/m², elle sera presque non observable pour des éclairements supérieurs à 1000 W/m².

Pour les allures de débit, au couplage direct et la logique floue. Dans le cas du couplage direct le système le système ne commence a délivré de l'eau qu'à un éclairement de plus de 300(W/m^2), par conséquent la maximisation de puissance force la pompe à fournir de l'eau à partir 200(W/m^2).

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'application de la logique floue et la méthode p & O pour l'optimisation du système de pompage, entrainant une pompe centrifuge afin d'améliorer ses performances dynamiques.

On a simulé, pour les mêmes conditions climatiques et les mêmes exigences de pompage (débit + hauteur manométrique), deux systèmes de pompage photovoltaïque. Le premier est à couplage direct (Générateur PV – Onduleur – PMBLDC – Pompe) et le deuxième est à couplage indirect (Générateur PV – Hacheur boost avec MPPT - Onduleur – PMBLDC – Pompe).

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a porté sur la modélisation et la simulation des systèmes de pompage photovoltaïque. Ces systèmes se présentent comme une solution idéale pour l'alimentation en eau pour les régions isolées.

Dans cette étude, nous avons présenté les modèle mathématiques qui régissent le fonctionnement de chaque composante du système globale à savoir : le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC permettant l'optimisation de la puissance de sortie du GPV et enfin le groupe motopompe.

Afin d'avoir un meilleur rendement du GPV, nous avons procédé à une étude comparative d'algorithmes d'extraction du point de puissance maximale où ceux obtenus par la logique floue ont montré des meilleurs performances. Une étude comparative entre un couplage direct et via un étage d'adaptation a été également présenté afin de montré l'apport énergétique supplémentaire du couplage indirecte.

Les résultats de simulation obtenus on adopte la logique floue ont montré sa robustesse que soit en régime transitoire ou en régime établi. Pour une variation brusque de l'éclairement un meilleur temps de réponse et de faible oscillation ont été obtenu par la logique floue. En ce qui concerne le régime permanant, cette approche a donnée de meilleur résultats en comparaison avec les méthodes classique (Ex : P&O). De plus cet algorithme présente moins de sensibilité aux variations paramétriques du GPV.

Enfin, les performances des systèmes de pompage photovoltaïque présente des meilleurs rendements avec le moteur à courant continu sans balais qu'avec les moteurs à courant continu classique. Seulement, on peut dire que ce dernier demande un cout supplémentaire pour son fonctionnement optimal à savoir l'ajoute d'un convertisseur DC/AC pour le séquencement de ces phases.

Quant aux perspectives que nous proposons, pour la poursuite de ce modeste travail, sont résumés ci-dessous :

- L'optimisation de système de pompage photovoltaïque par d'autres techniques de l'intelligence artificielle comme les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous.

- Développer des lois de commande à base des techniques intelligentes et ceux-ci en vue de surmonter les problèmes de non linéarité du modèle imposé par la source PV et la charge. Par ailleurs, l'amélioration du bilan énergétique pourrait être examinée en considérant le niveau du flux rotorique comme un degré supplémentaire dans la procédure d'optimisation.

Références bibliographiques

BIBIOGRAPHIE

[1] S. M. Ait-Cheikh: « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïque». Thèse de Doctorat Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

[2] R. Chenni: « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.

[3] M. Arrouf : « Optimisation d l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.

[4] M. Nabil, S. M. Allam, and E. M. Rashad: « Performance Improvement of a Photovoltaic Pumping System Using a Synchronous Reluctance Motor». Electric Power Components and Systems, 41:447–464, 2013.

[5] J. Appelbaum, M.S. Sarme: « The operation of a permanent magnet DC motors powered by a common source solar cells», IEEE Trans. on energy. conv, Vol 4, pp635-642,1989.

[6] A. Labouret, M. Viloz : « Energie solaire photovoltaïque ». Edition le Moniteur, Dunod, 2éme Edition, 2005.

[7] A. Labouret et al : « Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque », Collection: ETSF, ETSF, 5éme Edition, 2010.

[8] R. Pernick, C. Wilder: « The Clean Tech Revolution: Winning and Profiting from Clean Energy » Edition HarperCollins e-books, 2009.

[9] A. Chiron, « Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre », Edition Public book, 2003.

[10] Christian NGO, «Le Soleil », Editions Le Cavalier Bleu, Idée reçu, Juin 2005

[11] G. Tamizhmani et al, « Photovoltaic Module Power Rating per IEC 61853-1 Standard » Report of Arizona State University, Photovoltaic Reliability Laboratory (PRL), March 2011.

[12] P. Wurfel : « Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts », Edition Wiley & Sons, February 2009.

[13] S. Makhloufi : « Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes». Thèse de doctorat en science université de Batna 2013.

[14] A. Mcevoy, L. Castaner and T. Markvart: « Solar cells », Edition Elsevier, 2012.

[15] E. Lorenz et al: « Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems. », report of the Universidad Politécnica de Madrid., 2000.

[16] D. Y. Goswani: « Principles of Solar Engineering »; Taylor and Francis, second ed., 2000.

[17] Q. Kou, S.A. Klein, W.A. Beckman : « A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems », Solar Energy, Volume 64, Issues 1–3, September 1998, Pages 33–40

[18] M. Akbaba, and al: « Matching Of Separately Excited Dc Motors To Photovoltaic Generators For Maximum Power Output», Solar Energy, Vol. 63, N0. 6, 1998, pp.: 375-385.

[19] V. C. Mummadi: « Steady State And Dynamic Performances Analysis Of PV Supplied DC Motors Fed From Intermediate Power Converter», Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol-61, 2000, pp.: 365-381.

[20] A.A. Ghoneim: « Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems». Energy Conversion and Management 47 (2006) 1449–1463.

[21] M. A. Elgendy, B. Zahawi, Senior Member, IEEE, and D. J. Atkinson: « Comparison of Directly Connected and Constant Voltage Controlled Photovoltaic Pumping Systems». IEEE Transactions on sustainable energy VOL. 1, NO. 3, October 2010.

[22] J. R. Potebaum : « Optimal Characteristics Of A Variable Frequency Centrifugal Pump Motor Drive», IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, N. 1, pp. 23-31, Feb. 1984

[23] W.R Anis et al, «Coupling of a volumetric pump to a photovoltaic array», Solar cells, Vol.14, pp27-42, 1985.

[24] D. Weigner and at Levinson: «Watt pumping optimal operation », Electrical Machines and power system, Electric machines and components, Vol 24, N°3, pp277-288, 1996.

[25] D. Langrigge et Al:« Development of a photovoltaic pumping system using brushless DC motor and helical rotor pump »,, Solar energy, Vol 56,N°2, pp151-160,1996

[26] Swamy, C.L.P: «Dynamic performance of permanent magnet brushless DC motor powered by a PV array for water pumping». Solar. Energy. Mater. Sol. Cells 36, 187–200.1995

[27] B. Azoui. : «Concept and realization of a three-phase brushless DC motor for solar application», Doctor d'états Es'-Science, University of Batna 2002

[28] « Magtech Brushless Motor Source Book ». Axsys Technologies, Inc. Motion Control Products San Diego. April, 2002.

[29] I.H .Altas, A.M. Sharaf: «A novel on –ligne MPP search algorithm for PV array», IEEE Trans on Energy. Conv. Vol 11, N°4, pp. 748-754, 1996.

[30] Akihiro OI, « Design and simulation of photovoltaic water pumping system», Master Thesis California Polytechnic State University, 2005.

[31] K. Benlarbi, L. Mokrani, M.S. Nait-said: « A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system ». Solar Energy 77 (2004) 203–216.

[32] M. Angel Cid Pastor : « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques». Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.2006.

[33] L. Zarour : «Étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseaux», Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.

[34] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance : Conversion DC/DC », Laboratoire d'électronique industrielle, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

[35] A. Varsani: « Low Cost Brushless DC Motor Controller ». Bachelor of Engineering. University of Queensland. November, 2003.

[36] R. K. Srivastava et all: « PM enhanced sensing of internal EMF variation – a tool to study PMBLDC/AC motors», International journal on smart sensing and intelligent systems, VOL. 6, NO. 4, September 2013.

[37] H. B. Hansen et all: « A Hybrid Model of a Brushless DC Motor ». 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control. Singapore. October. 2007.

[38] K. Jois et all: « implementation of BLDC motor drive for automotive water pump». International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology, Volume 1, Issue 1, March, 2013.

[39] S. Rama Reddy et all: « Modeling and simulation of closed loop controlled VSI fed PMBLDC motor », International Journal of Advanced Engineering Technology E-ISSN 0976-3945.

[40] T.V. Narmadha et all : «speed control of PMBLDC drive with gate control method using conventional and fuzzy controller», International Journal of Engineering Science and Technology,Vol. 2(11), 2010, 6663-6674.

[41] J. Faiz et all: « Simulation and Analysis of Brushless DC Motor Drives Using Hysteresis, Ramp Comparison and Predictive Current Control Techniques ». Simulation Practice and Theory 3 (1996) 347-363. Science Direct. December, 1994.

[42] H. B. Hancen, et all: « A Hybrid Model of a Brushless DC Motor ». 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control. Singapore. Octobre. 2007.

[43] C. Gencer, et all: « Modeling and Simulation of BLDCM Using MATLAB/SIMULINK ». IEEE Journal of Applied Sciences 6 (3): 688-691, 2006.

[44] S.D. Sudhoff, P.C. Krause: « Average-Value Model of the Brushless DC Motor 120° Inverter System ». IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL, 5, No. 3. September, 1990.

[45] A. Moussi, A. Torki: « An improved efficiency permanent magnet brushless DC motor PV pumping system». *LARHYSS* Journal, N°.01, Mai 2002.

[46] A. Terki: « control flou- génétique hybride d'un moteur BLDC dans un système de pompage photovoltaïque ».thèse de doctorat, université de Beskra. 2011.

[47] M. Cunkas, O. Aydogdu: « Realization of FUZZY logic controlled brushless dc motor drives using MATLAB/SIMULINK». Mathematical and Computational Applications, Vol. 15, No. 2, pp. 218-229, 2010.

[48] M. Algazar, et all: «Maximum power point tracking using fuzzy logic control», Electrical Power and Energy Systems 39 (2012) 21–28.

[49] L. Wang, H. L. Yongkuisun: « Fuzzy Control Based on Self-adjusted Parameter for Brushless DC Motor ». IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. China. August, 2007.

[50] J. Royer Thomas, D E. Schiller: « Le pompage photovoltaïque». Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens. IEPF / Université d'Ottawa / EIER.

[51] A. Hamidat, et all: « performances costs of the Centrifugal and displacement pumps ». Pp1951-1954, WREC1998.

[52] D. Weiner and. A. Levinson. "An optimal operation design of a photovoltaic dc motor Coupled water pumping system» Electric machine and power system, Vol .24 N°24, p, 277-288. 1996.

[53] I. Purnama, et all*:* « A Fuzzy Control Maximum Power Point Tracking Photovoltaic System ». 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems June 27-30, 2011.

[54] V. Salas et all: « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems». Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 1555–1578.

[55] C. Alonso : «Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie». Mémoire En vue de l'obtention de L'habilitation à diriger les recherches. 2003

[56] R. Andoulssi: « étude d'une classe de système photovoltaïques par une approche bond graph : modélisation, analyse et commande ». Thèse de doctorat université de Lille 2001.

[57] M. Veerachary, et all, «Voltage-based maximum power point tracking control of PV systems», IEEE Trans. AEROSP. Electron. Syst., vol. 38, pp. 262–270, Jan. 2002

[58] Z. M. Salameh, F. Daghar, W.A. Lynch: « Step-down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems », Solar Energy, Vol. 46, N° 5, pp. 279-282, 1991

[59] Z. Salameh S, D. Taylor, « Step-up maximum power point tracker for photovoltaic arrays », Proc. Of the 1988 annual meeting of the American Solar Energy Society, Cambridge, USA, pp. 409-414, 20-24 June 1988.

[60] D. Petreus, et all: « A novel maximum power point tracker based on analog and digital control loops». Solar Energy 85 (2011) 588–600. 2007.

[61] A, Zegaoui, M. Aillerie1, P. Petit1, J.P. Sawicki, A. Jaafar, C. Salame and J.P. Charles: « Comparison of Two Common Maximum Power Point Trackers by Simulating of PV Generators». Energy Procedia 6 (2011) 678–687

[62] K.H. Hussein, et all: «Maximum photo-voltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions», In IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution, volume 142(1), pages 59-64. January 1995.

[63] P.Takun, et all: « Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Control for Photovoltaic Systems». IMECS 2011

[64] KSB S.A.S. 4, allée des Barbanniers - 92635 Gennevilliers Cedex (France)
www.ksb.fr

Annexes

ANNEXS

A. Annexe 01

A.1 Pompage à l'aide d'un moteur à courant alternatif(PMBLAC).

La résolution du modèle du MSAP associé aux équations électriques et mécaniques et de la pompe centrifuge respectivement permet d'obtenir les points de fonctionnement *I(V),* du groupe MSAP pompe couplé au générateur photovoltaïque,

A.1.1 Modèle mathématique de la MSAP :

- **Equations électriques**

Les équations électriques du stator et du rotor d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents sans amortisseurs s'écrivent :

- Au stator

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad \text{(A.1)}$$

R_s : Résistance par phase statorique.

V_a, V_b, V_c : Les tensions des phases statoriques.

i_a, i_b, i_c : Les courants des phases statoriques.

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

- Au rotor

$$[V_f] = [R_f][i_f] + \frac{d}{dt}[\varphi_f] \quad \text{(A.2)}$$

i_f: Le courant rotorique.

R_f : La résistance rotorique.

V_f: La tension rotorique.

- **Equations magnétiques**

Le flux total qui traverse chaque bobine peut être décomposé en flux propre de la même bobine et des flux mutuels provenant des autres bobines.

- Flux statorique

$$\begin{bmatrix}\varphi_a\\ \varphi_b\\ \varphi_c\end{bmatrix} = [L_s]\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix} + [M_{sf}]\begin{bmatrix}i_f\\ 0\\ 0\end{bmatrix} \quad \text{(A.3)}$$

- Flux rotorique

$$[\varphi_f] = [L_f]\begin{bmatrix}i_f\\ 0\\ 0\end{bmatrix} + [M_{sf}]\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix} \quad \text{(A.4)}$$

φ_f: Flux constant dû aux aimants permanents

L_f : L'inductance propre rotorique.

M_{sf}: La mutuelle inductance rotorique.

- **Equation mécanique**

L'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine :

$$J\frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f_c\Omega_r \quad \text{(A.5)}$$

Avec :

$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$: La vitesse de rotation de la machine.

C_r: Le couple résistant.

C_e: Le couple électromagnétique.

J : Le moment d'inertie de la machine tournante.

p : Le nombre de paires de pôles.

ω_r: La vitesse électrique du rotor.

f_c: Le coefficient de frottement.

Donc le modèle de la MSAP peut s' écrire :

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}\varphi_d - \omega_r \varphi_q \quad \text{(A.6)}$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt}\,\varphi_q + \omega_r\,\varphi_d$$

Avec:

R_s: Résistance par phase statorique;

L_d: Inductance suivant l'axe d ;

L_q:Inductance suivant l'axe q ;

ω_r: Pulsation des tensions et des courants triphasés

En remplaçant les expressions des flux φ_d et φ_q dans le système (A.6), nous obtenons

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt}\, i_d - \omega_r\, L_q\, i_q \qquad \text{(A.7)}$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r \qquad \text{(A.8)}$$

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J\frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f_c\Omega \qquad \text{(A.9)}$$

Le couple électromagnétique est exprimé par la dérivée partielle de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor comme suit:

$$\mathrm{C_e} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} = p\frac{dw_e}{d\theta} \qquad \text{(A.10)}$$

w_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo}: Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator)

p: Nombre de paires de pôles

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2}\left(V_d i_d + V_q i_q\right) \qquad \text{(A.11)}$$

En remplaçant V_d, V_q par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2}\left[R_s\left({i_d}^2 + {i_q}^2\right) + \left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q\right) + \frac{d\theta}{dt}\left(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d\right)\right] \qquad \text{(A.12)}$$

Le terme $\frac{3}{2}R_s\left({i_d}^2+{i_q}^2\right)$: représente la puissance dissipée en pertes Joules dans les enroulements du stator.

Le terme $\left(\frac{d\varphi_d}{dt}i_d+\frac{d\varphi_q}{dt}i_q\right)$: représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

Le terme $\left(\varphi_d i_q-\varphi_q i_d\right)$: représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P_{e=}C_e\Omega_r \qquad \text{(A.13)}$$

Il vient :

$$C_e=\frac{3}{2}p\left[\varphi_d i_q-\varphi_q i_d\right] \qquad \text{(A.14)}$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des courants est comme suit :

$$C_e=\frac{3}{2}p\left[\left(L_d-L_q\right)i_d i_q+\ i_q\varphi_f\right] \qquad \text{(A.15)}$$

- **CONVERTISSEUR STATIQUE :**

Le convertisseur statique est un onduleur de tension triphasé. Celui-ci est composé de six (06) interrupteurs.

Afin de simplifier l'étude, nous associons à chaque bras de l'onduleur une fonction logique de connexion F_j (j=1, 2,3).

Nous définissons les fonctions logiques comme suit :

F_j= 1 si T_i est fermé et T'_i ouvert

F_j= 0 si T'_i est fermé et T_i ouvert

Les tensions de lignes aiguillées par l'onduleur sont alors :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_a - V_b = E(F_1-F_2)\\ U_{bc} &= V_b - V_c = E(F_2-F_3)\\ U_{ca} &= V_c - V_a = E(F_3-F_1) \end{aligned} \qquad \text{(A.16)}$$

Du fait que les enroulements du stator de la machine sont à neutre isolé, les tensions de phase vérifient la relation :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \qquad \text{(A.17)}$$

En tentant compte des relations (A.16) et (A.17), les tensions simples sont comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \qquad \text{(A.18)}$$

Il reste à déterminer les fonctions logiques F_j. Celles-ci dépendent de la stratégie de commande de l'onduleur.

A.1.2 Principe de la stratégie de commande par hystérésis de courant

Le principe de ce contrôle consiste à maintenir les courants réels à l'intérieur d'une bande, de largeur donnée, centrée autour des courants de référence.

Une comparaison permanente est faite entre les courants réels et les courants de référence. Les sorties des comparateurs représentes la logique de commande des interrupteurs.

A.1 .3 Contrôle de la vitesse de rotation du moteur synchrone à aimant permanent

Elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple par orientation du flux selon l'axe directe du repère (d, q).

ceci est possible en faisant un asservissement de vitesse ou(et) de position à l'aide de capteurs qui comparent la valeur mesurée à la valeur de référence (consigne), puis asservis par un régulateur PI, P ou PID.

A.1.3.1 Description du système global

L'organigramme de simulation de la commande vectorielle de la MSAP est donné par la figure (A.1). La sortie du régulateur de courant impose la valeur de référence du courant en quadrature $(i_q{}^*)$.

Par la transformation de Park, on obtient les valeurs de référence des courants de phases $(i_a{}^*, i_b{}^*, i_c{}^*)$ et chaque courant de phase mesuré est contrôlé indépendamment par un régulateur à hystérésis. Les sorties des régulateurs à hystérésis constituent les signaux de commande des transistors de l'onduleur.

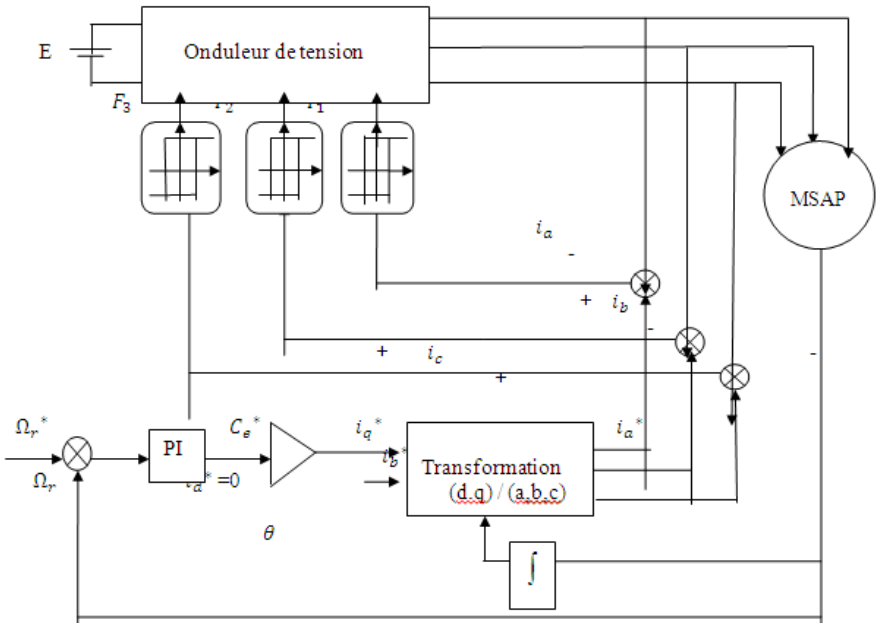


Figure A.1 : Commande vectorielle d'une MSAP alimentée en tension et contrôlée en courant

- **Calcul des paramètres du régulateur PI**

Le régulateur de vitesse dans la commande étudié dans ce chapitre est calculé à partir du modèle linéaire. On utilisera l'une des techniques classiques développées pour les systèmes linéaires afin de le synthétiser.

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par :

$$F(P) = k_p + \frac{k_i}{P}$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est donnée par :

$$G(p) = \frac{Pk_p + k_i}{JP^2 + (f_c + k_p)P + k_i} \quad (A.19)$$

$$G(p) = \frac{P\frac{k_p}{k_i} + 1}{\frac{J}{K_i}P^2 + \left(\frac{f_c + k_p}{k_i}\right)P + 1} \quad (A.20)$$

Sachant que la fonction du transfert d'un système de second ordre est donnée par l'expression suivante :

$$F(p) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2}P^2 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_0}\right)P + 1} \qquad (A.21)$$

Par analogie en peut trouver les paramètres du régulateur PI :

$k_i = J\omega_0^2$ avec : ω_0= 25 rad

$k_p = 2J\zeta\omega_0 - f_c$ ζ=0.7

A.2 Résultats de simulation

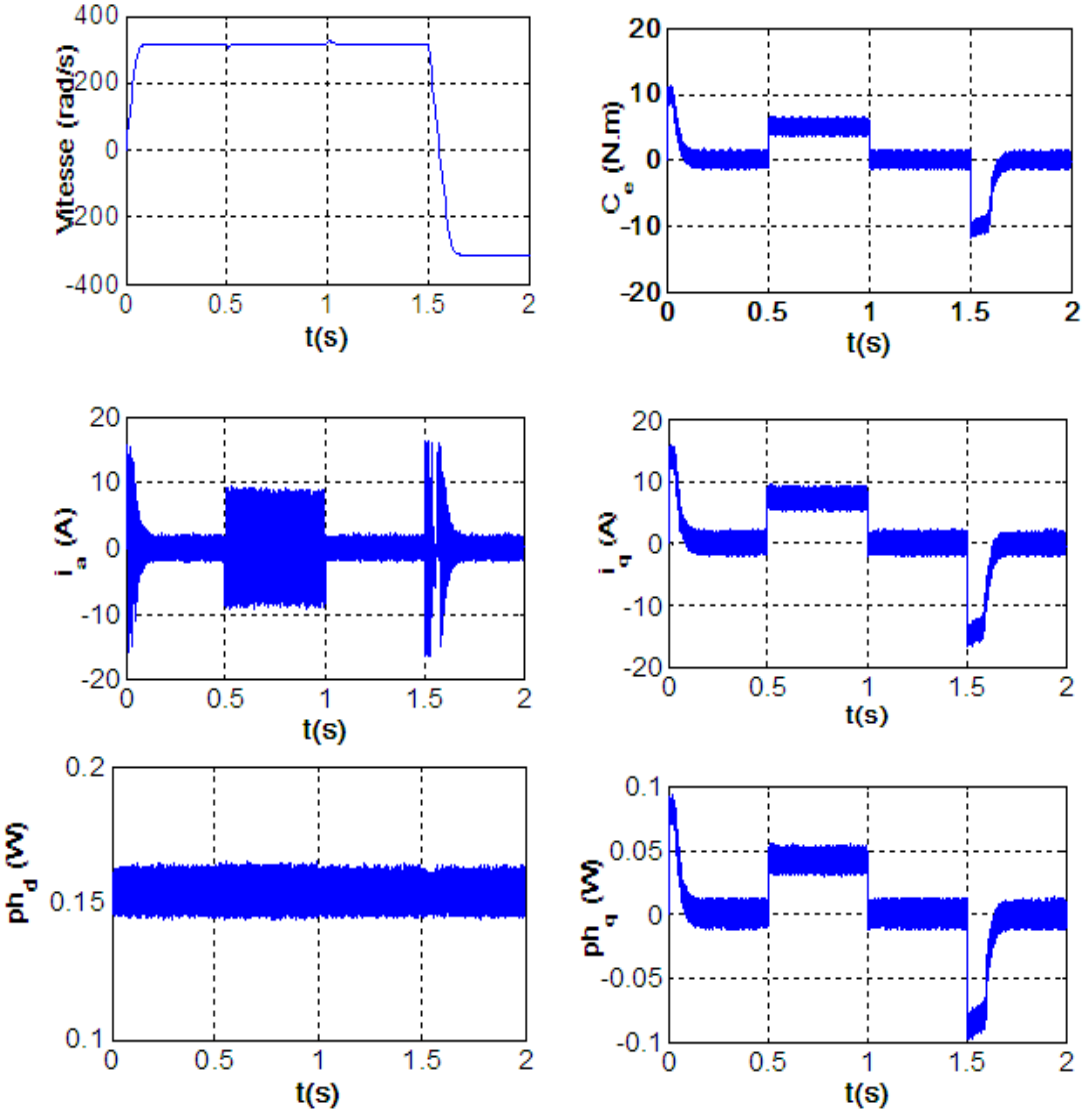


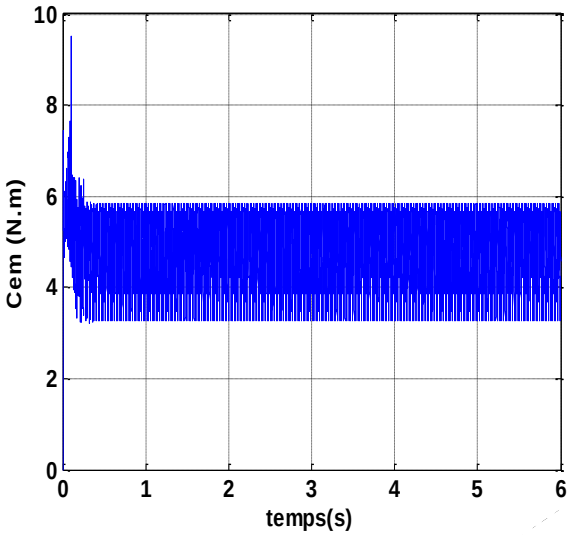
Figure A.2 : Réglage de vitesse de la MSAP avec un régulateur PI, lors de l'inversion du sens de rotation de 314 à -314 rad/s à t = 1.5 s, et application de couple de charge a t=0.5 s

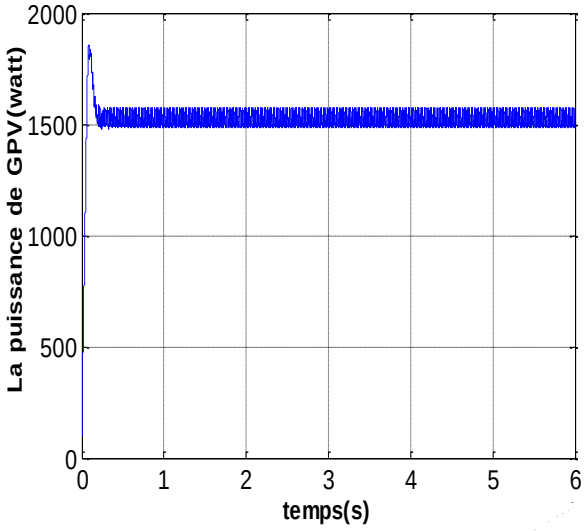
A. Couplage direct de moteur avec le générateur

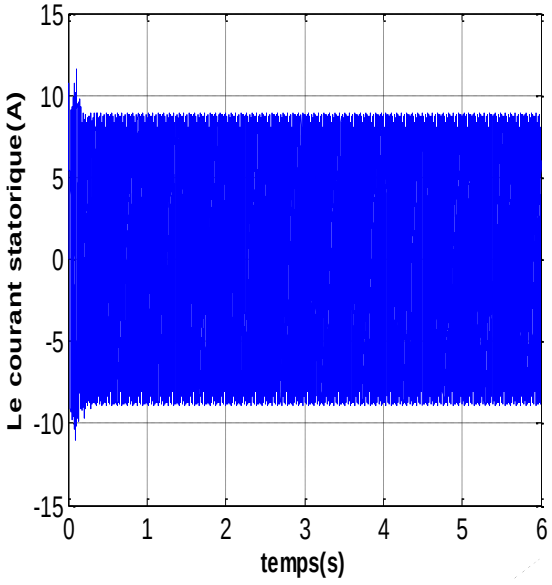
Les nombres de panneaux série et parallèle pour assure une puissance de 1500 W seront :

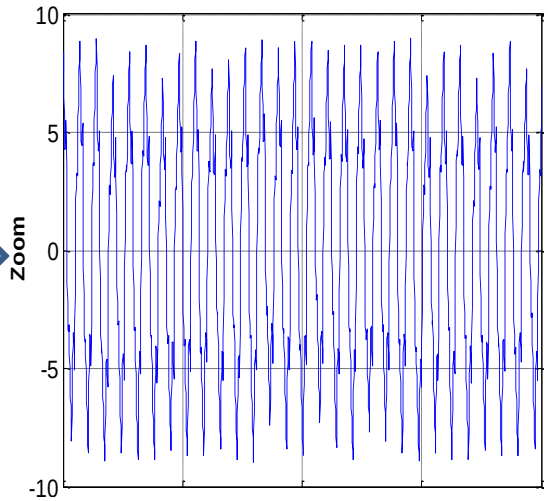
Pour le couplage direct :

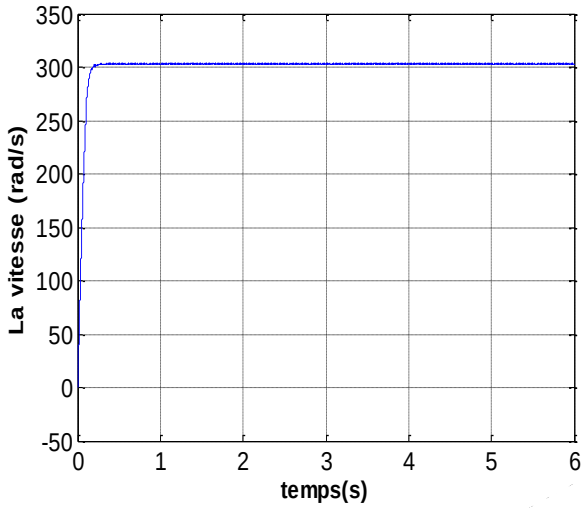
$N_s = 14 \quad N_p = 2 \qquad P_{Gpv} = 14 * 2 * V_{max} * I_{max} = 2100\ W$







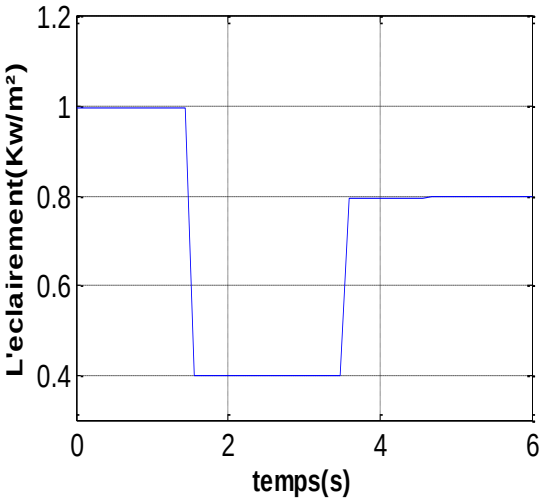


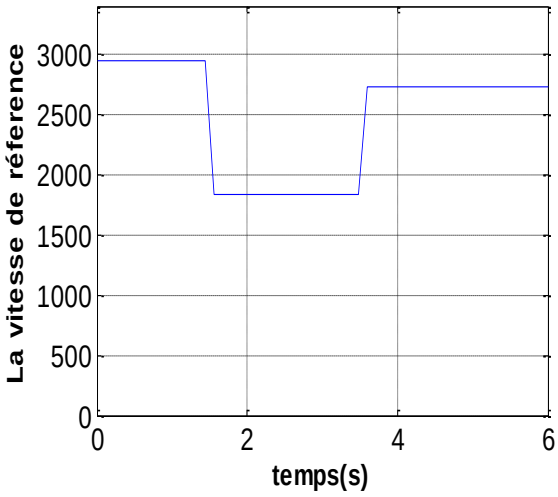


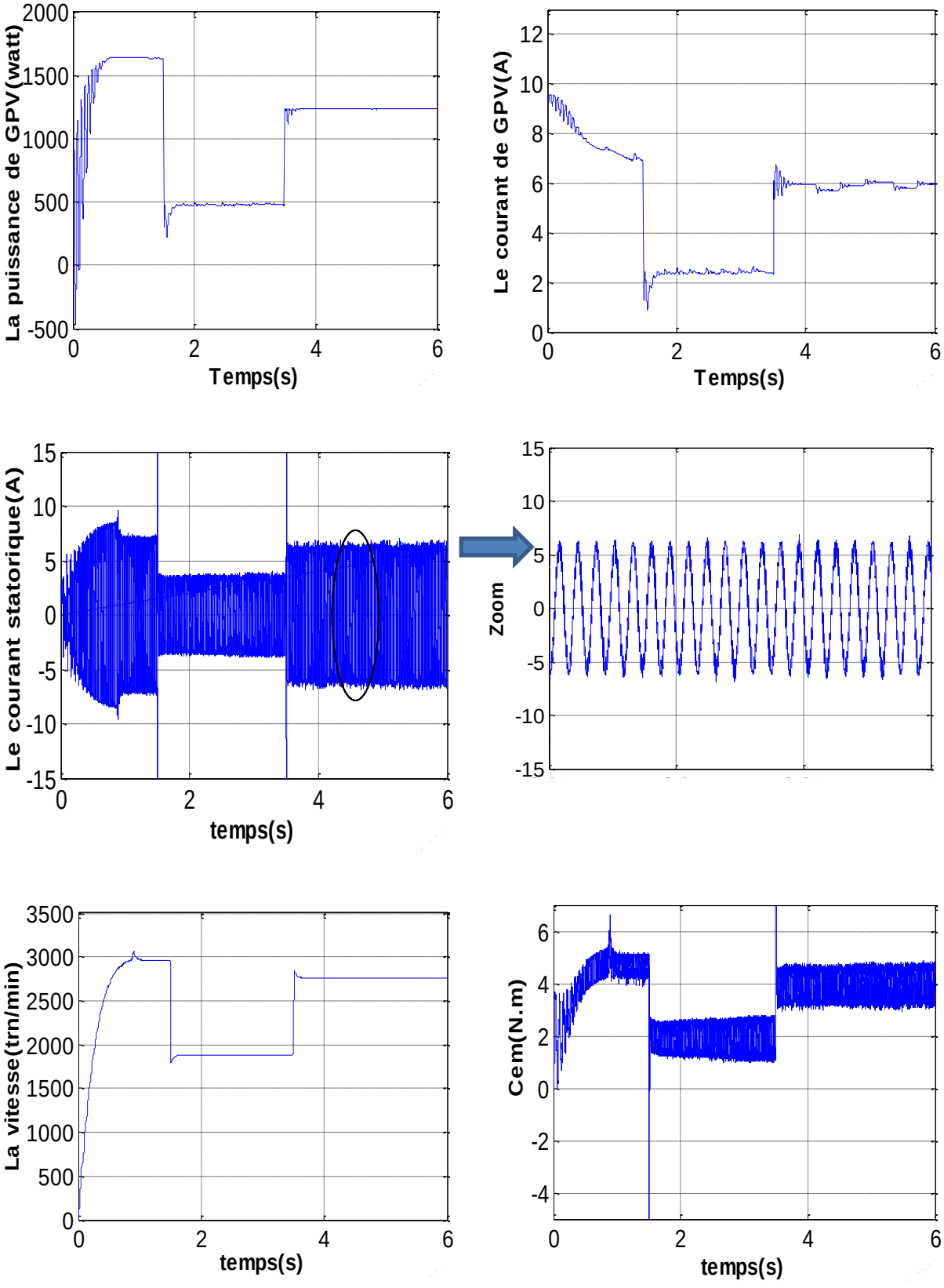
Figures A.3 : Résultat de simulation du système de pompage d'eau à couplage direct

(Générateur PV –- onduleur – MSAP – Pompe)

A. 4 Fonctionnement du système de pompage avec MPPT-Flou







Figures A.4 : Résultat de simulation du système de pompage d'eau à couplage avec MPPT FLOU

B. Annexe 02

Le générateur photovoltaïque, moteur et pompe utilises dans cette étude ont les paramètres suivantes :

Paramètres caractéristiques du générateur PV

Température dans la condition standard	T = 25° C
Eclairement dans les conditions standard	E = 1000 W/m2
Tension de circuit ouvert	Vco =21.7 V
Courant de court-circuit	Icc =4.8 A
Puissance maximale	Pm = 75 W
Tension au point de la puissance maximale	Vm = 17.2 V
Courant au point de la puissance maximale	Im = 4.2A
Coefficient de température de Courant de court-circuit	0.065±0.015%/°C
Coefficient de température de Tension de circuit ouvert	160±20 mV/°C
Résistance série	Rs=0.006

La pompe centrifuge

La vitesse	3000trn/min
La puissance	520W
le debit	2.7l/s
La hauteur	14m
Le rendement	68%
A1	1.93e-4
A2	2.36
A3	451538.94

Le moteur PMBLDC

La puissance	700W
La vitesse	3000trn /min
La tension	200---250V
Le courant	4A
La résistance	1ohm
L'inductance	5e-3mh
Coefficient de frottement	0.8e-4
Nombre de pôles	6

paramètre de MSAP

La puissance	1500w
La tension	220V
La résistance	1.4ohm
L'inductance Ld	0.006h
L'inductance Lq	0.0058h
Coefficient de frottement	38.81^{e}-5
Nombre de pôles	3
inertie	1.76^{e}-3
Couple de charge	5N.m

Résumé

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuse de l'industrie grandissante de fabrication des cellules solaires soutenue par les tendances actuelles de développement durable et à la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

Dans le présent travail nous proposons l'étude, la modélisation et la commande de l'ensemble des sous-systèmes faisant partie d'un système de pompage photovoltaïque par l'utilisation d'un moteur à courant continu sans balais (BLDC). Pour assurer un fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, un étage de conversion DC/DC de type élévateur, piloté par un algorithme flou assurant la poursuite du point de puissance maximale, est proposé afin d'augmenter la rentabilité su systèmes global. Une étude comparative entre l'algorithme flou, proposé dans le présent travail, et l'algorithme classique « Perturber et Observer: P&O » a été également mené on se focalisant sur les performances électriques (source PV), mécaniques (moteur) et hydraulique (débit d'eau).

Les résultats de simulation menés dans l'environnement Matlab/Simulink ont montrés l'efficacité de l'algorithme flou quant à l'amélioration des performances de l'ensemble du système de pompage photovoltaïque et à l'amélioration du débit d'eau pompé particulièrement dans des conditions de faible rayonnement solaire.

Abstract

Photovoltaic pumping system is considered as a promising application of PV cells industry sustained by the increased interest on sustainable development and the reduction of greenhouse effect due to dioxide Carbone emission.

In the present work we propose the study, modeling and control of the whole subsystems forming part of photovoltaic pumping system by using brushless DC motor. In order to ensure optimal output poster of the photovoltaic generator, a DC/DC boost converter

Controlled by a fuzzy logic algorithm to derive the maximum available power, is proposed in the frame of this work in order to get the maximal efficiency of the whole system.

A comparative study between the proposed fuzzy based MPPT controller and the classical Perturb and Observe algorithm is carried out where the focus is given to the electrical (primary energy source), mechanical (BLDC motor) and hydraulic (debit d'eau) performances.

The simulation results carried out in Matlab/Simulink environment have shown the effectiveness of the fuzzy-based MPPT algorithm in improving the overall system performances especially of the flow rate in reduced irradiance levels.