

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie électrique

Spécialité : Énergies renouvelables et Électrotechnique industrielle.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Thème :

**Commande par logique floue d'un système de
pompage photovoltaïque**

Réalisé par :

GUENDOUL Cylia

GHEZLI Bilal

Encadreur :

Mr BERBOUCHA Ali

Promotion 2022/2023

Remerciement

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

Nous exprimons nos vifs remerciements en particulier à notre promoteur Mr A. Berboucha qui a accepté de nous encadrer et pour son orientation et soutien.

Et nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

A travers ce mémoire, nous adressons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

*D*édicaces

*Je dédie ce travail à la mémoire de mon père, à
ma Très chère mère,*

À ma sœur, à toute ma famille, à tous mes amis

et

*A tout ceux qui m'ont soutenu pendant toute la
durée de mes études.*

CYLIA

*D*édicaces

J'ai le plaisir de dédie ce modeste travail à Mes chers parents qui ont tout sacrifié pour moi et dont les mots sont insuffisants pour exprimer toute ma gratitude et mon profond amour. Je les remercie pour leur confiance et « que Dieu leurs accordent une très longue vie ».

Mes frères

Mes sœurs

Tous mes amis

Enfin, à tous ceux de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, en guise de reconnaissance.

BILAL

Sommaire

Sommaire

	Sommaire	
Introduction générale	.....	1
Chapitre I	.....	3
I.1. Introduction	.....	3
I.1. Présentation de l'énergie solaire	.....	3
I.1.1. Effet photovoltaïque	.....	3
I.1.2. Les différents types de cellules photovoltaïques	.....	3
I.1.3. Les différents panneaux solaires	.....	5
I.1.3.a. Le panneau solaire photovoltaïque	.....	5
I.1.3.b. Panneau solaire thermique et thermodynamique	.....	5
I.2. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque	.....	6
I.2.1. Le générateur photovoltaïque	.....	7
I.2.1.a. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	.....	7
I.2.1.b. Caractéristiques d'un module	.....	8
I.2.2. La commande MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING)	.....	9
I.2.3. Les convertisseurs statiques	.....	9
I.2.3.a. Les convertisseurs DC/DC (les hacheurs)	.....	9
I.2.3.b. Les convertisseurs DC/AC (les onduleurs)	.....	11
I.2.4. Machine asynchrone	.....	11
I.2.4.a. Structure et principe de fonctionnement	.....	12
I.2.5. La pompe	.....	14
I.2.5.a. Type de pompes	.....	14
I.3. Conclusion	.....	16
Chapitre II	.....	16
II.1. Introduction	.....	16
II.2. Modélisation des composants	.....	16
II.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque	.....	16
II.2.1.a. Modèle a une diode	.....	16
II.2.1.b. Modèle a deux diodes	.....	18

Sommaire

II.2.1.c. Modèle de Bishop.....	18
II.2.2. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension	19
II.2.2.a. Influence des conditions atmosphériques sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension	20
II.2.3. Modélisation des convertisseurs	23
II.2.3.a. Modélisation du hacheur BOOST	23
II.2.3.b. Modélisation de l'onduleur	24
II.2.4. Modélisation de la machine asynchrone	25
II.2.4.a. Mise en équation de la machine asynchrone	27
II.2.4.b. Transformation d-q	29
II.2.4.c. Équations de la machine asynchrone dans les axes d et q.....	30
II.2.4.d. Choix de référentiel.....	31
II.2.5. Modélisation de la pompe centrifuge.....	31
II.2.5.a. Caractéristique « Hauteur-Débit ».....	31
II.2.5.b. Caractéristique « Couple-Vitesse ».....	33
II.2.5.c. Caractéristique « Débit – Vitesse »	33
II.3. Conclusion.....	33
Chapitre III.	34
III.1. Introduction.....	34
I.1. Dimensionnement du système	34
III.1.a. Étape de dimensionnement du système	34
III.1.b. Évaluation des besoins en eau	34
III.1.c. Puissance Hydraulique nécessaire	35
III.1.d. Inclinaison du générateur photovoltaïque	35
III.1.e. Mois de dimensionnement	35
III.2. Choix des composants.....	36
III.2.a. Dimensionnement du réservoir d'eau	36
III.2.b. Dimensionnement de la pompe centrifuge	37
III.2.c. Puissance mécanique	37

Sommaire

III.2.d. Dimensionnement du moteur Asynchrone	38
III.2.e. Puissance demandée par les modules	38
III.2.f. Temps de pompage nécessaire	39
III.2.g. Energie électrique journalière demandé	39
III.2.h. Dimensionnement des panneaux	39
III.2.i. Nombre de panneaux	39
III.3. La commande de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT).....	40
III.3.a. Principe De La Commande MPPT	40
III.4. Différents types de commande MPPT	41
III.4.a. Méthode d'incrémentation de conductance (IC)	41
III.4.b. Mesure d'une fraction de la tension en circuit ouvert (FCO)	41
III.4.c. Mesure d'une fraction de courant de court-circuit	42
III.4.d. Méthode de la logique floue	43
III.4.e. La Méthode Perturbation et Observation (P&O).....	44
III.4.f. Autres Methods	46
III.5. Fonctionnement de la commande P&O sous des condition variables	46
III.6. Commande des machines asynchrones	50
III.6.a. Principe de la commande vectorielle.....	50
I.1.1. Estimation de $\phi dr, \omega s, \theta s$	52
III.7. Simulation globale du système de pompage photovoltaïque	53
III.8. Conclusion	54
Chapitre IV	55
IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Méthode à base de logique floue :	55
IV.2.1. Logique floue, principes et définitions :.....	55
IV.2.1.a. Les ensembles flous :.....	55

Sommaire

IV.2.1.b. Variable linguistique :	56
IV.2.1.c. Univers du discours :	57
IV.2.1.d. Fonction d'appartenance :	58
IV.2.1.e. Opérateurs logiques flous :	59
IV.2.2. Description d'un régulateur flou :	59
IV.2.2.a. Interface de fuzzification :	60
IV.2.2.b. Bases Règles floues :	61
IV.2.2.c. Logique de prise de décision :	61
IV.2.2.d. Interface de défuzzification :	61
IV.3. Contrôleur MPPT basé sur la logique floue.....	62
IV.3.1. Fuzzification.....	62
IV.3.2. Inférence floue.....	64
IV.3.3. Défuzzification	64
IV.4. Fonctionnement de la commande logique floue sous des conditions variables	65
IV.5. Simulation globale du système de pompage photovoltaïque.....	69
IV.8. Conclusion	71
Conclusion générale.....	72

Liste des Figures

LISTE DES ABREVEATIONS ET SYMBOLES

Liste des Figures :

Figure I-1 Cellule de silicium poly-cristallin.....	4
Figure I-2 Cellule de silicium monocristallin	4
Figure I-3 Cellule en silicium amorphe	5
Figure I-4 Panneau solaire photovoltaïque.	5
Figure I-5 Panneau solaire thermique.	6
Figure I-6 Schéma d'un système de pompage photovoltaïque.	7
Figure I-7 structure d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I-8 Structure d'un générateur photovoltaïque.	8
Figure I-9 Hacheur type BUCK.....	10
Figure I-10 Hacheur type Boost.....	10
Figure I-11 Onduleur triphasé.....	11
Figure I-12 Machine asynchrone triphasé	12
Figure I-13 Stator d'une machine asynchrone triphasé	12
Figure I-14 rotor a cage d'écureuil.	13
Figure I-15 principe fonctionnement de la machine asynchrone.....	14
Figure I-16 Exemple d'installation avec une pompe centrifuge.....	15
Figure II-1 Schéma équivalent du modèle à une diode	16
Figure II-2 Schéma équivalent d'une cellule PV model a deux diodes.....	18
Figure II-3 Schéma du circuit équivalent représentant le model de Bishop.....	18
Figure II-4 Caractéristique I(A) d'une cellule photovoltaïque, modèle à une diode.....	19
Figure II-5 Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque, modèle à une diode.	20
Figure II-6 Caractéristique I(v) du module PV pour un éclairement constant et température variable.....	21
Figure II-7 Caractéristiques P(V) du module PV pour un éclairement constant et températures variable	21
Figure II-8 Caractéristique I(v) d'un module PV pour une température constante et un éclairement variable.....	22
Figure II-9 Caractéristique I(v) d'un module PV pour une température constante et un éclairement variable.....	22
Figure II-10 Schémas équivalents de l'hacheur survolteur (a) : K fermé, (b) ouvert.....	23
Figure II-11 Schéma simplifier d'un onduleur de tension triphasé	24

LISTE DES ABREVEATIONS ET SYMBOLES

Figure II-12 Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasée	26
Figure III-1 Principe de la commande MPPT	40
Figure III-2 Algorithme de la méthode incrémentation de conductance (CI)	41
Figure III-3 Algorithme de fraction d'une tension en circuit ouvert	42
Figure III-4 Algorithme de fraction de courant en court-circuit	43
Figure III-5 Algorithme de la logique floue	43
Figure III-6 principe de la commande perturbation & d'observation	44
Figure III-7 Algorithme de la méthode P&O	45
Figure III-8 Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement rapide.	46
Figure III-9 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement rapide.	47
Figure III-10 Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement lent.	47
Figure III-11 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement lent.	48
Figure III-12 Allure de la consigne de la température dans le cas d'un changement rapide.	48
Figure III-13 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement rapide ...	49
Figure III-14 Allure de la consigne de la température dans le cas d'un changement lent.	49
Figure III-15 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement lent.	49
Figure III-16 Orientation du flux rotorique orienté sur l'axe d.	51
Figure III-17 Allure de la température et d l'ensoleillement d'une journée.	53
Figure III-18 Allure du débit nominal de la pompe	53
Figure III-19 Allure de la vitesse de référence et la vitesse de rotation	54
Figure IV-1 Représentation des variables binaires.	57
Figure IV-2 Représentation des variables floues	58
Figure IV-3 Les différentes formes de la fonction d'appartenance	58
Figure IV-4 Fonction d'appartenance singleton.	59
Le schéma de Figure (IV-5) illustre la structure interne d'un régulateur floue :	60
Figure IV-6 Le schéma synoptique d'un système flou.	60
Figure IV-7 Structure d'un contrôleur MPPT flou.	62
Figure IV-8 (ajouter un titre)	63
Figure IV-9 L'allure de la puissance photovoltaïque par la commande FLC.	64
Figure IV-10 Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement rapide.	65

LISTE DES ABREVEATIONS ET SYMBOLES

Figure IV-11	Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement rapide. ..	65
Figure IV-12	Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement lent. 66	
Figure IV-13	Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement lent.	66
Figure IV-14	Allure de la consigne de la température dans le cas d'un changement rapide.	67
Figure IV-15	Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement rapide. ..	67
Figure IV-16	Allure de la consigne de la température dans le cas d'un changement lent....	68
Figure IV-17	Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement lent.	68
Figure IV-18	Allure de la température et d l'ensoleillement.	69
Figure IV-19	Allure du débit nominal de la pompe.....	69
Figure IV-20	Allure de la vitesse de référence et la vitesse de rotation	70
Figure IV-21	Allure de la puissance photovoltaïque	70
Figure IV-22	allure du volume de la pompe.....	71

Liste des Figures :

Tableau IV-1	Table des règles de décision à cinq classes	64
--------------	---	----

LISTE DES ABREVEATIONS ET SYMBOLES

LISTE DES ABREVEATIONS ET SYMBOLES

ABREVIATION

GPV	Générateur photovoltaïque
PV	Photovoltaïque.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
PPM	Point de puissance maximale.
Cs	Convertisseur statique
Vopt	Tension optimale
Iopt	Courant optimale
MLI	Modulation en Largeur d'Impulsion.
Sa, Sb, Sc	Axes statoriques du repère triphasé.
Ra, Rb, Rc	Axes rotoriques du repère triphasé.
Vdc	Tension du bus continu de l'onduleur.
MAS	Machine Asynchrone.
IGBT	Insolated Gate Bipolare Transistor.
P&O	Perturbation et Observation.
DTC	Direct Torque Control.

SYMBOLES

I	Le courant fourni par la cellule (A).
I_{ph}	Photo-courant de la cellule (A).
I_d	Courant de la diode (A).
I_{sh}	Courant circulant dans la résistance shunt de la cellule PV (A).
I_{sat}	Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température
E_g	Energie de gap
I_{ccr}	Courant de court-circuit dans les conditions atmosphériques standards (A).

LISTE DES ABREVEATIONS ET SYMBOLES

- T_j** Température de fonctionnement de la jonction en Kelvin (K).
- T** Température standard (K).
- T_a** Température ambiante.
- Noct** Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).
- λ** Coefficient de température du photo-courant (ou courant de court-circuit).
- q** Charge d'électron
- L_{sa}** Inductance propre d'une phase statorique.
- L_{ra}** Inductance propre d'une phase rotorique.
- M_S** Inductance mutuelle d'une phase statorique.
- M_r** Inductance mutuelle d'une phase rotorique.
- M_{sr}** Inductance mutuelle maximale entre deux phases statorique et rotorique.
- J** Moment d'inertie ramené sur l'arbre de la machine.
- C_{em}** Couple électromagnétique développé par la machine.
- C_r** Couple résistant de la charge.
- f** Coefficient de frottement visqueux.
- R_s** Résistance de la phase du stator
- R_r** Résistance de la phase du rotor.
- L_S** Inductance cyclique statorique.
- L_r** Inductance cyclique rotorique.
- A** c'est la constante des pertes de charge.
- ω et ω_n** Sont respectivement la vitesse réelle et la vitesse nominale de rotation de la pompe.
- Q et Q_n** Sont respectivement le débit réel et le débit nominal de la pompe.
- H_{MT} et H_{MT,n}** Sont respectivement la hauteur manométrique réelle et la hauteur manométrique nominale de la pompe.

LISTE DES ABREVEATIONS ET SYMBOLES

- ω Vitesse de rotation [rad/s].
- H_{MT} Hauteur manométrique totale [m].
- Q Débit [m^3/s].
- P_{hyd} La puissance communiquée au fluide par la pompe (W).
- g Accélération de la pesanteur ($9.81m/s^2$).
- Q_v Débit volumique (m^3/s).
- φ Masse volumique d'eau ($1000\text{ Kg}/m^3$).
- C_H Constante hydraulique.
- η_P Rendement de pompe (%).
- η_m Rendement de moteur (%).
- P_{mec} Puissance mécanique requise par la pompe (W).
- η_{ond} Rendement de l'onduleur (%).
- V Quantité d'eau requise (m^3)
- Q_V Débit nominal(m^3/h)

INTRODUCTION *G*énérale

INTRODUCTION GENERALE

La croissance de la consommation mondiale d'énergie ces dernières décennies est étroitement liée au développement de l'industrie. Cependant, cette croissance est préoccupante car elle repose principalement sur des ressources non renouvelables telles que le charbon, les hydrocarbures et l'uranium, qui sont facilement exploitables mais s'épuisent rapidement et se régénèrent très lentement à l'échelle humaine. De plus, cette consommation rapide de combustibles fossiles entraîne des effets secondaires indésirables tels que l'augmentation de la pollution et le dérèglement climatique, qui peuvent compromettre l'avenir de l'humanité. Dans ce contexte, la demande croissante de protection de l'environnement a conduit à un intérêt croissant pour les sources d'énergie renouvelable, en particulier l'énergie solaire et éolienne, pour la production d'électricité. Cependant, la production d'énergie renouvelable présente des défis tels qu'un coût élevé, un rendement relativement faible et une intermittence de la ressource en raison de son caractère aléatoire. [1]

Le pompage photovoltaïque est une application prometteuse de l'énergie solaire, surtout pour le pompage d'eau dans les régions rurales et isolées des pays en développement. Les systèmes de pompage photovoltaïque sont écologiques et ont une durée de fonctionnement prolongée. Leur configuration la plus simple se compose d'un panneau solaire et d'une pompe, qui sont directement connectés à une source et une charge. Cependant, cette configuration ne permet pas toujours d'extraire la puissance maximale du panneau solaire car les conditions météorologiques (ensoleillement et température) varient dans le temps. Pour minimiser cette perte de puissance, l'utilisation d'un module de suivi du point de puissance maximale est recommandée. Dans le cas d'une pompe à courant continu, ce module peut être un convertisseur statique de type hacheur, tandis que pour une pompe à courant alternatif, un onduleur peut être utilisé. [1][2]

Afin d'optimiser le rendement d'un générateur photovoltaïque, c'est-à-dire maximiser la puissance fournie à la charge connectée au générateur, plusieurs critères d'efficacité du système photovoltaïque ont été appliqués et des techniques ont été développées pour assurer une bonne adaptation et un rendement élevé. Étant donné que la caractéristique des panneaux photovoltaïques est non linéaire, leur tension est fortement influencée par la charge connectée. Pour résoudre ce problème, des dispositifs MPPT (Maximum Power Point Tracking) ont été mis en place pour permettre aux panneaux de fonctionner dans des conditions optimales et ainsi extraire la puissance maximale. [3]

INTRODUCTION GENERALE

Notre travail est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons les différents composants qui constituent une chaîne de pompage photovoltaïque, tels que le générateur photovoltaïque, l'hacheur, l'onduleur, le moteur asynchrone et la pompe centrifuge.

Dans le deuxième chapitre, nous établissons des modèles simplifiés pour chacun de composants du système complexe.

Le troisième chapitre est consacré au dimensionnement de notre système de pompage et à la commande MPPT ou nous allons parler sur les différents types de commande MPPT et étudier une de ces méthodes ; la méthode perturbe et observe (P&O).

Le quatrième chapitre sera consacré pour la commande par logique flou du système de pompage photovoltaïque ou nous allons faire une étude comparative entre les deux méthodes de l'MPPT pour tester leur performance.

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur l'ensemble de notre étude, où nous résumons les principaux résultats obtenus et discutons de leur pertinence et nous proposons également quelques perspectives.

CHAPITRE I

Généralité sur le système de pompage photovoltaïque

Chapitre I.

I.1. Introduction

La première génération des systèmes de pompage photovoltaïque, en particulier ceux pour les applications pour les basses et moyennes hauteurs incorporent des moteurs à courant continu à aimant permanent. Ces dernières années, les moteurs asynchrones alimentés par un convertisseur de fréquence variable sont devenus les moteurs standards pour des applications de pompage solaire. Cela est dû principalement à sa simplicité, robustesse et faible prix comparé au moteur à courant continu. [4]

Un système de pompage photovoltaïque est devenu de nos jours un enjeu majeur pour l'amélioration des conditions de vie et le développement des zones rurales et désertiques.

Selon la méthode d'installation, l'énergie peut être stockée dans des batteries, cependant, il n'est pas toujours nécessaire de stocker l'énergie générée, en installant un réservoir à la sortie de la pompe, il est possible de stocker l'eau et de maintenir une réserve utilisable même sans rayonnement solaire. [5]

I.1. Présentation de l'énergie solaire

I.1.1. Effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants qui transforment directement la lumière du soleil en électricité, elles sont faites de matière semi-conductrice.

Dans la plupart des cas, le matériau de base est le silicium, selon le processus de production, on obtiendra des cellules solaires plus ou moins performantes, en amorphe, polycristallin ou monocristallin, autres matériaux utilisables : Arséniure de Gallium, Tellure de cadmium [6].

I.1.2. Les différents types de cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, lorsqu'il est exposé au spectre solaire, génère une tension par effet photovoltaïque. Toutes les batteries sont faites de matériaux semi-conducteurs. Le Silicium (Si) est utilisé la plupart du temps, mais on trouve aussi du Sulfure de Cadmium, du Tellure de Cadmium...[6]

Il existe plusieurs types de cellule photovoltaïque :[7]

- **Cellule polycristallin**
 - ❖ Rendement 16-18%.
 - ❖ Cout de production moine élevé.
 - ❖ Procédé de fabrication nécessitant moins d'énergie.

- ❖ Première génération de photopiles.

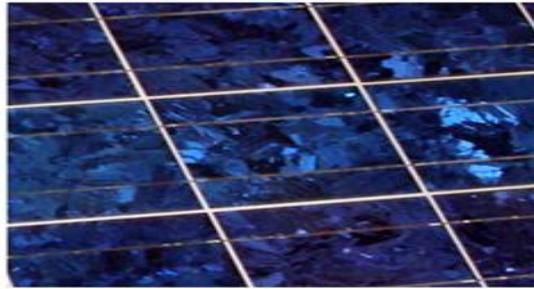


Figure I-1 Cellule de silicium poly-cristallin [8]

- **Cellule monocristalline**

- ❖ Première génération de cellules photovoltaïques.
- ❖ Très bon rendement 17-20%.
- ❖ Cout élevé
- ❖ Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus en contrôlant strictement et progressivement le refroidissement du silicium.



Figure I-2 Cellule de silicium monocristallin [8]

- **Cellule amorphe**

- ❖ Deuxième génération des photopiles.
- ❖ Faible rendement 6-7%.
- ❖ Moins couteuse que la première génération.

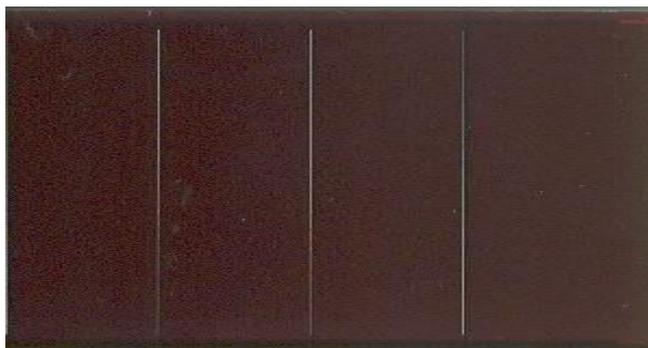


Figure I-3 Cellule en silicium amorphe [9]

I.1.3. Les différents panneaux solaires

I.1.3.a. Le panneau solaire photovoltaïque

Le panneau solaire photovoltaïque ou (générateur photovoltaïque) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le panneau solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.[6]



Figure I-4 Panneau solaire photovoltaïque [10].

I.1.3.b. Panneau solaire thermique et thermodynamique

a) Domestique (thermique)

Un fluide caloporteur circule dans le panneau et absorbe la chaleur générée par le rayonnement du soleil, ce fluide est ensuite envoyé vers le réservoir de stockage de chauffe-eau solaire, ou il transmet sa chaleur à l'eau sanitaire. Le panneau solaire thermique ne peut pas produire de l'électricité. [11]



Figure I-5 Panneau solaire thermique.

b) Industriel (thermodynamique)

On désigne par une centrale thermodynamique l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée. L'eau chauffée par la température est transformée en vapeur, envoyée dans une turbine. Un alternateur, lié à la turbine, produit alors de l'électricité. [12]

I.2. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'une pompe immergée centrifuge qui est alimentée par un moteur à induction à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable. Pour améliorer les performances, on utilise souvent un convertisseur DC/DC entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC afin d'adapter l'impédance et de maximiser la puissance en trouvant le point de puissance maximale (MPPT) (voir figure I.6).[13] Dans les systèmes de pompage photovoltaïque qui fonctionnent au fil du soleil, le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution la plus adoptée, par rapport au stockage électrochimique dans les batteries.

Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation.

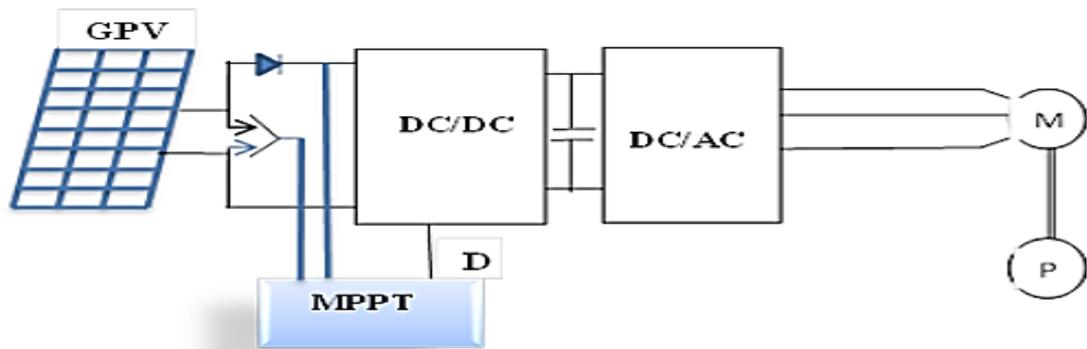


Figure I-6 Schéma d'un système de pompage photovoltaïque. [13]

I.2.1. Le générateur photovoltaïque

I.2.1.a. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium, elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.[14]

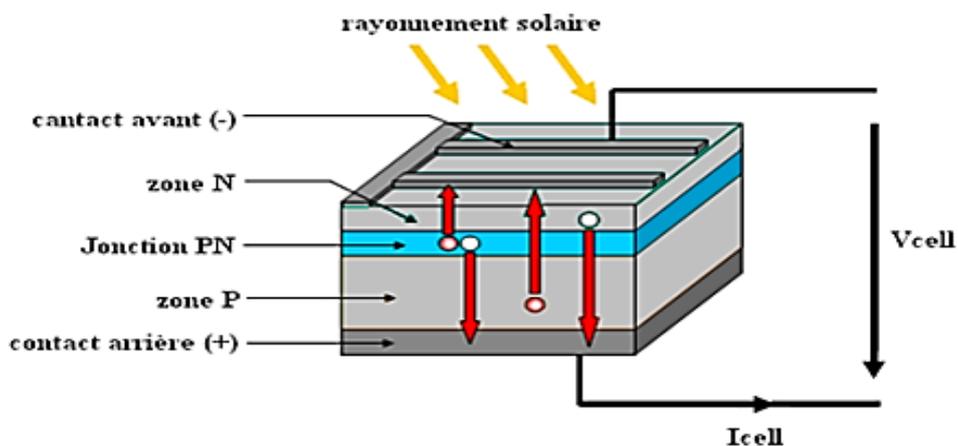


Figure I-7 structure d'une cellule photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandée. Chaque module est lui-même constitué de cellules

photovoltaïques généralement montée en série, celles-ci sont encapsulées dans une même structure pour former un module. L'encapsulation ainsi réalisée va avoir deux principaux rôles :

- Protection des cellules contre les agressions extérieures (chocs, humidité, corrosion, poussière... etc.).
- Contrôle de température des cellules qui vont permettre une bonne dissipation vers l'extérieur de la partie de l'énergie incidente qui n'est pas transformée en énergie électrique.[15]

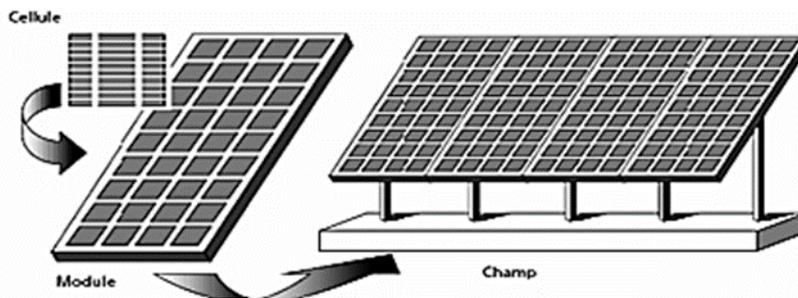


Figure I-8 Structure d'un générateur photovoltaïque.

I.2.1.b. Caractéristiques d'un module

- **La puissance de crête P_c** : puissance électrique maximale que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$).

- **La caractéristique I/V** : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

- **Point de fonctionnement optimum** (U_m, I_m) : Lorsque la puissance de (crête est maximum en plein soleil.

- **Rendement** : Rapport entre la puissance électrique optimale et la puissance de radiation incidente.

- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale et la puissance maximale que peut avoir les cellules. [16]

I.2.2. La commande MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING)

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stable. Que ce soit une commande analogique ou digitale, le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV [17]

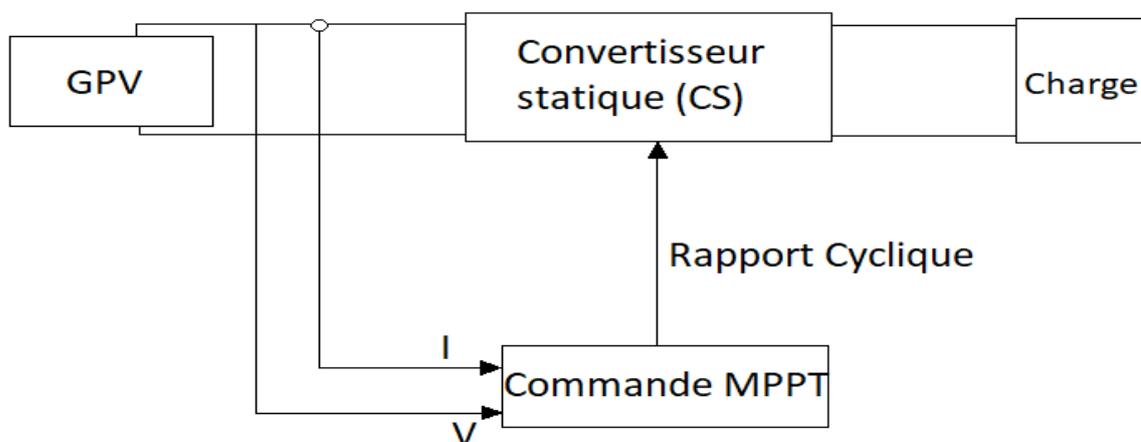


Figure I-9 Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT. [18]

I.2.3. Les convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système qui permet d'adapter une source d'énergie électrique à un récepteur en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique étaient constitués de machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'avènement des semi-conducteurs, de l'électronique de puissance, des diodes, des transistors, des thyristors, etc., les systèmes de conversion sont devenus de plus en plus sophistiqués et ne nécessitent plus de machines tournantes. [19]

I.2.3.a. Les convertisseurs DC/DC (les hacheurs)

Ces types de convertisseurs ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Ils sont constitués d'un seul transistor, d'une diode et d'une inductance comme composants principaux dans le cas le plus simple. [15]

c) Hacheur (série-abaisseur), type BUCK

La figure (I.10) donne le circuit électrique d'un convertisseur Buck, Le transistor MOSFET travaille en régime commutation avec une période T_s . Dans le premier laps de temps αT_s le transistor dans un état de saturation, alors l'inductance L se charge d'énergie avec augmentation du courant I_L .

Dans le deuxième laps de temps $(1-\alpha) T_s$ l'inductance L libère cette énergie à la charge Z avec une diminution de courant I_L . Alors le circuit est décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent à chaque état du transistor. [20]

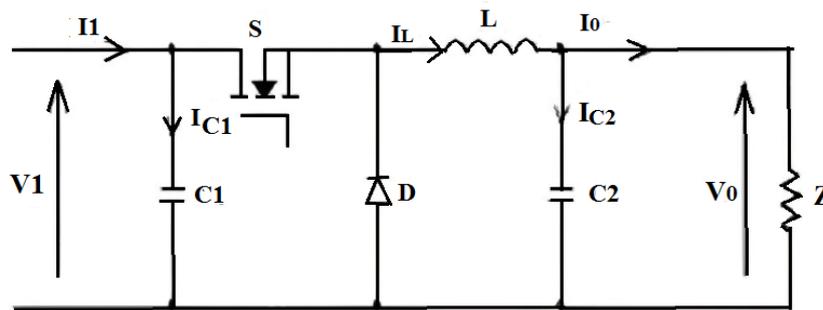


Figure I-9 Hacheur type BUCK. [19]

d) Hacheur (parallèle-élévateur), type BOOST

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (I.11) représente le circuit électrique du Boost. Dans l'intervalle $[0, \alpha T_s]$, le transistor est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la période. Ensuite, le transistor s'ouvre et l'inductance L s'oppose à la diminution de courant I_L , génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D . [20]

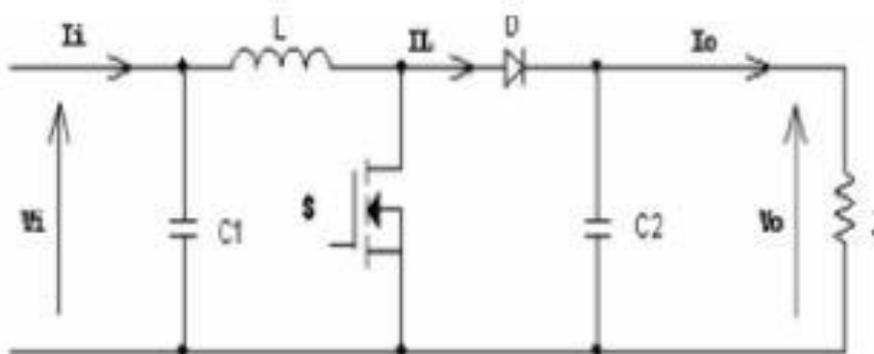


Figure I-10 Hacheur type Boost. [21]

e) Convertisseur Buck-Boost

Combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il est utilisé comme un transformateur idéal qui pourrait s'appliquer à n'importe quelle tension d'entrée afin d'obtenir la tension de sortie désirée. [15]

I.2.3.b. Les convertisseurs DC/AC (les onduleurs)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de l'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative, on distingue deux grands types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension, alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant, alimentés par une source de courant continu. [19]

f) Onduleur de tension

L'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture ; ce sont des transistors de types IGBT auxquels sont placés des diodes en antiparallèle. L'onduleur est alors constitué de trois bras, dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire. Les séquences de commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commande en MLI « Modulation de Largeur d'Impulsion »). La structure de l'onduleur de tension est représentée sur la figure suivante. [19]

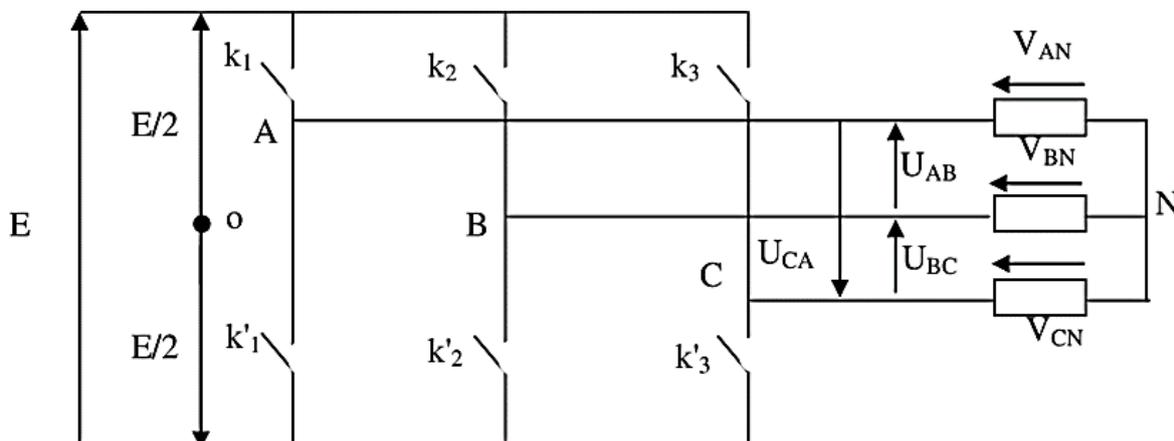


Figure I-11 Onduleur triphasé. [19]

I.2.4. Machine asynchrone

Une machine asynchrone, également connue sous le nom de machine à induction, est un type de machine à courant alternatif où la vitesse de rotation de l'arbre diffère de la vitesse de rotation du champ magnétique tournant. Elle est également utilisée comme générateur dans certains cas spécifiques. [22]



Figure I-12 Machine asynchrone triphasé.[23]

I.2.4.a. Structure et principe de fonctionnement

Les machines asynchrones sont les actionneurs les plus utilisés dans l'industrie, leur utilisation très répandue est due à leur robustesse et leur fiabilité. Elle se compose d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor).

- **Le stator**

Il se compose d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches pour loger les bobinages. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques métalliques, afin de minimiser les courants de Foucault et pertes induites. [24]

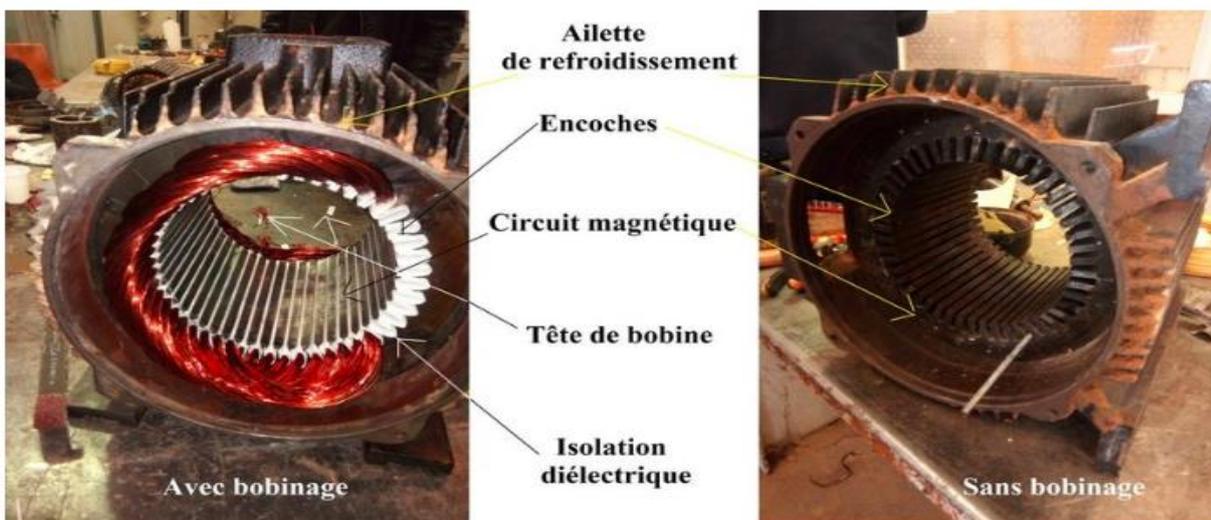


Figure I-13 Stator d'une machine asynchrone triphasé. [25]

- **Le rotor**

Il n'est pas lié à une source d'énergie électrique, le courant dans ses enroulements est induit que par le champ tournant produit dans le stator. Il y a deux types de rotor ce qui explique l'existence de deux types de moteurs.

➤ **Rotor à bague (bobiné)**

C'est un cylindre laminé, avec des encoches qui renferment un enroulement comportent obligatoirement le même nombre de pôles que celui du stator. [26]

➤ **Rotor à cage d'écureuil**

Il est constitué de tiges conductrices, très souvent en aluminium, les extrémités de ces tiges sont reliées par deux couronnes également conductrices. Le rotor devrait être en court-circuit.



Figure I-14 rotor a cage d'écureuil. [28]

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose sur :

- ❖ D'une part, sur la génération de courants induits dans des conducteurs se trouvant dans un champ magnétique tournant, le conducteur en question est l'un des faisceaux du rotor à cage d'écureuil qui forme le rotor du moteur. Pas d'induction de courant uniquement si les conducteurs sont en court-circuit (c'est parce que les deux anneaux latéraux relient toutes les barres). [24]
- ❖ D'autre part, la création de force motrice du conducteur est prise en compte, placé dans un champ magnétique qui est mis en rotation ou modifié par un courant électrique), son orientation est donnée par la règle des trois doigts.

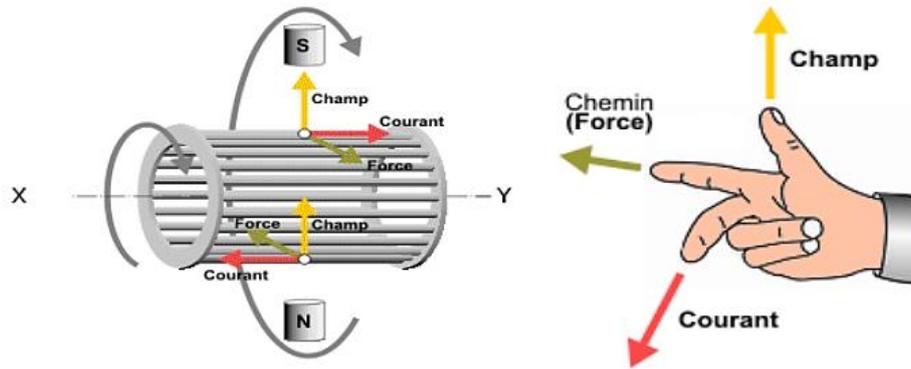


Figure I-15 principe fonctionnement de la machine asynchrone. [28]

I.2.5. La pompe

Une pompe est un appareil qui convertit l'énergie mécanique (couple et vitesse de rotation de l'arbre) en une énergie hydraulique (débit et pression). Elle est utilisée dans des forages et choisie selon la hauteur manométrique que devra fournir la pompe pour garantir le fonctionnement. [29]

I.2.5.a. Type de pompes [30]

Les pompes à eau sont généralement classées selon leur principe, Soit de type volumétrique ou fonctionnement centrifuge. En plus de ces deux catégories nous distinguons également les deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: pompes d'aspiration et de refoulement.

- **Pompe volumétrique**

Une pompe volumétrique transfère l'énergie cinétique d'un moteur en mouvement de va-et-vient continu permet au fluide de vaincre la gravité par variation d'un volume relié alternativement aux orifices d'aspiration et de refoulement.

- **Pompe centrifuge**

Les pompes centrifuges sont les plus courantes dans le domaine des pompages à eau, elles sont couplées à des moteurs asynchrones formant un groupe motopompe électrique.

- **Principe de fonctionnement**

Une pompe centrifuge transfère l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de la bague extérieure ou des aubes. L'eau pénètre au centre de la pompe et est expulsée et poussée vers le haut grâce à la force centrifuge du couteau. Le mouvement du liquide est dû à l'augmentation de l'énergie transmise par la force centrifuge.

Les pompes centrifuges sont conçues en fonction de la hauteur manométrique (HMT), le débit de cette pompe varie proportionnellement avec le régime du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et de la hauteur de refoulement en fonction du carré du régime moteur.

Les pompes centrifuges sont généralement utilisées pour des débits élevés et les profondeurs d'eau moyenne ou peu profonde (10-100 mètres).

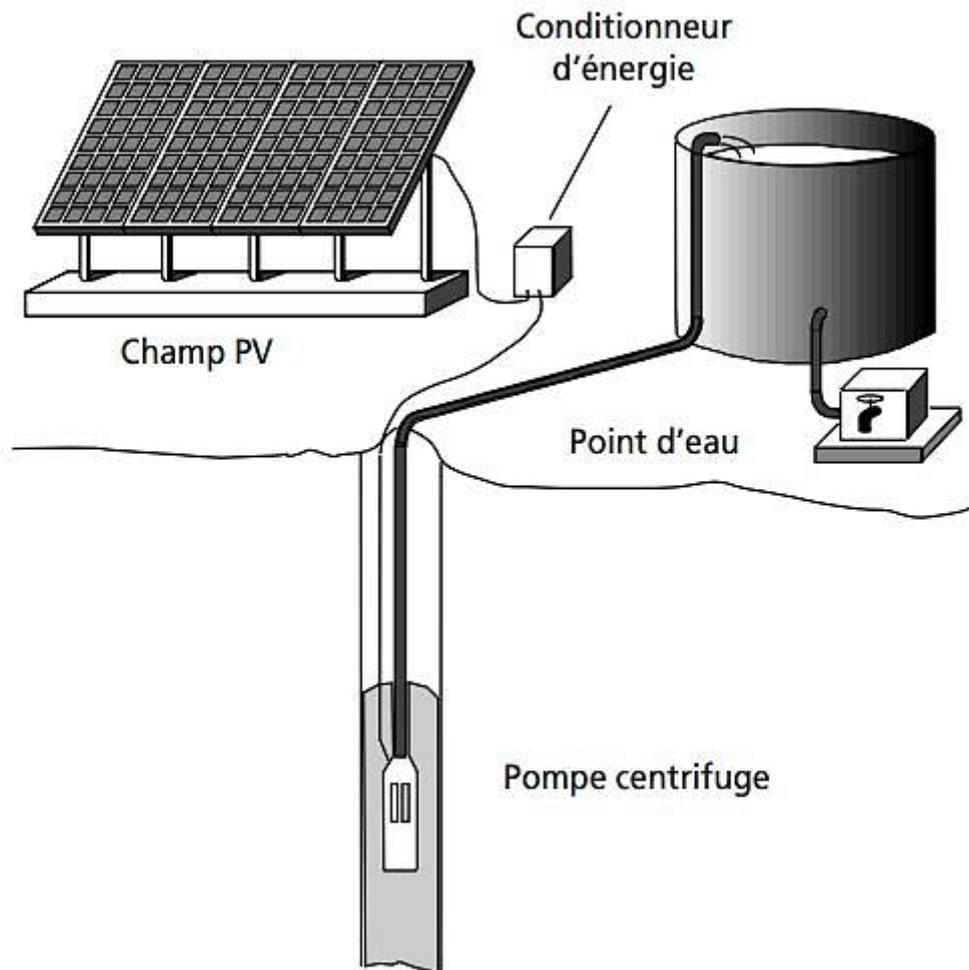


Figure I-16 Exemple d'installation avec une pompe centrifuge [30]

La pompe centrifuge est constituée par :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe.
- Un distributeur dans l'axe de la roue.

- Un collecteur de section croissante en forme de spirale.

I.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différents concepts qui composent un système de pompage d'eau photovoltaïque, et le principe de fonctionnement de chaque élément, Cela permet d'introduire la modélisation et l'analyse de ce système, que nous allons présenter dans chapitre deux.

CHAPITRE II

Modélisation du système de pompage photovoltaïque

Chapitre II. Modélisation du système de pompage photovoltaïque

II.1. Introduction

Lorsqu'on modélise un système physique, on met en place des équations mathématiques qui décrivent la dynamique de ce système. Ainsi, un modèle est une représentation mathématique d'une entité réelle qui en décrit le fonctionnement. Avec un modèle, il est possible de simuler le comportement de cette entité. [31]

Le présent chapitre a pour objet de décrire la modélisation des éléments fondamentaux d'un système de pompage photovoltaïque, à savoir le générateur photovoltaïque, l'hacheur, l'onduleur ainsi que le groupe motopompe.

II.2. Modélisation des composants

Pour modéliser un système et le simuler sous le logiciel Matlab/Simulink, il est nécessaire d'avoir un ensemble d'équations qui caractérisent tous les éléments du système étudié.

II.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque

II.2.1.a. Modèle à une diode

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode est fréquemment utilisé dans la littérature scientifique.

Ce modèle est utilisé pour analyser les caractéristiques courant-tension (I.V) et puissance-tension (P-V) de la cellule photovoltaïque, ainsi que son comportement en fonction des paramètres solaires tels que l'éclairement dans le plan des panneaux (E_s) et la température de la jonction T_j . [32]

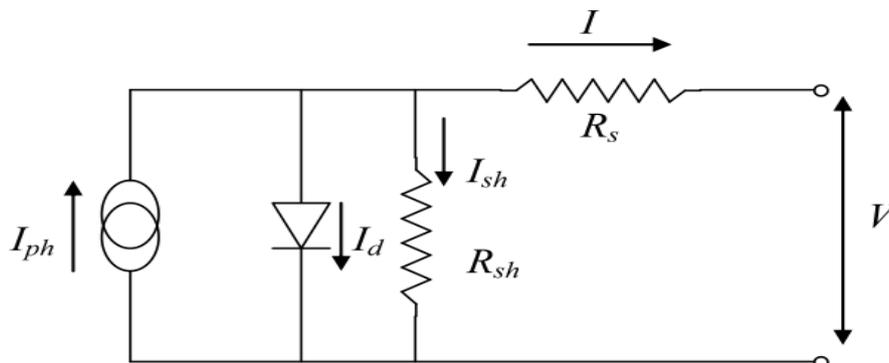


Figure II-1 Schéma équivalent du modèle à une diode

Le courant généré par le module est donné par la loi de kirchhoff :

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

I : le courant délivré par la cellule.

I_d : le courant de diode.

I_{sh} : le courant shunt.

La valeur du courant I_p est directement influencée à la fois par le rayonnement solaire E_s et la température T_j de la cellule.

La relation suivante permet de déterminer sa valeur :

$$I_p = P_1 \cdot E_s \cdot \left[1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref}) \right] \quad (\text{II.2})$$

Il est possible de déterminer la température de la cellule en utilisant la température ambiante et la température d'irradiation :

$$T_j = T_a + E_s \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

T_a : Température ambiante.

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(v + R_s I)}{A n_s K T_j} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.4})$$

I_{sat} : Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température

$$I_{sat} = P_4 T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{E_g}{k T_j} \right) \quad (\text{II.5})$$

E_g : Energie de gap (paramètre caractéristique du matériau pour le Si :

$$E_g : 1.12 \text{ eV}$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par

$$I_{sh} = \frac{(V+R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

Le courant de la cellule I est donné par :

$$I = I_p(E_s, T_j) - I_d(V, I, T_j) - I_{sh}(V) \quad (II.7)$$

L'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque :

$$I = P_1 E_s \cdot (1 + P_2 \cdot (E - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})) - P_4 T_j^3 \cdot \exp\left[\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right] \left[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s I)}{K \cdot n_s \cdot A \cdot T_j}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I}{R_{sh}} \quad (II.8)$$

II.2.1.b. Modèle a deux diodes [31]

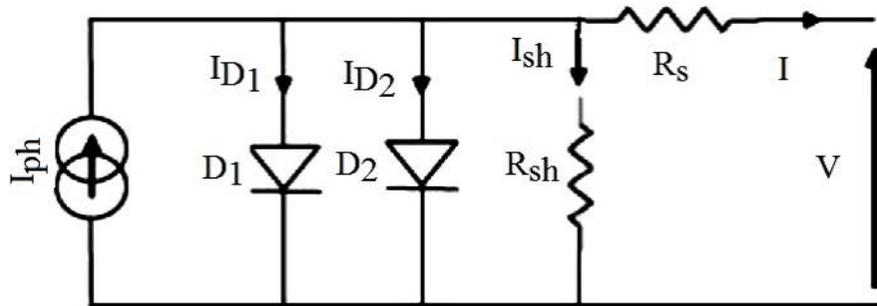


Figure II-2 Schéma équivalent d'une cellule PV model a deux diodes

Le courant produit par la cellule PV est donné par la relation suivante :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{AKT}\right) - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{2AKT}\right) - 1 \right] \quad (II.9)$$

II.2.1.c. Modèle de Bishop [32]

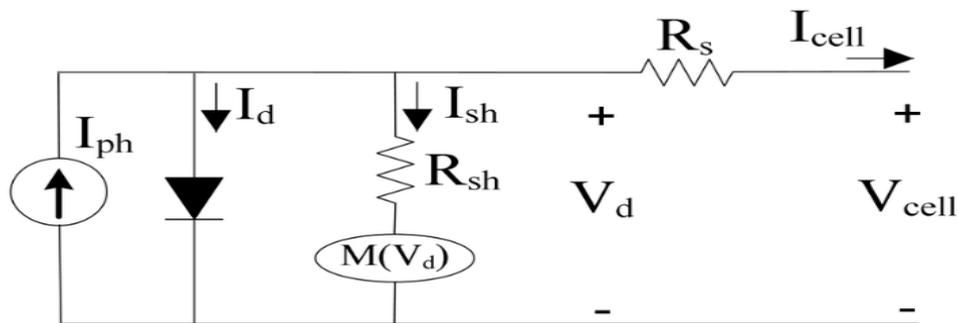


Figure II-3 Schéma du circuit équivalent représentant le model de Bishop

Le modèle de Bishop prend en compte l'effet d'avalanche de la cellule en incluant un multiplicateur non linéaire $M(V)$ en série avec la résistance shunt, dans le modèle à une diode. Cette modification peut être observée dans la Figure (II.1) du modèle. Le multiplicateur $M(V)$ correspond au dernier terme de l'équation (II.1) qui décrit la relation entre le courant (I) et la tension (V) d'une cellule photovoltaïque. En incorporant ce multiplicateur non linéaire, le modèle de Bishop permet de mieux représenter l'effet d'avalanche dans la cellule et d'obtenir des prévisions plus précises de son comportement électrique.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} + \left[K \cdot \left(1 - \frac{V+R_s I}{V_b}\right)^{-n} \right] \quad (\text{II.10})$$

II.2.2. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque sont représentés sur la figure (II-5 et II-6) ces figures représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension à $T=25^\circ\text{C}$ et $E_s=1000\text{W}/\text{m}^2$.

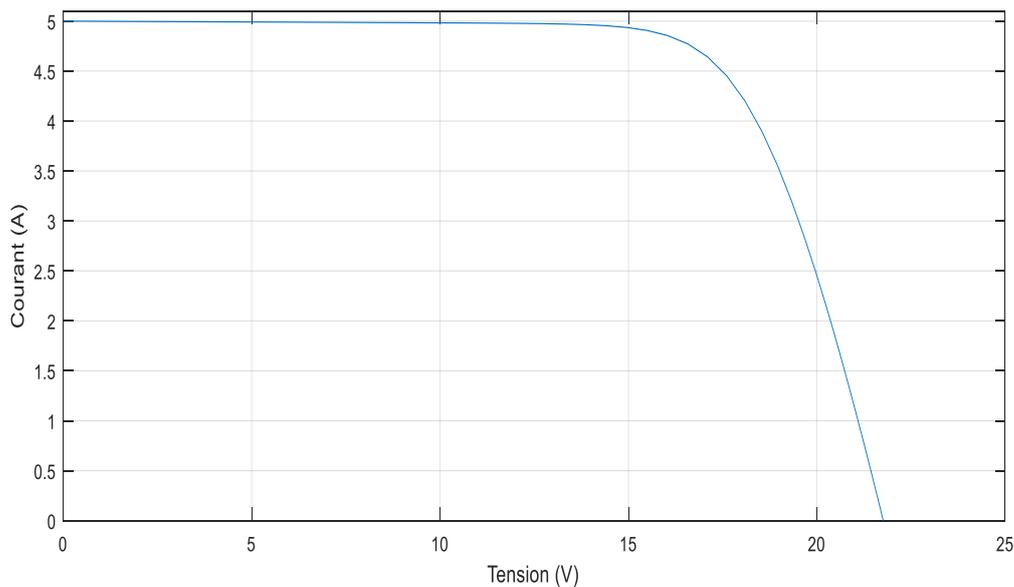


Figure II-4 Caractéristique $I(A)$ d'une cellule photovoltaïque, modèle à une diode

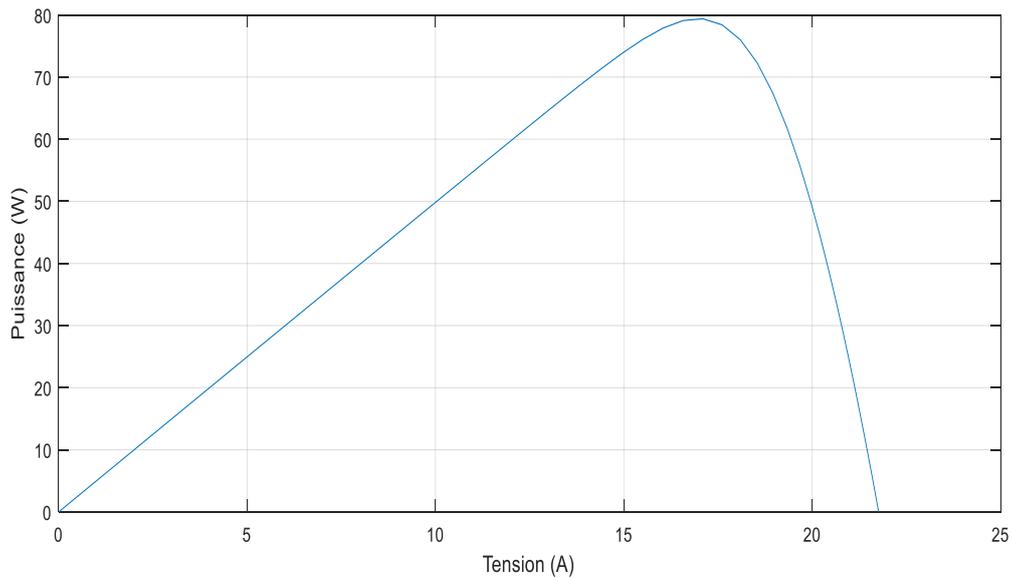


Figure II-5 Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque, modèle à une diode.

Les Figure II.4 et II.5 présentent les propriétés fondamentales I(V) et P(V) des modules PV dans des conditions atmosphériques standard, qui décrivent leur comportement.

II.2.2.a. Influence des conditions atmosphériques sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension

a) Influence de la température

Dans cet essai, nous allons maintenir l'ensoleillement constant et en faisant varier la température pour observer comment celle-ci affecte la performance du panneau solaire en termes de puissance et de courant généré. Nous allons enregistrer les valeurs de puissance et de courant pour chaque niveau d'ensoleillement afin de déterminer l'impact de ce dernier sur la performance du panneau solaire.

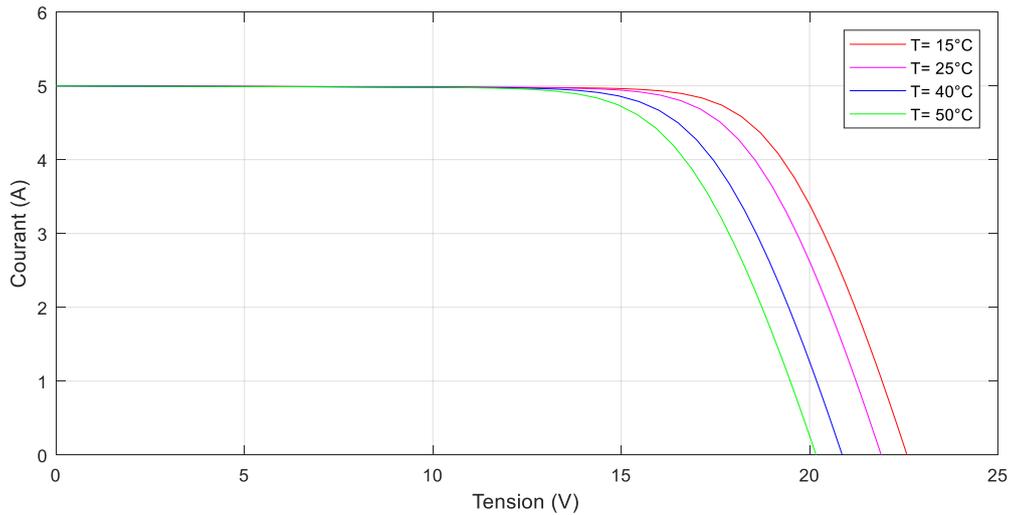


Figure II-6 Caractéristique I(v) du module PV pour un éclairement constant et température variable

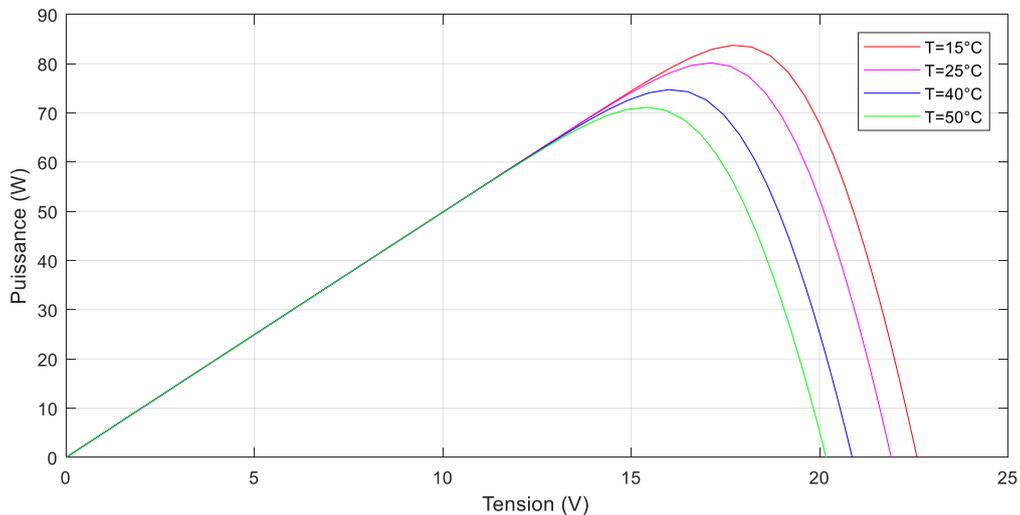


Figure II-7 Caractéristiques P(V) du module PV pour un éclairement constant et températures variable

La figure II.6 et II.7 montre les courbe I(v) et P(v) du module PV pour un éclairement constant et une température variable ($T=15^{\circ}\text{C}$, $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=40^{\circ}\text{C}$ et $T=50^{\circ}\text{C}$).

Il est évidant que la température a un impact négligeable sur la valeur du courant de court-circuit, tandis que la tension en circuit ouvert diminue considérablement avec l'augmentation de la température. En effet, pour chaque élévation de 25°C de la température, la puissance maximale des modules PV diminue d'environ 0,85%.

b) Influence de l'ensoleillement

Dans cet essai, nous allons maintenir la température à 25°C et faire varier l'ensoleillement pour observer comment la puissance et le courant générés par un panneau solaire évoluent en fonction de l'intensité lumineuse.

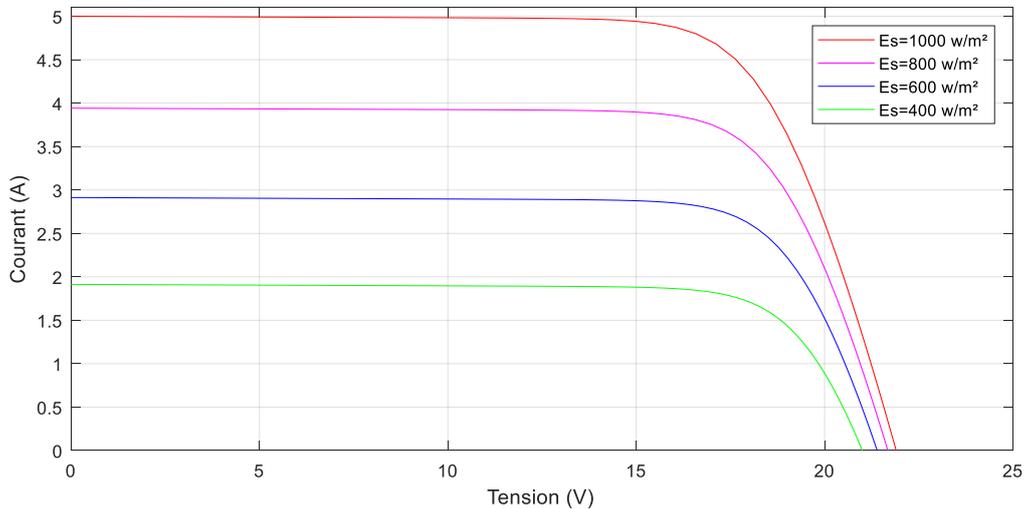


Figure II-8 Caractéristique I(v) d'un module PV pour une température constante et un éclairement variable.

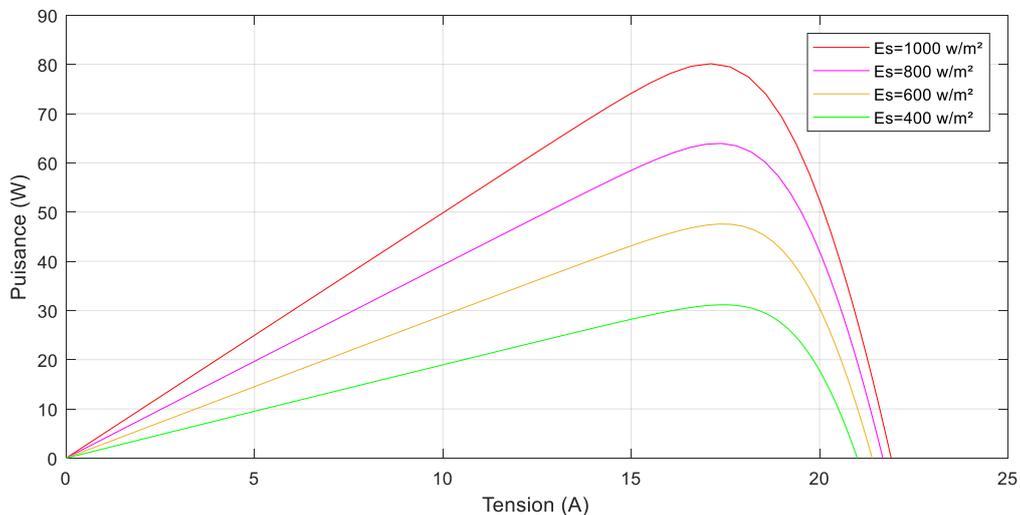


Figure II-9 Caractéristique P(v) d'un module PV pour une température constante et un éclairement variable.

Les figures II.8 et II.9 représentent les caractéristique I(v) et P(v) du module PV pour une température constante de $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclairement variable ($E_s=1000\text{W}/\text{m}^2$, $E_s=800\text{W}/\text{m}^2$, $E_s=600\text{W}/\text{m}^2$ et $E_s=400\text{W}/\text{m}^2$).

On remarque que le courant de court-circuit des modules PV est proportionnel à l'intensité du rayonnement, tandis que la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions et reste presque constante même en cas de faible éclaircissement. Cela implique que la puissance optimale P_{ppm} est proportionnelle à l'éclaircissement, tandis que la tension au point de puissance maximale reste approximativement constante.

II.2.3. Modélisation des convertisseurs

II.2.3.a. Modélisation du hacheur BOOST [33]

Afin d'obtenir le modèle mathématique du convertisseur, il est nécessaire d'analyser son fonctionnement dans les deux phases (fermée et ouverte) et d'élaborer ensuite un modèle approximatif.

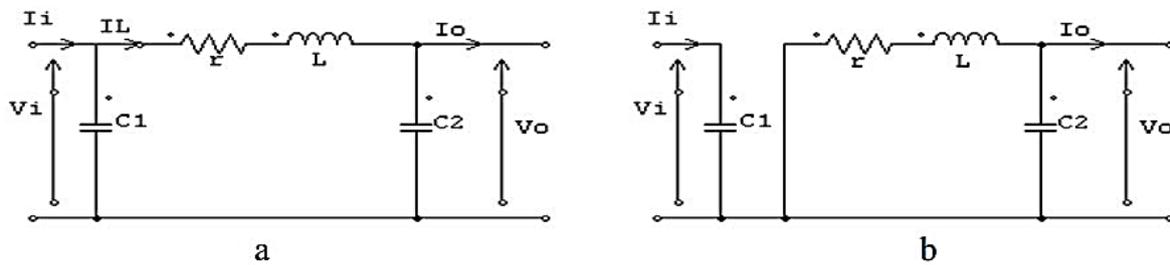


Figure II-10 Schémas équivalents de l'hacheur survolteur (a) : K fermé, (b) ouvert. [34]

Pour la première période αT_s :

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dV_i}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = C_2 \frac{dV_o}{dt} = -i_o \\ V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_i \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha)T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dV_i}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c1} = C_2 \frac{dV_o}{dt} = i_L - i_o \\ V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_i - V_o \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

II.2.3.b. Modélisation de l'onduleur [35]

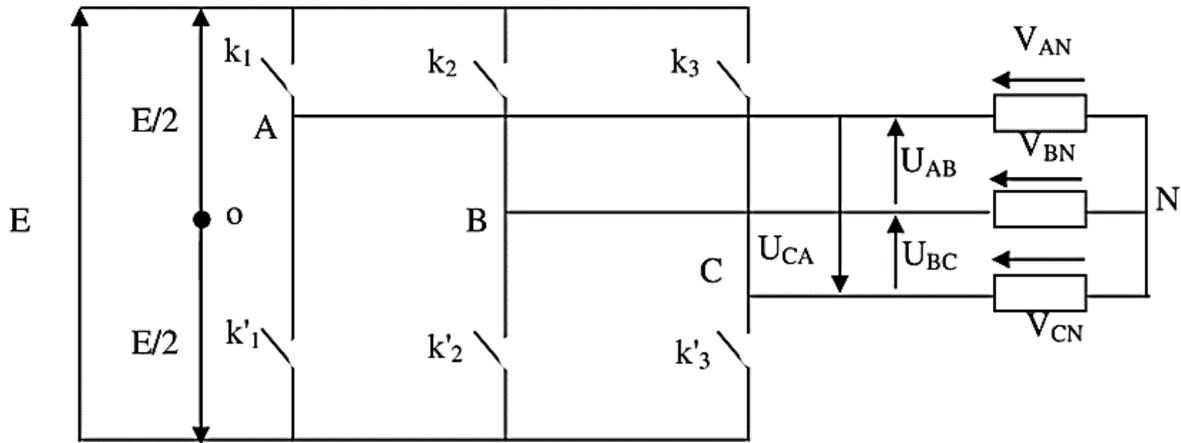


Figure II-11 Schéma simplifié d'un onduleur de tension triphasé [36]

$V_A(t), V_B(t), V_C(t)$: sont les tensions simples délivrées par l'onduleur.

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} : Les tensions composées délivrées par l'onduleur.

Les équations des tensions composées sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AO} - V_{BO} \\ U_{BC} = V_{BO} - V_{CO} \\ U_{CA} = V_{CO} - V_{AO} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

D'autre part, on a les relations entre les tensions simples et les tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} V_A = \frac{1}{3}(U_{AB} - U_{CA}) \\ V_B = \frac{1}{3}(U_{BC} - U_{AB}) \\ V_C = \frac{1}{3}(U_{CA} - U_{BC}) \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Il est possible d'exprimer les tensions simples en termes des tensions mesurées entre les points A, B, C et le point milieu fictif O associé à l'alimentation par :

$$\begin{cases} V_A = \frac{1}{3}(2V_{AO} - V_{BO} - V_{CO}) \\ V_B = \frac{1}{3}(-V_{AO} - 2V_{BO} - V_{CO}) \\ V_C = \frac{1}{3}(-V_{AO} - V_{BO} - 2V_{CO}) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

On obtient sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Un interrupteur dans chaque bras de l'onduleur peut être représenté par une valeur binaire de commande quand un interrupteur est fermé, sa commande prend la valeur 1 quand il est ouvert, sa commande prend la valeur 0. Étant donné que les interrupteurs fonctionnent de façon complémentaire dans chaque bras, si l'un a une commande de 1, l'autre aura une commande de 0.

$S_i=+1$; Interrupteur du haut fermé et interrupteur du bas ouvert.

$S_i=-1$; Interrupteur du haut ouvert et interrupteur du bas fermé.

Ce qui donne :

$$\begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} = \frac{E}{2} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

D'où la nouvelle matrice :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{E}{2} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

L'onduleur générera des tensions simples directement à partir des états des signaux de commande S_A , S_B et S_C . Les états de ces signaux de commande seront déterminés par la stratégie de contrôle choisie.

II.2.4. Modélisation de la machine asynchrone

La représentation schématique de la machine asynchrone dans l'espace électrique est donnée par la figure (II-12).

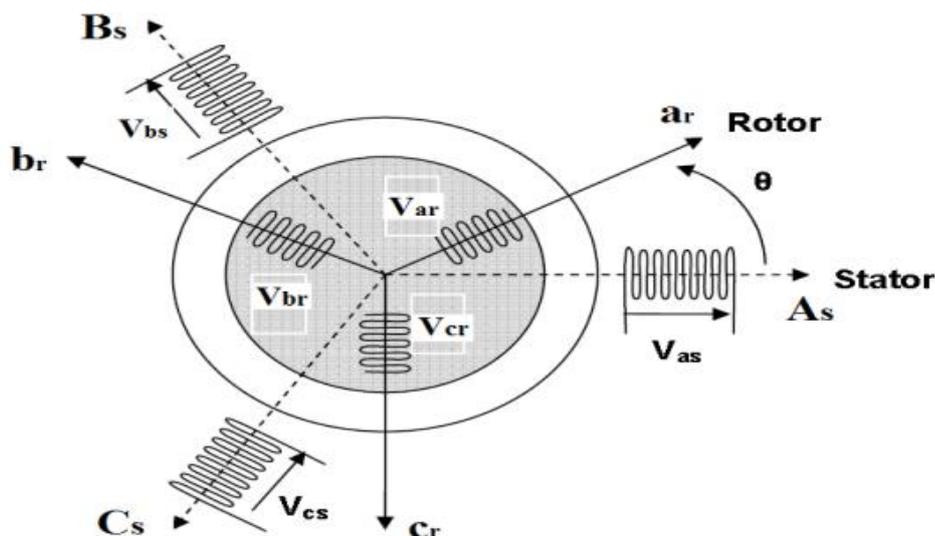


Figure II-12 Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasée [37]

a) Hypothèses simplificatrices

Le modèle de la machine asynchrone que nous allons utiliser repose sur les hypothèses suivantes :

- le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants électriques.
- le circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté, on peut donc considérer que seuls les enroulements sont parcourus par des courants, de plus, on suppose que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- La force magnétomotrice créée par chaque phase du stator et du rotor présente une distribution spatiale (le long de l'entrefer) sinusoïdale (on ne considère que la première harmonique). Par conséquent, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales des angles que font les axes magnétiques. L'effet dû à la présence des encoches est négligé. [38]

b) Conventions de signes

Les machines asynchrones sont principalement utilisées comme moteurs, nous adopterons les conventions de signes suivantes :

- Un courant positif qui traverse son propre enroulement crée un flux magnétique positif.
- Une force électromotrice positive induit un courant positif.

- Le stator est considéré comme le générateur et le rotor comme le récepteur.
- Les angles et les vitesses de rotation sont comptés positivement dans le sens trigonométrique (sens antihoraire).

Ces conventions de signes seront utilisées pour établir les équations de la machine asynchrone, elles visent à uniformiser le sens des vecteurs et à faciliter la compréhension de ces équations. [39]

II.2.4.a. Mise en équation de la machine asynchrone

Le comportement de la machine peut être traduit par trois types de phénomènes régis par leurs équations respectives : équation électrique, magnétique et mécanique. [29]

a) Equations électriques

Soient (v_{sabc}) , (I_{sabc}) et (ϕ_{sabc}) , respectivement, le vecteur tension, courant et flux des troisphases statoriques de la machine.

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}; [I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Les mêmes notations sont adoptées pour les grandeurs rotoriques en remplaçant l'indice 's' par l'indice 'r'.

On définit les tensions statoriques et rotoriques comme suit :

Pour l'ensemble des enroulements statoriques, on écrira les notations matricielles :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

R_s : Résistance de la phase du stator

Pour l'ensemble des enroulements rotoriques, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

R_r : Résistance de la phase du rotor.

b) Equations magnétiques

Les hypothèses citées précédemment, entraînent les relations suivantes entre les flux (Φ) et les courants (I) des phases statorique et rotorique.

$$\begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sa} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sa} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ra} & M_r & M_r \\ M_r & L_{ra} & M_r \\ M_r & M_r & L_{ra} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Les mutuelles inductances stator-rotor dépendent de l'angle α (position du rotor) et ont pour valeur crête M_{sr} .

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{sr}] \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \alpha & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Avec : $\alpha = \omega t$

On aura finalement les équations magnétiques sous forme matricielle des phases statoriques et rotoriques comme suit :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \\ \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & L_{sa} & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_{sa} & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_{ra} & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_{ra} & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_{ra} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

L_{sa} : Inductance propre d'une phase statorique.

L_{ra} : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle d'une phase statorique.

M_r : Inductance mutuelle d'une phase rotorique.

M_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre deux phases statorique et rotorique.

A partir des relations (II.25) ; (II.26) et (II.27) les équations électriques deviennent :

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \} \quad (\text{II.28})$$

$$[v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \} \quad (\text{II.29})$$

c) Equation mécanique

L'équation mécanique régissant la vitesse de rotation de la machine est donnée par

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f \cdot \omega \quad (\text{II.30})$$

Avec :

J : Moment d'inertie ramené sur l'arbre de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la machine.

C_r : Couple résistant de la charge.

f: Coefficient de frottement visqueux.

II.2.4.b. Transformation d-q [29]

La transformation d-q consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes dq. L'angle intervient pour les grandeurs du stator et l'angle pour les grandeurs du rotor. La matrice de transformation permet de passer d'un système de grandeurs triphasées équilibré en un système de grandeurs diphasées équivalent d'axe (d, q).

Les composantes relatives et réelles sont liées par l'équation :

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II.31})$$

Où : d, q, o sont respectivement des composantes directe, quadratique et homopolaire, la matrice d-q de changement de base $[P(\theta)]$ est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Où θ est l'angle de transformation, il dépend du choix du référentiel ainsi que des grandeurs statoriques et rotoriques.

Le coefficient $\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$ a été choisi pour conserver la même puissance instantanée dans les deux représentations (triphasee et diphasée). La transformation d-q est appliquée de la même façon aux tensions, aux courants et aux flux dans les deux systèmes de représentation.

La matrice de passage inverse est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Le modèle de la machine est établi dans le repère des axes d et q solidaire au champ tournant suit à la nullité des composantes homopolaires (système équilibré).

II.2.4.c. Équations de la machine asynchrone dans les axes d et q

a) Equations électriques

$$V_{ds} = \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} + R_s i_{ds} \quad (\text{II.34})$$

$$V_{qs} = \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{ds} + R_s i_{qs} \quad (\text{II.35})$$

$$V_{dr} = \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qr} + R_r i_{dr} = 0 \quad (\text{II.36})$$

$$V_{qr} = \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{dr} + R_r i_{qr} = 0 \quad (\text{II.37})$$

Avec : $\omega_r = \omega_s - \omega_m$ et ω_r est la vitesse mécanique.

b) Equations magnétiques

$$\phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (\text{II.38})$$

$$\phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (\text{II.39})$$

$$\phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L \cdot i_{ds} \quad (\text{II.40})$$

$$\phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L \cdot i_{qs} \quad (\text{II.41})$$

Avec :

L_s : Inductance cyclique statorique.

L_r : Inductance cyclique rotorique.

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

c) Équation mécanique

$$C_{em} = p \frac{3}{2} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.42})$$

p : Nombre de pair de pole.

II.2.4.d. Choix de référentiel

- Référentiel lié au stator : $\omega_s=0$; $\omega_r = -\omega_m$
- Référentiel lié au rotor : $\omega_r=0$; $\omega_s=\omega_m$
- Référentiel lié au champ tournant : $\omega_r=\omega_s - \omega_m$

II.2.5. Modélisation de la pompe centrifuge [40]**II.2.5.a. Caractéristique « Hauteur-Débit »**

Les fabricants de pompes fournissent des courbes montrant la relation entre le débit Q [en m^3/s] et la hauteur manométrique totale H_{MT} (en mètres) pour les roues avec les diamètres minimum et maximum possibles. Si la pompe est de type monocellulaire à roue radiale, elle est caractérisée par un modèle qui permet de déterminer la dépendance entre la hauteur manométrique H_{MT} créée par la roue et le débit Q du fluide. Cette relation $H_{MT}(Q)$ est obtenue en soustrayant les pertes de charge ΔH , qui sont dues au frottement contre les parois des canaux d'aspiration et de refoulement, de la caractéristique théorique H_{HTd} de la pompe.

$$H_{MT} = H_G + \Delta H \quad (\text{II.43})$$

Avec :

$$H_G = \frac{(wr_2)^2}{g} - \frac{Qw}{2\pi b_2 g} \cot g\beta_2 \quad (\text{II.44})$$

$$\Delta H = AQ^2 \quad (\text{II.45})$$

A : c'est la constante des pertes de charge.

r_2, b_2 et β_2 : sont des constes données par le constructeur relatives à la forme et angles d'inclinaisons des aubes de la pompe centrifuge.

La modification de la caractéristique $H_{MT}(Q)$ pour d'autres vitesses d'entraînement s'effectue par l'utilisation des lois de similitude ci-après.

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (\text{II.46})$$

$$\frac{H_{MT}}{H_{MT_n}} = \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \quad (\text{II.47})$$

Avec :

ω et ω_n : Sont respectivement la vitesse réelle et la vitesse nominale de rotation de la pompe.

Q et Q_n : Sont respectivement le débit réel et le débit nominal de la pompe.

H_{MT} et H_{MT_n} : Sont respectivement la hauteur manométrique réelle et la hauteur manométrique nominale de la pompe.

On obtient le modèle de PELEIDER-PETERMAN qui caractérise des courbes ayant comme paramètre la vitesse ω , et identifiées par l'expression suivante :

$$H_{MT} = C_1 Q^2 + C_2 \omega Q + C_3 \omega^2 \quad (\text{II.48})$$

Les coefficients C_1, C_2 et C_3 étant des fonctions des caractéristiques de la pompe (forme et dimensions des aubes et du diffuseur).

ω : Vitesse de rotation [rad/s].

H_{MT} : Hauteur manométrique totale [m].

Q : Débit [m^3/s].

II.2.5.b. Caractéristique « Couple-Vitesse »

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de la vitesse, la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur, le moteur devra, donc, être très rapide pour assurer un bon débit.

II.2.5.c. Caractéristique « Débit – Vitesse »

Le débit dépend de la vitesse de rotation du moteur, mais il est important de noter qu'il existe une vitesse minimale requise à une H_{MT} donnée pour obtenir un débit non nul. Cela est dû au fait que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle, ce qui est plus important qu'en rotation. Par conséquent, la pompe centrifuge opposera un couple résistant C_r , alors que C_s représente le petit couple statique et K_r le coefficient de proportionnalité $[(Nm/rad. s^{-1})^2]$ introduit par BRAUNSTEIN et KORNFELD en 1981. Il est donc crucial d'atteindre une vitesse suffisante pour vaincre le couple résistant C_r et obtenir un débit de départ non nul.

$$\begin{cases} C_r = K_r \omega^2 + C_s \\ P_{mec} = K_r \omega^3 \end{cases} \quad (II.49)$$

Avec les expressions données ci-dessus, ainsi que les constantes du constructeur et le rendement fourni dans l'annexe, il est possible de créer un modèle permettant de simuler le débit et la hauteur manométrique obtenue.

II.3. Conclusion

Ce chapitre a permis de modéliser les divers éléments qui composent un système complexe de motopompe asynchrone alimenté par un générateur photovoltaïque, utilisant un hacheur et un onduleur. Cette étape de modélisation est cruciale car elle nous permettra d'étudier la commande et le dimensionnement de ce système dans les chapitres suivants.

Chapitre III

Dimensionnement et optimisation du système de pompage photovoltaïque

Chapitre III.

III.1. Introduction

La conception d'un système de pompage photovoltaïque nécessite à la fois une étude dimensionnelle et une commande appropriée pour assurer un fonctionnement optimal de l'ensemble. [41]

Dans ce chapitre nous allons avant tout présenter les différentes étapes pour réaliser le dimensionnement du système de pompage photovoltaïques qui nous sera indispensable pour choisir les éléments du système a utilisé afin de satisfaire les besoins en eau demander. Ensuite, on présente quelques méthodes pour maximiser la puissance du générateur en le faisant fonctionner à son point de puissance maximale.

Enfin, Nous allons faire une simulation en appliquant pour optimiser le système photovoltaïque la méthode perturbe & observe (P&O).

I.1. Dimensionnement du système

Le dimensionnement précis d'un système de pompage photovoltaïque est crucial pour garantir un fonctionnement optimal et fiable, ainsi qu'une rentabilité économique à long terme.

III.1.a. Étape de dimensionnement du système

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

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

III.1.b. Évaluation des besoins en eau

La première étape dans le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque est d'estimer les besoins en eau. Pour l'irrigation, ces besoins dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation utilisée et des facteurs météorologiques tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent et la saison de l'année.

III.1.c. Puissance Hydraulique nécessaire

La formule suivante permet d'obtenir la puissance hydraulique nécessaire pour effectuer un pompage :

$$P_{hyd} = \varphi \cdot g \cdot Q_v \cdot HMT \quad (III.1)$$

Avec :

P_{hyd} : La puissance communiquée au fluide par la pompe (W).

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

Q_v : Débit volumique (m³/s).

HMT : Hauteur manométrique totale atteinte par la pompe (m).

φ : Masse volumique d'eau (1000 Kg/m³).

III.1.d. Inclinaison du générateur photovoltaïque

Lorsque le plan est perpendiculaire aux rayons du soleil, le rayonnement solaire atteint son intensité maximale. Par conséquent, si l'on incline un plan quelconque vers le soleil, l'intensité du rayonnement solaire augmente.

Pour maximiser la quantité d'énergie solaire directe captée, il est recommandé de changer constamment l'inclinaison du plan pour le maintenir à angle droit avec les rayons du soleil. Si le plan est fixe, la quantité d'énergie reçue sera moins importante car les rayons du soleil le frapperont souvent de biais. En inclinant le plan à un angle égal à la latitude, on peut capturer le rayonnement solaire annuel au maximum.

III.1.e. Mois de dimensionnement

La stratégie fréquemment employée par les entreprises spécialisées dans la vente et l'installation de systèmes photovoltaïques consiste à déterminer une puissance maximale qui permettra de répondre aux besoins énergétiques pendant le mois le moins ensoleillé. Cette puissance est sélectionnée en fonction de l'inclinaison du panneau solaire, qui est généralement proche de la latitude du lieu. De cette manière, on s'assure que le panneau solaire fournira une quantité suffisante d'énergie tout au long de l'année, y compris pendant les périodes d'ensoleillement réduit.

III.2. Choix des composants

III.2.a. Dimensionnement du réservoir d'eau

Le pompage solaire en continu ne correspond pas toujours aux besoins des utilisateurs. En effet, bien que l'énergie solaire soit plus intense en milieu de journée, les besoins en eau ne sont pas forcément élevés à ce moment-là. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de stocker l'eau dans un réservoir pour pouvoir la puiser en fonction des besoins. La taille du réservoir doit prendre en compte le fait qu'une partie de l'eau requise chaque jour doit être stockée durant la journée, en même temps que la pompe extrait l'eau. Le pompage avec batterie permet de faire fonctionner la pompe selon la demande, mais l'utilisation d'un réservoir peut également s'avérer nécessaire si la pompe ou le forage ne sont pas suffisants pour répondre à une demande d'eau instantanée. Dans ce cas, la pompe doit être en marche plus longtemps et l'eau stockée dans un réservoir suffisamment grand pour répondre à la demande maximale en eau de la journée. La taille du réservoir dépend également de la disponibilité de l'eau au cours des jours ou des saisons. De plus, la variation du niveau de la nappe phréatique en certaines saisons peut obliger à diminuer la vitesse d'extraction de l'eau, voire à arrêter périodiquement la pompe. Dans ces cas, il est plus avantageux de pomper l'eau de façon constante tout au long de la journée et de stocker l'eau pour pouvoir répondre aux besoins en eau au moment voulu.

La capacité du réservoir solaire dépend du nombre de personnes qui l'utilisent et de leur consommation d'eau quotidienne. La quantité d'eau nécessaire varie en fonction du type de bâtiment et du niveau de confort souhaité. En général, le volume du réservoir doit être équivalent à environ 1 à 1,5 fois la consommation d'eau quotidienne du village.

$$T_{rmin} = N_f (N_{Per} \cdot C_{per} + C_{bét} + C_{irr}) \quad (III.2)$$

Avec :

T_{rmin} : taille minimale du réservoir

N_f : Nombre de famille du village

N_{Per} : Nombre moyen de personne pour chaque famille.

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

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

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

Par contre la taille maximale du réservoir est calculée comme suit :

$$T_{rmax} = 1,5 \cdot N_f (N_{per} \cdot C_{per} + C_{bét} + C_{irr}) \quad (III.3)$$

Pour notre cas, on veut alimenter un petit village à la wilaya de Bejaia qui contient 200 familles de 6 personnes avec une consommation économisée d'eau (une famille Algérienne). Le volume moyen consommé par une personne journée est estimé à 25 Litres/jours. Quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation des bétails d'une famille quotidiennement est 100 Litres/jours. Quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation des plantes du jardin d'une famille est estimée par 100 Litres/jours.

$$T_{rmin} = 200(25.6 + 100 + 100)$$

$$T_{rmin} = 70m^3$$

$$T_{rmax} = 1,5 \cdot 200(25.6 + 100 + 100)$$

$$T_{rmax} = 105m^3$$

Donc on va prendre un réservoir de 110m³.

III.2.b. Dimensionnement de la pompe centrifuge

Comme mentionné précédemment lors du calcul de la puissance hydraulique requise, connaître cette puissance permet de dimensionner la pompe en fonction d'un débit et d'une hauteur donnés. Le débit nominal(Q) de la pompe est égal à 18,2 m³ /h.

$$P_{hyd} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 12 \cdot 18,2}{3600}$$

$$P_{hyd} = 595,14W$$

III.2.c. Puissance mécanique

Pour avoir la puissance mécanique nécessaire on fait recours à l'équation suivante :

$$P_{mec} = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{\eta_P} \quad (III.4)$$

Avec :

C_H : Constante hydraulique. (2,725)

η_p : Rendement de pompe (%).

Si le rendement de la pompe centrifuge est de 55%, la puissance mécanique requise par la pompe sera :

$$P_{mec} = \frac{595,14}{0,55}$$

$$P_{mec} = 1082,07W$$

III.2.d. Dimensionnement du moteur Asynchrone

Le dimensionnement du moteur consiste à déterminer la puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner la pompe. Cette puissance est exprimée en watts (W) et se calcule en prenant en compte la puissance mécanique requise par la pompe et le rendement du moteur.

$$P_{elec} = \frac{P_{mec}}{\eta_m} \quad (III.5)$$

Avec :

η_m : Rendement de moteur (%).

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

- Pour notre cas le rendement de notre moteur est de 85%

$$P_{elec} = \frac{1082,07}{0,85}$$

$$P_{elec} = 1273,02W$$

III.2.e. Puissance demandée par les modules

La puissance demandée par les modules est calculée par :

$$P_{dem} = \frac{P_{elec}}{\eta_{ond}} \quad (III.6)$$

Avec :

η_{ond} : Rendement de l'onduleur (%).

- Le rendement de l'onduleur est de 95%

$$P_{dem} = \frac{1273,02}{0,95}$$

$$P_{dem} = 1340,02W$$

III.2.f. Temps de pompage nécessaire

Le temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau :

$$T_p = \frac{V}{Q_V} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

V : quantité d'eau requise (m³)

Q_V : Débit nominal(m³/h)

$$T_p = \frac{70}{18,2}$$

$$T_p = 3,85 \frac{\text{heurs}}{\text{jours}}$$

III.2.g. Energie électrique journalière demandé

$$E_{elec} = P_{dem} \cdot T_p \quad (\text{III.8})$$

$$E_{elec} = 1340,3,33$$

$$E_{elec} = 5159,10 \text{ Wh/j}$$

III.2.h. Dimensionnement des panneaux

$$P_{PV} = \frac{E_{elec}}{T_p(1-Pertes)} \quad (\text{III.9})$$

$$P_{PV} = \frac{5159,10}{3,85(1 - 0,15)}$$

$$P_{PV} = 1576,50W$$

III.2.i. Nombre de panneaux

$$N_{PV} \geq \frac{P_{PV}}{P_C} \quad (\text{III.10})$$

$$N_{PV} \geq \frac{1576,50}{80}$$

$$N_{PV} \geq 19,70$$

On prend 20 panneaux.

III.3. La commande de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT)

En somme, pour améliorer la connexion entre une source et une charge, on peut ajuster le rapport cyclique α du convertisseur statique de manière à maximiser la puissance fournie à la charge. Différentes techniques peuvent être utilisées à cet effet, dont la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT). [18]

III.3.a. Principe De La Commande MPPT

Une commande MPPT accompagnée d'un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation est conçue pour permettre à un générateur photovoltaïque de produire en continu la puissance maximale disponible, indépendamment des conditions météorologiques telles que l'irradiation et la température. La commande du convertisseur positionne ainsi le système au point de fonctionnement optimal (V_{opt} , I_{opt}). [42]

L'algorithme MPPT est utilisé pour maximiser la puissance de sortie du générateur photovoltaïque (GPV) en faisant varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) grâce à un signal électrique approprié. Ce processus peut être plus ou moins complexe, mais en général, il consiste à ajuster le rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée (I et V) jusqu'à atteindre le point de puissance maximale (MPP). [43]

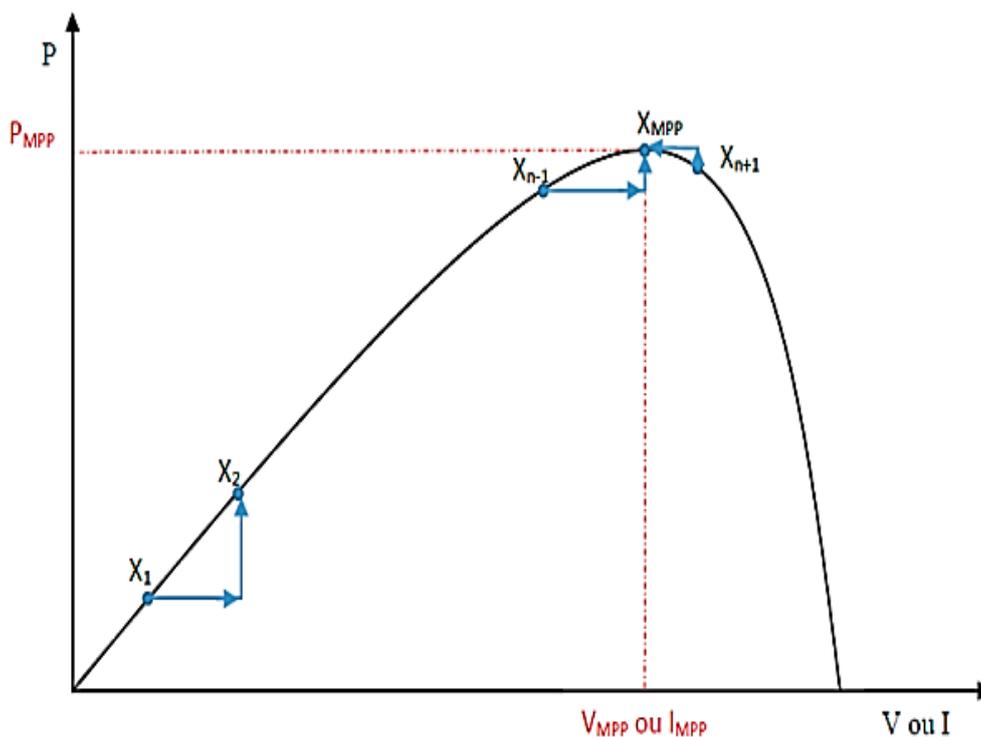


Figure III-1 Principe de la commande MPPT [18]

III.4. Différents types de commande MPPT

On utilise la technique du suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques afin d'optimiser la puissance produite. Plusieurs techniques MPPT sont couramment utilisées, telles que : Perturber et Observer, l'Incrément de Conductance, la mesure d'une fraction de la tension en circuit ouvert (FCO), la mesure d'une fraction du courant de court-circuit (FCC) et le contrôle à base de la logique floue (LF). Pour notre système, nous avons choisi d'utiliser la technique Perturber et Observer.

III.4.a. Méthode d'incrément de conductance (IC)

Le principe de l'incrément de conductance (IC) est une méthode courante de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les panneaux solaires, qui implique la mesure de la tension de fonctionnement et du courant du module PV à l'aide de deux sondes. Cette technique repose sur l'idée que la dérivée de la puissance de sortie du panneau solaire par rapport à sa tension de fonctionnement est nulle au point de puissance maximale. [44]

L'algorithme d'incrément de conductance est représenté par :

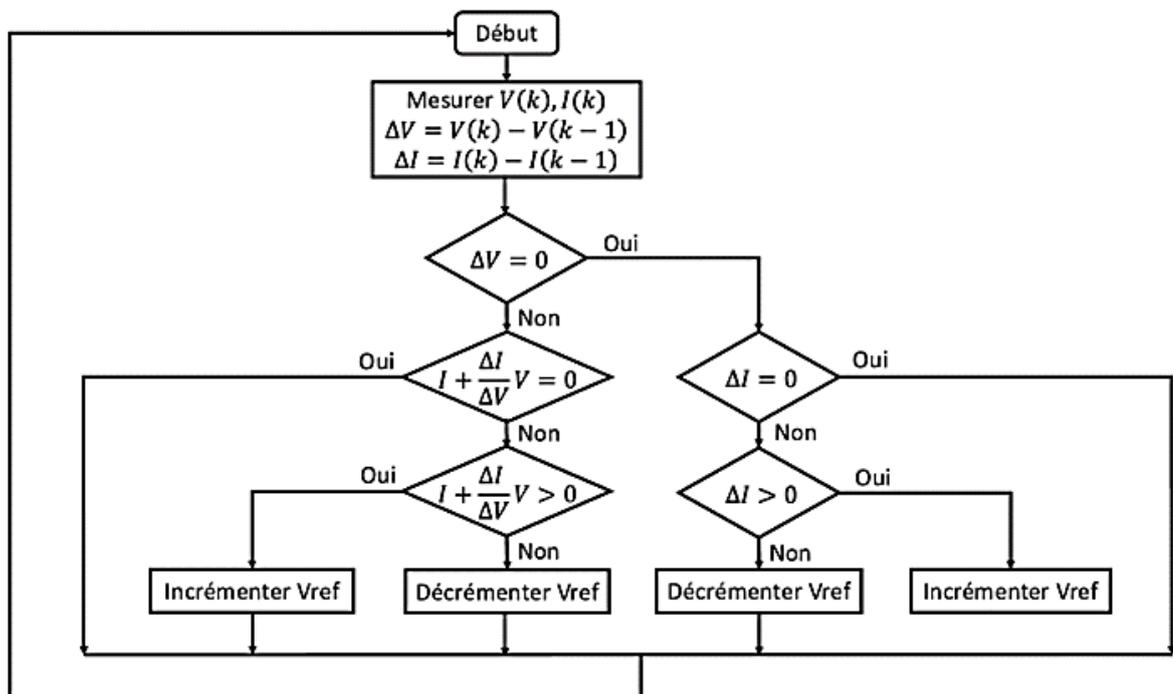


Figure III-2 Algorithme de la méthode incrément de conductance (CI) [45]

III.4.b. Mesure d'une fraction de la tension en circuit ouvert (FCO) [46]

L'algorithme repose sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert (V_{oc}) et la tension optimale (V_{mpp}), telle que décrite par l'équation suivante : $V_{mpp} = kV_{oc}$, où k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV.

Pour obtenir la tension optimale, il est donc nécessaire de mesurer la tension de circuit ouvert V_{oc} . En ajustant la tension du panneau solaire à la tension optimale calculée, le point de fonctionnement du panneau est maintenu près du point optimal. Ce processus est effectué de manière cyclique en modifiant le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale

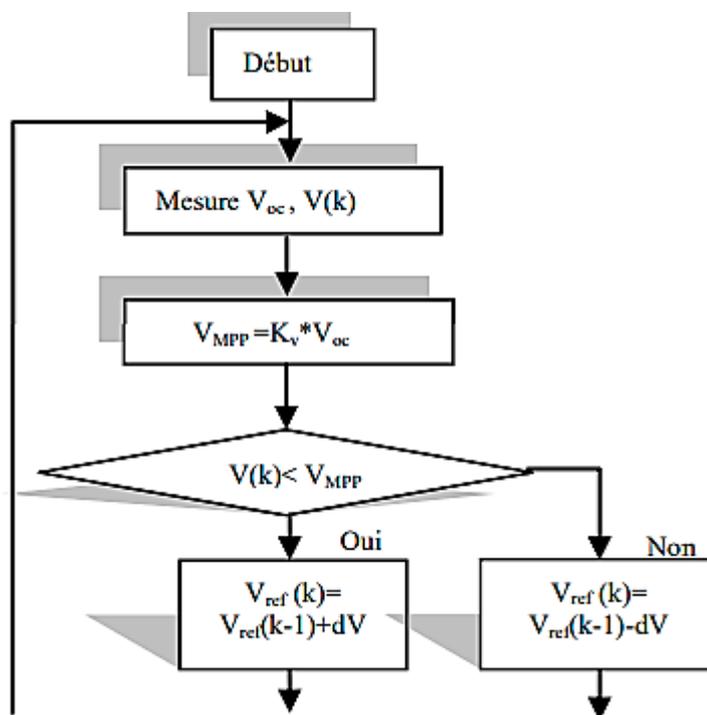


Figure III-3 Algorithme de fraction d'une tension en circuit ouvert

III.4.c. Mesure d'une fraction de courant de court-circuit [46]

Cette technique repose sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal, décrite par l'équation suivante : $I_{mpp} = kI_{cc}$, où k est un facteur de courant variant généralement entre 0,85 et 0,92 et dépendant des caractéristiques de la cellule PV. En ajustant le courant du panneau solaire au courant optimal, on peut obtenir le point de fonctionnement optimal. Pour ce faire, le rapport cyclique est modifié jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale.

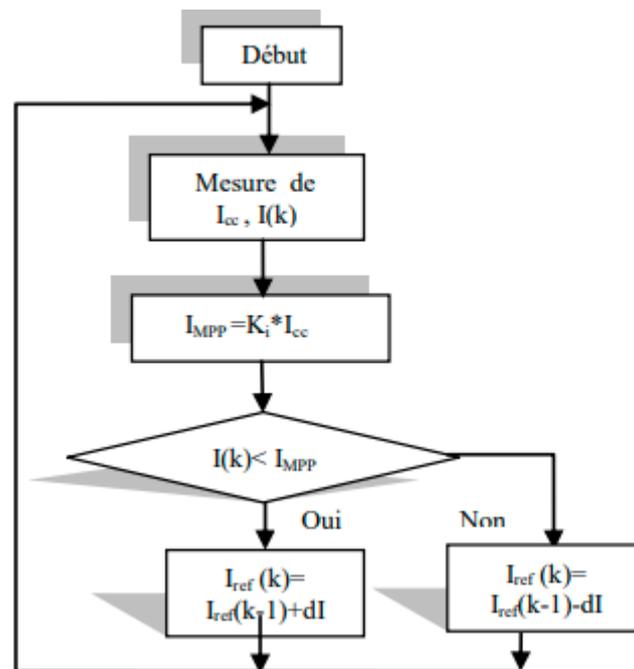


Figure III-4 Algorithme de fraction de courant en court-circuit

III.4.d. Méthode de la logique floue [47]

Cette approche de commande floue est pertinente dans les cas où le processus à commander présente des non-linéarités fortes ou des imprécisions, ou lorsque l'on ne dispose pas d'un modèle mathématique précis. Dans ce chapitre, nous aborderons les fondements théoriques de la logique floue et son application à la commande d'un générateur photovoltaïque et d'une serre. Nous utiliserons cette commande pour divers systèmes tels que le MPPT, l'état de charge de la batterie, ainsi que la régulation des variables du microclimat de la serre.

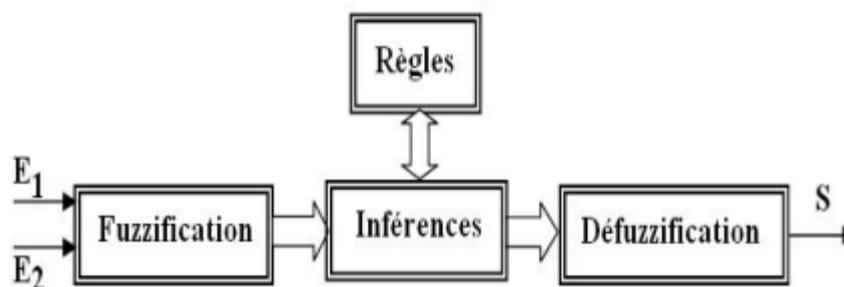


Figure III-5 Algorithme de la logique floue

III.4.e. La Méthode Perturbation et Observation (P&O)

La méthode Perturbation et Observation (P&O) est très répandue pour la poursuite du point de puissance maximale. Elle repose sur une approche itérative consistant à mesurer les caractéristiques du panneau photovoltaïque, puis à appliquer une petite perturbation sur la tension ou le courant pour observer la variation de puissance obtenue en conséquence. [48]

Comme expliqué précédemment, la commande MPPT de type P&O fonctionne en perturbant la tension V_{pv} d'une petite amplitude autour de sa valeur initiale, puis en observant la variation résultante de la puissance P_{pv} . Ainsi, si une légère augmentation de la tension V_{pv} provoque une augmentation de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point de puissance maximale (PPM). Si la puissance P_{pv} diminue au lieu d'augmenter, cela indique que le système a déjà dépassé le PPM. De même, une diminution de la tension V_{pv} peut également être analysée pour déterminer la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, et pour le faire converger vers le maximum de puissance en utilisant une commande appropriée. En résumé, si la puissance PV augmente suite à une perturbation de tension, la direction de perturbation est maintenue, tandis qu'elle est inversée si la puissance diminue, afin de reprendre la convergence vers le nouveau PPM. [49]

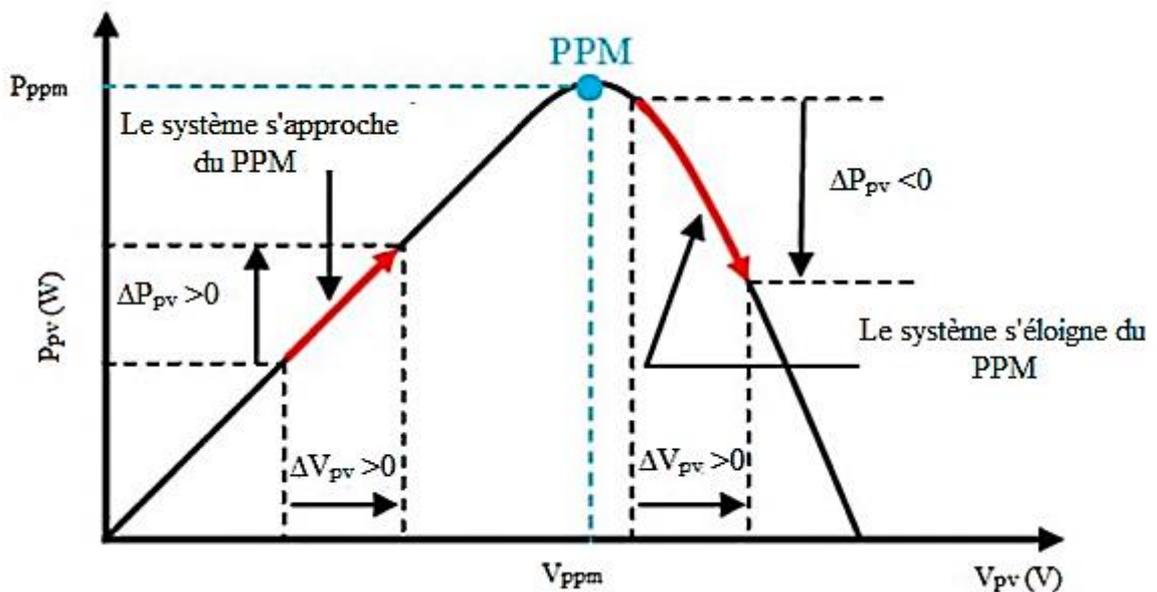


Figure III-6 principe de la commande perturbation & d'observation.

La Figure (III.7) illustre l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type Perturbe et Observe (P&O), qui analyse l'évolution de la puissance après chaque perturbation de tension. Cette méthode de commande nécessite deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) pour déterminer la puissance du PV à chaque instant. Bien que

largement utilisée en raison de sa facilité d'implémentation, la méthode P&O présente des problèmes liés aux oscillations autour du Point de Puissance Maximum (PPM) en régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation, mais cela ralentit la recherche du PPM. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre précision et rapidité pour optimiser cette commande. [18]

Il est connu que cette méthode de commande permet d'obtenir un rendement plus élevé pendant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Cependant, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM. [50]

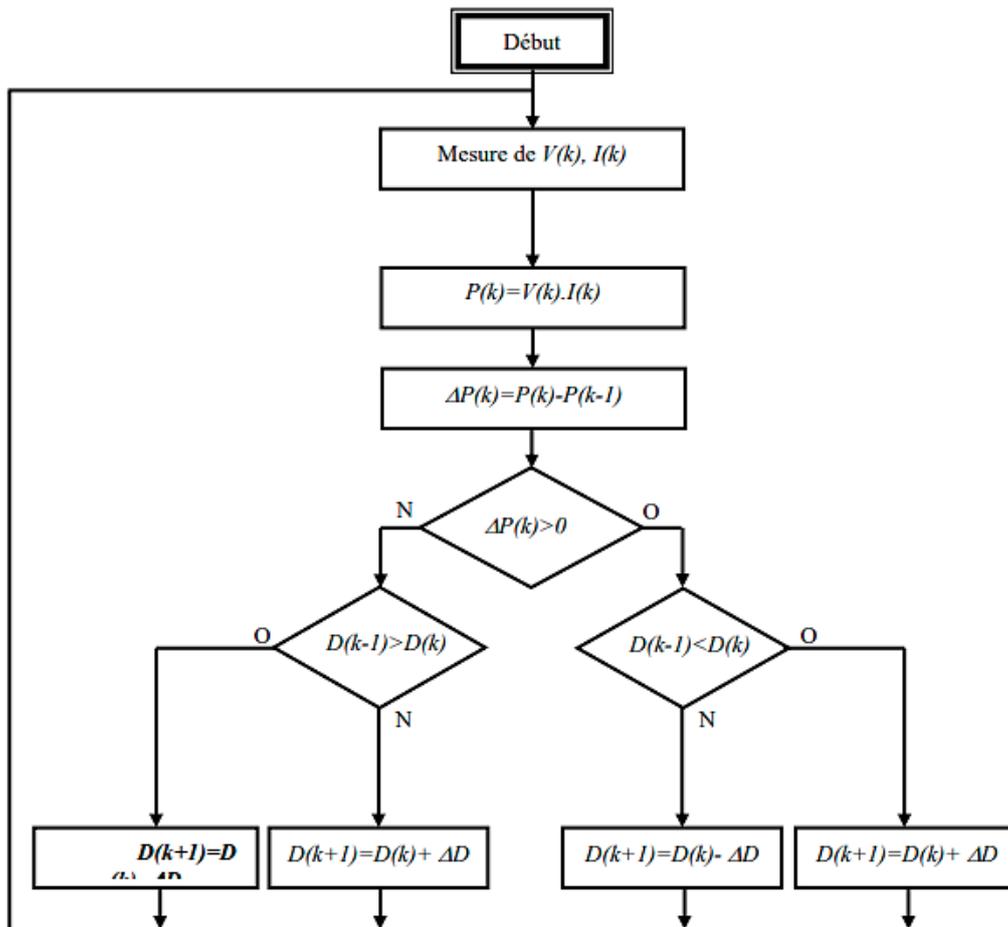


Figure III-7 Algorithme de la méthode P&O. [34]

III.4.f. Autres Methods

Il existe d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui sont parfois appelés des techniques nouvelles, telles que :

- Les algorithmes à base de réseau de neurones.
- L'algorithme de la capacité parasite.
- La méthode de l'oscillation forcée.
- La méthode de balayage du courant (CurrentSweep)

III.5. Fonctionnement de la commande P&O sous des conditions variables

Pour comprendre le comportement du système face aux changements climatiques, on va effectuer une diminution lente et rapide de l'ensoleillement à température constante.

❖ Première partie

En premier lieu on va effectuer une diminution rapide de l'ensoleillement à température constante ($T_c=25^\circ\text{C}$). On commence par un ensoleillement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et à l'instant $t=5\text{s}$ on bascule $E_s=800\text{W}/\text{m}^2$. On obtient les résultats suivants :

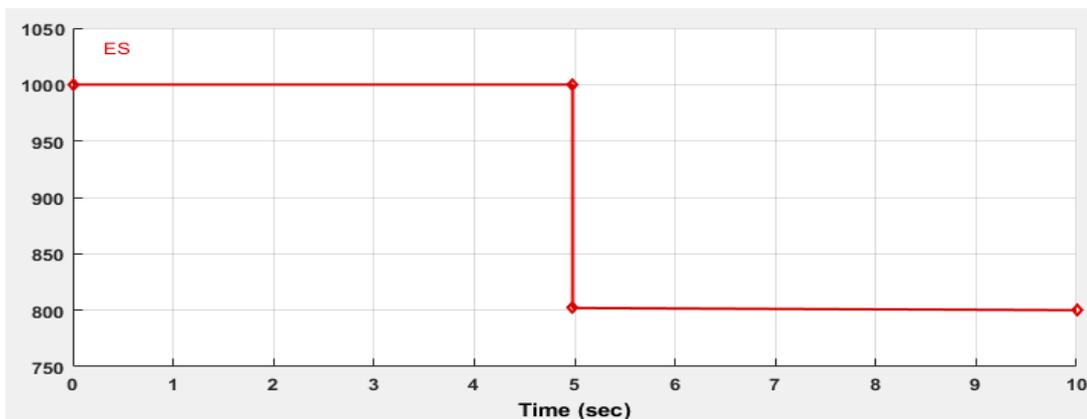


Figure III-8 Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement rapide.

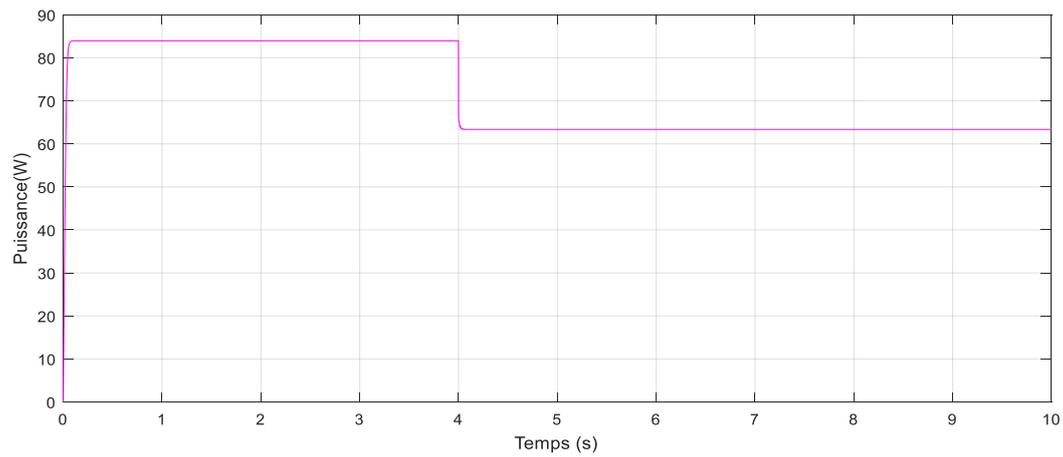


Figure III-9 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement rapide.

Pour une diminution lente en commence par un ensoleillement de 1000W/m^2 et a partir de $t=3\text{s}$ on commence a diminuer le l'ensoleillement jusqu'à $t=6\text{s}$ ou $E_s=800\text{W/m}^2$.

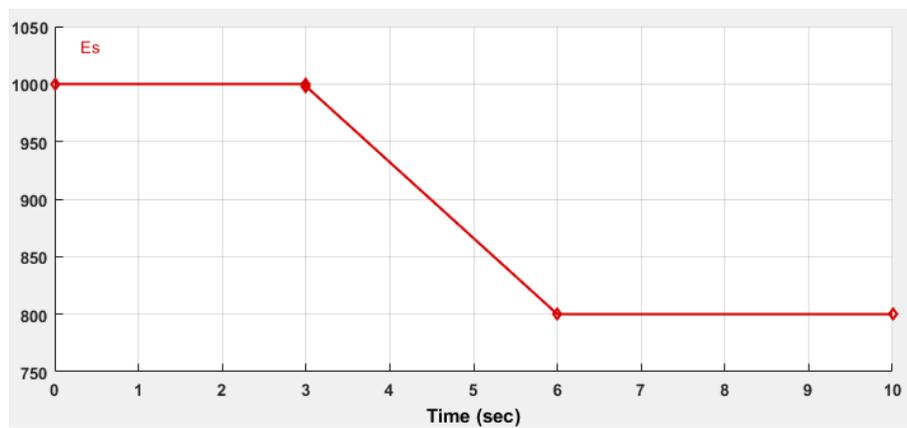


Figure III-10 Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement lent.

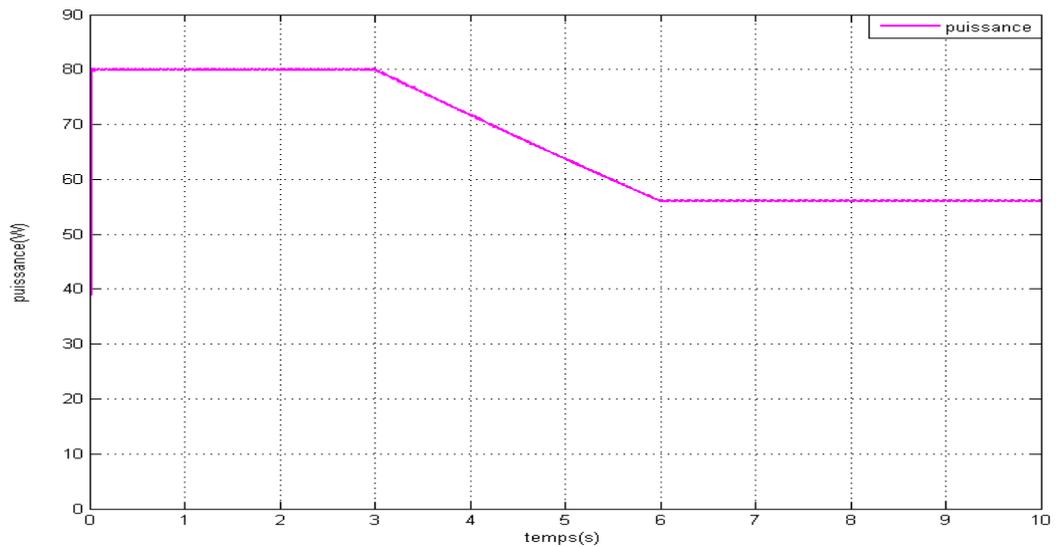


Figure III-11 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement lent.

Pour une variation rapide et lente d'ensoleillement, on remarque que la puissance est telle que l'ensoleillement c'est-à-dire que si l'ensoleillement diminue la puissance aussi diminue au même moment et la même vitesse.

❖ Deuxième partie

Dans cette partie, on va effectuer une diminution rapide et lente de la température avec un ensoleillement fixe ($E_s=1000\text{W/m}^2$).

En commence par une température de 25°C et à $t=5\text{s}$ on la bascule à $T=0^\circ\text{C}$.

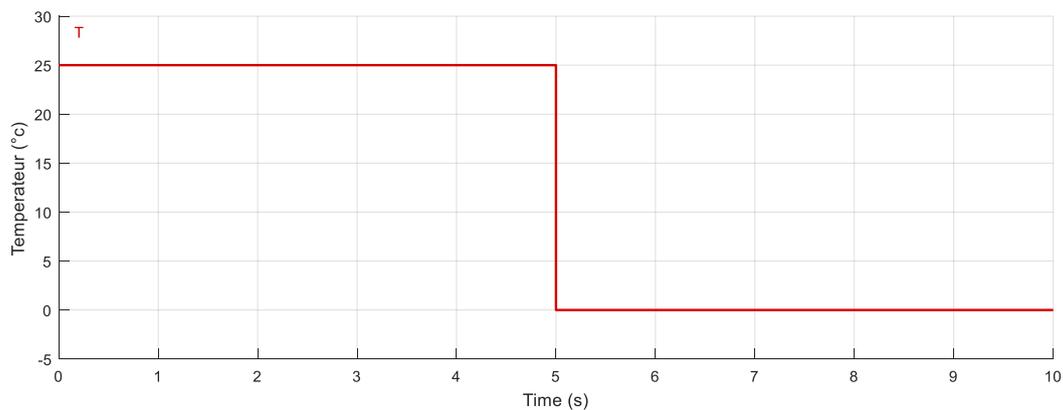


Figure III-12 Allure de la consigne de la température dans le cas d'un changement rapide.

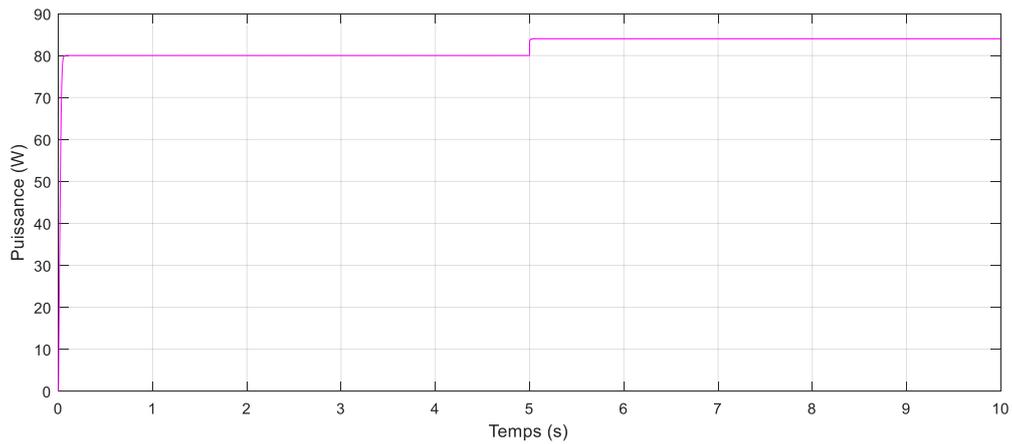


Figure III-13 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement rapide.

Cette fois ci on va effectuer un changement lent avec $T=25^{\circ}\text{C}$ et on commence à diminuer la température jusqu'à $t=6\text{s}$ ou on aura $T=0^{\circ}\text{C}$.

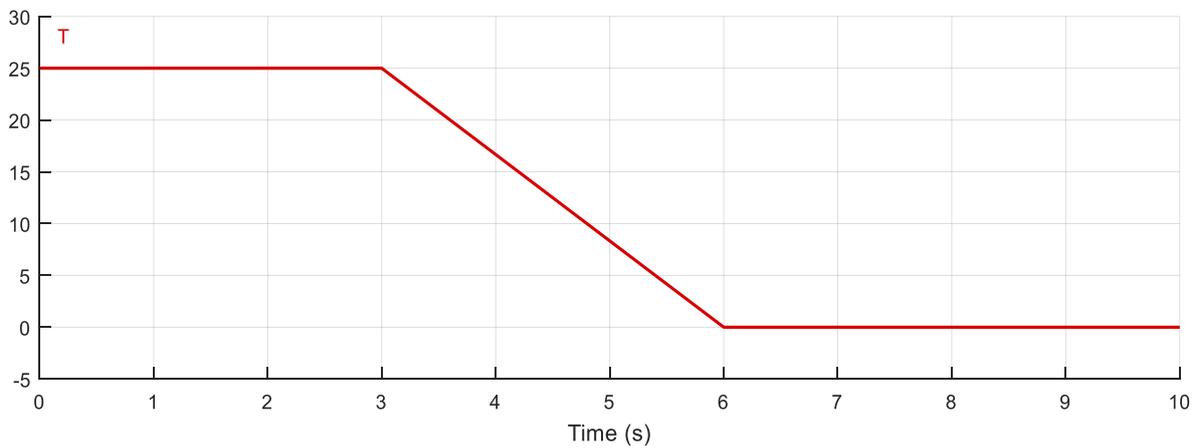


Figure III-14 Allure de la consigne de la température dans le cas d'un changement lent.

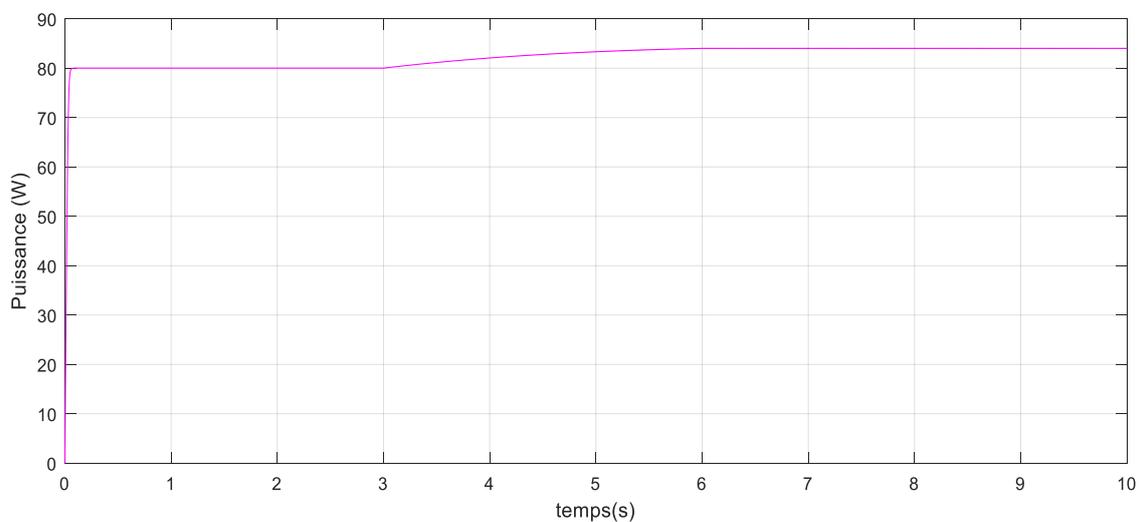


Figure III-15 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement lent.

Cette partie met en évidence que lorsqu'il y a une baisse rapide de la température, la puissance augmente rapidement jusqu'à atteindre une stabilité lorsque la température se stabilise. En revanche, lorsqu'il y a une baisse de température plus lente, la puissance augmente de manière plus graduelle. De cette observation, on peut en déduire que la puissance est étroitement liée aux variations d'ensoleillement, et que toute variation de température entraîne une variation inverse de la puissance.

III.6. Commande des machines asynchrones [50]

La commande d'une machine à courant continu à excitation séparée présente une simplicité due à la séparation naturelle du couple et du flux. En revanche, la commande des machines à courant alternatif (MSAP, MAS) est plus difficile en raison du fort couplage entre ces deux variables. Pour parvenir à un contrôle similaire à celui des machines à courant continu, BLASCHKE a introduit en 1971 les fondements de la nouvelle théorie de commande des machines à courant alternatif appelée "commande vectorielle ».

III.6.a. Principe de la commande vectorielle

Pour réaliser le découplage entre le flux et le couple, il est nécessaire d'orienter le repère « dq », ce qui implique de fixer en permanence une contrainte pour imposer l'une des grandeurs de sortie impliquées dans l'expression du couple (II.62). Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit le flux rotorique, le flux statorique, ou le flux d'entrefer.

Dans notre étude, nous nous concentrons sur la technique de commande par orientation du flux rotorique, qui offre des performances dynamiques supérieures, notamment en termes de maîtrise de la dynamique du couple électromagnétique grâce à la maîtrise de la dynamique du flux rotorique.

Dans ce cas, nous choisissons l'orientation du repère de telle sorte que $\Phi_{dr} = 0$, ce qui entraîne $\Phi_{rd} = \Phi_r$ en permanence. Cela signifie que le flux Φ_r est constamment aligné avec l'axe « d ».

La composante quadratique est donc nulle dans ce cas, et la commande est conçue de manière à maintenir le flux constant. Cette hypothèse permet une simplification significative du système d'équations lors de l'élaboration de la commande.

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L} \Phi_r \cdot i_{sq} \quad (\text{III.11})$$

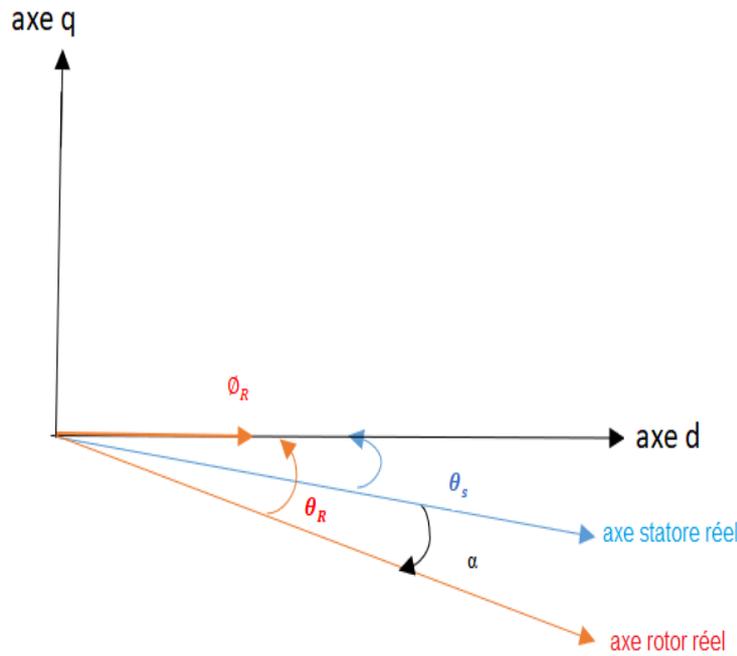


Figure III-16 Orientation du flux rotorique orienté sur l'axe d.

En supposant que la commande maintienne $\Phi_{rd} = \Phi_r a$ une constante et $\Phi_{rq} = 0$, alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent $\frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{d\Phi_{rd}}{dt} = \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = 0$

A partir des équations (II.34), (II.35), (II.36), (II.37)

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \mathcal{L}_s i_{ds} + \mathcal{M} i_{dr} \\ \phi_{qs} = \mathcal{L}_s i_{qs} + \mathcal{M} i_{qr} \\ \phi_{dr} = \mathcal{L}_r i_{dr} + \mathcal{M} i_{ds} \\ \phi_{qr} = \mathcal{L}_r i_{qr} + \mathcal{M} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

$$\frac{d\phi_r}{dt} \quad (\text{III.13})$$

Par ailleurs, l'équation, $v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} = 0$ permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -\frac{R_r \cdot i_{rq}}{w_r} \quad (\text{III.14})$$

A partir de l'équation :

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M \cdot i_{ds} \quad (\text{III.15})$$

On peut d'exprimer le courant i_{dr} comme suit :

$$i_{dr} = \frac{\phi_r - M \cdot i_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.16})$$

Comme $i_{dr} = 0$

On a alors : $\phi_{dr} = \phi_{md} = \phi_r = LM \cdot i_{sd}$

Par ailleurs, la relation (III.26) peut s'écrire de la manière suivante :

$$i_{qr} = -\frac{M \cdot i_{qs}}{L_r} \quad (\text{III.17})$$

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

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{qs} + \omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \phi_r \quad (\text{III.18})$$

Dans cette étude, nous avons opté pour l'utilisation de correcteurs de courant par hystérésis. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de déterminer des consignes de tension et la connaissance du modèle interne du moteur n'est pas requise. De plus, il n'est pas nécessaire de prendre en compte les termes de compensation dans notre système de commande.

I.1.1. Estimation de $\phi_{dr}, \omega_s, \theta_s$

Les grandeurs statoriques sont les seules mesurables, tandis que les grandeurs rotoriques ne le sont pas directement. Par conséquent, il est nécessaire de les estimer à partir des grandeurs statoriques après une transformation de Park.

$$\phi_r = \frac{M i_{ds}}{1 + T_r s} \quad (\text{III.19})$$

Tel que :

S : est l'opérateur de LAPLACE.

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{III.20})$$

La pulsation de glissement est estimée à base de la composante statorique quadrature I_{sq} . Elle est exprimée par l'expression suivante :

$$\omega_r = \frac{M \cdot i_{qs}}{T_r \cdot \phi_r}$$

III.7. Simulation globale du système de pompage photovoltaïque

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de notre système de pompage photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « P&O ».

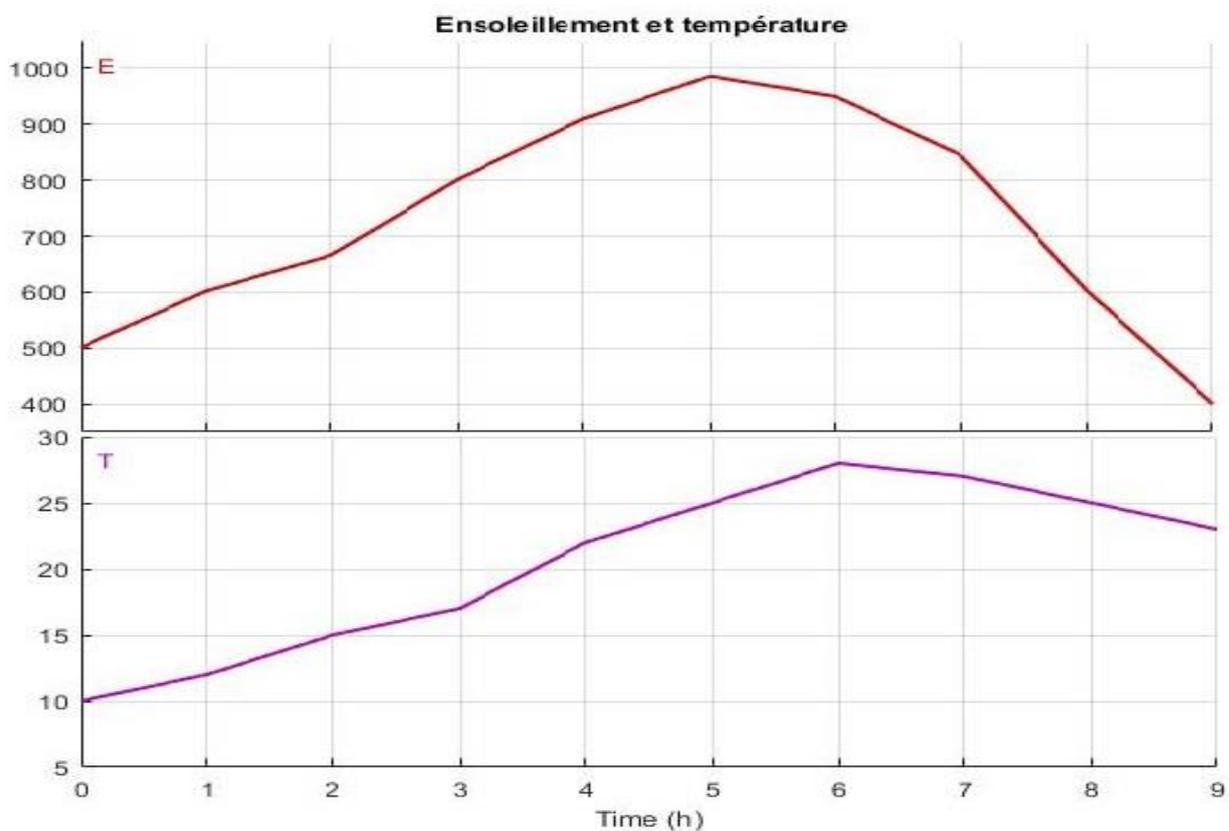


Figure III-17 Allure de la température et d l'ensoleillement d'une journée.

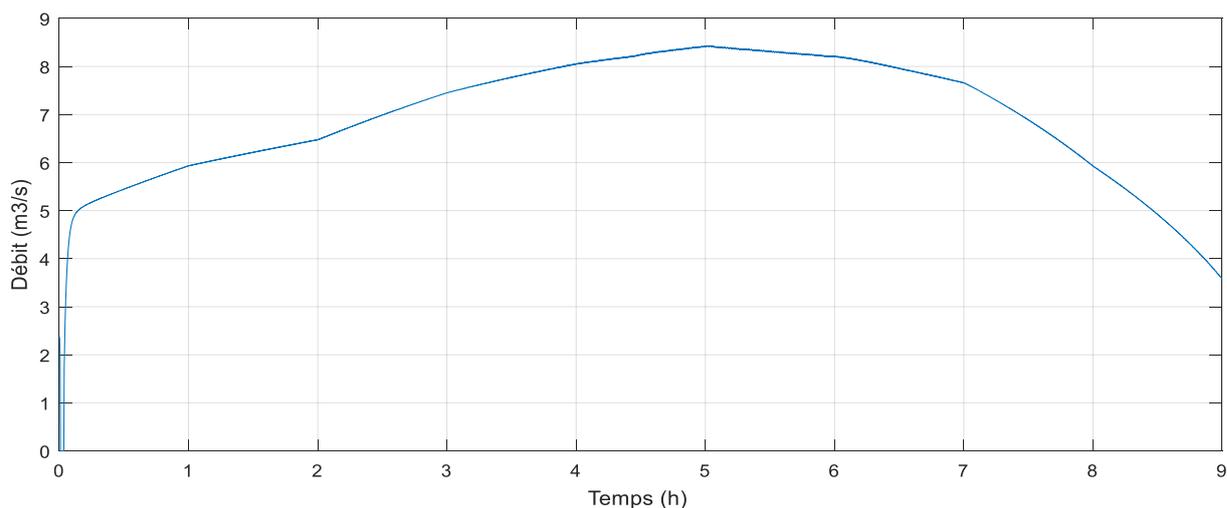


Figure III-18 Allure du débit nominal de la pompe

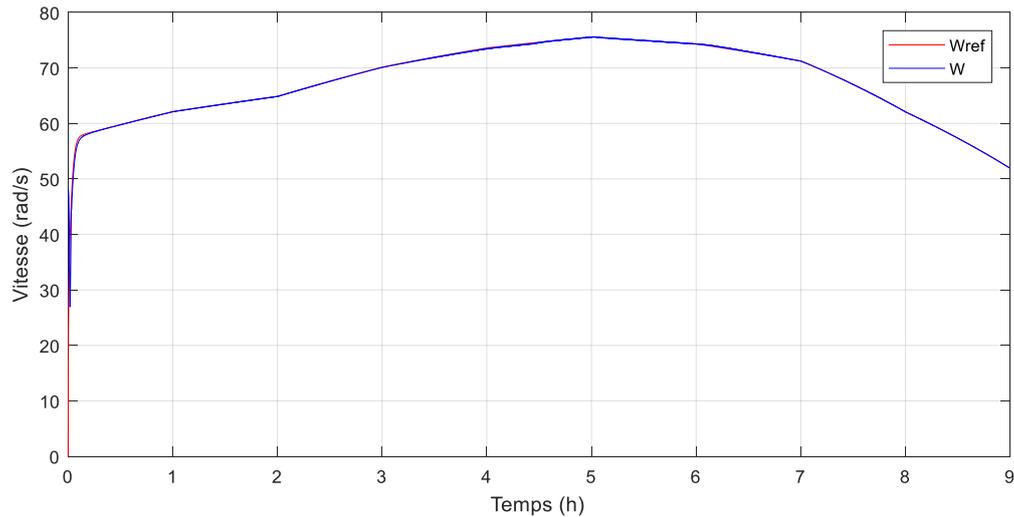


Figure III-19 Allure de la vitesse de référence et la vitesse de rotation

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionner notre système de pompage photovoltaïque afin de choisir les composants idéals et on a pu entamer la partie la plus importante de notre étude qui s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale MPPT ainsi les différents types de méthodes MPPT rencontrés le plus souvent dans la littérature. Nous avons choisi la commande Perturbe & observe afin de visualiser les performances de cette commande qui nous permettra de la comparer à la méthode logique floue dans le prochain chapitre.

Chapitre IV

*Commande et simulation du
système de pompage photovoltaïque*

Chapitre IV.

IV.1. Introduction

Lorsqu'une augmentation soudaine de l'ensoleillement survient, la méthode P&O présente un inconvénient majeur : la puissance produite par le panneau solaire augmente également, ce qui peut induire en erreur l'algorithme P&O. En effet, l'algorithme peut réagir comme s'il s'agissait d'une perturbation précédente, et continuer dans la même direction, ce qui éloigne le système du point de puissance maximale réel. C'est pour cette raison que nous avons décidé d'utiliser une autre méthode MPPT pour notre système. Nous allons explorer dans ce chapitre une méthode basée sur la logique floue. [51]

IV.2. Méthode à base de logique floue :

Les méthodes de réglage conventionnelles se basent sur une modélisation adéquate du système et un traitement analytique à l'aide de fonction de transfert ou d'équations d'état seulement, cette connaissance est souvent entachée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation du processus.

De plus, le couplage existant entre les variables du système rend la commande d'optimisation plus difficile.

Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Californie de Berkeley. Dès 1974, la logique floue a connue des applications au niveau des systèmes de réglage et de contrôle ; la première implantation d'un contrôleur flou a été appliquée par l'équipe du professeur Madani sur une machine à vapeur au Queen Mary Collège de Londres. [52][53]

IV.2.1. Logique floue, principes et définitions :

La logique floue est basée sur la théorie des ensembles flous, qui introduit la notion d'appartenance partielle. Contrairement aux théories mathématiques classiques, où un élément appartient soit complètement, soit pas du tout à un ensemble donné, les ensembles flous permettent une appartenance graduelle. Ainsi, chaque élément peut être considéré comme appartenant partiellement ou graduellement à des ensembles flous définis, offrant ainsi une représentation plus nuancée et flexible. [53]

IV.2.1.a. Les ensembles flous :

Le concept fondamental de la théorie des sous-ensembles flous, et par conséquent de la logique floue, repose sur la notion de degré d'appartenance d'un élément à un sous-ensemble

flou. Les sous-ensembles flous sont caractérisés par une fonction d'appartenance, généralement notée μ , qui attribue à chaque élément un degré d'appartenance sur une échelle allant de 0 à 1. En d'autres termes, contrairement à la théorie des ensembles classiques où un élément est soit membre soit non-membre d'un ensemble, dans la logique floue, un élément peut appartenir à un sous-ensemble flou avec un certain degré d'appartenance compris entre 0 et 1. [53]

On définit un sous ensemble A de U comme suit :

$$A = \left\{ \left(\frac{x}{\mu_A(x)} \right) \right\}, x \in U \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

$\mu_A(x)$ Degré d'appartenance de l'élément x au sous-ensemble flou A

μ_A : Est la fonction d'appartenance définie dans l'intervalle [0,1].

$\mu_A : U \longrightarrow [0,1]$.

$X \longrightarrow \mu_A(x)$

IV.2.1.b. Variable linguistique :

En effet, une variable linguistique est une variable dont les valeurs associées sont des termes linguistiques plutôt que des valeurs numériques. Chaque variable linguistique est définie par un ensemble comprenant plusieurs éléments :

- **X** : Il s'agit du nom de la variable linguistique, qui représente le concept ou la caractéristique que nous souhaitons décrire linguistiquement.
- **T(x)** : C'est l'ensemble des valeurs linguistiques que la variable x peut prendre. Ces valeurs linguistiques sont des termes linguistiques tels que "petit", "moyen", "grand", "très chaud", etc.
- **U** : C'est l'univers du discours associé à la variable x. Il s'agit de l'ensemble des valeurs possibles que x peut prendre, indépendamment des termes linguistiques utilisés pour les décrire.
- **G** : C'est la règle syntaxique qui définit comment générer les valeurs linguistiques de x à partir de l'univers du discours U. Cette règle permet de spécifier comment les termes linguistiques sont construits et utilisés pour représenter les différentes valeurs de x.

- **M** : C'est la règle sémantique qui associe un sens ou une signification à chaque valeur linguistique de x . Elle permet d'interpréter les termes linguistiques utilisés pour décrire les valeurs de x et de les relier aux caractéristiques réelles ou abstraites qu'ils représentent. [53]

IV.2.1.c. Univers du discours :

Lors de la conception d'une application floue, l'une des premières étapes consiste à définir l'ensemble de référence ou l'univers de discours pour chaque variable linguistique. L'univers de discours est un ensemble de référence qui englobe tous les éléments qui sont pertinents dans un contexte donné. Il représente toutes les valeurs possibles prises par une variable linguistique.

Afin de mieux comprendre la différence entre les deux logiques et de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, nous pouvons prendre un exemple simple [3]. Supposons que nous souhaitons classer des vitesses en fonction de leurs valeurs, en définissant trois catégories, comme illustré dans la figure ci-dessous:

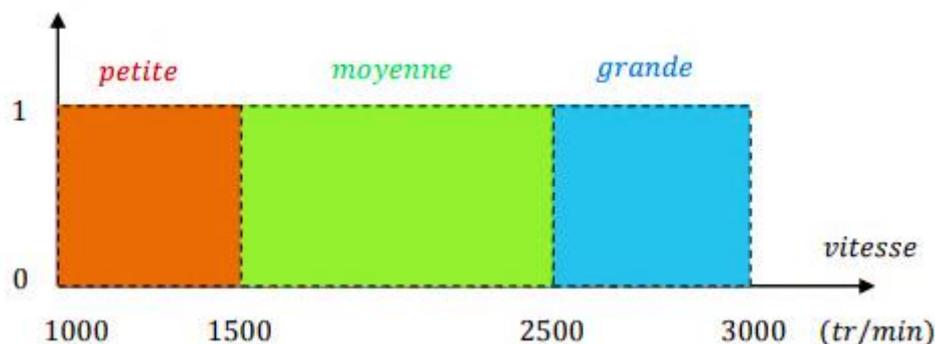


Figure III-20 Représentation des variables binaires. [54]

On remarque que la méthode utilisée ici pour distinguer les intervalles de vitesse est très différente de celle employée par l'être humain lorsqu'il analyse ce genre de situation. En effet, l'homme n'établit pas une distinction nette entre ces intervalles. Une vitesse de 2500 tr/min considérée comme moyenne ne peut pas devenir soudainement élevée à 2501 tr/min, car cela choquerait l'intuition humaine.

Ainsi, bien que la logique classique présente l'avantage de la simplicité, elle est relativement éloignée de la logique utilisée par l'être humain. [54]

En effet, dans le contexte de la logique floue, la variable telle que la vitesse et les termes tels que moyenne, grande et petite, qui sont définis par les fonctions d'appartenance, sont appelés respectivement une variable linguistique et des termes linguistiques. [55]

Représentons la même situation en utilisant la logique floue. Dans ce cas, les variables ne sont plus binaires mais peuvent prendre une infinité de valeurs possibles entre 0 et 1. La figure (IV-2) montre la classification obtenue selon le principe de la logique floue.

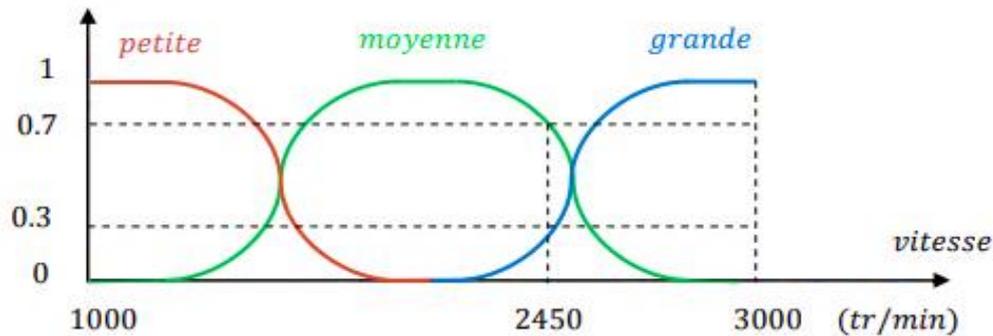


Figure III-21 Représentation des variables floues. [53]

La représentation graphique des fonctions d'appartenance, est une illustration de la gradualité introduite par la logique floue. Dans ce contexte, la vitesse de 2450 tr/min est considérée à la fois comme appartenant à l'ensemble "grande" avec un degré de 0.3 et à l'ensemble "moyenne" avec un degré de 0.7.

IV.2.1.d. Fonction d'appartenance :

La fonction d'appartenance est un outil mathématique qui permet de décrire l'évolution du degré de vérité d'une variable linguistique dans l'univers de discours U . Cette fonction peut prendre différentes formes, les plus utilisées sont:

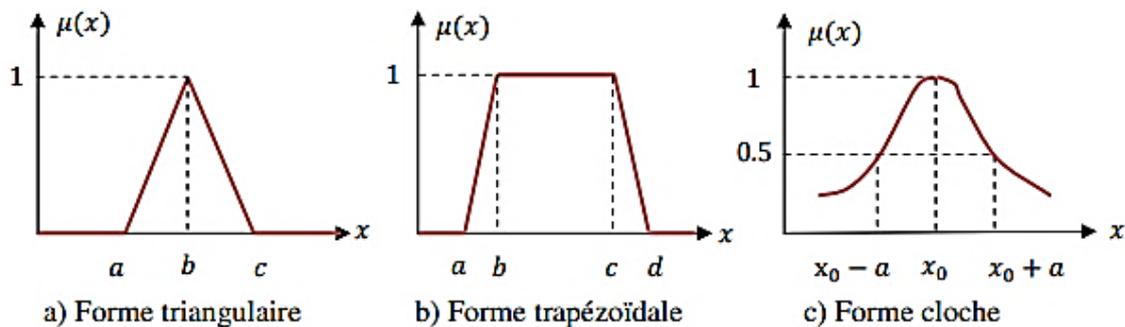


Figure III-22 Les différentes formes de la fonction d'appartenance. [53]

Il existe des cas où les fonctions d'appartenance peuvent être égales à un pour une seule valeur spécifique de la variable et égales à zéro pour toutes les autres valeurs. Ces fonctions d'appartenance sont appelées "fonctions d'appartenance singletons" [2], comme illustré dans la figure (III-4).

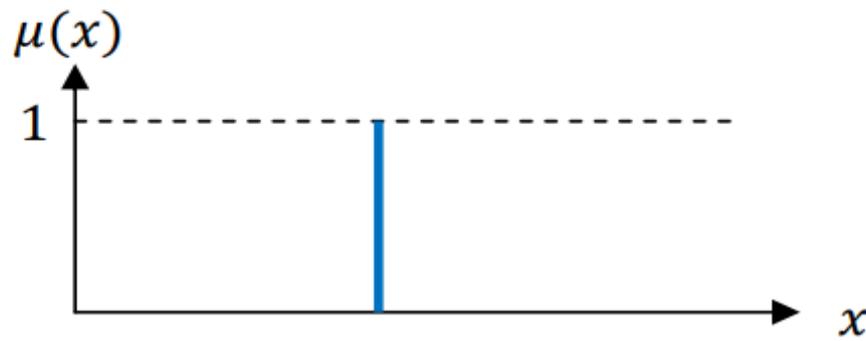


Figure III-23 Fonction d'appartenance singleton. [52]

IV.2.1.e. Opérateurs logiques flous :

Les opérateurs de la logique floue permettent de réaliser des combinaisons logiques entre des notions floues, c'est-à-dire de calculer des degrés de vérité. Tout comme dans la logique classique, il est possible de définir des opérateurs tels que ET, OU et la négation.

Parmi les différentes variantes d'opérateurs disponibles, les plus couramment utilisés sont les opérateurs "de Zadeh", qui sont décrits ci-dessous [55] :

- **Intersection**

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est le ET. Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu(AETB) = \text{MIN}(\mu(A), \mu(B)) \quad (\text{IV.2})$$

- **Union :**

L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le OÙ. Le degré de vérité

De la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu(AOUB) = \text{MAX}(\mu(A), \mu(B)) \quad (\text{IV.3})$$

- **Complément :**

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation :

$$\mu(NONA) = 1 - \mu(A) \quad (\text{IV.4})$$

IV.2.2. Description d'un régulateur flou :

Le régulateur flou fonctionne différemment des régulateurs classiques en n'utilisant pas une relation mathématique précise. Au lieu de cela, il se base sur des variables linguistiques

pour effectuer des inférences à partir de plusieurs règles floues. Ces inférences sont ensuite traitées par des opérateurs de logique floue. [53]

Le schéma de Figure (III-24) illustre la structure interne d'un régulateur floue :

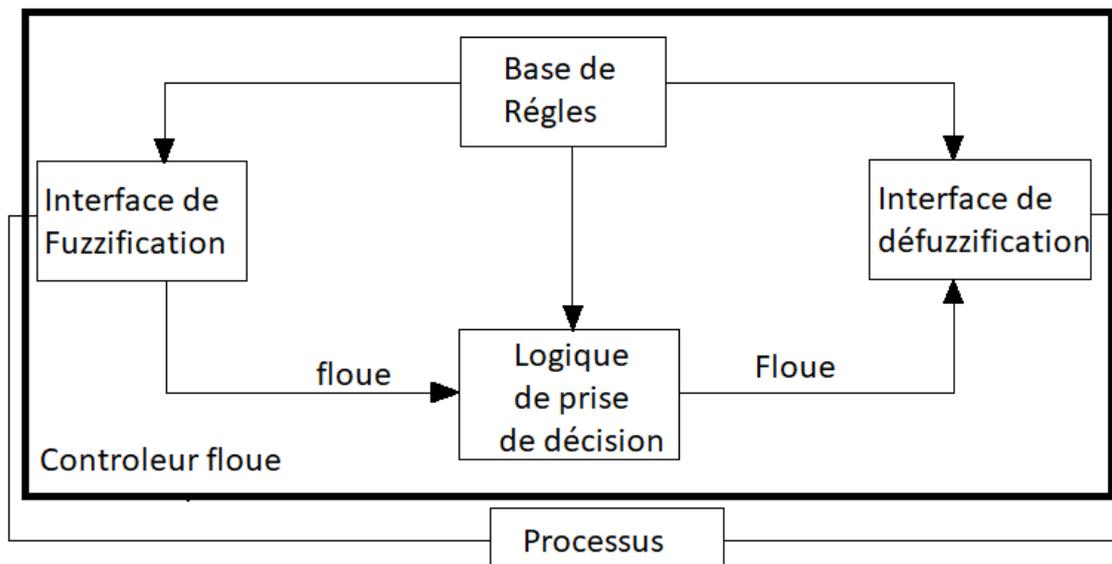


Figure III-25 Le schéma synoptique d'un système flou. [56]

Ce schéma est composé de :

- Une interface de fuzzification à l'entrée.
- Une base de connaissances.
- Une logique de prise de décision.
- Une interface de défuzzification à la sortie.

IV.2.2.a. Interface de fuzzification :

En matière de contrôle, les variables observées sont des quantités physiques réelles. Cependant, dans ce contexte, le traitement de ces données repose sur la théorie des ensembles flous. Par conséquent, il est nécessaire de convertir ces valeurs numériques en valeurs floues.

L'interface de fuzzification comprend les fonctionnalités suivantes [52] :

- Mesure des variables d'entrée.
- Création d'une cartographie d'échelle pour faire correspondre la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.
- Conversion des variables d'entrée en variables linguistiques en définissant les fonctions d'appartenance.

IV.2.2.b. Bases Règles floues :

Les bases de règles floues sont composées de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais qui peuvent également être enchaînées dans certaines applications. Une règle est formulée sous la forme : "Si le prédicat est vrai, alors la conclusion est valide". Le prédicat est une combinaison de propositions effectuée à l'aide des opérateurs logiques ET, OU et NON.

Tout comme les systèmes experts classiques, les bases de règles floues fonctionnent en utilisant une base de connaissances qui provient de l'expertise humaine. Cependant, il existe d'importantes différences dans les caractéristiques et le traitement de cette connaissance. [55]

IV.2.2.c. Logique de prise de décision :

La logique de prise de décision est le cœur du contrôleur flou, capable de simuler la prise de décision humaine en utilisant des concepts flous et des règles d'inférence de la logique floue [52]. Le traitement numérique des règles d'inférence, qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur, est réalisé à l'aide de différentes méthodes, notamment [54]:

- La méthode d'inférence max-min: l'opérateur ET est implémenté en prenant le minimum des valeurs, l'opérateur OU est implémenté en prenant le maximum, et l'opérateur ALORS (implication) est implémenté en prenant le minimum.

- La méthode d'inférence max-produit: l'opérateur ET est implémenté en prenant le produit des valeurs, l'opérateur OU est implémenté en prenant le maximum, et l'opérateur ALORS (implication) est implémenté en prenant le produit.

- La méthode d'inférence somme-produit: pour la condition, l'opérateur ET est implémenté en prenant la somme (valeur moyenne), et l'opérateur OU est implémenté en prenant le produit. Pour la conclusion, l'opérateur ALORS est implémenté en prenant le produit.

Ces différentes méthodes permettent de combiner les valeurs d'entrée floues et d'inférer la sortie du régulateur de manière appropriée en fonction des règles de l'ensemble des connaissances floues.

IV.2.2.d. Interface de défuzzification :

Effectivement, pour définir la loi de commande d'un contrôleur flou, il est nécessaire d'utiliser une procédure de défuzzification. Cette étape permet de convertir la sortie floue du contrôleur en des valeurs physiques concrètes adaptées au système en question. Différentes stratégies de défuzzification peuvent être utilisées, parmi lesquelles les plus couramment utilisées sont [53]:

- Méthode par valeur maximale : Cette méthode consiste à sélectionner la valeur maximale de la fonction d'appartenance de la sortie floue. Ainsi, la classe d'appartenance ayant la plus grande valeur est choisie comme valeur de sortie.
- Méthode de centre de gravité : Cette méthode utilise le concept du centre de gravité (ou centroïde) de la fonction d'appartenance de la sortie floue. Elle pondère les valeurs d'appartenance par leur position respective par rapport au centre de gravité, afin de calculer une valeur de sortie représentative.
- Méthode des hauteurs pondérées : Cette méthode tient compte des hauteurs des fonctions d'appartenance de la sortie floue. Les valeurs d'appartenance sont pondérées par leurs hauteurs respectives, et une moyenne pondérée est calculée pour obtenir la valeur de sortie.

Le choix de la stratégie de défuzzification dépend du contexte spécifique et des exigences de l'application. Chaque méthode présente ses avantages et ses limitations, et il est important de sélectionner celle qui convient le mieux à la situation donnée, en prenant en compte les objectifs du contrôle et les caractéristiques du système.

IV.3. Contrôleur MPPT basé sur la logique floue [57]

Le but de cette étude est de proposer une commande MPPT basée sur la logique floue afin de réduire les oscillations causées par la méthode de perturbation et observation (P&O). Ces oscillations peuvent entraîner des pertes de puissance significatives et la commande MPPT floue vise à améliorer la réponse du système.

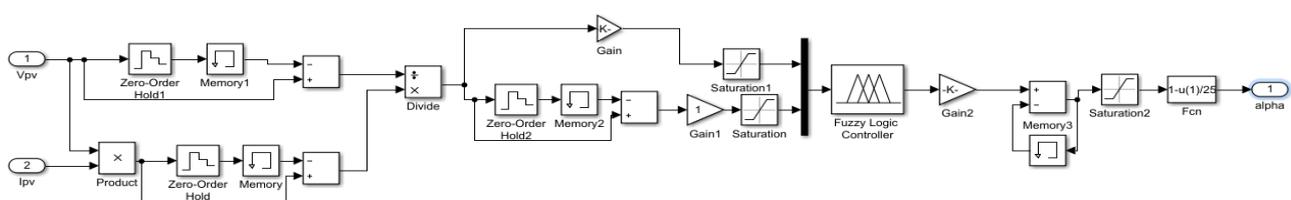


Figure III-26 Structure d'un contrôleur MPPT flou.

IV.3.1. Fuzzification

Au cours de la fuzzification, les variables numériques d'entrée sont transformées en variables linguistiques en utilisant les fonctions d'appartenance.

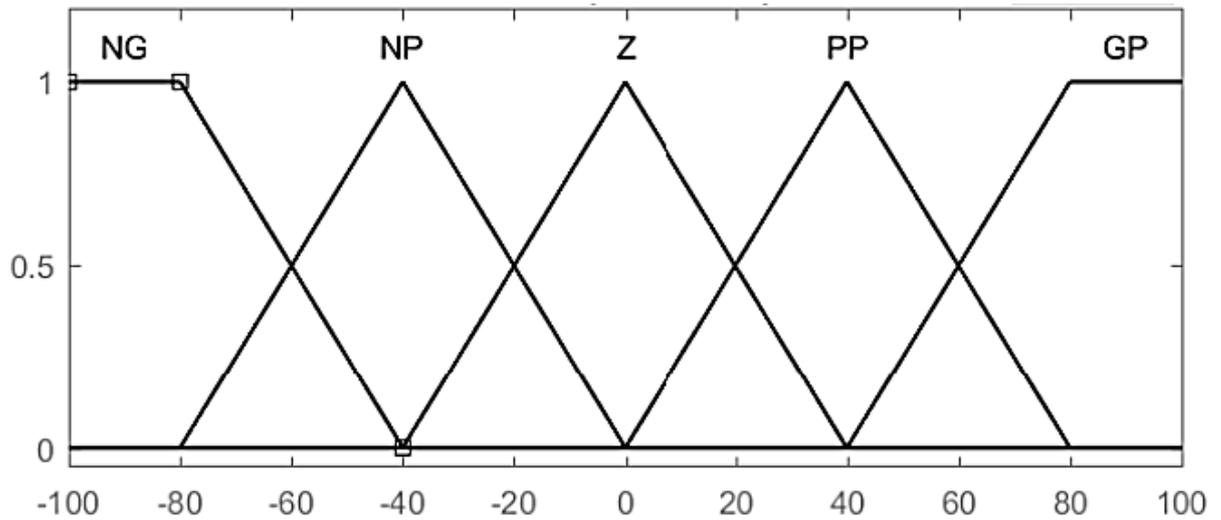


Figure III-27 Fonction d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.

Dans ce cas, nous employons cinq classes qui sont notées comme suit: NG pour négatif grand, NP pour négatif petit, Z pour environ zéro, GP pour positif grand et PP pour positif petit. Les deux variables d'entrée de FLC sont l'erreur E et la variation de l'erreur CE .

$$E(K) = \frac{P_{pv}(K+1) - P_{pv}(K)}{V_{pv}(K+1) - V_{pv}(K)} \quad (IV.5)$$

$$CE(K) = E(K) - E(K - 1) \quad (IV.6)$$

IV.3.2. Inférence floue

En utilisant la table des règles suivante, les règles floues permettent de calculer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée.

Tableau IV-1 Table des règles de décision à cinq classes

DE \ E	NG	NP	Z	PP	PG
NG	Z	Z	NP	PP	PG
NP	Z	Z	Z	PP	PG
Z	NG	NP	Z	PP	PG
PP	NG	NP	Z	Z	Z
PG	NG	NP	PP	Z	Z

IV.3.3. Défuzzification

Pour calculer la sortie du contrôleur logique flou (CLF), qui correspond au changement du rapport cyclique, la méthode du centre de gravité est utilisée lors de la défuzzification.

$$d\alpha = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\alpha_j) \alpha_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\alpha_j)} \quad (IV.7)$$

Les résultats de la simulation dans des conditions standards indiquent que le contrôleur logique flou (CLF) est plus précis, plus stable et offre une réponse plus rapide que la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

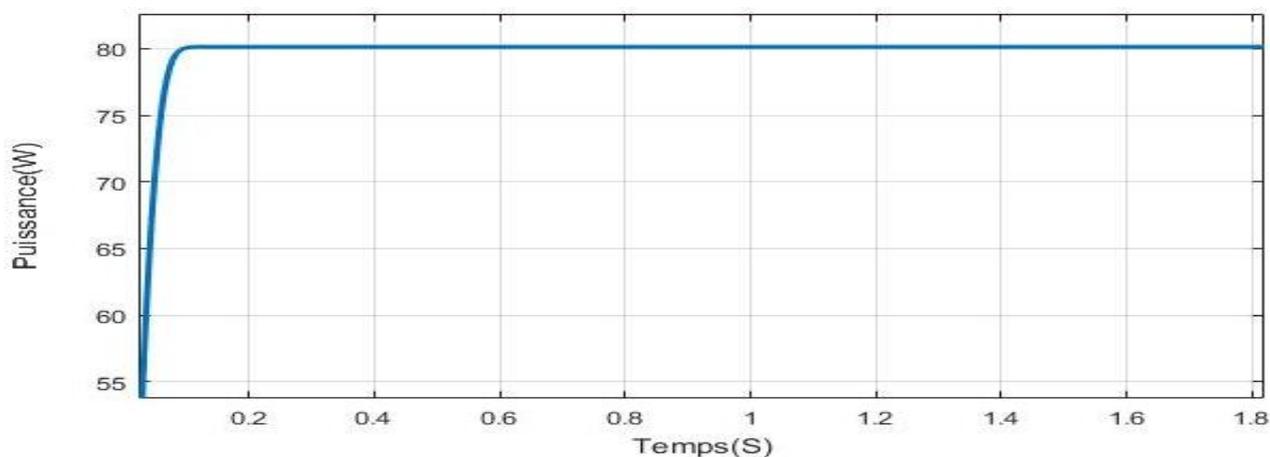


Figure III-28 L'allure de la puissance photovoltaïque par la commande FLC.

IV.4. Fonctionnement de la commande logique floue sous des conditions variables

Première partie

En premier lieu on va effectuer une diminution rapide de l'ensoleillement à température constante ($T_c=25^\circ\text{C}$). On commence par un ensoleillement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et à l'instant $t=5\text{s}$ on bascule $E_s=800\text{W}/\text{m}^2$. On obtient les résultats suivants

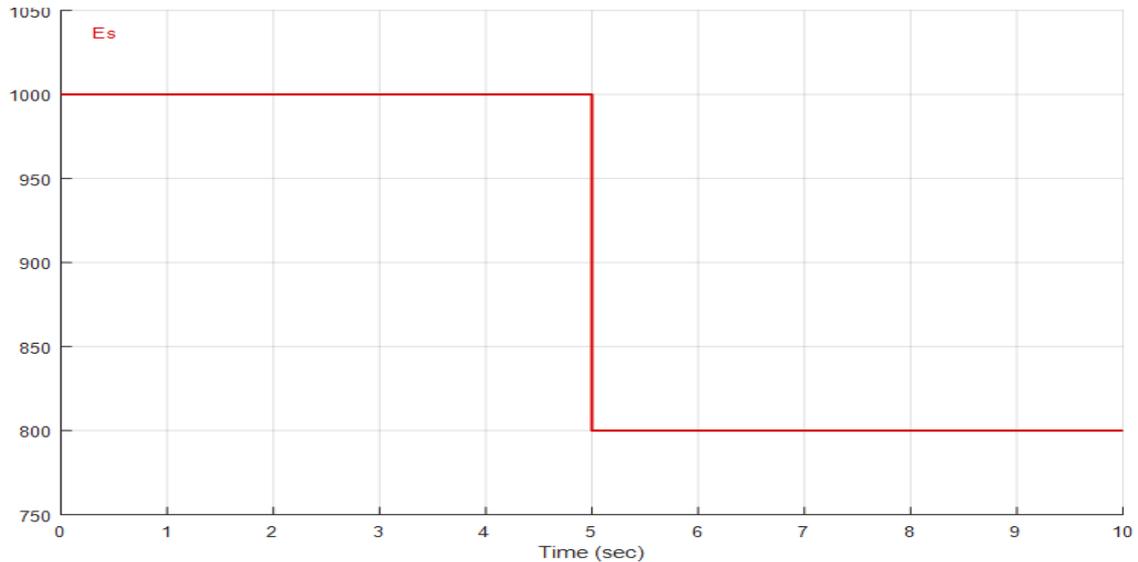


Figure III-29 Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement rapide.

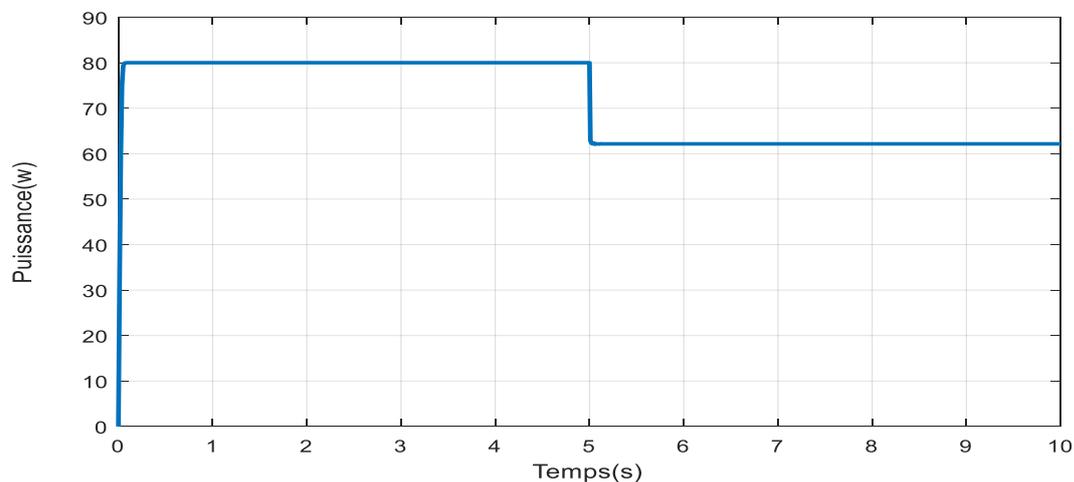


Figure III-30 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement rapide.

Pour une diminution lente on commence par un ensoleillement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et à partir de $t=3\text{s}$ on commence à diminuer l'ensoleillement jusqu'à $t=6\text{s}$ ou $E_s=800\text{W}/\text{m}^2$.

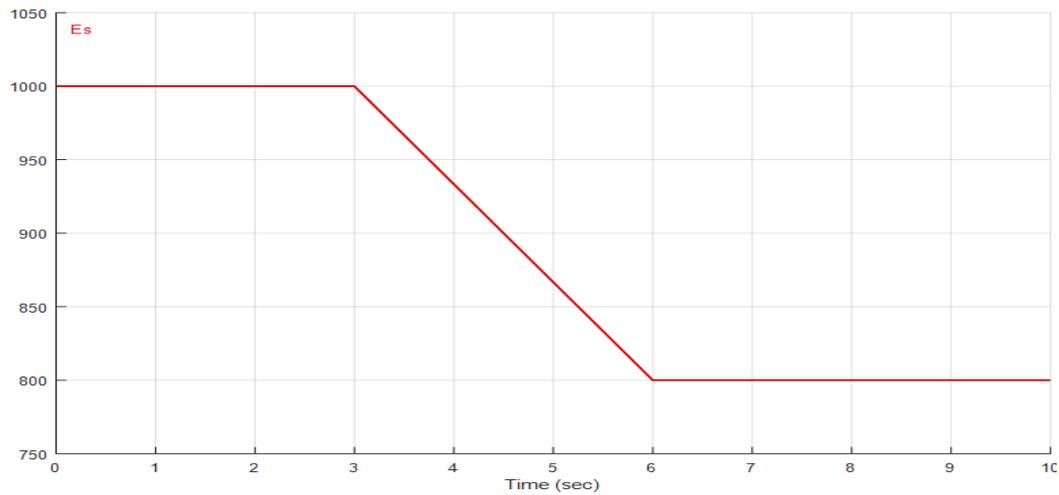


Figure III-31 Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement lent.

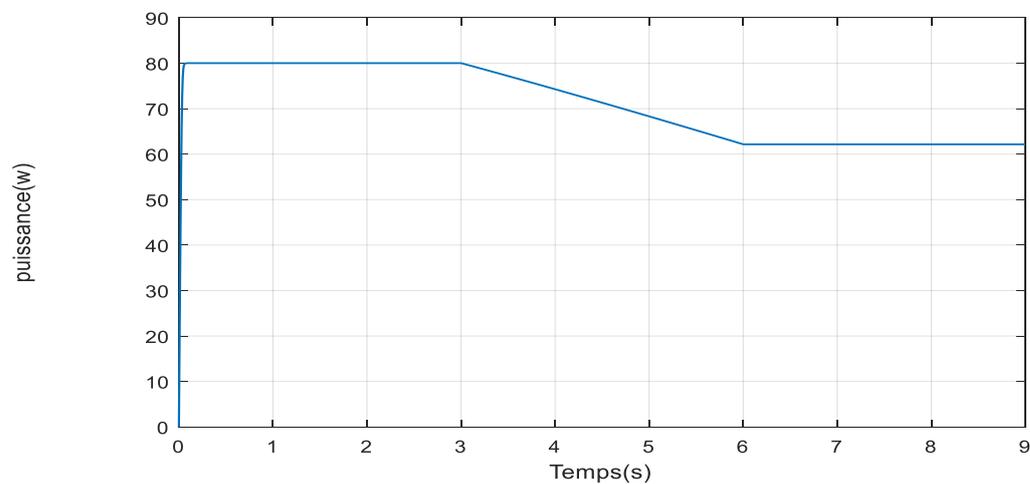


Figure III-32 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement lent.

Pour une variation rapide et lente d'ensoleillement, on remarque que la puissance est telle que l'ensoleillement c'est-à-dire que si l'ensoleillement diminue la puissance aussi diminue au même moment et la même vitesse.

Deuxième partie

Dans cette partie, on va effectuer une diminution rapide et lente de la température avec un ensoleillement fixe ($E_s=1000\text{W/m}^2$).

On commence par une température de 25°C et à $t=5\text{s}$ on la bascule à $T=0^\circ\text{C}$.

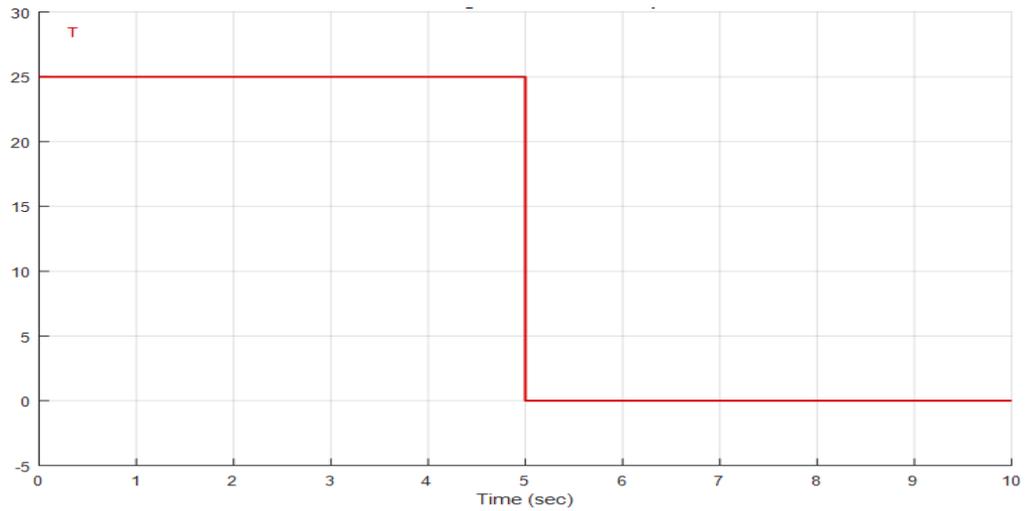


Figure III-33 Allure de la consigne de la température dans le cas d'un changement rapide.

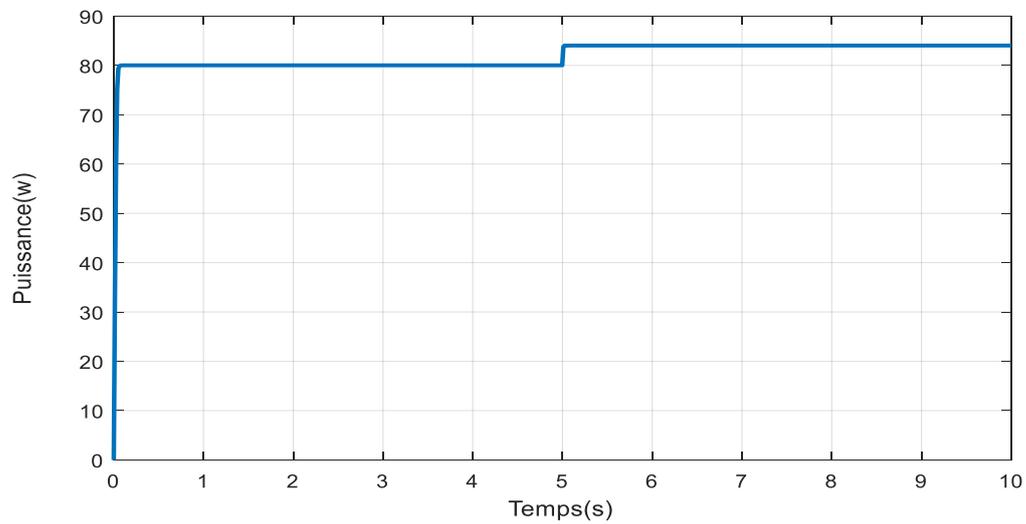


Figure III-34 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement rapide.

On va effectuer un changement lent avec $T=25^{\circ}\text{C}$ et on commence à diminuer la température de $t=3\text{s}$ jusqu'à $t=6\text{s}$ ou on aura $T=0^{\circ}\text{C}$.

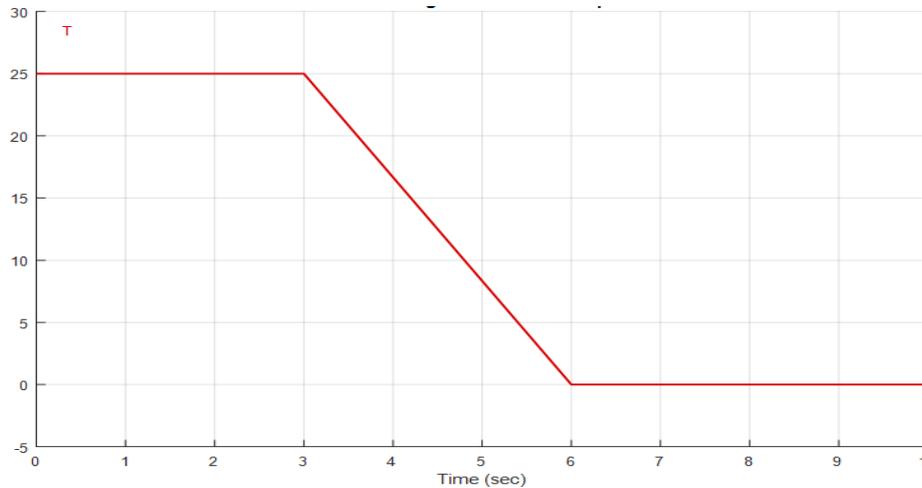


Figure III-35 Allure de la consigne de la température dans le cas d'un changement lent.

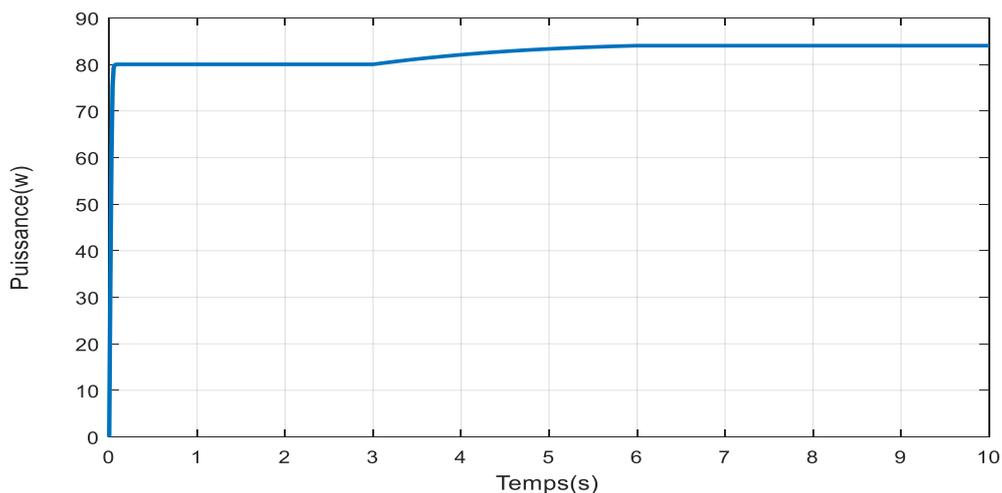


Figure III-36 Allure de la consigne de la puissance dans le cas d'un changement lent.

On remarque dans cette partie que lors d'une diminution rapide de la température la puissance augmente rapidement pour qu'elle se stabilise lorsque la température soit stable et dans le cas d'une diminution lente la puissance augmente lentement.

Il en est conclu que la puissance est directement liée à la variation de l'ensoleillement, et que lorsqu'il y a un changement de température, la puissance varie dans le sens inverse de la variation de la température. En d'autres termes, la puissance et la température sont inversement proportionnelles.

IV.5. Simulation globale du système de pompage photovoltaïque

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de notre système de pompage photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT par logique floue.

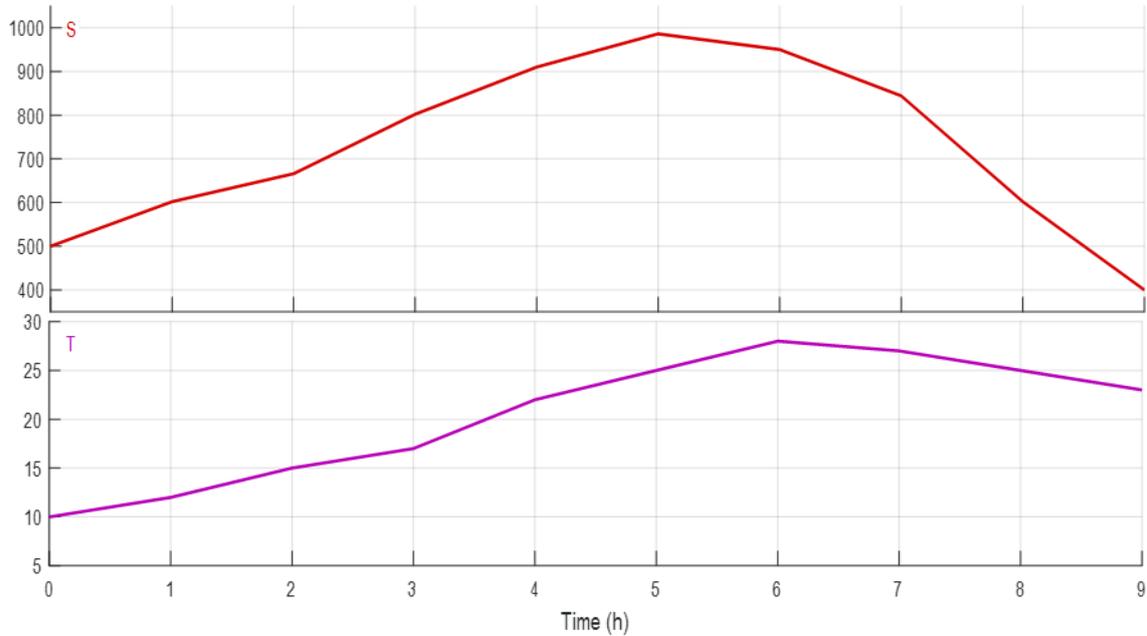


Figure III-37 Allure de la température et d'insolation.

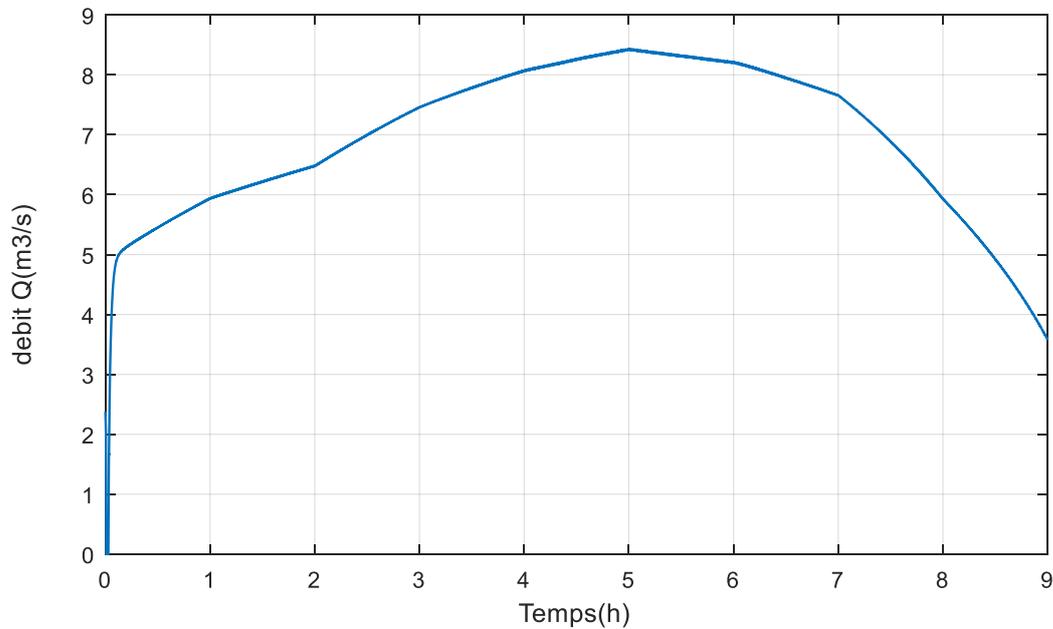


Figure III-38 Allure du débit nominal de la pompe

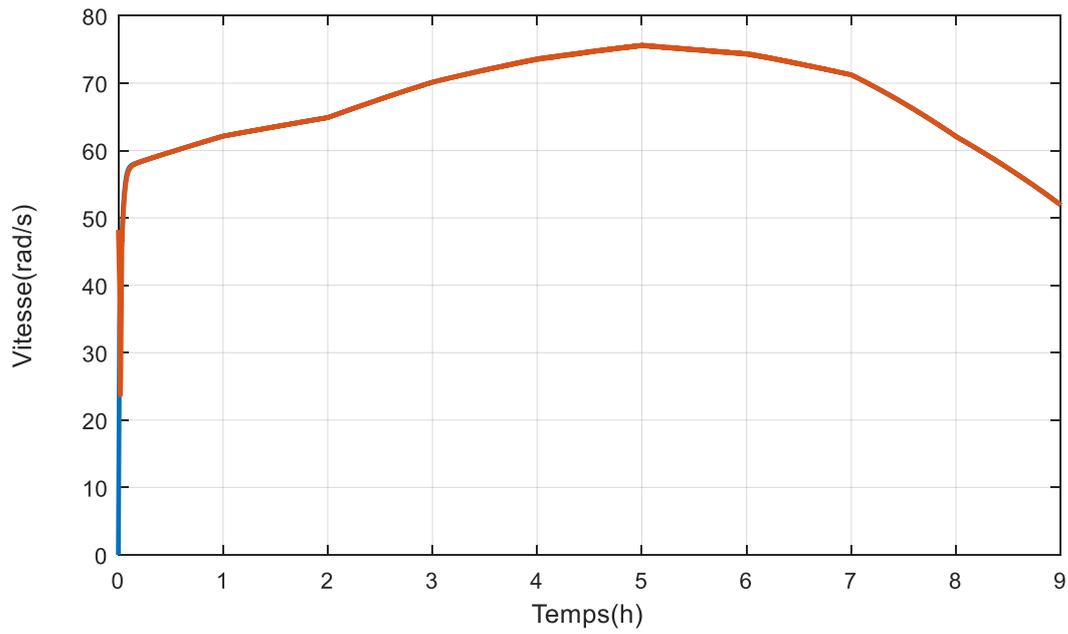


Figure III-39 Allure de la vitesse de référence et la vitesse de rotation

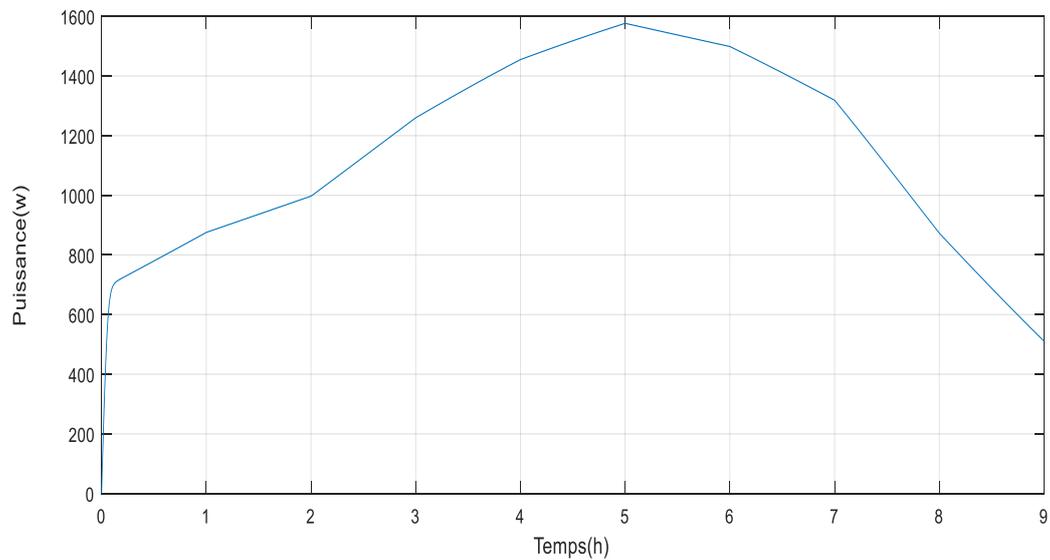


Figure III-40 Allure de la puissance photovoltaïque

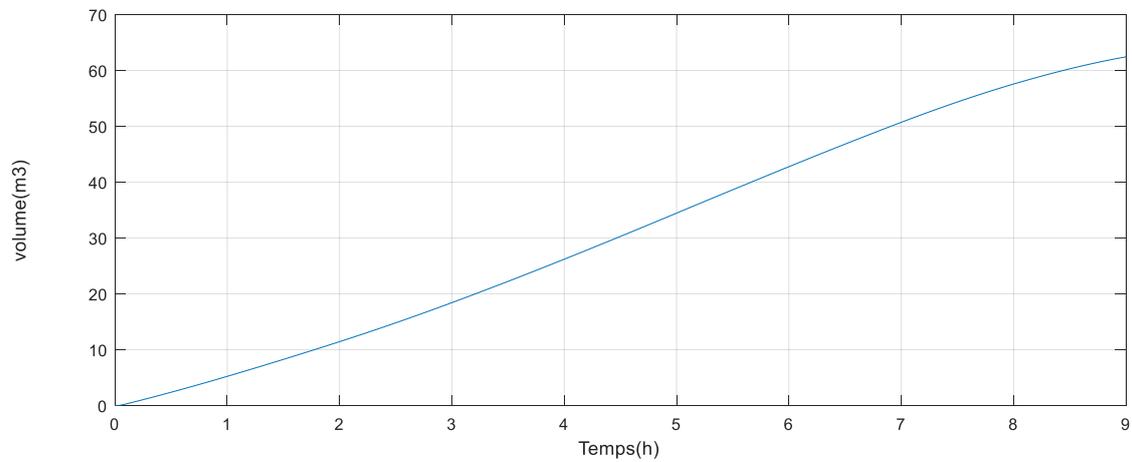


Figure III-41 allure du volume de la pompe

IV.8. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons introduit certains concepts clés de la logique floue. Ensuite, nous avons examiné le fonctionnement de la logique floue dans des conditions variables. Enfin, nous avons procédé à une simulation du système global de pompage photovoltaïque.

CONCLUSION GENERALE

Pour ce mémoire, nous avons utilisé une commande non linéaire basée sur la logique floue pour contrôler un système de pompage photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque et les systèmes de pompage utilisant cette dernière comme source d'énergie et les différents types existant, tout on définit chaque élément de cette chaîne. Nous avons aussi décrit les paramètres qui influent sur le fonctionnement de ces systèmes à la fin de ce chapitre nous avons porté notre choix sur le système à étudier et les composants qui le constitue.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation des différentes composantes du système de pompage photovoltaïque. Nous avons commencé par simuler un panneau photovoltaïque (à une diode) pour différentes conditions d'ensoleillement et de température, afin de tracer les différentes caractéristiques correspondantes.

Le troisième chapitre porte sur l'optimisation et le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque. Nous avons présenté une méthode de dimensionnement permettant d'assurer un bon fonctionnement de la chaîne et de répondre à la demande en eau. Nous avons également souligné l'importance d'une commande MPPT pour amener les générateurs photovoltaïques à fonctionner à leur point de fonctionnement optimal, et présenté quelques méthodes différentes, notre choix est basé sur l'algorithme de MPPT P&O. Enfin, nous avons présenté une commande vectorielle à flux rotorique orienté pour améliorer les performances dynamiques de la machine synchrone.

L'objectif du quatrième chapitre est la commande du système de pompage photovoltaïque, en appliquant comme MPPT un contrôleur flou pour l'optimisation de la puissance photovoltaïque. Une commande vectorielle est appliquée sur la machine asynchrone afin de contrôler sa vitesse de rotation. Les résultats obtenus confirment les performances souhaitées. Nous avons présenté des résultats de simulation pour différents ensoleillement et températures.

Comme perspective, il serait intéressant de faire l'optimisation de l'énergie photovoltaïque en utilisant d'autres techniques, comme la méthode du gradient, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, etc. Une validation par moyens expérimentaux du système de pompage photovoltaïque étudié est souhaitable.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

- [1] DAOUD Amine « Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire » Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (thèse de doctorat) 2013.
- [2] SALI Sara et OUAKLI Aldjia « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia.2017.
- [3] Anki Massinissa et Bouallg Arezki, Master en électrotechnique, « Contribution à l'Étude et à l'Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque », option énergie renouvelable, Université Abderrahmane Mira Bejaia,2012
- [4] M. ROUF : « optimisation de l'ensemble onduleur ; moteur et pompe branche sur générateur photovoltaïque ». Électrotechnique thèse de doctorat, université de Constantine.
- [5] : Jimmy Royer, thomas Djiako, Erico SCHILLER, Bokar Sada : «le pompage photovoltaïque». Manuel de cour à l'intension des ingénieurs et des techniciens.
- [6] Azouagh Lynda, Zidi Djamila, Dahmani Madiha, Mémoire de fin d'étude « étude d'un système de pompage photovoltaïque », université Mouloud Mammeri de Tizi ousou,2012.
- [7] <http://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies.html> , mai 2023.
- [8] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques> , mai 2023.
- [9] <https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/panneau-solaire-photovoltaique-fonctionnement-et-description-1/category>, mai 2023
- [10] <https://www.panneausolaire-info.be/panneau-solaire-thermique>
- [11] J-C. Sabonadiere: Nouvelles technologie de l'énergie ; les énergies renouvelable 2006.
- [12] A.C. Pastor : « Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Électroniques », École Doctorale : GEET, Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAACNRS), Toulouse, 29 septembre
- [13] A. Saliha, Magister académique « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque », Spécialité commande électrique, Université Farhat Abbas-Sétif 01.

Références Bibliographique

- [14] Mechalikh Med Nadjib, Hamada Charaf Eddine, Mémoire académique « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Spécialité Machine électrique et électronique de puissance, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.
- [15] Bouderradji Salima, Ould Makhoulfi Meriem, Master académique « Etude et commande d'un générateur photovoltaïque sous ombrage partiel raccorde a un réseau électrique », Université Mouhamed Boudiaf, M'sila, 2020.
- [16] A. Labouret, M. Viloz : « Energie solaire photovoltaïque ». 3ème Edition DUNOD, 2007.
- [17] W.Achim, Design issues of photovoltaïque systems and their grid integration», (Decembrer2003).
- [18] A. Hakoumi, A. Benamar, Master académique « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue », Spécialité commande électrique, Université Ahmed Draia, Adrar.
- [19] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat, de l'école normale supérieure de CACHAN, décembre 2002
- [20] « Hacheurs », Cours sur l'énergie et convertisseurs d'énergie, Licence EEA Module U6 Université de Savoie, France.
- [21] A. Talha, K. Ameer « Modélisation Et Commande D'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un Régulateur MPPT », Laboratoire d'Instrumentation, Faculté d'Électronique et d'Informatique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. B.P.32, El-Alia, 16111 Bab-Ezzouar, Alger, Algérie, Mai2023.
- [22] Berkani Yazid, Afia Lyes, Master académique « Commande Floue Adaptative De La Machine Asynchrone », Spécialité Automatismes industriels, Université A.MIRA-BEJAIA.
- [23] <https://www.transmission-aquitaine.com/moteur-asynchrone-et-synchrone-lequel-choisir>. mai 2023
- [24] T. Wildi, G. Symbile : Électrotechnique 3eme édition, Edition de Boeck, 2000

- [25] A. Gazzam, C. Safsafa : « diagnostic des défauts rotorique des machines asynchrone à cage par différentes techniques de traitement de signal », mémoire de master en électrotechnique, Université Amar Telidji de Laghouate ,2018.
- [26] J.Bonal :« Entraînement électrique à vitesse variable : les variateurs électroniques de vitesse». Paris 1977
- [27] <https://fr.demotor.net/moteurs-electriques/moteurs-ac/moteur-asynchrone/rotor-de-cage-d-ecureuil> , mai 2023
- [28] Mr D.Aouzalleg ,Cours 01-construction des Machines asynchrones, Université Abd Rahman Mira, Bejaia, 2022.
- [29] Kefsi Djamila, Ouikene Fetta, mémoire de fin d'étude « Commande d'un système de pompage photovoltaïque. », Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2009.
- [30] Jimmy Royer, thomas Djiako, Erico SCHILLER, Bokar Sada : « le pompage photovoltaïque ». Manuel de cour à l'intension des ingénieurs et des techniciens
- [31] D. Bellala: « contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application au système photovoltaïque » : Mémoire de magistère université de Batna,2009
- [32] Mr. Belaout Abdesslam, diplôme de magister « Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension », Université, setif 1, 2014.
- [33] Long Bun, « Détection et localisation de défaut pour un système PV » 2006
- [34] S. M. AIT-CHEIKH : « Étude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse de Doctorat d'État, École Nationale Polytechnique, Décembre 2007.
- [35] Dahmani Mohamed, Master en électronique « Étude comparative entre les différents types de convertisseurs DC-DC », École nationale Polytechnique, 2014
- [36] Ramdane Amel, thèse de doctorat en électrotechnique « Commande de la machine a induction par les techniques de l'intelligence artificielle. », Université Batna 2 Mostefa Ben Boulaid,2020

- [37] Mr. Mesai Ahmed Hamza Mr. Nadir Kais, Master en électrotechnique « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l’intelligence artificielle. », Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abes, 2017.
- [38] R. AHMED Serire, B. Bouhris, Mémoire de Master « Estimation Des Paramètres D’une Machine Asynchrone a cage » Master en Électrotechnique spécialité Machines électriques, Université SAAD DAHLAB de BLIDA.
- [39] Ph. Barret : « Régimes transitoires des machines électriques », Edition EYROLLES, 1987.
- [40] Y. Zidane, I. Doumbia, « Modélisation et simulation d’un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de fin d’étude, UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAÏA.
- [41] Afir Soufiane, Saci Massinissa, Master en électrotechnique « Commande non linéaire d’un moteur asynchrone utilisé dans un système de pompage photovoltaïque », option command électrique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2018.
- [42] Yakoub Berkas, Tarek Boudjerda, Master en électromécanique « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque », Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2020.
- [43] A. Tchapo singo « système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome », Thèse de doctorat université Henri Poincaré 2010.
- [44] Aouchiche Nedjma, These de doctorat de l’établissement Université Bourgogne Franche-Comt « Conception d’une commande MPPT optimale à base d’intelligence artificielle d’un système photovoltaïque », Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2020
- [45] M’hammed Guisser, Rapport de synthèse « Stratégies de Commande pour l’Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Autonomes et Connectés au Réseau », Automatique et Informatique Industrielle, Université Hassan 1^{er} Casablanca, 2015
- [46] Hanen Abbes, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Conférence Internationale des Énergies Renouvelables (CIER’13) Sousse, Tunisie – 2013.

- [47] M.S. Aït Cheikh¹, B. Hadj Aïssa¹, A. Malek² et M. Becherif³, Revue des Énergies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 421 – 443 « Mise au point d’une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire »
- [48] Akihiro Oi, “ design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of cali- fornia polytechnic state university, 2005
- [49] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi, « active power control for a single-phase grid connected pv system », international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [50] F. GUERROUDJ, N. GUERROUDJ, Master en électrotechnique « Contribution à l’amélioration des performances d’un système de pompage photovoltaïque », Option : Energies renouvelables, Université Abderrahmane Mira de Bejaia 2012.
- [51] Bouamra Asma, Hamidi Oussama « étude de la comparaison entre les convertisseurs CUK et SEPIC pour et l’implémentation l’MPPT sur EPGA », Master en électronique option système de vision et robotique, Université Saad Dahlab de Blida, 2015.
- [52] B. Zarour « Etude technique d’un système d’énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de Doctorat, Université de Mentouri de Constantine, 2010
- [53] L. BOUDRAHEM, L. DJOUADI, Mémoire de fin d’études « Commande non linéaire d’un système de pompage photovoltaïque », Université Abderrahmane Mira de Bejaia 2011.
- [54] B. Toulal « Modélisation et commande floue optimisée d’une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable », Mémoire de Magister Université de Batna, 2010.
- [55] F. Chevré, F. Guély « La logique floue » Cahier Technique de Schneider N° 191 éditions mars 1998.
- [56] S. Belhouane, « Étude et simulation d’une régulation thermique par la logique floue », Mémoire de Master, Université ABDERRAHMANE MIRA de Bejaia 2013.
- [57] Chafiaa Serir, Djamila Rekioua, « Contrôle vectoriel-logique floue pour le pompage photovoltaïque », Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg. Vol. 62, 4, pp. 375–380, Bucarest, 2017.

Annexe

Annexe

➤ Caractéristiques des panneaux photovoltaïques de type SunTech STP080

Les panneaux photovoltaïques PV utilisés sont de type SunTech STP080,80W_c. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Puissance maximale du panneau $P_{mpp}(w)$	80
Courant au point de puissance maximale du panneau $I_{mpp}(A)$	4.57
Tension au point de puissance maximale du panneau $V_{mpp}(V)$	17.5
Courant de court-circuit $I_{sc}(A)$	4.90
Tension de circuit ouvert $V_{oc}(V)$	21.90
Tension maximale du système $V_{max}(V)$	715
Constante de Boltzmann K (SI)	1.38e-23
Charge de l'électron q (c)	1.6e-19
Bande d'énergie du semi-conducteur $E_g(ev)$	1.76e-19

➤ Caractéristiques de la machine asynchrone

La machine utilisée est une machine asynchrone à cage d'écureuil standard. Ses paramètres principaux sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Résistance statorique $R_s(\Omega)$	5.75
Résistance rotorique $R_r(\Omega)$	4.2
Inductance statorique $L_s(\Omega)$	0.4662
Inductance rotorique $L_r(\Omega)$	0.4662
Inductance mutuelle $M(\Omega)$	0.44
Nombre de pôle P	4
Inertie J (N.m)	3e-2
Coefficient de frottement f (N.m.s/rad)	0.001

➤ **Caractéristiques de la pompe centrifuge**

La pompe utilisée est une pompe centrifuge. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Vitesse nominale (rad/sec)	150
Inertie de la pompe (Kg.m ²)	0.02
Débit nominal (m ³ /h)	18.2
Hauteur nominal (m)	12
Constante C1 m/ (rad/sec) ²	4,9234.10 ⁻³
Constante C2 m/ (rad/sec) (m ² /sec)	1.5826.10 ⁻⁵
Constante C3 m/ (m ³ /sec) ²	-18144