

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique**



**Ecole Nationale Polytechnique**  
**Département de Génie électrique**

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Automatique

Thème

**Optimisation d'un Générateur  
Photovoltaïques par Réseaux de Neurones  
Artificiels**  
Application au Pompage Photovoltaïques

**Proposé par :**

Pr. F. BOUDJEMA  
M. M.T. BOUKADOUM

**Réalisé par :**

M. MOHAND OUSAID Abdenbi  
M. ZIADI Zakaria

**Promotion 2007/2008**

Ecole Nationale Polytechnique  
10, Avenue Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

## المخلص :

اهتمنا في هذا العمل بزيادة مردود مولد كهروضوئي لنظام للضخ، باستعمال متعقبات ذكية لنقطة الاستطاعة القصوى ، كالشبكات العصبونية و المنطق الضبابي، و ذلك لتتبع نقطة الاستطاعة القصوى.

دراسة لنظام للضخ أنجزت و أتبعَت بمحاكاة، سمحت لنا بالتأكد من فائدة متعقبات نقطة الاستطاعة القصوى الذكية.

و في الأخير، برمجنا الشبكات العصبية لتعقب نقطة الاستطاعة القصوى في PIC 16F877، و أنجزنا دارة التحكم.

**كلمات مفتاحية :** كهروضوئي، متعقب نقطة الاستطاعة القصوى، نقطة الاستطاعة القصوى، محول مستمر/متناوب، الشبكات العصبية، المنطق الغامض، PIC16F877، محرك غير متزامن، مضخة.

## Résumé

Dans ce travail notre intérêt s'est porté sur l'optimisation du générateur photovoltaïque d'un système de pompage, en utilisant des contrôleurs MPPT intelligents, réseaux de neurones et logique floue, qui permettent de poursuivre le point de puissance maximale.

Une étude du système de pompage a été effectuée et suivie d'une simulation, nous a permis de constater l'intérêt des MPPT intelligents.

Enfin nous avons implémenté le MPPT neuronal sur le PIC 16F877, et ainsi nous avons réalisé une carte de commande.

**Mots clés :** photovoltaïque, MPPT, PPM, convertisseur DC/AC, réseau de neurone, logique flou, PIC16F877, moteur asynchrone, pompe.

## Abstract

In this work, our goal is the optimization of photovoltaic generator of pumping system, by using intelligent MPPT controllers, neural network and fuzzy logic, which allow the tracking of the maximum power point.

A study of pumping system is made and followed by a simulation, allows us to notice the interest of the intelligent MPPT.

Finally, we have implemented the neural MPPT on the PIC 16F877, and we have realized a control card.

**Key words:** Photovoltaic, MPPT, PPM, DC/AC converter, neural network, fuzzy logic, PIC 16F877, asynchrony motor, pump.

# Remerciements

---

Nous remercions le bon Dieu de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur **F. BOUDJEMA** Professeur au département de Génie électrique de l'Ecole Nationale Polytechnique pour nous avoir encadré durant notre projet de fin d'études et nous conseillé tout le long de notre travail.

Nous remercions également notre Co-promoteur Monsieur **M.T. BOUKADOUM**, maître de recherche au centre de développement des énergies renouvelables (CDER), pour son encadrement.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Enfin, nous aimerions adresser nos plus fervents remerciements à nos parents, car nul autres qu'eux se sont plus sacrifiés pour notre bien et l'accomplissement de nos projets. Ils ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui, et pour cela, nous leur dédions ce mémoire.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

# SOMMAIRE

## ABREVIATIONS

## NOMENCLATURES

## INTRODUCTION GENERALE ..... 5

### CHAPITRE I : Généralités sur les cellules photovoltaïques

I.1. Introduction.....	8
I.2. Rappel sur les semi-conducteurs.....	8
I.3. L'effet photovoltaïque et la jonction PN .....	8
I.4. La cellule photovoltaïque.....	9
I.4.1. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque $I = f(v)$ .....	10
I.4.2. Influence de l'éclairement .....	12
I.4.3. Influence de la température .....	13
I.4.4. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	13
I.5. Association des cellules .....	15
I.5.1. Association de cellules photovoltaïques en série .....	15
I.5.2. Association de cellules photovoltaïques en parallèle .....	15
I.6. Le module photovoltaïque .....	16
I.7. Générateur Photovoltaïque.....	16
I.8. Protection des générateurs photovoltaïques.....	17
I.9. Conclusion .....	18

### CHAPITRE II : Système de pompage photovoltaïque

II.1. Introduction .....	19
II.2. Générateur photovoltaïque .....	20
II.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	20
II.2.3. Nomenclature des paramètres .....	21
II.3. Le convertisseur statique (Onduleur) .....	24
II.3.1. Modélisation de l'onduleur triphasé .....	25
II.3.2. Modulation de l'arguer d'impulsion (MLI) .....	26
II.4. Le moteur asynchrone .....	27
II.4.1. Modélisation du moteur asynchrone.....	27
II.4.1.1. Hypothèse simplificatrices .....	27

II.4.1.2. Equations des tensions et des flux en grandeurs de phase .....	28
II.4.1.3. Transformation de Park .....	29
II.4.1.4. Application de la transformation de Park.....	30
II.4.1.4.1. Equation de tension .....	30
II.4.1.4.2. Equation du flux .....	31
II.4.1.5. Modèle mathématique de la machine asynchrone.....	31
II.5. Filtre d'entrée .....	32
II.6. La pompe .....	32
II.6.1. Les types de pompes .....	33
II.6.2. Dimensionnement d'une pompe .....	33
II.6.3. Modélisation de la pompe .....	34
II.7. Le stockage .....	34
II.8. Conclusion .....	35

### **CHAPITRE III : Méthodes de poursuite du point de puissance maximale**

III.1. Introduction .....	36
III.2. Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale.....	36
III.3. Optimisation du générateur .....	37
III.4. Optimisation du récepteur .....	37
III.5. Le MPPT (maximum power point tracking).....	37
III.5.1. Méthode à contre réaction de tension .....	38
III.5.1.1. Méthode à tension de référence fixe .....	38
III.5.1.2. Méthode à tension de référence en fonction de $V_{oc}$ .....	39
III.5.1.3. Méthode à tension de référence externe (cellule pilote) .....	39
III.5.2. Méthodes à contre réaction de courant .....	39
III.5.3. Méthodes à contre réaction de puissance .....	40
III.5.3.1. Algorithme 'perturbation et observation' .....	40
III.5.3.2. Algorithme 'incrémental conductance' .....	40
III.5.4. Méthodes de poursuite analogique .....	41
III.6. Méthodes intelligentes pour la commande du MPPT .....	41
III.6.1. Commande MPPT par réseau de neurones.....	41
III.6.2. Commande MPPT par logique floue .....	42
III.7. Conclusion.....	42

## CHAPITRE IV : Réseaux de neurones et logique floue

IV.1 Les réseaux de neurones .....	43
IV.1.1. Introduction .....	43
IV.1.2. Historique .....	43
IV.1.3. Neurone biologique .....	44
IV.1.4. Neurone artificiel.....	44
IV.1.5. Modélisation d'un neurone artificiel .....	45
IV.1.6. Les réseaux de neurones .....	46
IV.1.6.1. Réseau multicouche .....	47
IV.1.6.2. Réseau à connexions locales.....	47
IV.1.6.3. Réseau à connexions récurrentes .....	48
IV.1.6.4. Réseau à connexions complexes.....	48
IV.1.7. Apprentissage des réseaux de neurones .....	49
IV.1.7.1. Apprentissage supervisé .....	49
IV.1.7.2. Apprentissage non supervisé .....	49
IV.1.7.3. Surapprentissage .....	49
IV.1.8. Algorithme d'apprentissage des réseaux de neurones.....	49
IV.1.8.1. Algorithme de rétropropagation (Back-propagation) .....	50
IV.1.8.2. Algorithme Fast Back-propagation.....	50
IV.1.8.3. Algorithme Random Optimisation Methode (ROM) .....	50
IV.1.9. Application des réseaux de neurone dans le control .....	50
IV.1.10. Elaboration d'un bon réseau .....	51
IV.1.10.1. Première étape : les variables d'entrées .....	51
IV.1.10.2. Deuxième étape : choix de la structure.....	51
IV.1.10.3. Troisième étape : l'entraînement.....	52
IV.1.11. Conclusion.....	52
IV.2. La logique floue .....	53
IV.2.1. Introduction .....	53
IV.2.2. Terminologie de la logique floue .....	53
IV.2.2.1. Variable linguistique.....	53
IV.2.2.2. Fonctions d'appartenance.....	53
IV.2.2.3. Univers de discours et classes d'appartenances.....	54
IV.2.2.4. Opérateurs de la logique floue.....	54

IV.2.3. Structure de base d'un contrôleur flou .....	55
IV.2.3.1. Fuzzification .....	55
IV.2.3.2. Les règles floues .....	56
IV.2.3.1.1. Les règles de Mamdani .....	56
IV.2.3.1.2. Les règles de Takagi Sugeno .....	56
IV.2.3.3. Inférences.....	57
IV.2.3.4. Defuzzification .....	58
IV.2.3.4.1. Méthode du maximum.....	58
IV.2.3.4.2. Méthode de la moyenne des maxima.....	58
IV.2.3.4.3. Méthode du centroïde .....	58
IV.2.3.4.4. Méthode de la somme pondérée .....	58
IV.2.4. Avantages et désavantages du réglage par logique floue .....	59
IV.2.5. Conclusion.....	59

## **CHAPITRE V : Simulations et évaluations**

V1. Simulation du système de pompage .....	60
V.1.2. Comportement du système sans contrôleur MPPT.....	60
V.2. Application des réseaux de neurones .....	61
V.2.1. Application des réseaux de neurone pour l'adaptation de la tension de consigne.....	61
V.2.2. MPPT neuronal.....	64
V.3. Application de la logique floue .....	68
V.3.1. MPPT flou .....	68
V.3.1.1. La fuzzification .....	68
V.3.1.2. Variables linguistiques .....	69
V.3.1.3. Fonctions d'appartenance.....	69
V.3.1.4. L'inférence .....	70
V.3.1.5. Defuzzification.....	70
V.3.2. Substitution du comparateur par un contrôleur flou .....	73
V.4. Interprétation des résultats obtenus .....	75

## CHAPITRE VI : Expérimentation et réalisation

VI.1. Description du système de pompage photovoltaïque du CDER .....	77
VI.1.1. Générateur photovoltaïque .....	78
VI.1.2. Dispositif électronique .....	79
VI.1.2.1. Filtre d'entrée.....	79
VI.1.2.2. Le Convertisseur DC/AC.....	79
VI.1.3. Moteur Asynchrone .....	80
VI.1.3.1. Identification des paramètres du moteur.....	80
VI.1.3.2. Méthode de calcul des paramètres .....	81
VI.1.4. La pompe .....	81
VI.2. Fonctionnement du système de pompage photovoltaïque .....	82
VI.3. Simulation du système .....	82
VI.3.1. Adaptation de la tension de référence par réseau de neurone .....	83
VI.3.2. MPPT neuronal.....	84
VI.4. Relevés expérimentaux .....	85
VI.4.1. Capteur de temperature .....	86
VI.4.2. Capteur d'eclairment .....	86
VI.5. Choix de la méthode à implémenter .....	87
VI.6. Entraînement du réseau de neurone .....	87
VI.7. Implémentation du MPPT sur PIC16F877.....	88
VI.8. Réalisation de la carte de commande sous PROTEUS .....	88
VI.8.1. Conditionnement des capteurs.....	88
VI.8.2. Programmation du PIC .....	89
VI.8.3. Vue générale de la carte de commande .....	90
VI.9. Organigramme de fonctionnement de la carte .....	91
VI.10. Simulation de la carte de commande sous PROTEUS.....	92
VI.11. Réalisation pratique de la carte de commande.....	95
VI.11.1. Circuit imprimé .....	95
VI.11.2 Vue générale de la carte de commande réalisée.....	95
VI.11.3. Validation pratique des performances de la carte réalisée .....	95
VI.12. Conclusion .....	96



<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>96</b>
<b>ANNEXE A .....</b>	<b>99</b>
<b>ANNEXE B .....</b>	<b>101</b>
<b>ANNEXE C .....</b>	<b>103</b>
<b>ANNEXE D .....</b>	<b>105</b>
<b>ANNEXE E .....</b>	<b>107</b>
<b>ANNEXE F.....</b>	<b>112</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>1155</b>

## ABREVIATIONS

MPPT	Maximum power point tracking
PPM	Point de puissance maximale
CDER	Centre de développement des énergies renouvelables
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
HMT	Hauteur manométrique totale
HGT	Hauteur géométrique
Pdc	Pertes de charges estimées

## NOMENCLATURES

$C_m$	Couple mécanique
$C_p$	Couple pompe
$C_r$	Couple résistant
$E_1 \dots E_2$ Et $C_1 \dots C_2$	Ensembles flous
$f_p$	Fréquence de la porteuse
$K_p$	Constante de la pompe
$f_r$	Fréquence de la référence
$I_0$	Courant de saturation de la jonction.
$i_a \ i_b \ i_c$	Courants de sortie de l'onduleur
$i_{ABC}$	Vecteur de courant statorique
$i_{abc}$	Vecteur de courant rotorique
$i_{dr}$	Courant axe direct rotorique
$i_{dr}$	Courant axe quadratique rotorique
$i_{ds}$	Courant axe direct statorique
$I_g$	Courant générateur
$I_{mp}$	Courant à puissance maximale (A).
$I_n$	Courant (A)
$i_{or}$	Courant axe homopolaire rotorique
$i_{os}$	Courant axe homopolaire statorique
$i_{qs}$	Courant axe quadratique statorique
$I_r$	Courant rotorique

$I_s$	Courant d'entrée de l'onduleur
$I_{sc}$	Courant de court circuit ou photocourant.
$I_{sc}$	Courant de court-circuit (A).
$K_1 K_2 \dots K_6$	Interrupteurs
$h_1 h_2$	coefficients
$k_1 k_2 \dots k_6$	fonctions
$L_r$	Matrice d'inductance rotorique
$L_{ref}$	Eclairement de référence ( $kw/m^2$ ).
$L_s$	Matrice d'inductance statorique
$L_{sr}$	Matrice des inductances mutuelles stator-rotor
$N_r$	Vitesse du rotor
$N_s$	Vitesse du stator
$P_i$	puissance solaire incidente
$P_m$	puissance maximale de la cellule
$P_m$	Puissance mécanique
$R_r$	Resistance rotorique
$R_s$	Resistance série de la jonction.
$R_s$	Résistance série (ohms).
$T_{ref}$	Température de référence de la cellule ( $^{\circ}C$ ).
$u_1 \dots u_2$	Variables de sorties
$U_{ab} U_{bc} U_{ca}$	Tensions composées de à la sortie de l'onduleur
$u_{ABC}$	Vecteur de tension statorique
$u_{abc}$	Vecteur de tension rotorique
$u_{dr}$	Tension axe direct rotorique
$u_{dr}$	Tension axe quadratique rotorique
$u_{ds}$	Tension axe direct statorique
$u_{os}$	Tension axe homopolaire statorique
$u_{os}$	Tension axe homopolaire rotorique
$u_{qs}$	Tension axe quadratique statorique
$U_s$	Tension d'entrée de l'onduleur
$V_a V_b V_c$	Tensions simples à la sortie de l'onduleur
$V_{mp}$	Tension à puissance maximale (V).

$V_n$	Tension (V)
$V_{oc}$	Tension de circuit ouvert.
$V_{oc}$	Tension de circuit ouvert (V).
$V_p$	Amplitude de la référence
$V_r$	Amplitude de la référence
$w_m$	Pulsation mécanique
$w_r$	Pulsation du courant rotorique
$w_s$	Pulsation du courant statorique
$x_1 \dots x_n$	Les variables d'entrées
$\theta_r$	Angle entre A et d
$\theta_s$	Angle entre a et d
$\mu_{\bar{A}}(x)$	Complémentation
$\mu_{A \cap B}(x)$	Intersection
$\mu_{A \cup B}(x)$	Union
$\psi_{ABC}$	Vecteur de flux statorique
$\psi_{abc}$	Vecteur de flux rotorique
$\psi_{dr}$	Flux axe direct rotorique
$\psi_{ds}$	Flux axe quadratique statorique
$\psi_{os}$	Flux axe direct statorique
$\psi_{or}$	Flux axe direct rotorique
$\psi_{qr}$	Flux axe quadratique rotorique
$\psi_{qs}$	Flux axe direct statorique
$R_s$	Resistance statorique
$\Delta T$	Variation de la température de la cellule (°C).
$\alpha$	Coefficient de température du courant ( $A/^\circ C$ ).
A,B,C	Enroulements Statoriques
a,b,c	Enroulements rotoriques
C1, C2	Constantes.
g	Glissement
I	Courant (A).
Iref	Courant de référence
k	Constante de Boltzmann.

L	Éclairement ( $\text{kw}/\text{m}^2$ ).
m	Indice de modulation
M	Mutuelle
n	Facteur d'idéalité.
P	Transformation de Park
q	Charge de l'électron
Qi	Débit quotidien
r	Indice d'amplitude
T	Température de la jonction °K.
T	Température de la cellule (°C).
V	Tension (V).
Vref	Tension de référence
$\beta$	Coefficient de température de la tension ( $\text{V}/\text{°C}$ ).
$p$	Nombre de paire de pole
$\theta$	Position relative instantanée entre les axes magnétique des phases $A$ et $a$

### INTRODUCTION GENERALE

La croissance de la demande énergétique dans le monde a largement stimulé la recherche de nouvelles sources d'énergie. Et l'énergie solaire est une des sources non conventionnelles les plus prometteuses. Le congrès international (Le soleil au service de l'homme UNESCO, juillet 1972) a attiré l'attention sur les perspectives d'une utilisation facile et économique de cette nouvelle source d'énergie.

Avec les progrès scientifiques et techniques de ces dernières années qui ont permis d'envisager une utilisation très large de l'énergie solaire, un changement profond dans l'économie de la production d'énergie par des processus conventionnels ainsi qu'une prise de conscience accrue de leurs effets négatifs sur l'environnement se sont manifestés.

Par ailleurs, il existe en particulier dans les pays en voie de développement, un besoin de techniques plus adaptées du point de vue social et permettant la décentralisation de la production d'énergie pour de petites communautés très dispersées, l'énergie solaire s'adapte parfaitement à ce type de production à petite échelle dans des endroits reculés, comme le peuvent déjà les pompes solaires dont le fonctionnement s'est révélé irréprochable dans de nombreux pays en voie de développement.

La demande en électricité est la meilleure illustration des besoins du consommateur. En raison de ses innombrables applications à la fois industrielles et domestiques, il serait difficile d'envisager de vivre aujourd'hui sans électricité. Cependant, la mise au point de l'électricité solaire offre la perspective d'un approvisionnement illimité en énergie non polluante. On ne renoncera pas donc aux avantages de l'électricité, avec un usage plus entendu de l'énergie solaire à l'avenir [1].

Les générateurs photovoltaïques, qui ont connu une période d'intense développement avec l'aventure spatiale, suscitent un renouveau d'intérêt tout particulier dans le domaine des usages terrestres. Bien que les motivations qui conduisent au choix du photovoltaïque comme source d'énergie soient, dans les deux cas, relativement différentes. Il existe toutefois une motivation commune qui est la notion d'autonomie.

Autonomie de lieu, mais toute aussi importante est la notion d'autonomie de fonctionnement [2].

## INTRODUCTION GENERALE

---

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique  $I(V)$  du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Ces commandes sont, connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) associées au hacheur ou onduleur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale. Les techniques MPPT (maximum power point tracking) sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre ; En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées [3].

Le pompage photovoltaïque est parmi les applications les plus importantes dans le domaine de l'énergie solaire (générateur photovoltaïque) [4]. C'est dans ce sens là, qu'un couplage directe (sans stockage électrique) a été envisagé et l'étude de l'optimisation du système a été faite. En effet il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs fragiles, lourds et coûteux de plus l'utilisation d'un moteur asynchrone dont les opérations de maintenance sont moindres, plus robuste et moins chers qu'un moteur à courant continu. Augmente la fiabilité et l'autonomie de l'installation [2].

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

Dans ce travail nous développons des méthodes intelligentes, réseaux de neurones et logique floue, ayant pour objet la poursuite du point de puissance maximale quelque soit la variation des conditions climatiques (ensoleillement et température).

Dans ce cadre, nous avons organisé notre plan de travail en cinq chapitres qui se résument comme suit :

Chapitre I : est consacré à l'étude des cellules et générateurs photovoltaïques

Chapitre II : dans ce chapitre, on prestera le système de pompage photovoltaïque, ainsi que sa modélisation.

Chapitre III : dans ce chapitre, on présentera les différentes méthodes d'optimisation des générateurs photovoltaïques

Chapitre IV : Théorie des méthodes de poursuite du point de puissance maximale intelligentes (réseaux de neurones et logique floue).

Chapitre V : est consacré à la simulation du système de pompage photovoltaïque et l'évaluation des résultats obtenus.

Chapitre VI : Présentation du prototype (système de pompage photovoltaïque) disponible au niveau du CDER, les résultats des mesures effectuées, ainsi que l'implémentation d'un MPPT par réseaux de neurones sur le PIC 16F877.



CHAPITRE I

# Généralités sur les Cellules Photovoltaïques

### I.1. Introduction

La conversion directe de la lumière en énergie électrique s'obtient par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques, selon un processus appelé couramment effet photovoltaïque [1]. L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque ayant une caractéristique courant-tension non linéaire et présente un point de puissance maximal.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un bref rappel sur les semi-conducteur, on présentera la cellule photovoltaïque ainsi que l'influence des paramètres météorologiques sur la caractéristique de la cellule, nous allons également nous intéressé au fonctionnement de la cellule, l'association des cellules en série et en parallèle pour former le générateur photovoltaïque.

### I.2. Rappel sur les semi-conducteurs

Le semi conducteur a une structure cristalline. Celle-ci consiste en des atomes parfaitement rangés en lignes et en colonnes et liés les uns aux autres par quatre électrons périphériques. Ces électrons n'ont pas la tentation de se déplacer, et l'ensemble se comporte comme un bon isolant électrique.

Quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui constituent cette lumière sont capables de transmettre leur énergie aux électrons de valence du semi-conducteur pour rompre la liaison qui les maintient liés aux atomes respectifs. Pour chaque liaison rompue, on obtient un électron libre dans le semi-conducteur ainsi qu'un trou. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron.

### I.3. L'effet photovoltaïque et la jonction PN

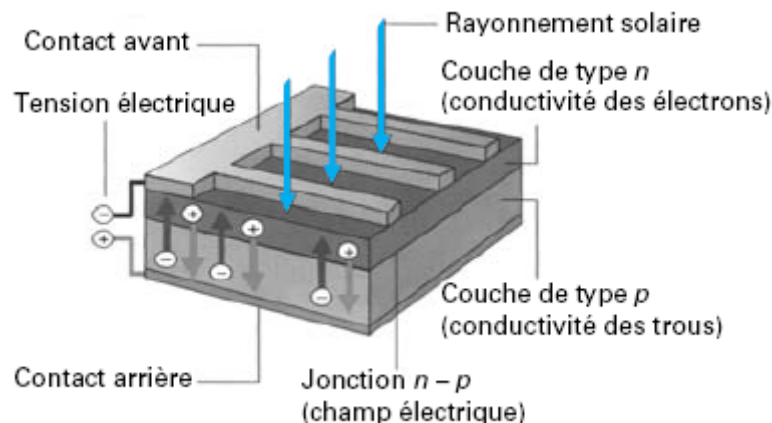
Fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paire d'électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une tension électrique apparaît dans les deux cotés N et P.

Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule [5][6][7].

### I.4. La cellule photovoltaïque

Appelé aussi, cellule solaire ou photopile, la cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Elle est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de la cellule [8].

La plus répandue est à base de silicium monocristallin, un certain nombre d'autres matériaux et de structures font l'objet d'effort de recherche considérable visant à découvrir et à mettre au point des solutions nouvelles pour obtenir des cellules à base du sulfure de cadmium, du silicium amorphe, de l'arséniure de gallium [1].



**Figure I.1 :** cellule photovoltaïque [8].

### I.4.1. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque $I = f(v)$

La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque est donné par l'équation suivante :

$$I(V) = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) \quad (I.1)$$

Ou :

$I_0$  : Courant de saturation de la jonction.

$T$  : Température de la jonction °K.

$I_{sc}$  : Courant de court circuit ou photocourant. Il est proportionnel à l'éclairement.

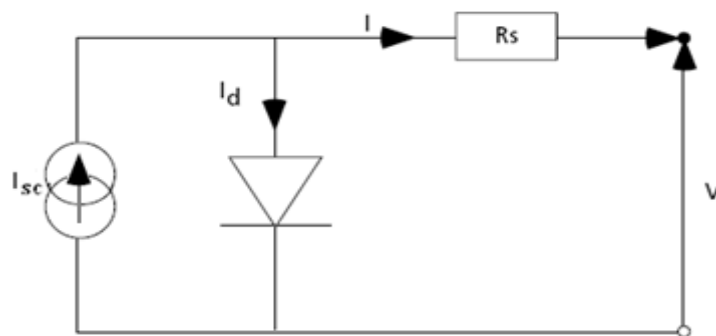
$R_s$  : Resistance serie de la jonction.

$n$  : Facteur d'idéalité.

$k$  : Constante de Boltzmann.

$q$  : Charge de l'électron.

La cellule est donc équivalente à un générateur de courant de valeur  $I_{sc}$  induit par le flux lumineux, shunté par une diode représentant la jonction  $PN$  du semi-conducteur figure(I.2) [2]. La caractéristique courant-tension ainsi que la caractéristique puissance-tension de la cellule sont illustrées dans la figure (I.3) et figure (I.4) respectivement.



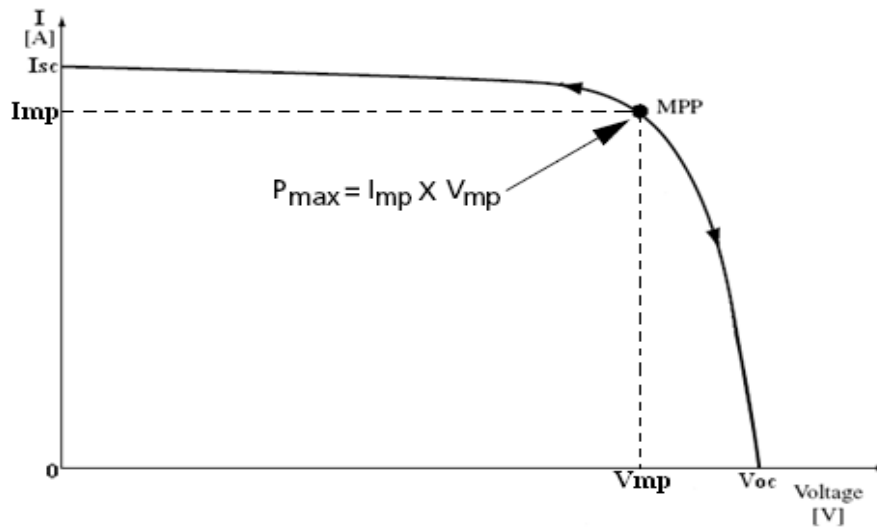
**Figure I.2:** Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire [7].

## Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est égal à :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (I.2)$$

Où  $P_i$  est la puissance solaire incidente,  $P_m$  puissance maximale de la cellule.

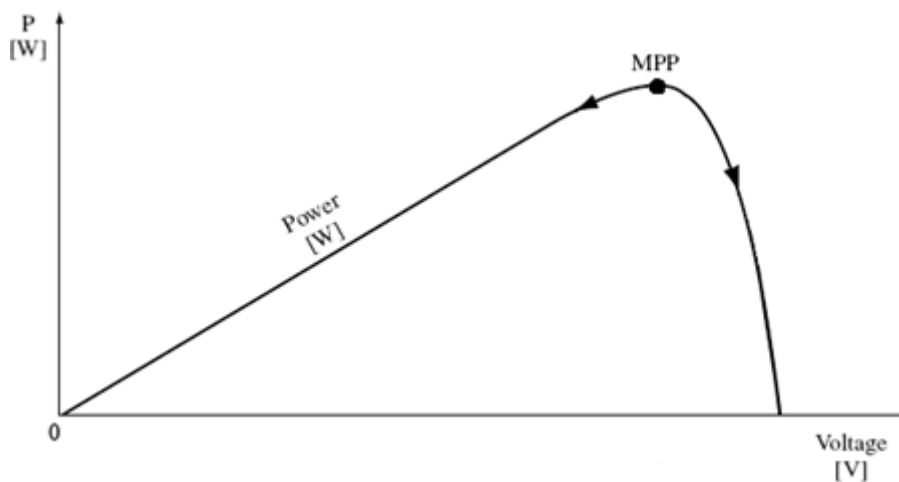


La caractéristique courant-tension passe par trois points importants :

Le point  $V_{oc}$  : tension de circuit ouvert.

Le point  $I_{sc}$  : courant de court-circuit.

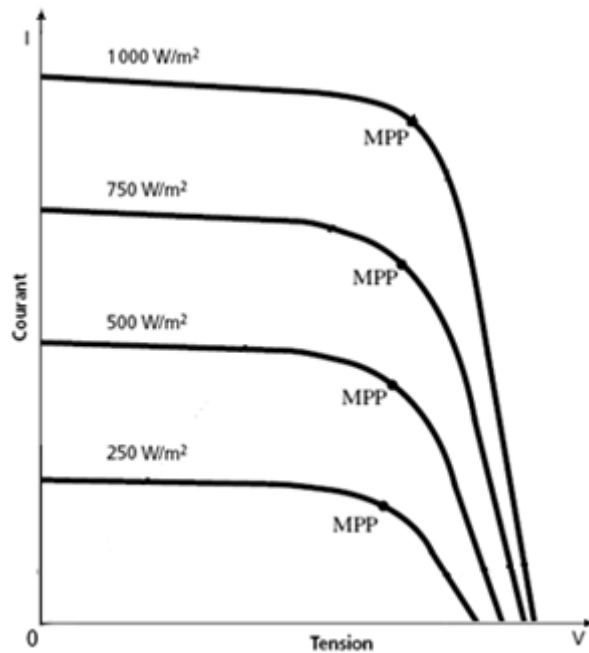
Le point  $MPP$  : (maximum power point) point de puissance maximale  $PPM$ .



### I.4.2. Influence de l'éclairement

Le courant produit par la photopile  $I_{ph}$  est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire. Par contre, la tension  $V$  aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction P-N du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux [7]. Ceci implique donc que :

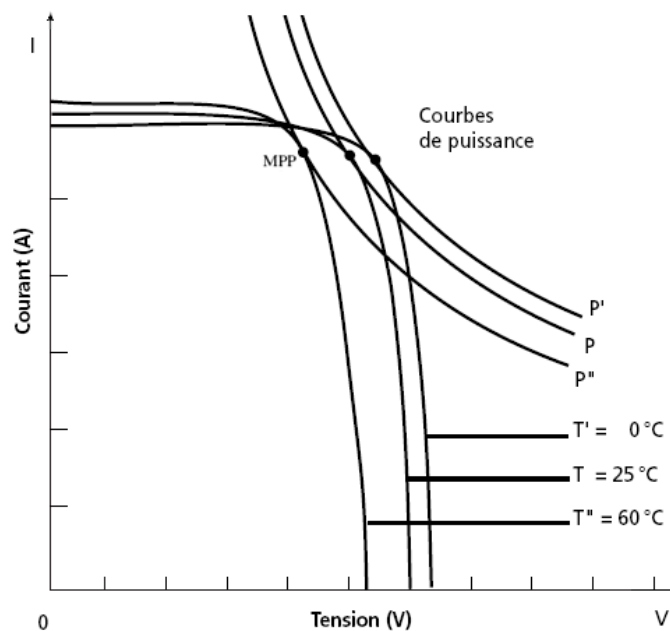
- la puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension. (voir figure (I.5)).



**Figure I.5 :** influence de l'éclairement sur la caractéristique de la cellule [7].

### I.4.3. Influence de la température

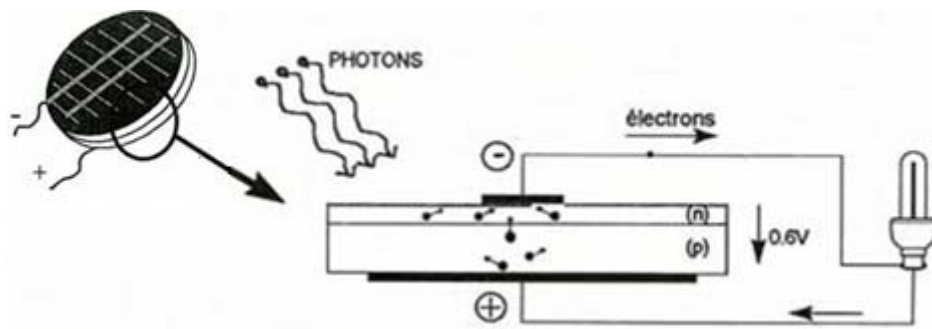
La température est un paramètre important dans le comportement d'une cellule solaire, exposée à une irradiation de  $1\text{kw}/\text{m}^2$  elle n'en transforme que 12% en électricité. Si la cellule n'est pas correctement ventilée, elle peut monter très haut en température et ses performances électriques peuvent se dégrader. La figure (9) montre l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension de la cellule. Lorsque la température augmente, le courant augmente alors que la tension décroît. Cela se traduit par une baisse de la puissance [10].



**Figure I.6 :** Influence de la température sur la caractéristique de la cellule [7].

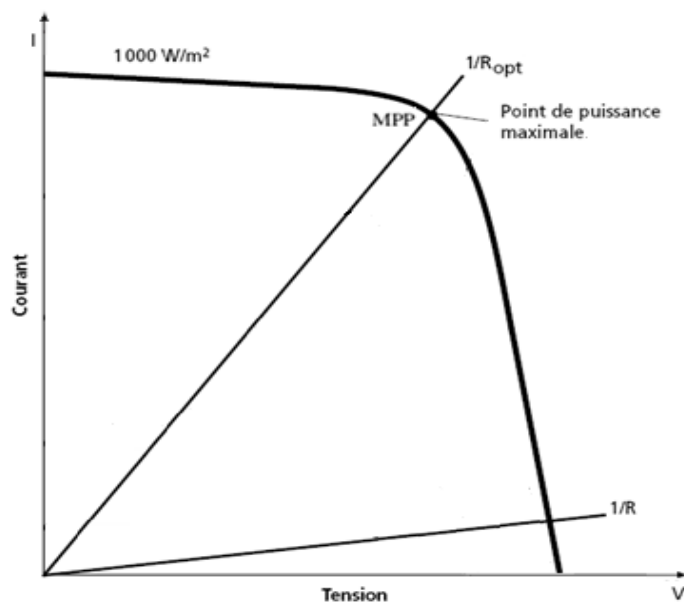
### I.4.4. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Lorsque la cellule est éclairée par une radiation lumineuse d'énergie  $h\nu$  supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite  $E_g$  du semi-conducteur, un couple d'électron-trou est créé, c'est l'effet photovoltaïque. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne de la jonction PN vers les extrémités ce qui va créer une différence de potentiel appelé tension photovoltaïque, Si on place une charge non nulle et non infinie aux bornes de la cellule photovoltaïque (photodiode), on se trouve dans un cas intermédiaire entre la situation en court-circuit et celle du circuit ouvert. Le courant va se répartir entre la charge extérieure et la diode. Il en résultera une tension de travail inférieure à la tension de circuit ouvert.



**Figure I.7 :** principe d'une cellule photovoltaïque

Une caractéristique fondamentale des photodiodes est que pour une irradiation et une température données, elles n'imposent ni le courant ni la tension de fonctionnement. Seule la courbe  $I = f(v)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes de la photodiode qui va déterminer le point de fonctionnement. La figure (I.8) montre en particulier que fermée sur une charge de résistance  $R$ , la cellule ne cèdera qu'une puissance  $P$  bien inférieure à la puissance optimale  $P_{op}$  qu'elle pourrait débiter [10].



**Figure I.8 :** Courbe d'une photopile débitant sur une charge  $R$  et une charge optimale  $R_{op}$  [9].



I.5. Association des cellules

I.5.1. Association de cellules photovoltaïques en série

La tension générée par une photopile est limitée à la valeur du gap du matériau duquel elle est issue. Pour obtenir une tension compatible, on doit assembler les photopiles en série. Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La caractéristique  $I = f(v)$  est homothétique de celle de la cellule de base. La figure (I.9) présente la caractéristique du groupement [10].

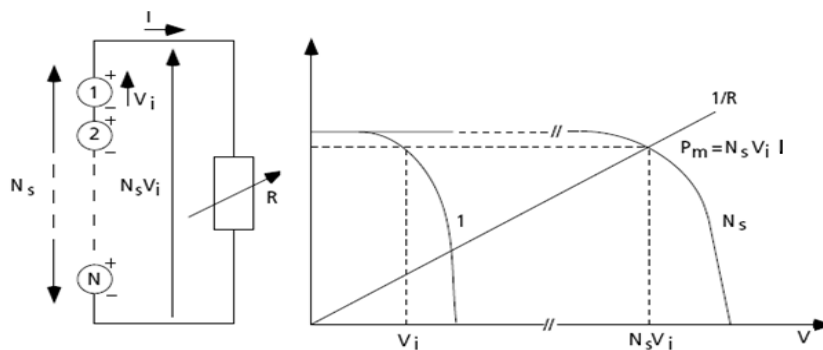


Figure I.9 : Groupement de cellules en série [7].

I.5.2. Association de cellules photovoltaïques en parallèle

Dans ce cas c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutent, la caractéristique du groupement est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de la tension, le courant de la cellule élémentaire par le nombre de cellule en parallèle. La figure (I.10) présente la caractéristique du groupement [10].

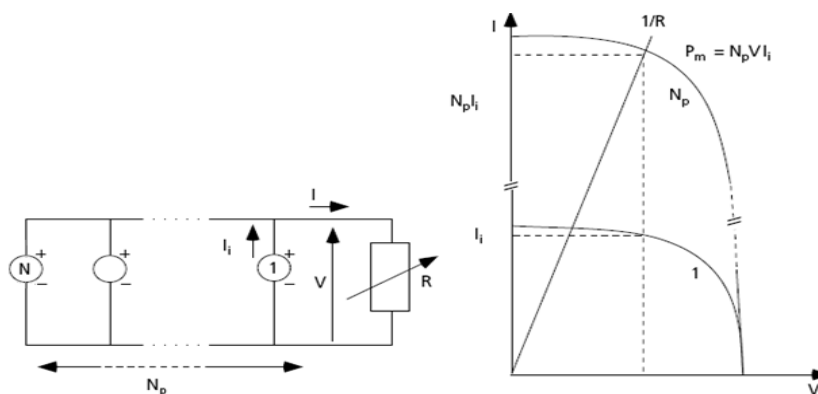


Figure I.10 : Groupement de cellules en parallèle [7].

### I.6. Le module photovoltaïque

Les cellules individuelles sont assemblées en montage en série (les tensions s'additionnent, figure (I.9)) ou en parallèle (les courants s'additionnent, figure (I.10)). On réalise ainsi des modules photovoltaïques. Les cellules sont triées par le fabricant afin qu'elles aient à peu près toutes les mêmes caractéristiques et pour éviter que la plus mauvaise cellule, c'est-à-dire celle de résistance série la plus élevée, ne détermine les performances de l'ensemble [11].

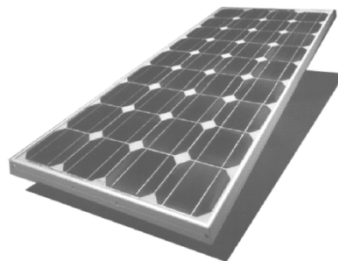


Figure I.11 : Module photovoltaïque [9].

### I.7. Générateur Photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, par principe, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés par association en série et en parallèle de modules (ensemble de cellules élémentaires). La puissance totale du générateur est égale à la somme des puissances des modules constituant ce dernier [8][2].

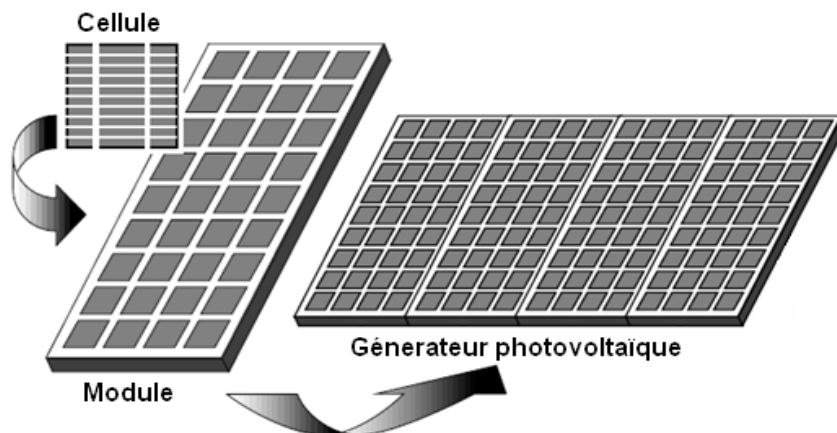


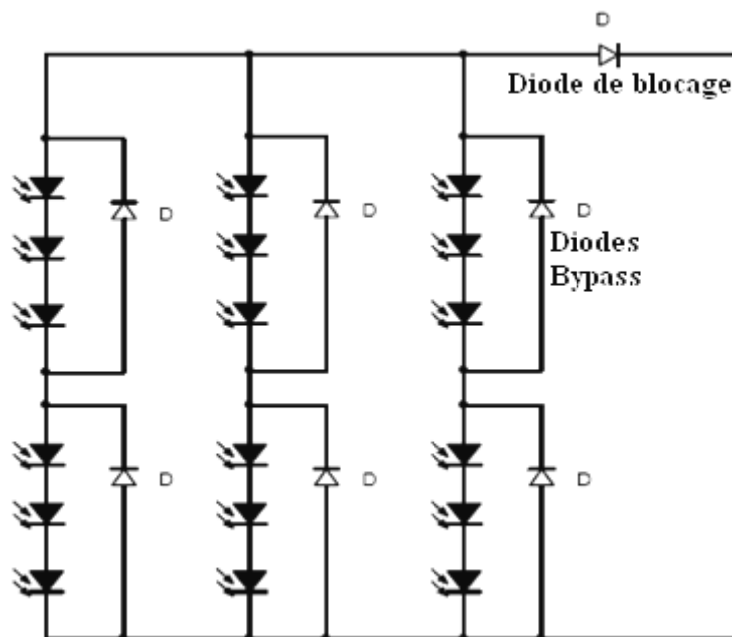
Figure I.12 : Composantes d'un générateur photovoltaïque [7].

### I.8. Protection des générateurs photovoltaïques

Dans la réalité, malgré un tri soigneux des cellules et des modules, il arrive, d'une part que l'on trouve quelques disparités intrinsèques dans les caractéristiques électriques des modules, d'autre part que les conditions de fonctionnement induisent ces disparités.

Par exemple l'occultation partielle d'une cellule par une feuille morte la transforme immédiatement en un récepteur, une charge électrique résistive, qui au lieu de générer de l'énergie va en recevoir de la part des autres [10].

Pour remédier à ce problème on prend quelques cellules voisines et on les shunte par une diode en parallèle appelée 'By-pass diode' ces diodes empêchent le courant de passer à travers les cellules dont la tension tombe au-dessous de la tension de seuil de la diode. On place aussi une diode en série avec chaque module pour éviter le retour du courant des autres modules montés en parallèle lorsqu'un module est mal ensoleillé [5].



**Figure I.13 :** Protection des cellules solaires par diodes 'By-pass' et de 'blocage' [5].

### **I.9. Conclusion**

La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, elle présente une caractéristique courant-tension fortement non linéaire, et son rendement dépend des conditions météorologiques (éclairage, température). L'association de cellules en série et en parallèle donne lieu aux générateurs photovoltaïques, qui sont utilisés pour l'alimentation électrique, tels les générateurs qui alimentent le système de pompage photovoltaïque qui fera l'objet de la section suivante.

CHAPITRE II

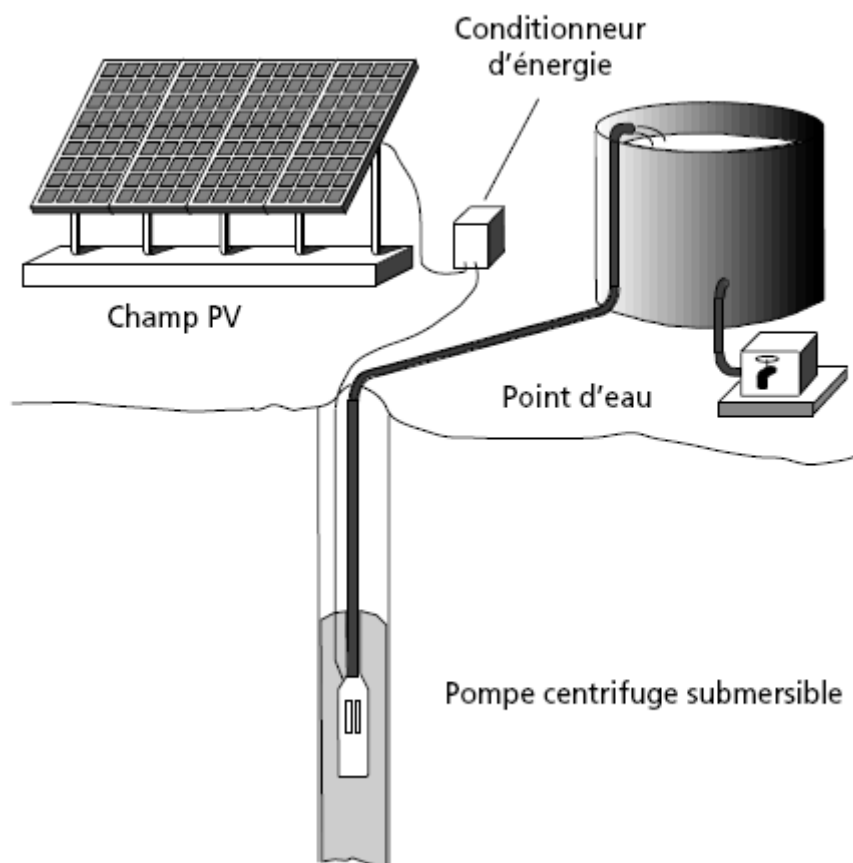
# Systeme de Pompage Photovoltaïque

### II.1. Introduction

Un système de pompage photovoltaïque se compose généralement des éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque
- Convertisseur statique (Onduleur, Hacheur).
- Un groupe moteur-pompe.
- La partie stockage.

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage de l'énergie électrique ou stockage d'eau qui est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que de l'énergie dans des accumulateurs lourds coûteux et fragiles, de plus le rendement énergétique est meilleur [13].



**Figure II.1** : vue générale d'un système de pompage photovoltaïque [7].

### II.2. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un élément clé du système de pompage photovoltaïque, il permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Il est composé d'ensemble de modules (série/parallèle).

#### II.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles du générateur photovoltaïque. Ces modèles décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque sous différentes conditions de fonctionnement. La différence entre ces modèles se situe dans la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la caractéristique tension-courant.

Le modèle développé dans cette section nécessite la connaissance de sept données et définit trois points de la courbe  $I = f(v)$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ , et le point de puissance maximal  $PPM$  [2].

L'expression du courant est donnée par l'équation suivante :

$$I = I_{sc} \left[ 1 - C1 \left( e^{\frac{V}{C2V_{oc}}} - 1 \right) \right] \quad (\text{II. 1})$$

Ou  $C1$  et  $C2$  sont deux constantes données par :

$$\begin{cases} C1 = \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) e^{\frac{-V_{mp}}{C2V_{oc}}} \\ C2 = \frac{\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1}{\text{LOG} \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right)} \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

L'équation (II.1) représente l'équation de la caractéristique  $I - V$  de la cellule à une température et à un éclairage de référence, par exemple  $25^\circ\text{C}$  et  $1 \text{ kw}/\text{m}^2$ . Si l'éclairage et la température varient le point ( $V_{ref}$  et  $I_{ref}$ ) de la courbe de référence se translate en un autre point ( $V_n$  et  $I_n$ ) tel que :

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta I = \alpha \left( \frac{L}{L_{ref}} \right) \Delta T + \left( \frac{L}{L_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \\ \Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \end{cases} \quad (II.3)$$

$$\begin{cases} V_n = V_{ref} + \Delta V \\ I_n = I_{ref} + \Delta I \end{cases} \quad (II.4)$$

La courbe définit par l'équation (II.1) se translate elle aussi et sera définie par l'équation :

$$I_n(V_n) = I(V_n - \Delta V) + \Delta I \quad (II.5)$$

$$I = I_{sc} \left[ 1 - C1 \left( e^{\frac{V-\Delta V}{C2V_{oc}}} - 1 \right) \right] + \Delta I \quad (II.6)$$

### II.2.3. Nomenclature des paramètres

$\alpha$ : Coefficient de température du courant ( $A/^\circ C$ ).

$\beta$ : Coefficient de température de la tension ( $V/^\circ C$ ).

$C1, C2$ : Constantes.

$I$ : Courant (A).

$I_{mp}$ : Courant à puissance maximale (A).

$I_{sc}$ : Courant de court-circuit (A).

$L$ : Éclairement ( $kw/m^2$ ).

$L_{ref}$ : Eclairement de reference ( $kw/m^2$ ).

$R_s$ : Résistance serie (ohms).

$T$ : Température de la cellule ( $^\circ C$ ).

$T_{ref}$ : Température de reference de la cellule ( $^\circ C$ ).



## Chapitre II : Système de pompage photovoltaïque

---

$\Delta T$ : Variation de la température de la cellule ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$V$ : Tension ( $V$ ).

$V_{mp}$ : Tension à puissance maximale ( $V$ ).

$V_{oc}$ : Tension de circuit ouvert ( $V$ ).

Les figures (II.2, II.3, II.4) montrent les résultats de simulation du modèle de cellule **SOLAREX SX 110** (module de 40 cellules en série) dont les paramètres sont :

$$V_{oc} = 22.25 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 2.3 \text{ A}$$

$$V_{mp} = 17.25 \text{ V}$$

$$I_{mp} = 2.1 \text{ A}$$

$$\alpha = 0.0025 \text{ A}/^{\circ}\text{C}$$

$$\beta = 0.096 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$$

$$R_s = 0.75 \Omega$$

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque composé de  $N_s$  modules en série dans une branche et de  $N_p$  branches en parallèle, seront  $N_s N_p P$  pour la puissance,  $N_s V$  pour la tension,  $N_p I$  pour le courant et  $R_s N_s / N_p$  pour la résistance série tel que  $P, V, I, R_s$  sont relatifs au module. Ce qui donne le modèle mathématique du générateur photovoltaïque [10].

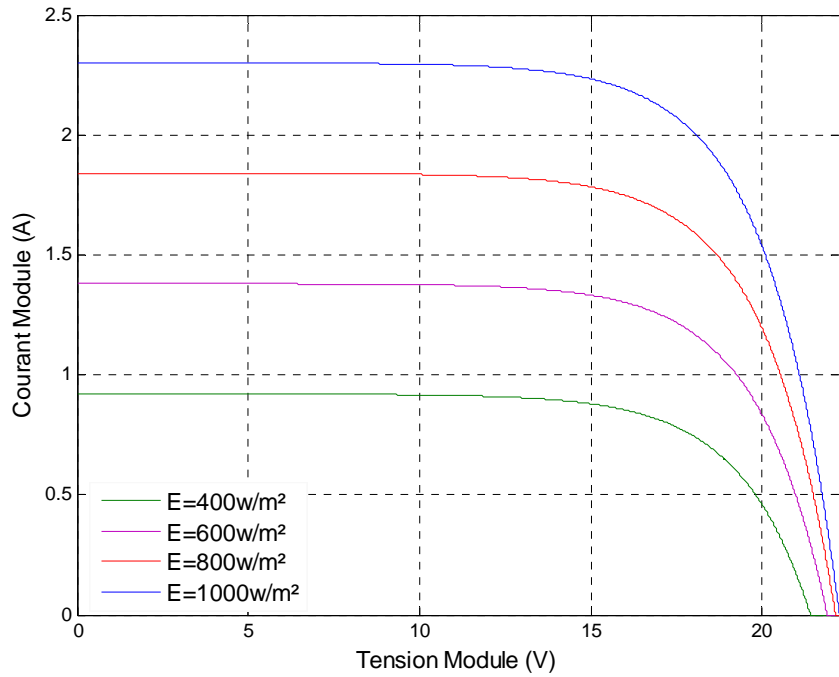


Figure II.2 : Caractéristique I-V pour différents éclaircements

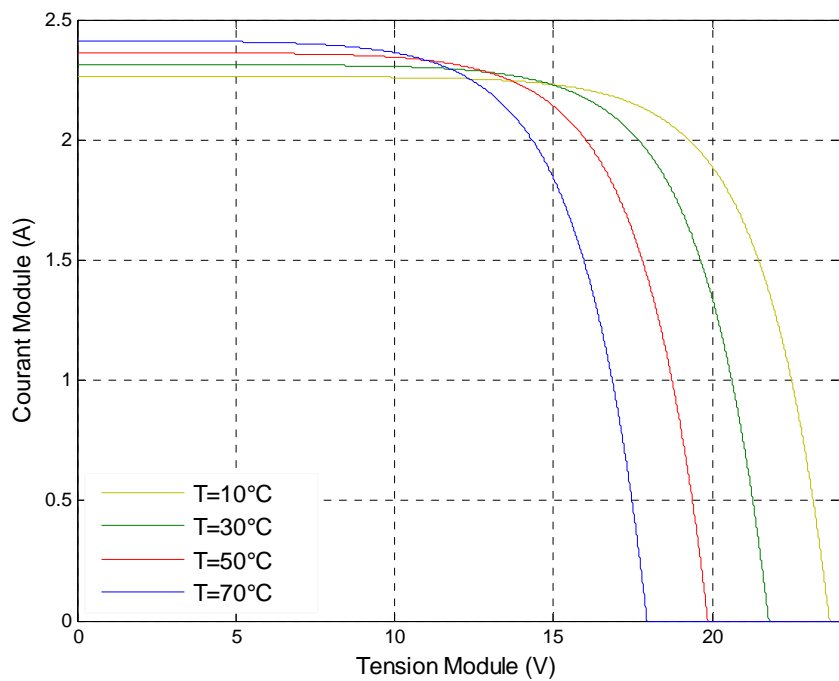
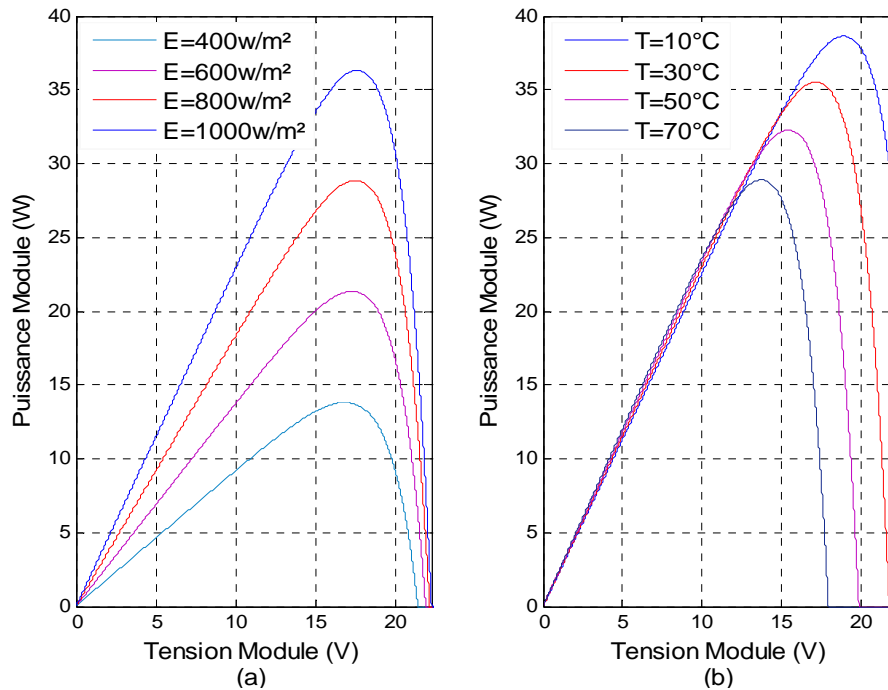


Figure II.3 : Caractéristique I-V pour différentes températures



**Figure II.4 :** (a) caractéristique P-V pour différents éclairements

(b) caractéristique P-V pour différentes températures

### II.3. Le convertisseur statique (Onduleur)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu alternatif. Le hachage de la tension d'entrée est réalisé grâce à des semi-conducteurs (transistors ou thyristors) utilisés comme commutateurs de puissance.

On peut distinguer deux types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension.
- Les onduleurs de courant.

Les premiers sont alimentés par une source de tension, alors que les seconds sont alimentés par une source de courant [14].

II.3.1. Modélisation de l'onduleur triphasé

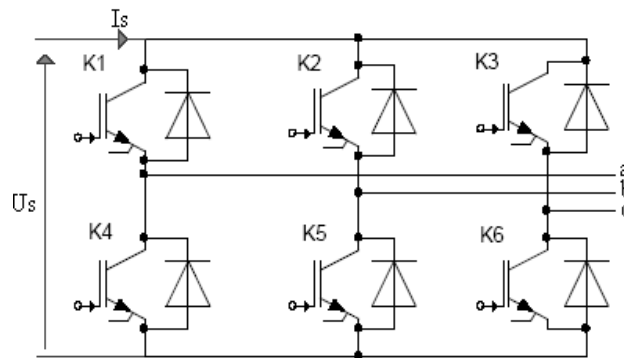


Figure II.5 : onduleur de tension triphasé

L'onduleur triphasé est composé de six transistors ( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  et  $K_6$ ) montés en tete beche avec des diodes de recuperation.

La commande des transistors d'un bras est complémentaire. Donc on peut remplacer chaque bras de l'onduleur par deux interrupteurs à deux positions.

Soit

$$k_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_1 \text{ est fermé et } K_4 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } K_1 \text{ est ouvert et } K_4 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Les tensions de sortie composées sont données donc par :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_s(k_1 - k_2) \\ U_{bc} = U_s(k_2 - k_3) \\ U_{ca} = U_s(k_3 - k_1) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Et les tensions simples sont données par :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_s}{3}(2k_1 - k_2 - k_3) \\ V_b = \frac{U_s}{3}(-k_1 + 2k_2 - k_3) \\ V_c = \frac{U_s}{3}(-k_1 - k_2 + 2k_3) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Le courant à l'entrée de l'onduleur est donnée par :

$$I_s = k_1 i_a + k_2 i_b + k_3 i_c \quad (\text{II.10})$$

### II.3.2. Modulation de l'arguer d'impulsion (MLI)

Le principe de la technique MLI consiste à comparer un signal de référence à une porteuse. Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence. Quant à la porteuse, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence [14].

La commande de l'onduleur par cette technique permet de générer, par alternance de la tension alternative, une tension composée de plusieurs créneaux de largeurs variables. Elle permet ainsi, d'obtenir un fondamental de tension variable en amplitude et en fréquence.

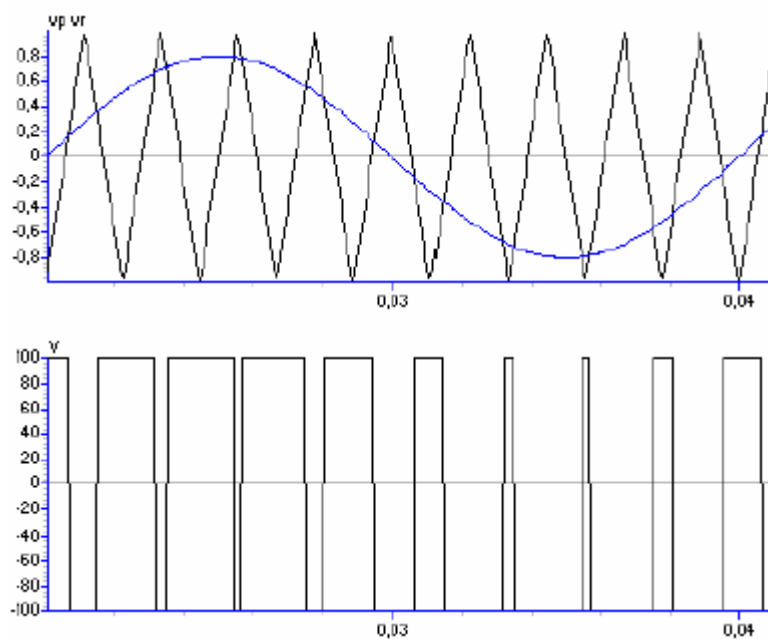


Figure II.6 : Principe de la MLI

La technique MLI est caractérisée par :

- L'indice de modulation  $m$  qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse de celle de la référence (modulante).  $m = \frac{f_p}{f_r}$ .
- L'indice d'amplitude  $r$  qui représente le rapport entre l'amplitude de la référence et celle de la porteuse.  $r = \frac{V_p}{V_r}$ .

### II.4. Le moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans toutes les applications industrielles ou domestiques de l'électricité, du fait de sa facilité d'installation, de son bon rendement et de son excellente fiabilité [15].

L'utilisation du moteur asynchrone dans les systèmes de pompage photovoltaïque, augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Il est alimenté par un onduleur à partir du générateur photovoltaïque [2].

#### II.4.1. Modélisation du moteur asynchrone

##### II.4.1.1. Hypothèse simplificatrices [16]

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme en négligeant l'effet de l'encoche ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault peuvent être négligés ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et que l'effet de peau est négligeable.
- La force magnétomotrice créée par chacune des phases du stator et du rotor est à répartition sinusoïdale. Cette hypothèse, jointe à celle de la constance de la perméance de l'entrefer, conduit à des expressions très simples de diverses inductances.
- On suppose la machine bipolaire pour ne pas avoir à distinguer angles géométriques et angles électriques.

II.4.1.2. Equations des tensions et des flux en grandeurs de phase

Soit une machine asynchrone triphasée représentée schématiquement par la figure (II.7), dont les phases sont repérées respectivement par  $A, B, C$  et  $a, b, c$ . L'angle électrique  $\theta$  variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétique des phases  $A$  et  $a$  choisi comme axes de référence [17].

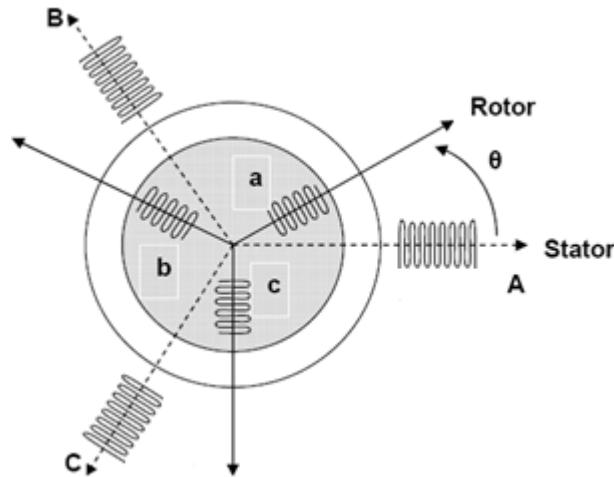


Figure II.7 : représentation schématique d'une machine asynchrone

Sous forme matricielle, on a :

$$[u_{ABC}] = R_s [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\psi_{ABC}] \quad (II. 11)$$

$$[u_{abc}] = R_r [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\psi_{abc}] \quad (II. 12)$$

$R_s, R_r$  Designent les résistances par phase du stator et du rotor.

$$[u_{ABC}] = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (2.13) \quad [\psi_{ABC}] = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} \quad (2.14) \quad [i_{ABC}] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques  $[u_{abc}], [\psi_{abc}], [i_{abc}]$ .

Les flux totalisés couplés avec les phases rotorique et statoriques s'expriment sous la forme :

$$[\psi_{ABC}] = [L_s][i_{ABC}] + [L_{sr}][i_{abc}] \quad (\text{II. 16})$$

$$[\psi_{abc}] = [L_{sr}]_t[i_{abc}] + [L_r][i_{abc}] \quad (\text{II. 17})$$

En introduisant (II.11 et II.12) dans (II.16 et II.17), on obtient :

$$[u_{ABC}] = R_s[i_{ABC}] + [L_s] \frac{d}{dt}[i_{ABC}] + \frac{d}{dt}[L_{sr}][i_{abc}] \quad (\text{II. 18})$$

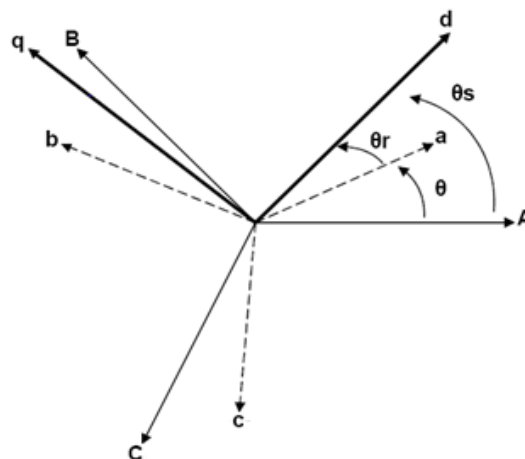
$$[u_{abc}] = R_r[i_{abc}] + [L_r] \frac{d}{dt}[i_{abc}] + \frac{d}{dt}[L_{sr}]_t[i_{ABC}] \quad (\text{II. 19})$$

$[L_s], [L_r]$  : Représentent les matrices d'inductances statoriques et rotoriques, tandis que  $[L_{sr}]$  correspond à la matrice des inductances mutuelles stator-rotor [17].

Du fait des termes de la matrice  $[L_{sr}]$  qui dépendent de l'angle  $\theta$ . Les coefficients des équations différentielles sont variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés.

#### II.4.1.3. Transformation de Park

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents selon la transformation de Park. Ainsi les enroulements statoriques  $A, B, C$  sont remplacés par  $ds, qs, os$  et les enroulements rotoriques  $a, b, c$  par  $dr, qr, or$  [17].



**Figure II.8 :** transformation des enroulements réels en enroulements équivalents



Dans la théorie de Park, on utilise la transformation unique pour les courants, tensions et flux, cette transformation est définie par la matrice P suivante :

$$[P] = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

### II.4.1.4. Application de la transformation de Park [17]

#### II.4.1.4.1. Equation de tension

L'application de la transformation de Park définie par la matrice P sur l'équation (II.11 et II.12), donne :

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_s \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega_s \psi_{ds} \\ u_{os} = R_s i_{os} + \frac{d}{dt} \psi_{os} \end{cases} \quad (II. 21)$$

Et

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} \\ u_{or} = R_r i_{or} + \frac{d}{dt} \psi_{or} \end{cases} \quad (II. 22)$$

### II.4.1.4.2. Equation du flux

L'application de la transformation de Park définie par la matrice P sur l'équation (II.16 et II.17), donne :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \\ \psi_{os} = L_{os} i_{os} \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

Et

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_r i_{ds} + L_{sr} i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qs} + L_{sr} i_{qs} \\ \psi_{or} = L_{or} i_{or} \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

Les équations de Park peuvent être exprimées dans différents référentiels :

- Dans un référentiel lié au stator  $w_s = 0$ .
- Dans un référentiel lié au rotor  $w_s = w_r$ .
- Dans un référentiel lié au champ tournant.

### II.4.1.5. Modèle mathématique de la machine asynchrone

Le système d'équations décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone dans le référentiel de Park lié au stator ( $w_s = 0$ ) est donné par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & M w_r & R_r & L_r w_r \\ -M w_r & 0 & -L_r w_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Avec  $M$  inductance mutuelle.

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$\frac{d}{dt} w_r = \frac{1}{J} (C_m - C_r) \quad (\text{II. 26})$$

Avec

$$C_m = pM(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (\text{II. 27})$$

L'équation de puissance est donnée par :

$$\text{Puissance} = i_{ds}u_{ds} + i_{qs}u_{qs} \quad (\text{II. 28})$$

### II.5. Filtre d'entrée

Pour imposer au générateur de fonctionner dans la zone à tension constante qui offre une meilleure stabilité de fonctionnement une capacité à l'entrée de l'onduleur est nécessaire [2]. L'équation du filtre est donnée par :

$$C \frac{dU_s}{dt} = I_g - i_s \quad (\text{II. 29})$$

Ou  $U_s$  tension d'entrée et tension aux bornes du générateur photovoltaïque.  $U_s = V_g$  et  $I_g$  courant délivré par le générateur photovoltaïque. Or  $I_g$  et  $V_g$  sont reliés par la relation  $I_g = f(V_g)$ , l'équation du filtre devient :

$$C \frac{dU_s}{dt} = f(U_s) - i_s \quad (\text{II. 30})$$

### II.6. La pompe

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée « pompe au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [7].

### II.6.1. Les types de pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. On distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

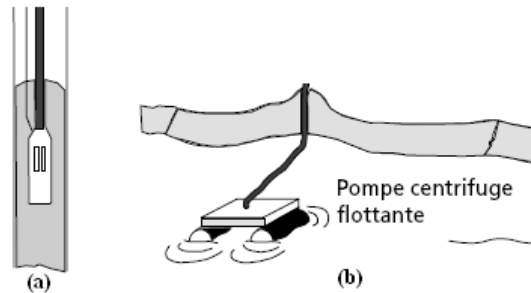


Figure II.9 : (a) pompe submersible (b) pompe flottante [7]

### II.6.2. Dimensionnement d'une pompe

La détermination de la puissance d'une pompe photovoltaïque s'effectue à partir des deux paramètres suivants :

- La HMT (Hauteur Manométrique Totale) exprimée en MCE (mètre de colonnes d'eau).
- Le débit quotidien ( $Q_i$ ) exprimé en  $m^3/jour$ .

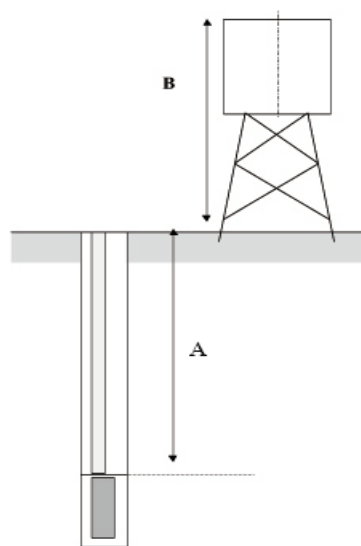


Figure II.10 : Hauteur géométrique HGT

## Chapitre II : Système de pompage photovoltaïque

---

La HMT est déterminée par les paramètres suivants :

$$HMT = HGT + Pdc \quad (II.31)$$

*HGT* : Hauteur géométrique. ( $HGT = A + B$ ).

*Pdc* : Pertes de charges estimées.

*B* : est la hauteur maximale d'élévation de l'eau, au dessus du niveau du sol. Elle est déterminée par la hauteur du château d'eau.

*A* : est la différence géométrique de côté entre le niveau d'eau en pompage invariable de l'orifice du tuyau de refoulement.

### II.6.3. Modélisation de la pompe

En général la pompe est modélisée par un coefficient  $k$ , de telle façon que la pompe développe la puissance utile du moteur à la vitesse de synchronisme. Ce coefficient dépend de la pompe et de la hauteur de la pompe [2].

$$C_p = K_p N^2 \quad (II.32)$$

### II.7. Le stockage

Dans un système photovoltaïque le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage de l'énergie électrique ou stockage d'eau qui est souvent adoptée dans les systèmes de pompage photovoltaïque, car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que de l'énergie dans des accumulateurs lourds coûteux et fragiles, de plus le rendement énergétique est meilleur [2].

### I.8. Conclusion

La configuration du système de pompage photovoltaïque que nous venons de voir dans cette section, consiste à coupler le groupe moteur-pompe directement avec le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/AC sans utiliser de batterie.

Ce système fonction donc au fil du soleil, et il nécessite une optimisation du fait de la non linéarité de la caractéristique I-V des cellules solaires. Cette optimisation est obtenue en ajoutant à l'ensemble du contrôleur du type MPPT.

Chapitre III

# Méthodes de poursuite du point de puissance maximale

### III.1. Introduction

Nous avons vu précédemment que les caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  d'un Générateur photovoltaïque montrent que la puissance maximale générée dépend de l'éclairement et de la température. De plus le Générateur photovoltaïque ne peut céder son maximum d'énergie que pour une certaine tension et courant de fonctionnement. Le point de puissance maximal (PPM) est à son tour fonction de l'éclairement, de la température ainsi que de la charge. Par conséquent il faut adapter la charge en permanence pour que le Générateur cède le maximum d'énergie.

### III.2. Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale

Chaque charge, que ce soit en continu (DC) (batteries, certains appareils électroménagers destinés à des réseaux continus isolés) ou bien en alternatif (AC), possède un comportement propre. De plus, souvent, la charge varie brutalement en fonction de la consommation des utilisateurs, ce qui est souvent difficile à prévoir surtout sur des petits réseaux locaux. Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons par exemple le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge purement résistive  $R_{opt}$  et une autre résistance quelconque  $R$ . Les deux points de fonctionnement sont différents. Celui qui correspond à  $R_{opt}$  permet d'extraire le maximum de puissance du générateur [12].

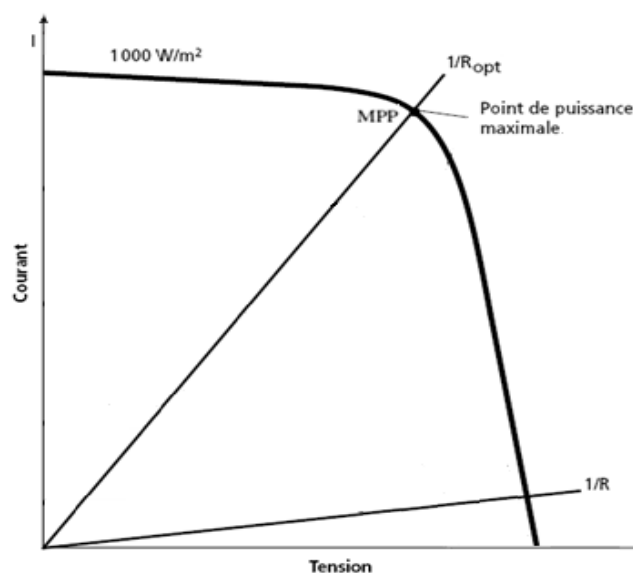


Figure III.1 : point de fonctionnement du générateur pour différentes charges [9].



### III.3. Optimisation du générateur

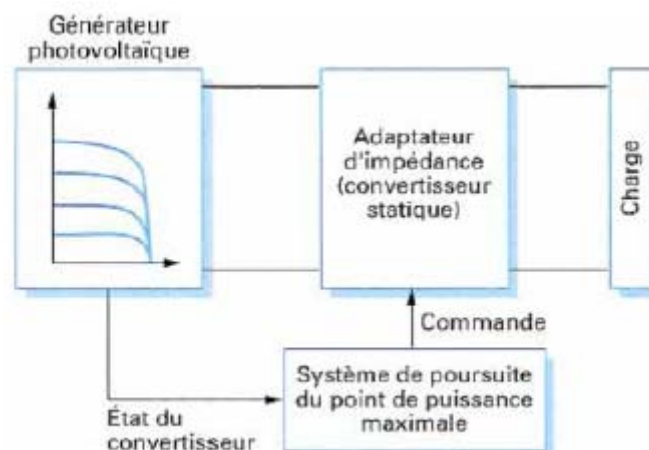
L'approche du problème consiste à intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique (hacheur ou onduleur) pour effectuer le transfert optimal d'énergie [2]. La commande de ce convertisseur permettra de faire fonctionner le système en un point où le générateur délivre le maximum de puissance.

### III.4. Optimisation du récepteur

Le récepteur absorbe aux pertes près la puissance fournie par le générateur. Le point de fonctionnement est choisi afin que la puissance utilisable soit égale à la puissance maximale fournie par le générateur. Le problème sera donc d'imposer un ou plusieurs paramètres de contrôle au récepteur, par exemple la fréquence d'alimentation pour un moteur asynchrone [2].

### III.5. Le MPPT (maximum power point tracking)

Le MPPT (maximum power point tracking) est un mécanisme de contrôle de poursuite qui est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre [3]. La figure (III.2) montre une vue générale d'un système photovoltaïque doté d'un contrôleur MPPT.



**Figure III.2 :** Vue Générale d'un système photovoltaïque doté d'un MPPT [8].

Le mécanisme de poursuite (MPPT) est un élément important dans tout système photovoltaïque, depuis 1968. Plusieurs commandes MPPT ont été développées et implémentées [18], parmi ces méthodes on trouve les méthodes à contre réaction de tension et de courant...

### III.5.1. Méthode à contre réaction de tension

Cette méthode se base sur l'asservissement de la tension du générateur à une tension de référence. En fonction de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) cette méthode comporte trois sortes.

#### III.5.1.1. Méthode à tension de référence fixe

Cette méthode résulte du fait que la tension des photopiles à la puissance maximale est en première approximation constante lorsque l'éclairement varie. Par conséquent il suffit de maintenir constante la tension au borne du générateur quel que soit l'éclairement, et de faire corriger cette tension en fonction de la température [2].

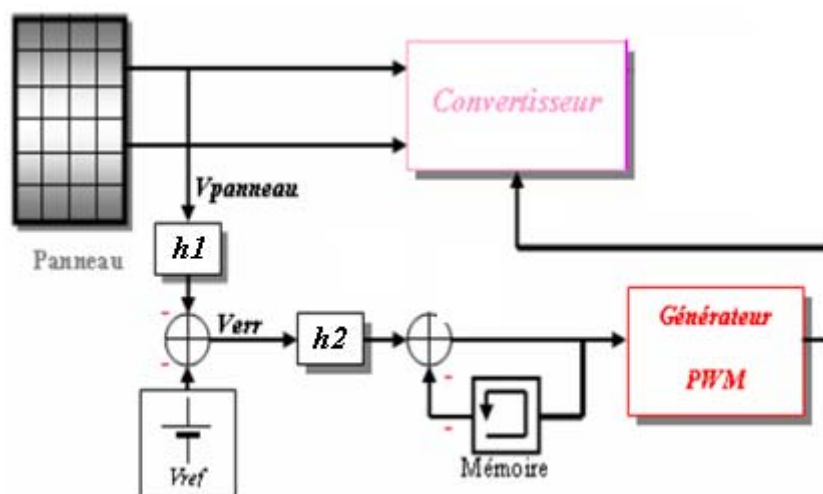
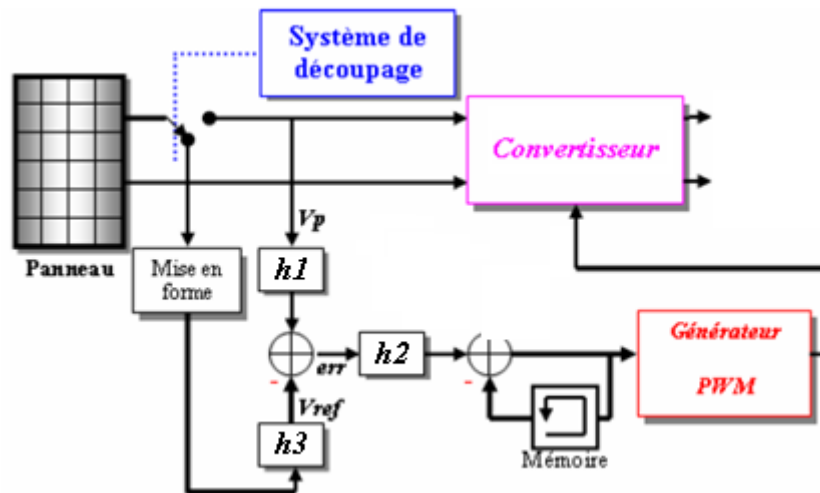


Figure III.3 : Principe de la méthode à contre réaction de tension [5].

### III.5.1.2. Méthode à tension de référence en fonction de $V_{oc}$

Cette méthode exploite la relation quasi linéaire entre la tension de fonctionnement en puissance maximale et la tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  ( $V_{mp} = h_1 V_{oc}$ ) du générateur (panneau). Cette tension est prélevée régulièrement par le débranchement du générateur pour une courte durée afin d'ajuster la tension de référence [12]. Le coefficient  $h_1$  est pris dans l'intervalle 0.71-0.78 [18].



**Figure III.4 :** Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert [5].

### III.5.1.3. Méthode à tension de référence externe (cellule pilote)

Cette méthode fait appel au même principe que la précédente, dans ce cas l'estimation de la tension  $V_{oc}$  est réalisé par l'ajout d'une cellule pilote a l'ensemble de l'installation, cette cellule donne continuellement une information implicite sur la tension en circuit ouvert de l'ensemble. De meme que les autres methodes, la tension  $V_{mp}$  est estimée à partir de la tension  $V_{oc}$ .

### III.5.2. Méthodes à contre réaction de courant

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension, le courant de court circuit du générateur permet de savoir la valeur du courant optimale qui correspond au fonctionnement à puissance maximale du générateur. Le courant optimal est proportionnel au courant de court circuit ( $I_{mp} = h_2 I_{sc}$ ). Le coefficient  $k_2$  est généralement entre 0.78 et 0.92 [18].

### III.5.3. Méthodes à contre réaction de puissance

Ces méthodes se basent sur des algorithmes de recherche itérative qui permettent de trouver le point de fonctionnement maximal du générateur sans interruption du système. La puissance extraite du générateur est calculée à partir des mesures du courant et de la tension, la multiplication de ces deux grandeurs donne la puissance. Le sens de variation de la puissance est connu par le calcul approximatif de la dérivée  $dP = P(k) - P(k - 1)$  sur un temps d'échantillonnage [12].

#### III.5.3.1. Algorithme 'perturbation et observation'

C'est l'algorithme de poursuite le plus utilisé, il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou en agit directement sur un paramètre de réglage (rapport cyclique ou fréquence) puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du générateur. Si la valeur de la puissance  $P(k)$  est supérieure à la précédente  $P(k - 1)$  alors on garde la même direction de perturbation sinon on inverse la perturbation. Cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètres de mesure [12].

#### III.5.3.2. Algorithme 'incrémental conductance'

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du générateur est calculée d'une autre manière. Elle est fonction de la tension et de la différence de la tension ainsi que du courant et de sa différence. Cette dérivée est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite [12].

Cette méthode utilise la conductance incrémentale de la source comme MPPT. Cette méthode est plus efficace que la méthode de perturbation, et indépendante des caractéristiques des différents composants utilisés. Les tensions et courants du panneau sont monitorés, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement [19].

### III.5.4. Méthodes de poursuite analogique

Cette méthode utilise directement la tension et le courant du générateur pour le control du MPP, une image de la puissance est obtenue par la multiplication des grandeurs précédentes. Le sens de variation de la puissance est déterminé grâce à deux filtres RC de constantes de temps différentes et un comparateur de tension comme illustré sur la figure(III.5).

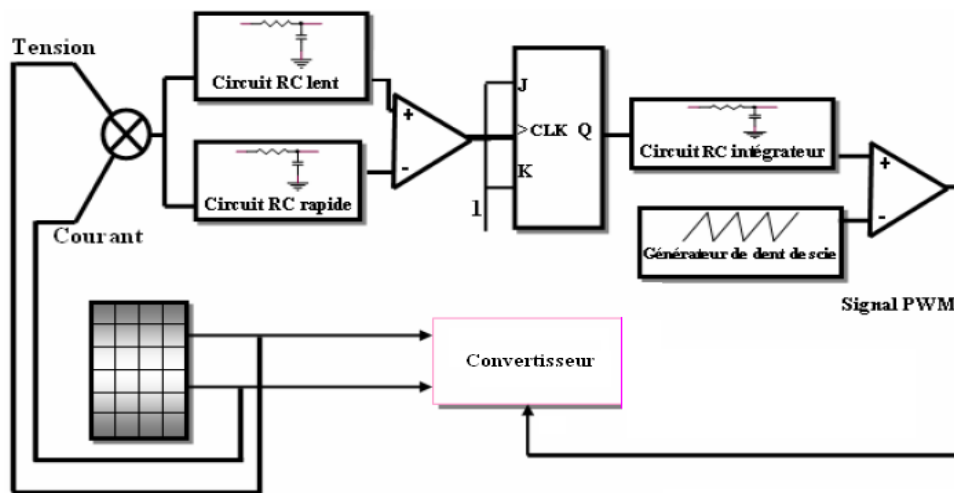


Figure III.5 : principe de la méthode de poursuite analogique [5].

### III.6. Méthodes intelligentes pour la commande du MPPT

Dans la partie précédente, les méthodes classiques et les mécanismes de poursuite de puissance maximale les plus rencontrés dans la littérature ont été présentés. Cette partie quant à elle, décrit les techniques intelligentes nouvellement introduites dans le monde de contrôle des MPPT. IL s'agit des réseaux de neurones et de la logique floue.

#### III.6.1. Commande MPPT par réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles électroniques basés sur la structure neuronale du cerveau lesquels sont souvent utilisés pour l'optimisation de l'algorithme de MPPT. En effet les réseaux de neurone peuvent être utilisés afin de trouver la position du point maximum de puissance avec un nombre réduit d'itérations pour atteindre le MPP et une réduction des oscillations autour du PPM [17].

### **III.6.2. Commande MPPT par logique floue**

La logique floue est une nouvelle méthode de tracking du MPP, elle a l'avantage de travailler sur plusieurs phases de tracking. La première est rude ou le pas de recherche est important, une fois le point de fonctionnement est proche du MPP l'algorithme fonctionne dans la phase fine ou le pas de recherche est faible, ainsi l'ondulation est minime [12].

### **III.7. Conclusion**

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.

CHAPITRE IV

# Réseaux de neurones et Logique floue

### IV.1. Réseaux de neurones

#### IV.1.1. Introduction

Le cerveau humain est un réseau de neurones biologique très complexe. Il comprend des milliards de neurones hautement interconnectés entre eux, permettant entre autres le processus de la respiration, des mouvements et de la pensée. Les scientifiques commencent juste à comprendre le fonctionnement du cerveau. On sait maintenant que toutes les fonctions neurologiques biologiques, comme la mémoire, sont emmagasinées dans les neurones et dans les interconnexions entre eux, L'apprentissage est vu comme l'établissement de nouvelles connexions entre les neurones ou dans les modifications entre ses interconnexions [20].

Le terme réseaux de neurones 'formels' ou 'artificiels' fait rêver certain, et fait peur à d'autres. La vérité est à la fois plus prosaïque et plus rassurante, les réseaux de neurones constituent une technique de traitement de données bien comprise et maîtrisée, ils sont utilisés pour faire des prévisions, élaborer des modèles, reconnaître des formes ou des signaux [21].

#### IV.1.2. Historique

Les premiers travaux sur les neurones artificiels ont débuté au début des années 1940 et ont été mémorisés par McCulloch et Pitts. Ils décrivent les propriétés du système nerveux à partir de neurones idéalisés : ce sont des neurones logiques (0 ou 1). Dix années plus tard, on a constitué le premier modèle réel d'un réseau de neurones.

En 1960, le premier perceptron est créé par Rosenblatt. Puis, durant les années 1970 il y eut une remise en cause de l'intérêt des réseaux de neurones car les ordinateurs apprenaient lentement, coûtaient très cher et leurs performances n'étaient pas si impressionnantes [22].

La disponibilité croissante de minis et microordinateurs, vers la fin des années 1970, a permis aux réseaux de neurones de prendre départ. On attribue à Hopfield (un physicien de Caltech) un rôle majeur dans cette résurrection [23].



### IV.1.3. Neurone biologique

Le neurone biologique (figure (IV.1.1)) est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie [23].

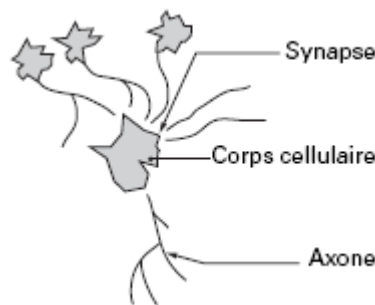


Figure IV.1.1 : Neurone biologique [23].

### IV.1.4. Neurone artificiel

Un neurone artificiel est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée, à valeur bornée [21]. c'est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrée en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont. A chacune de ces entrées est associé un poids  $w$  représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire (neurone) est doté d'une sortie unique, qui se ramifie pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval. A chaque connexion d'entrée est associé un poids [23].

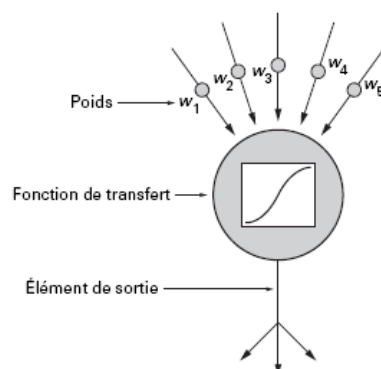


Figure IV.1.14 : Neurone artificiel [23].

Les variables sur lesquelles opère le neurone artificiel sont habituellement désignées sous le terme d'entrées du neurone. Et la valeur de sortie sous celui de sortie ; il est commode de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la figure(IV.1.2). Cette représentation est le reflet de l'inspiration biologique qui été à l'origine de la première vague d'intérêt pour les neurones formels, dans les années 1940 à 1970 [21].

### IV.1.5. Modélisation d'un neurone artificiel

Le neurone artificiel (formel) est modélisé par deux opérateurs comme le montre la (figure (IV.1.3) et (IV.1.4)), un opérateur de sommation en entrée, suivi d'un opérateur non linéaire (fonction d'activation). C'est l'association de tels éléments simples sous la forme de réseaux qui permet de réaliser des fonctions utiles pour des applications industrielles [24].

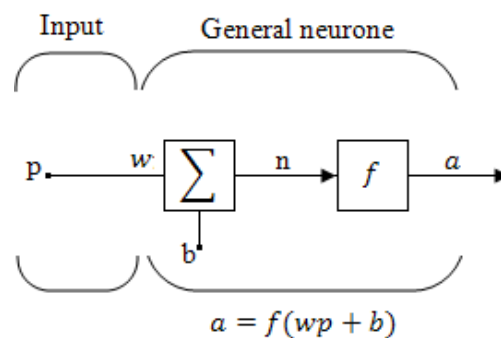


Figure IV.1.3 : Single-Input Neurone [25].

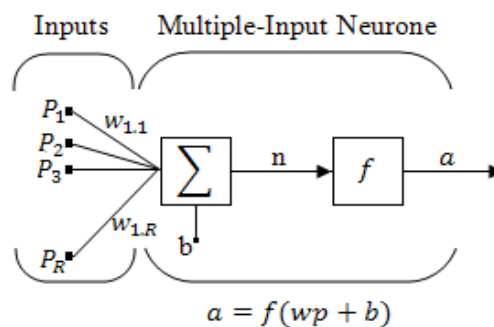
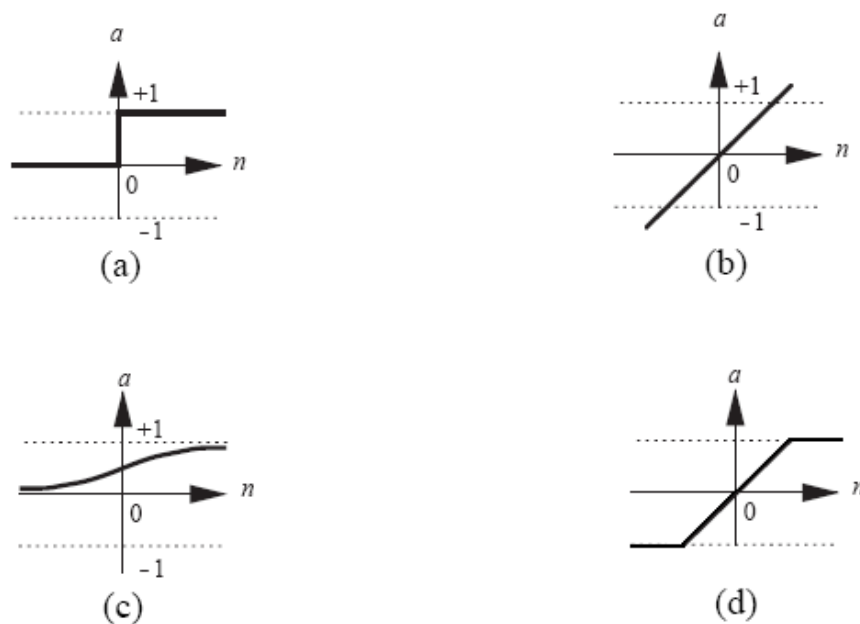


Figure IV.1.4 : Multiple-Input Neurone [25].

La sortie du neurone est donnée par  $a = f(wp + b)$ ,  $w$  et  $b$  sont des paramètres ajustable et la fonction de transfert est choisi par le concepteur [25].

Il existe plusieurs types de fonction d'activation selon l'application à laquelle est dédié le réseau de neurones et aussi les contraintes relatives aux algorithmes d'apprentissage [22].



**Figure IV.1.5 :** Fonctions d'activation [25].

(a) fonction Heaviside (b) fonction linéaire

(c) fonction linéaire à seuil (d) fonction sigmoïde

La fonction de transfert Log-Sigmoïde est souvent utilisée dans les réseaux à multicouches, entraînés par la méthode de rétropropagation du fait qu'elle est différentiable [25].

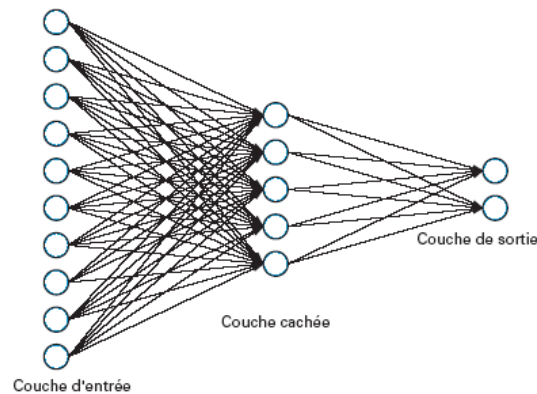
### IV.1.6. Les réseaux de neurones

Un neurone réalise simplement une fonction non linéaire, paramétrée, de ses variables d'entrées. L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est-à-dire de la composition des fonctions non linéaires réalisée par chacune des neurones [21].

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la « topologie » du modèle. Le plus souvent, cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones [23].

### IV.1.6.1. Réseau multicouche

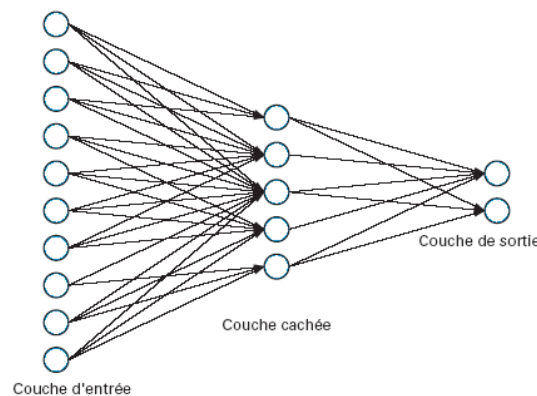
Les neurones sont arrangés par couche. On place ensuite bout à bout plusieurs couches et l'on connecte les neurones de deux couches adjacentes. Les entrées des neurones de la deuxième couche sont en fait les sorties des neurones de la couche amont. Les neurones de la première couche sont reliés au monde extérieur et reçoivent le vecteur d'entrée [23].



**Figure IV.1.6 :** Réseaux multicouche [23].

### IV.1.6.2. Réseau à connexions locales

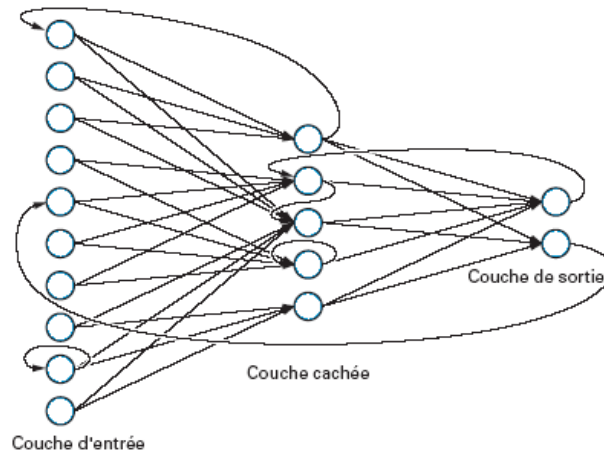
C'est aussi un réseau multicouche, mais tous les neurones d'une couche amont ne sont pas connectés à tous les neurones de la couche aval. Nous avons donc dans ce type de réseau de neurones un nombre de connexions moins important que dans le cas du réseau de neurones multicouche classique [23].



**Figure IV.1.7 :** Réseau à connexions locales [23].

### IV.1.6.3. Réseau à connexions récurrentes

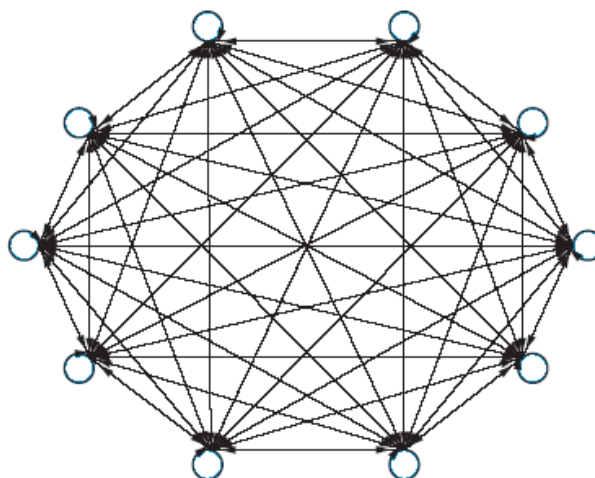
Un réseau de ce type signifie qu'une ou plusieurs sorties de neurones d'une couche aval sont connectées aux entrées des neurones de la couche amont ou de la même couche. Ces connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche [23].



**Figure IV.1.8 :** Réseau à connexions récurrentes [23].

### IV.1.6.4. Réseau à connexions complexes

Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau y compris lui-même, c'est la structure d'interconnexion la plus générale [23].



**Figure IV.1.9 :** Réseau à connexion complexe [23].

### IV.1.7. Apprentissage des réseaux de neurones

On appelle apprentissage des réseaux de neurones la procédure qui consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau, afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée [21].

#### IV.1.7.1. Apprentissage supervisé

L'apprentissage est dit supervisé lorsque les exemples sont constitués de couples de valeurs du type : (valeur d'entrée, valeur de sortie désirée). Tout le problème de l'apprentissage supervisé consiste, à déterminer le vecteur des poids  $w$  d'un réseau capable de mettre ces informations en correspondance [23]

#### IV.1.7.2. Apprentissage non supervisé

L'apprentissage est qualifié de non supervisé lorsque seules les valeurs d'entrées sont disponibles. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto-adaptation du réseau afin de produire des valeurs de sorties qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrées similaires (de même nature) [23].

#### IV.1.7.3. Surapprentissage

Les travaux expérimentaux menés sur les réseaux de neurones ont montré que, si on dépasse un certain nombre d'exemples d'entraînement, le réseau peut perdre sa capacité de généralisation, et donner ainsi des sorties non satisfaisantes pour de nouvelles entrées, c'est ce qu'on appelle le surapprentissage.

### IV.1.8. Algorithme d'apprentissage des réseaux de neurones

La phase d'apprentissage est une étape déterminante dans la conception du réseau de neurones. Pour cela, des algorithmes appropriés ont été élaborés et développés, chacun de ces algorithmes est spécifique à un type de réseau.

### IV.1.8.1. Algorithme de rétropropagation (Back-propagation)

Cet algorithme est appliqué au réseau de neurone de la manière suivante : le réseau est stimulé par un vecteur d'entrée. L'information se propage à travers les couches cachées. La sortie du réseau est recueillie et comparée à une réponse désirée. Ensuite les poids synaptiques sont modifiés par rétropropagation de l'erreur. Le terme rétropropagation provient du fait que l'erreur calculée en sortie est transmise en sens inverse vers l'entrée. Cet apprentissage est du type supervisé.

La quantité à minimisée, à chaque pas d'apprentissage  $k$ , est la variance de l'erreur de sortie du réseau [26].

### IV.1.8.2. Algorithme Fast Back-propagation

L'un des inconvénients de l'apprentissage des réseaux de neurones sur ordinateurs, est le temps énorme que met le réseau pour converger vers une performance acceptable. Ceci a poussé les chercheurs à trouver d'autres alternatives d'algorithmes rapides et efficaces. Parmi, figure l'algorithme Fast Back-propagation.

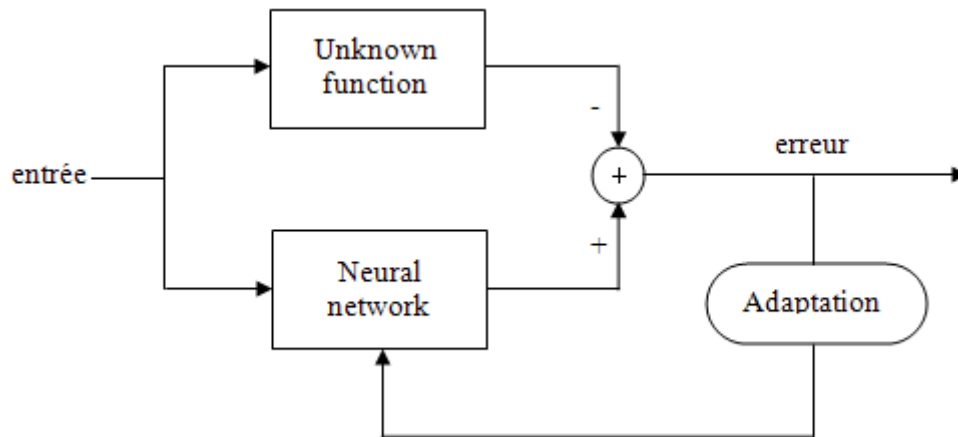
Le principe d'apprentissage dans cet algorithme est identique à celui de la Backpropagation, la différence réside dans le changement de la fonction à minimiser en vue d'accélérer la convergence après la première itération.

### IV.1.8.3. Algorithme Random Optimisation Methode (ROM)

C'est une méthode d'optimisation basée sur des techniques aléatoires utilisée pour retrouver l'extremum d'une fonction et adaptée à l'apprentissage des réseaux de neurones.

### IV.1.9. Application des réseaux de neurones dans le control

Une des applications des réseaux de neurones, est l'approximation des fonctions complexes, comme illustré dans la figure(IV.1.10), les paramètres du réseau sont modifiés afin que le réseau reproduise parfaitement la dynamique de la fonction à approximer, Dans notre cas cette fonction représente la relation qui existe entre les conditions météorologiques et la fréquence à laquelle doit fonctionner le moteur.



**Figure IV.1.10 :** Neural Network as function Approximator.

A la fin de l'entraînement du réseau nous aurons un bloc qui permettra de poursuivre le point de puissance maximale en fonctions des conditions météorologiques.

### IV.1.10. Elaboration d'un bon réseau [20]

La conception d'un réseau impose le choix de beaucoup de paramètres. Les sections suivantes détaillent les principales étapes de conception.

#### IV.1.10.1. Première étape : les variables d'entrées

La première étape consiste à déterminer les variables d'entrées du réseau. Celles-ci doivent avoir une influence (ou relation) avec la sortie désirée.

#### IV.1.10.2. Deuxième étape : choix de la structure

Maintenant que le choix des variables d'entrée est fait, il est possible de s'intéresser à l'architecture du réseau. Combien de couches cachées sont nécessaires? Combien de neurones faut-il inclure dans ces couches cachées? Quel sont les relations qui doivent relier les différentes couches?

#### IV.1.10.3. Troisième étape : l'entraînement

L'entraînement du réseau est l'étape cruciale de tout le processus. C'est à ce moment que se développe la précision et la robustesse de celui-ci. Pour faire un bon entraînement, certaines conditions doivent être respectées.



La première condition concerne les données d'entraînement. Il faut que celles-ci représentent bien la plage d'utilisation du procédé. La deuxième condition concerne la sur spécialisation du réseau. Il peut arriver, sous certaines conditions, que le réseau se spécialise sur les données d'entraînement, au dépend de la généralisation. Finalement, pour s'assurer que l'entraînement du réseau est bien fait, il faut réserver une partie des données expérimentales qui serviront uniquement à la validation du réseau.

### **IV.1.11. Conclusion**

Le grand avantage des réseaux de neurones réside dans leur capacité d'apprentissage automatique, ce qui permet de résoudre des problèmes sans nécessiter l'écriture de règles complexes, tout en étant tolérant aux erreurs.

Cependant, ce sont de véritables boîtes noires qui ne permettent pas d'interpréter les modèles construits. En cas d'erreur du système, il est quasiment impossible d'en déterminer la cause.

### IV.2. Logique floue

#### IV.2.1. Introduction

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs Américains, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous-ensemble flou (*fuzzy* en Anglais) soit proposé par L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation des phénomènes sous forme floue, en vue de palier les limitations dus aux incertitudes des modèles classiques à équations différentielles.

En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel [27].

Grâce au chercheur Japonais M. Sugeno, la logique floue était introduire au Japon dès 1985 [27], les sociétés Japonaises commencent à utiliser la logique floue dans des produits industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande [28].

#### IV.2.2. Terminologie de la logique floue

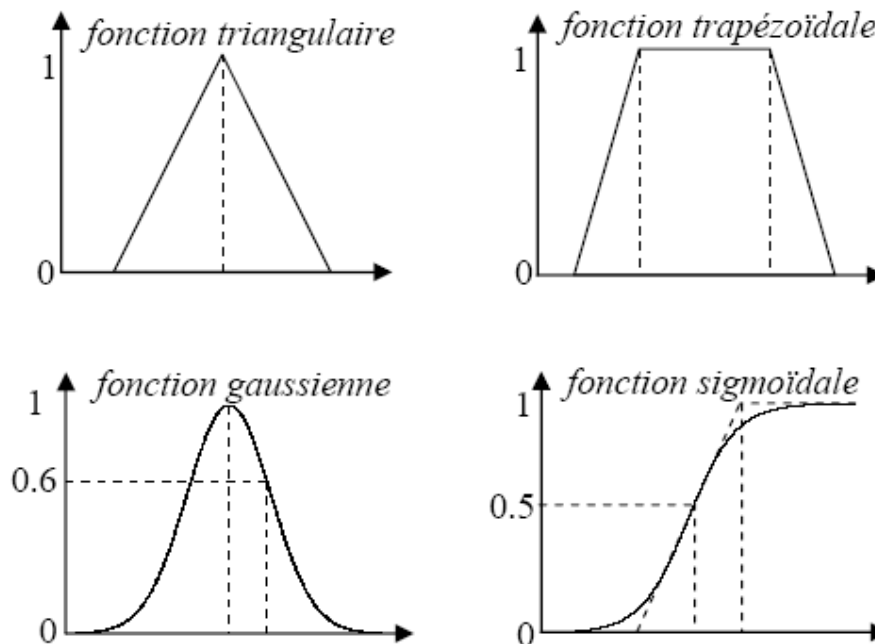
##### IV.2.2.1. Variable linguistique

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues (quelque, souvent, chaud, froid, rapide, lent...). Les expressions de ce genre forment les valeurs des variables linguistiques de la logique floue. Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenance [28].

##### IV.2.2.2. Fonctions d'appartenances

Chaque sous-ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. Si l'ensemble de référence est un ensemble fini, les valeurs d'appartenance sont des valeurs discrètes définies dans  $[0,1]$ . Si l'ensemble est infini, on peut représenter ces valeurs comme des fonctions d'appartenance continues. La fonction d'appartenance est notée par  $\mu_A(x)$ , l'argument  $x$  se rattache à la variable linguistique et l'indice  $A$  désigne l'ensemble concerné [29].

Elle peut être monotone, triangulaire, trapézoïdale, ou en forme de cloche comme le montre la figure (IV.2.1).



**Figure IV.2.1** : Fonction d'appartenance [30].

### IV.2.2.3. Univers de discours et classes d'appartenances

Un des premiers pas dans la conception d'une application floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'ensemble des prédicats peut être caractérisé par un ensemble de sous-ensembles flous. Chaque sous-ensemble flou dans l'univers de discours représente une valeur linguistique [29].

### IV.2.2.4. Opérateurs de la logique floue

Comme pour les ensembles classiques, on peut définir différentes opérations sur les ensembles flous. Soient A et B deux ensembles flous dans l'univers  $U$ . pour  $x \in U$  on a :

- **Complémentation** :  $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
- **Intersection** :  $\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(x))$
- **Union** :  $\mu_{A \cup B}(x) = \text{Max}(\mu_A(x), \mu_B(x))$

### IV.2.3. Structure de base d'un contrôleur flou

La structure conventionnelle d'un contrôleur flou est représentée par la figure (IV.2.2). Il est composé de quatre blocs.

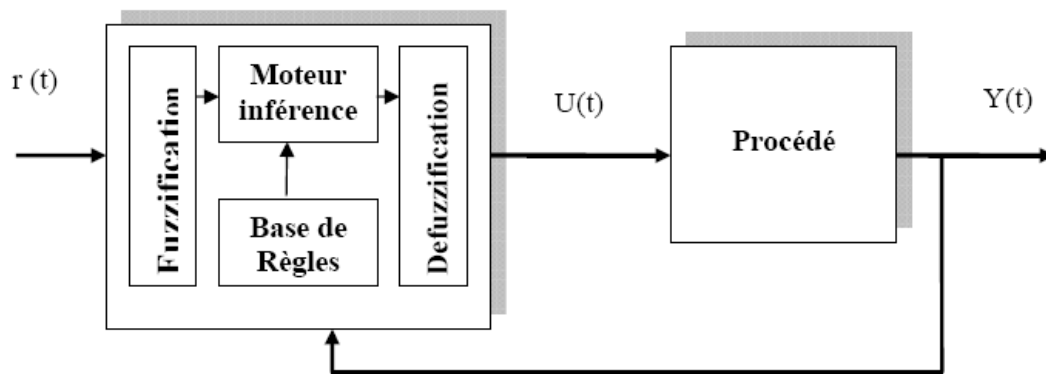


Figure IV.2.2 : structure d'un contrôleur flou [31].

- Base de règles ou base de connaissances (règles et paramètres des fonctions d'appartenances).
- Bloc de décision ou Moteur d'inférence (inférence des opérations sur les règles).
- Bloc de fuzzification (transformation des entrées précises en degrés d'appartenance)
- Bloc de defuzzification (transforme les résultats flous en sorties précise).

#### IV.2.3.1. Fuzzification

La fuzzification consiste à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, au temps t, sa fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définies, donc à transformer l'entrée réelle en un sous-ensemble flou [27].

### IV.2.3.2. Les règles floues

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue est d'exprimer la connaissance humaine sous forme de règles linguistiques de forme Si...alors...Chaque règle à deux parties :

- Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si...
- Partie conséquence (conclusion), exprimée par Alors...

La partie antécédente est la description de l'état du système. La partie conséquence exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter [29].

#### IV.2.3.1.1. Les règles de Mamdani

La forme typique d'une règle de Mamdani s'écrit :

**Si** ( $x_1$  est  $E_1$ ) et ( $x_2$  est  $E_2$ ) et... et ( $x_n$  est  $E_n$ ) **Alors** ( $u_1$  est  $C$ ) et ( $u_2$  est  $C_2$ ) et...et ( $u_m$  est  $C_m$ )

Ou :  $x_1 \dots x_n$  : Les variables d'entrées.

$u_1 \dots u_2$  : Les variables de sorties.

$E_1 \dots E_2$  Et  $C_1 \dots C_2$  : Ensembles flous.

#### IV.2.3.1.2. Les règles de Takagi Sugeno

Les règles de Takagi Sugeno sont similaires à celles de Mamdani, elles diffèrent dans la deuxième partie (conséquence). La forme typique de ces règles s'écrit :

**Si** ( $x_1$  est  $E_1$ ) et ( $x_2$  est  $E_2$ ) et... et ( $x_n$  est  $E_n$ ) **Alors**  $u_1 = f_1(x_1 \dots x_n)$ ,  $u_2 = f_2(x_1 \dots x_n)$   
... $u_m = f_m(x_1 \dots x_n)$ .

Les fonctions  $f_1, f_2, \dots, f_m$  sont des fonctions réelles, elles peuvent être linéaires ou non linéaires.

**IV.2.3.3. Inférences**

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sorties par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connexions (et) et (ou) [29].

Cette partie décisionnelle où le contrôleur décide l'action similaire à celle d'un opérateur humain, elle présente et englobe toutes les connaissances de l'expert humain sur la dynamique, et les caractéristiques du système.

La description des inférences peut se faire par des expressions linguistiques, symboliques, par tableau ou matrice d'inférence [28].

Soit un régulateur flou dont l'entrée et la dérivée de l'erreur, avec une sortie de commande  $u$ . On peut avoir une description d'une base de règles possible comme suit :

**Tableau IV.1 : base de règles**

N: négatif grand.  
 Z : proche de zéro.  
 P : Positif petit.  
 GP : Grand positif  
 GN : Grand négatif

$\Delta u$		e		
		N	Z	P
de	N	GP	P	P
	Z	Z	Z	Z
	P	N	N	GN

La notion de méthode d'inférence détermine la réalisation des différents operateurs dans une inférence, pour le réglage par logique floue, on utilise en générale une des méthodes suivante :

- Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani).
- Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen).
- Méthode de Sugeno.

### IV.2.3.4. Defuzzification

La defuzzification permet de passer d'un degré d'appartenance d'une commande à la détermination de la valeur à donner à cette commande. Il existe plusieurs méthodes de defuzzification, dont la plus utilisée est celle du centre de gravité [27].

#### IV.2.3.4.1. Méthode du maximum

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence. Cependant, cette méthode présente un certain inconvénient lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

#### IV.2.3.4.2. Méthode de la moyenne des maxima

Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

#### IV.2.3.4.3. Méthode du centroïde

Cette méthode est la plus utilisée dans les contrôleurs flous, elle génère le centre de gravité de la fonction d'appartenance issue de l'inférence.

$$y = \frac{\int y\mu_y(y)dy}{\int \mu_y(y)dy}$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface.

#### IV.2.3.4.4. Méthode de la somme pondérée

Il s'agit d'un compromis entre les deux méthodes précédentes. On calcule individuellement les sorties relatives à chaque règle selon le principe de la moyenne des maxima, puis on réalise leur moyenne pondérée [30].

### IV.2.4. Avantages et désavantages du réglage par logique floue [29]

Les avantages principaux des régulateurs flous sont les suivants :

- Il n'est pas nécessaire de faire un modèle mathématique du système à régler.
- On peut implémenter des connaissances de l'opérateur du processus.
- On peut maîtriser les systèmes non linéaires et difficile à modéliser.
- Grâce à des processus dédiés, On peut régler des processus rapides.

Les désavantages sont les suivants :

- Manque de directives précises pour la conception d'un régulateur.
- Approche artisanale et non systématique (il est souvent très difficile d'implémenter les connaissances de l'opérateur).
- Impossibilité de démontrer la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en absence d'un modèle valable).
- Précision du réglage en général peu élevée.
- Cohérence des inférences non garantie à priori (possible apparition de règles d'inférence contradictoire).

### IV.2.5. Conclusion

Contrairement aux contrôleurs classiques, les contrôleurs flous ne nécessitent nullement de modèle analytique de la tâche à résoudre. En effet, ils ne sont pas basés sur des équations physiques du système à contrôler mais sur le savoir-faire des opérateurs et des experts du domaine concerné.

Actuellement, il n'existe aucune méthodologie complète pour le développement de contrôleur à base de logique floue. La réussite est alors fortement liée, d'une part, à la bonne compréhension du comportement du système à commander, et, d'autre part, à l'expérience du concepteur dans la mise en œuvre de la logique floue.



CHAPITRE V

# Simulation et Evaluation

Dans le présent chapitre nous allons montrer les différentes simulations effectuées sur Le système de pompage photovoltaïque constitué principalement d'un générateur photovoltaïque, onduleur, groupe moteur-pompe. Ce dernier est piloté par différentes techniques MPPT permettant une meilleure adaptation source/charge, pour un transfert maximum de puissance. De ce fait, la simulation permet d'évaluer la performance du contrôleur MPPT avant d'établir un prototype réel.

Les résultats figurant dans ce chapitre nous permettent de valider les concepts théoriques de chaque commande et d'évaluer les techniques MPPT d'analyser leur comportement sous les mêmes conditions de fonctionnement. Cette étude nous permet de valider la technique la plus appropriée à une application qui répondra aux exigences de la rapidité de convergence vers un nouveau PPM causé par un changement éventuel dans les conditions climatiques.

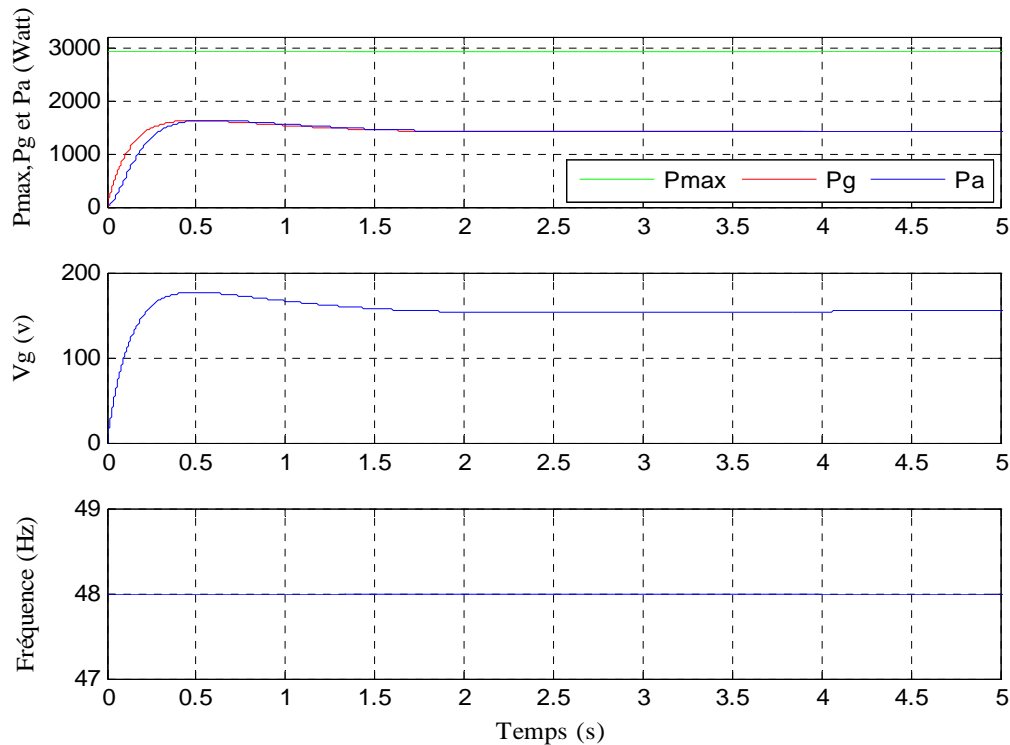
Pour effectuer les simulations nous avons utilisé le logiciel MATLAB qui est un standard dans le domaine de l'ingénierie, La simulation et le calcul numérique.

### **V1. Simulation du système de pompage**

L'ensemble générateur photovoltaïque, onduleur, moteur-pompe a été modélisé (Chapitre II), et simulé afin d'avoir une image du comportement du système et de vérifier ainsi son fonctionnement.

#### **V.1.2. Comportement du système sans contrôleur MPPT**

Pour simuler le système sans contrôleur MPPT nous avons fixé la fréquence de fonctionnement à une valeur qui diffère de la fréquence optimale. Cette simulation nous permet de voir l'intérêt d'utiliser des contrôleurs MPPT. La figure (V.1) montre le fonctionnement du système sans contrôleur MPPT.



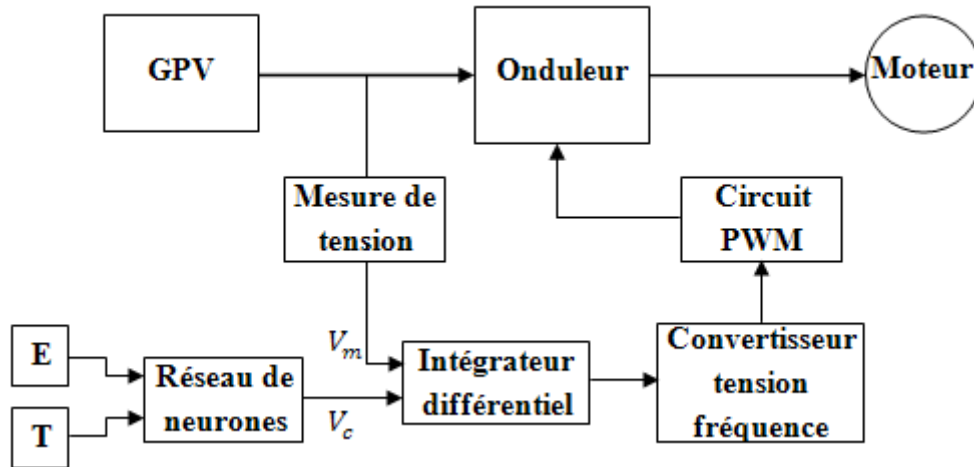
**Figure V.1 :** comportement du système sans contrôleur MPPT

Le résultat de simulation obtenu sur la figure (V.1) montre que la puissance délivrée par le générateur augmente jusqu'à 1620 watt puis elle diminue pour atteindre une puissance de 1400 watt, les conditions météorologiques sont telles que l'éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et la température  $25^\circ\text{C}$ , sous ces conditions, le générateur devrait délivrer 2900 watt. Comme le système ne possède pas de mécanisme d'adaptation de la fréquence, le système ne fonctionnera pas à sa puissance maximale. D'où la nécessité d'introduire les MPPT.

## V.2. Application des réseaux de neurones

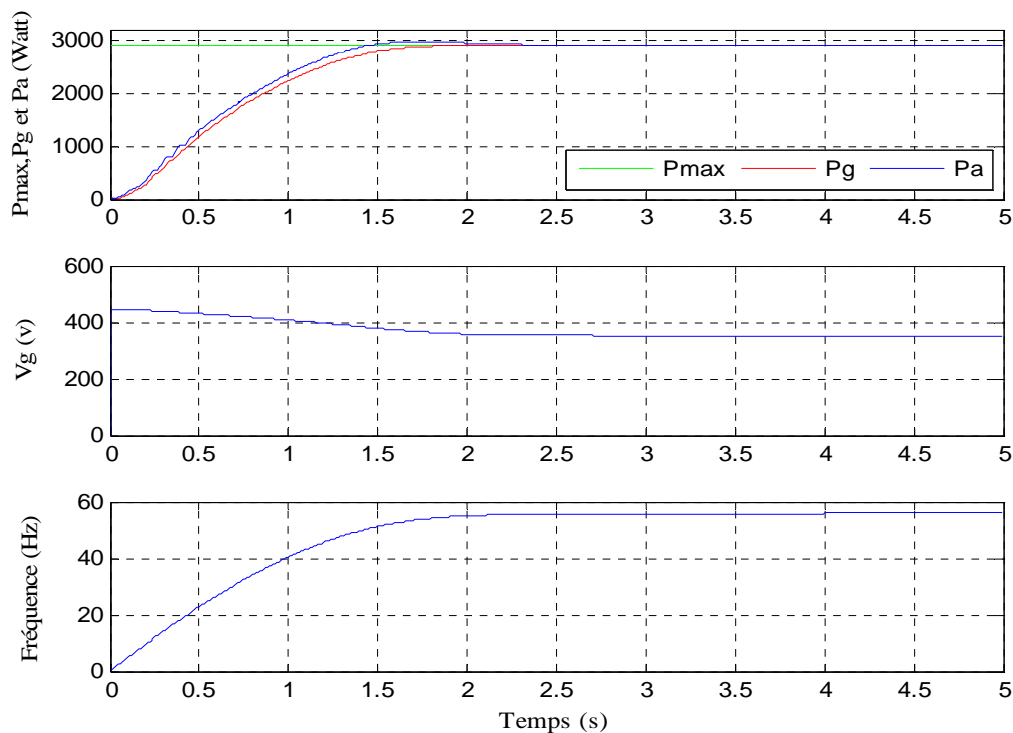
### V.2.1. Application des réseaux de neurones pour l'adaptation de la tension de consigne

Ce contrôleur se base sur l'asservissement de la tension du générateur à une tension de référence adaptée par un réseau de neurones. Le schéma synoptique de la commande est montré en figure (V.2), la tension de consigne  $V_c$  est comparée avec la tension mesurée  $V_m$  du générateur solaire par un comparateur-intégrateur qui donne en sortie un signal proportionnel à l'intégrale de la différence. Ce signal attaque un convertisseur tension fréquence qui agit sur la fréquence du circuit générant les signaux PWM et par conséquent sur la fréquence de la tension de sortie appliquée au moteur.

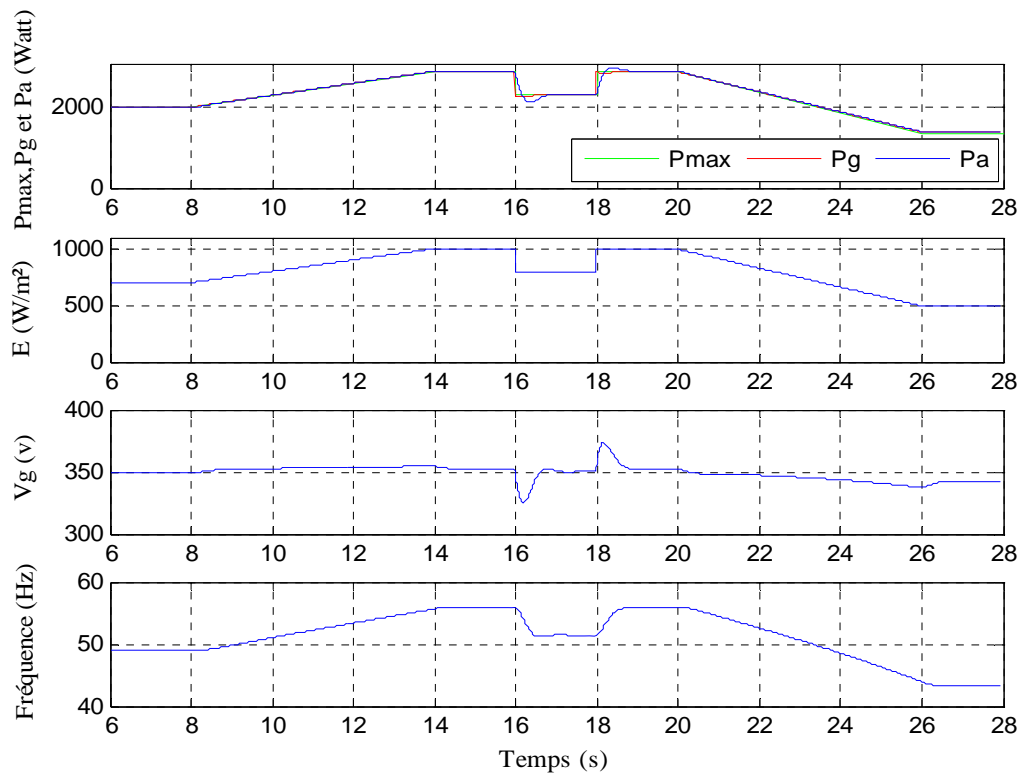


**Figure V.2 :** Schéma synoptique de l'asservissement en tension adaptée par un réseau de neurone.

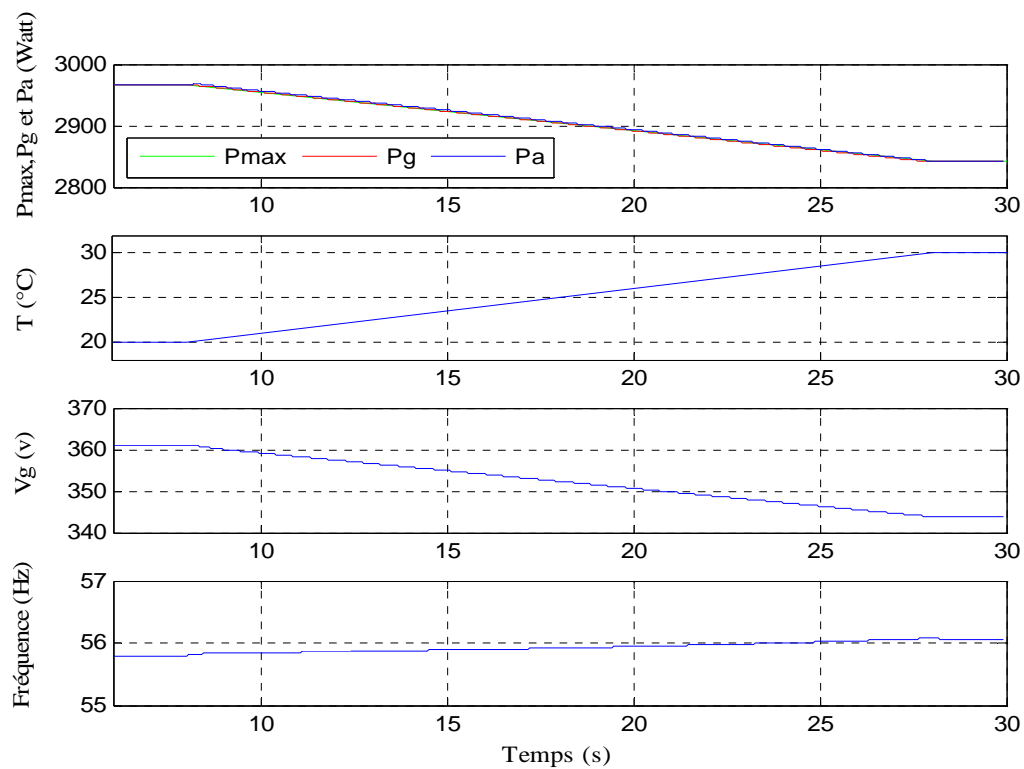
Le réseau utilisé pour adapter la tension est composé de deux couches, une couche d'entrée de 15 neurones et une couche de sortie. Les figures suivantes donnent le résultat de simulation.



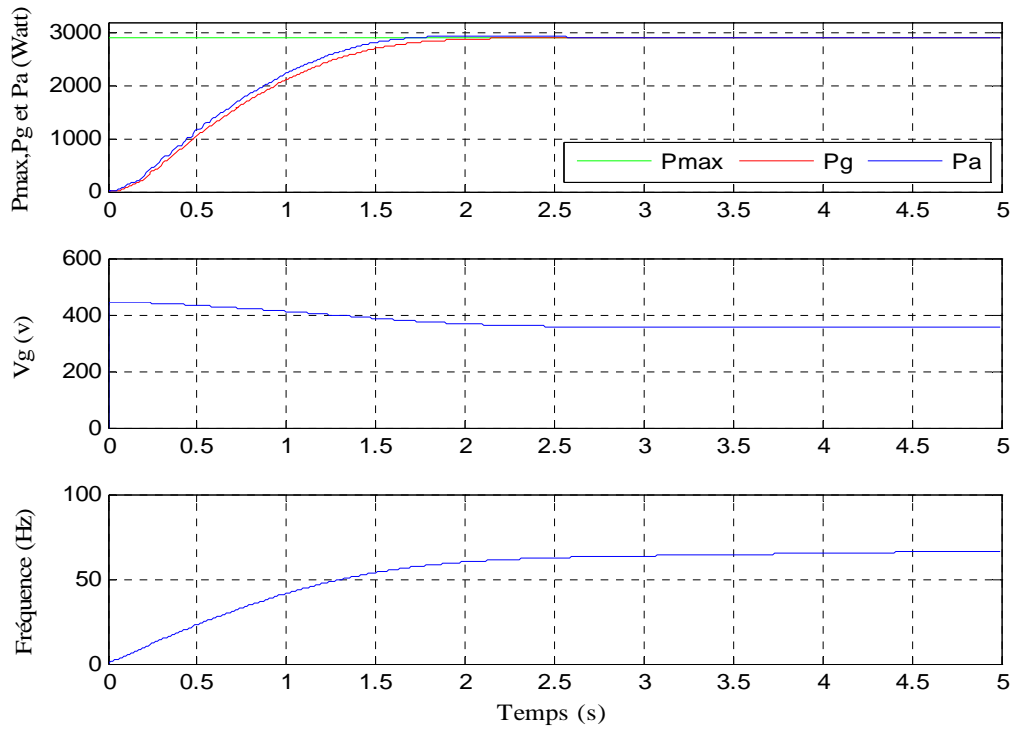
**Figure V.3 :** Réponse du système pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m².



**Figure V.4 :** Réponse du système pour des variations rapides et brisques de l'ensoleillement avec une température de 25 °C.



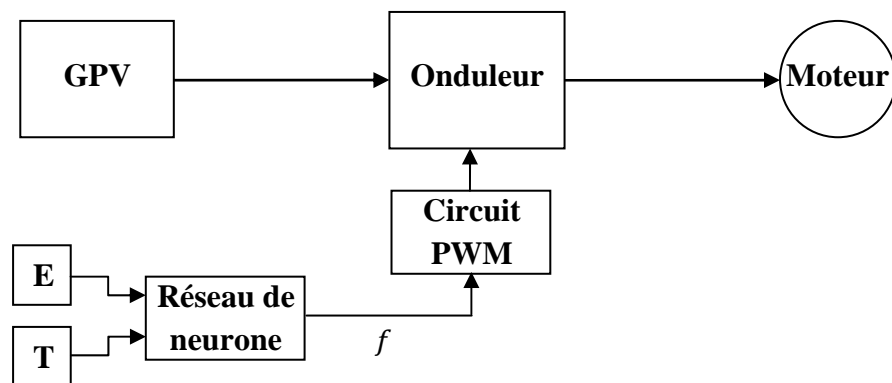
**Figure V.5 :** Réponse du système pour une augmentation de la température de 20°C à 30°C en 20 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup>.



**Figure V.6 :** Réponse du système pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m<sup>2</sup> avec une variation de 25% des paramètres du moteur.

### V.2.2. MPPT neuronal

Le schéma synoptique du système de fonctionnement global en présence du contrôleur neuronal est le suivant :

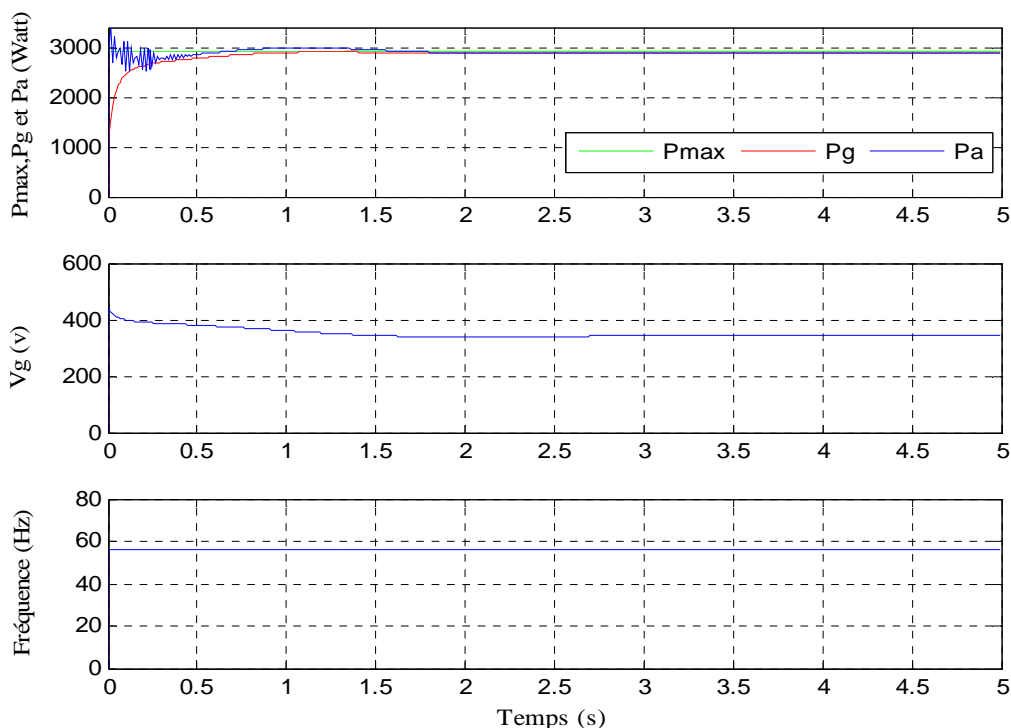


**Figure V.7 :** Schéma synoptique du système en présence du contrôleur neuronal

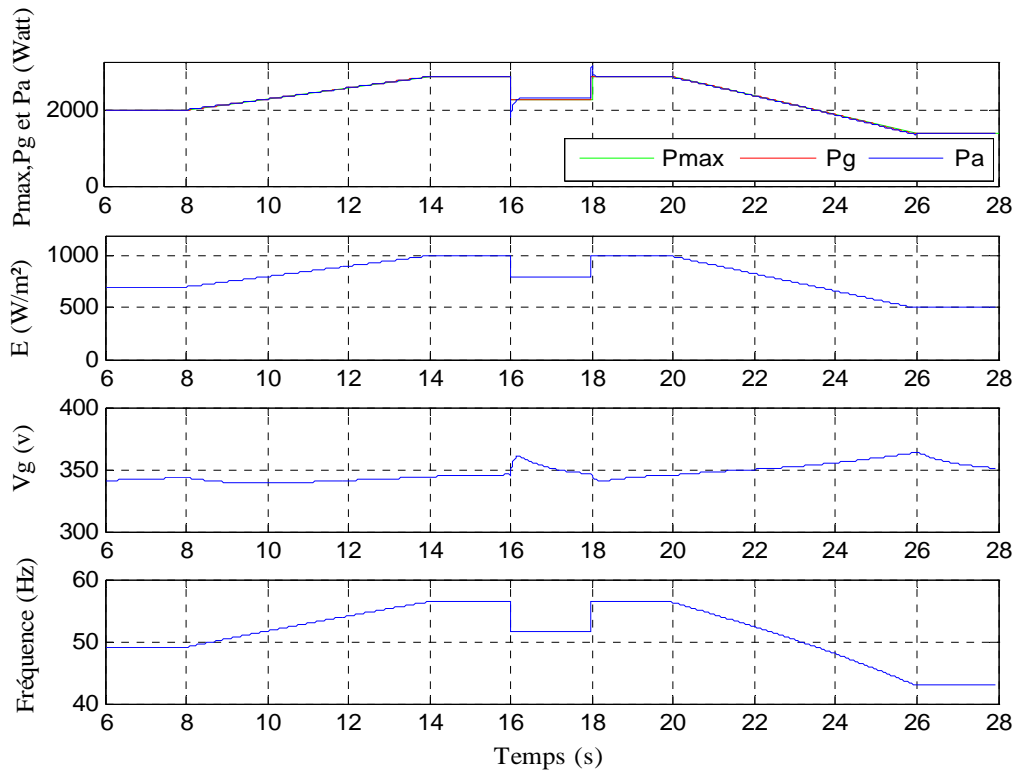
## Chapitre V : Simulations et évaluations

Pour une valeur bien déterminée de l'éclairement ( $E$ ) et de la température ( $T$ ), le générateur photovoltaïque possède un point de puissance maximale unique, pour se situer en ce point il apparaît très évident d'appliquer une fréquence ( $f$ ) bien déterminée à l'entrée commande de l'onduleur ( voir annexe D).

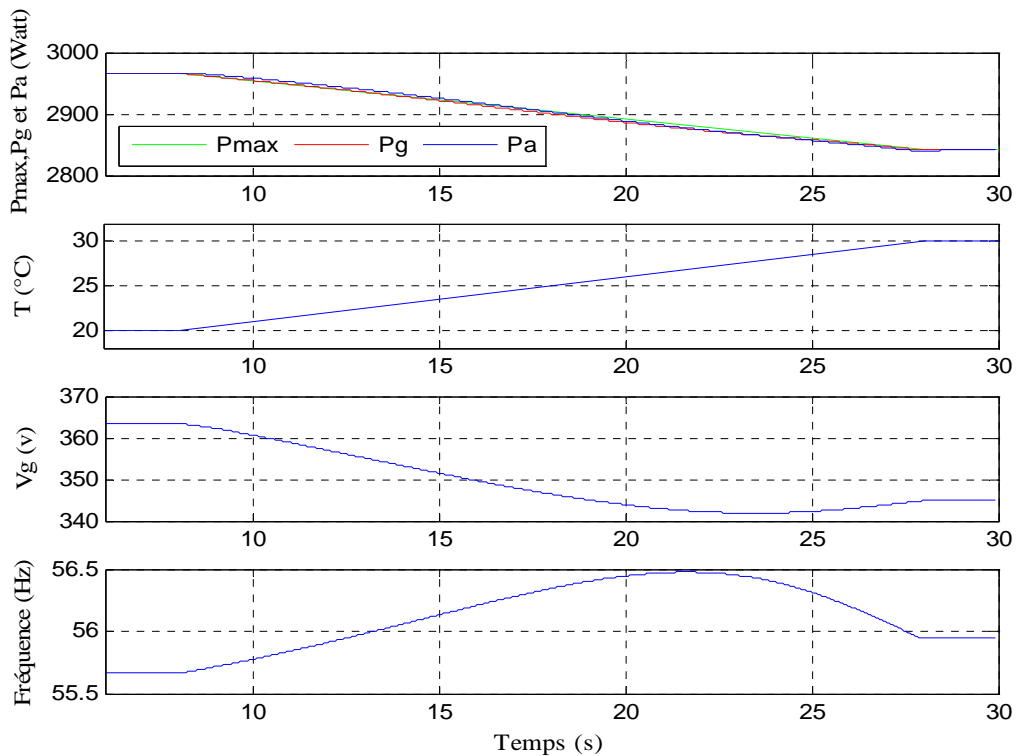
Pour faire entraîner le réseau de neurones afin qu'il puisse fonctionner au mieux dans l'architecture de commande de la figure (7), une base de données a été dressée, elle est composée de deux entrées, l'éclairement ( $E$ ) et la température ( $T$ ), et d'une sortie de commande, la fréquence ( $f$ ). Les figures suivantes donnent le résultat de simulation.



**Figure V.8** : Réponse du système pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m<sup>2</sup>.

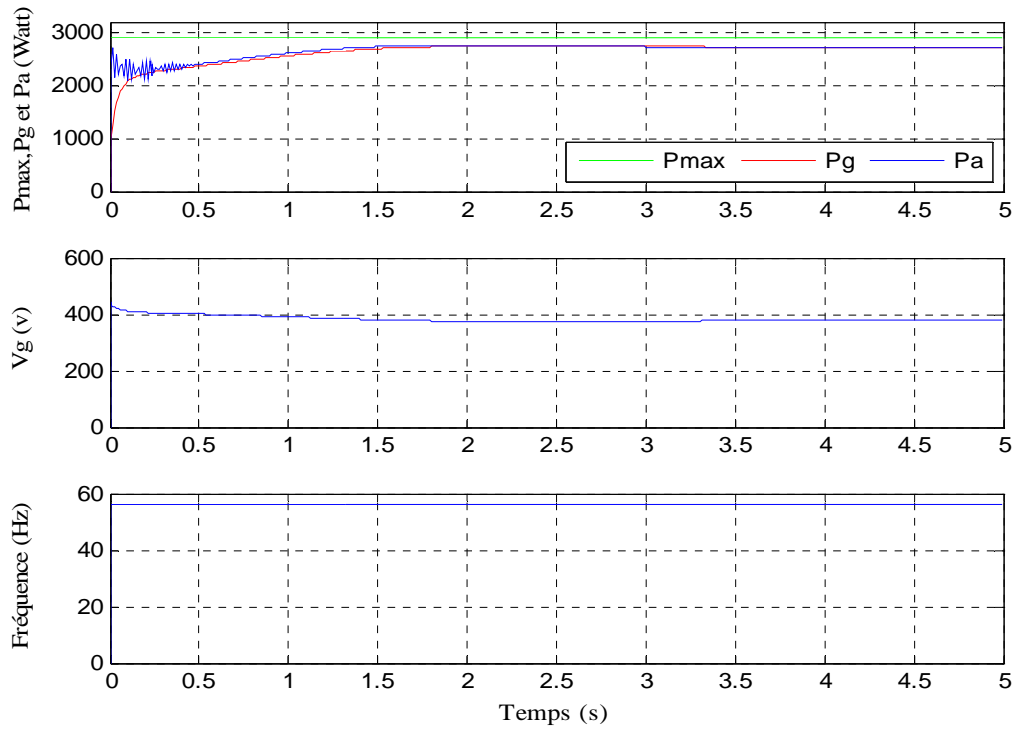


**Figure V.9 :** Réponse du système pour des variations rapides et brisques de l'ensoleillement avec une température de 25 °C.



**Figure V.10 :** Réponse du système pour une augmentation de la température de 20°C à 30°C en 20 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup>.





**Figure V.11 :** Réponse du système pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m<sup>2</sup> avec une variation de 25% des paramètres du moteur.

### V.3. Application de la logique floue

#### V.3.1. MPPT flou

Le MPPT flou utilise les principes de la logique floue dans son fonctionnement, il est constitué de trois blocs, La Fuzzification, l'Inférence et la Defuzzification.

La figure (V.12) montre le schéma synoptique du système avec MPPT flou.

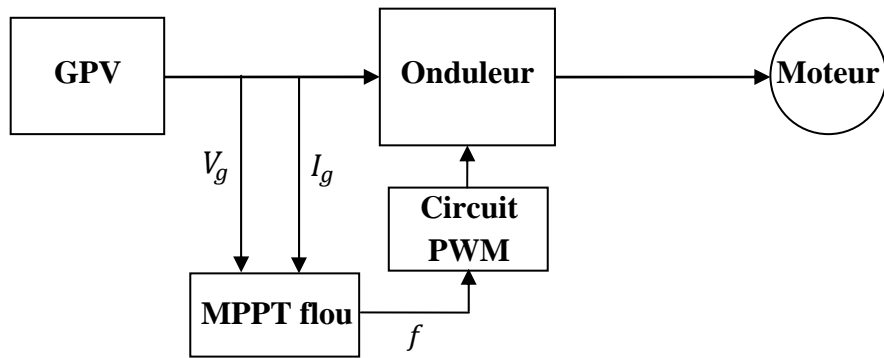


Figure V.12 : schéma synoptique du système avec MPPT flou.

#### V.3.1.1. La fuzzification

Cet MPPT flou à deux entrées l'erreur et la variation de l'erreur définies respectivement par :  $E$  et  $CE$ .

$$E(k) = \frac{P_{ph}(k) - P_{ph}(k-1)}{V_{ph}(k) - V_{ph}(k-1)}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1)$$

$P_{ph}(k)$  et  $V_{ph}(k)$  sont respectivement la puissance et la tension du générateur photovoltaïque. Ces grandeurs sont calculées à partir de la mesure du courant et de la tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

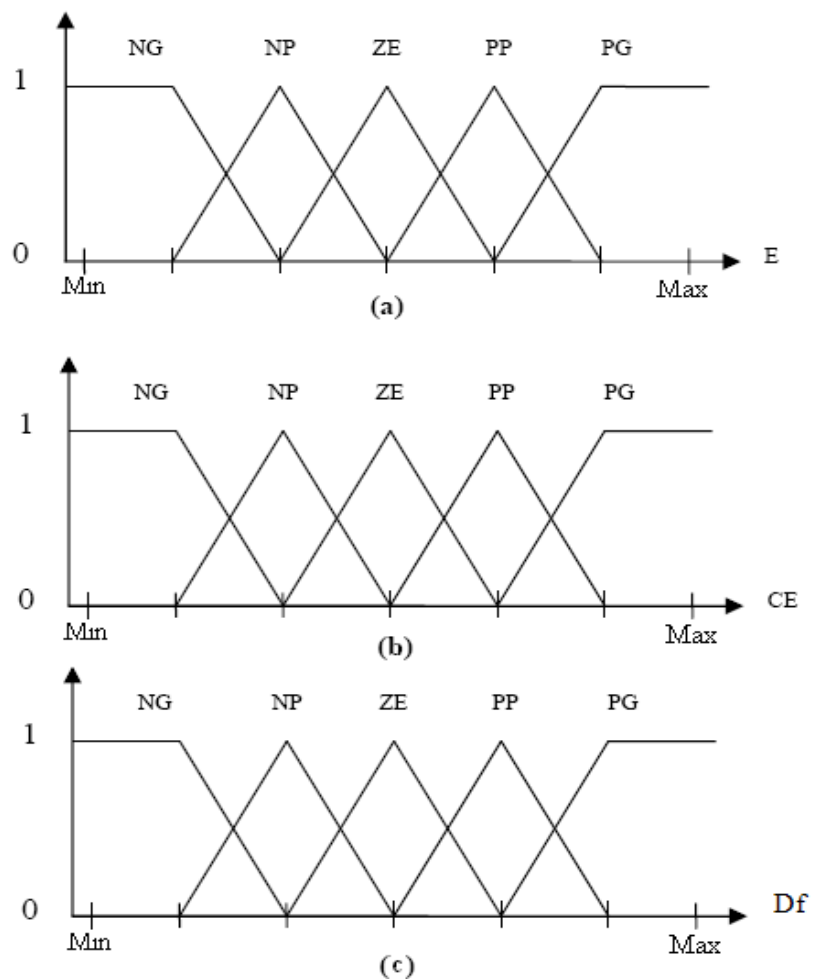
### V.3.1.2. Variables linguistiques

En utilisant les bases des sous ensembles flou, on peut exprimer les variables d'entrées et de sortie en terme de variables linguistiques suivantes :

PG: (positif grand) PP: (positif petit) ZE: (Zéro) NP: (négatif petit) NG: (négatif grand)

### V.3.1.3. Fonctions d'appartenances

La figure (V.13) montre les fonctions d'appartenances des 5 sous ensembles flous des variables d'entrées ainsi que la variable de sortie.



**Figure V.13 :** fonctions d'appartenances

(a) L'entrée E    (b) L'entrée CE    (c) La sortie  $f$ .

### V.3.1.4. L'inférence

La table (V.I) représente la matrice d'inférence du contrôleur où les entrées sont : l'erreur E et la variation de l'erreur CE. La sortie est La fréquence.

Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E doit être toujours Zéro.

<b>E \ CE</b>	<b>NG</b>	<b>NP</b>	<b>ZE</b>	<b>PP</b>	<b>PG</b>
<b>NG</b>	ZE	ZE	PG	PG	PG
<b>NP</b>	ZE	ZE	PP	PP	PP
<b>ZE</b>	PP	ZE	ZE	ZE	NP
<b>PP</b>	NP	NP	NP	ZE	ZE
<b>PG</b>	NG	NG	NG	ZE	ZE

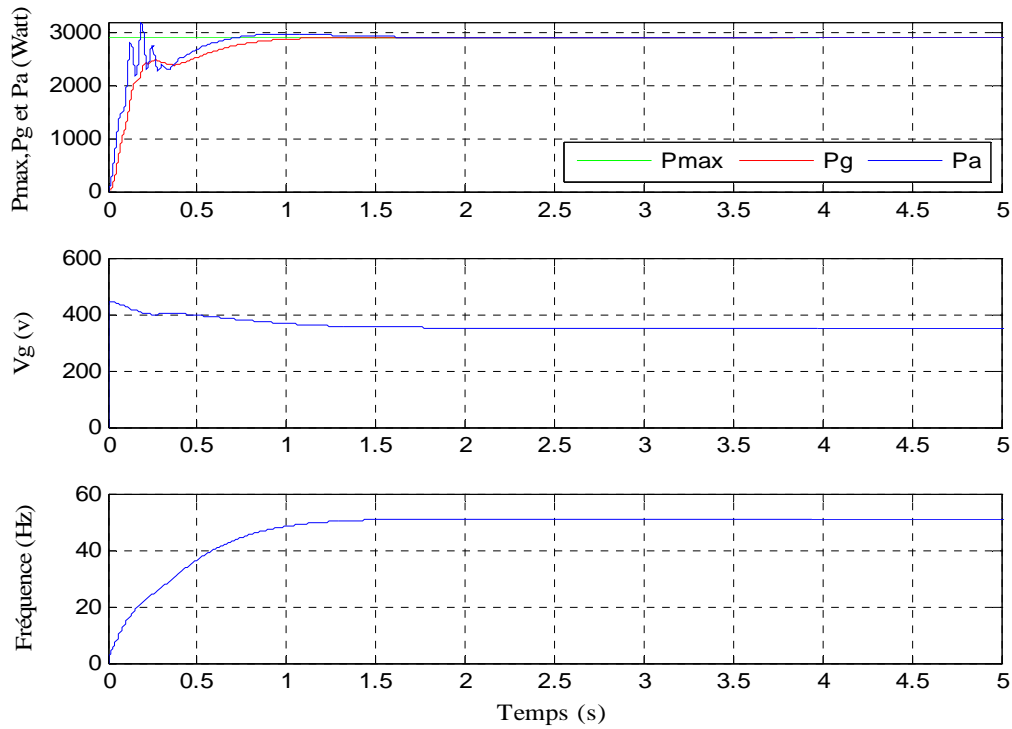
**Table V.1** : matrice d'inférence

La méthode de Mamdani a été utilisée comme méthode d'inférence floue. Elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU.

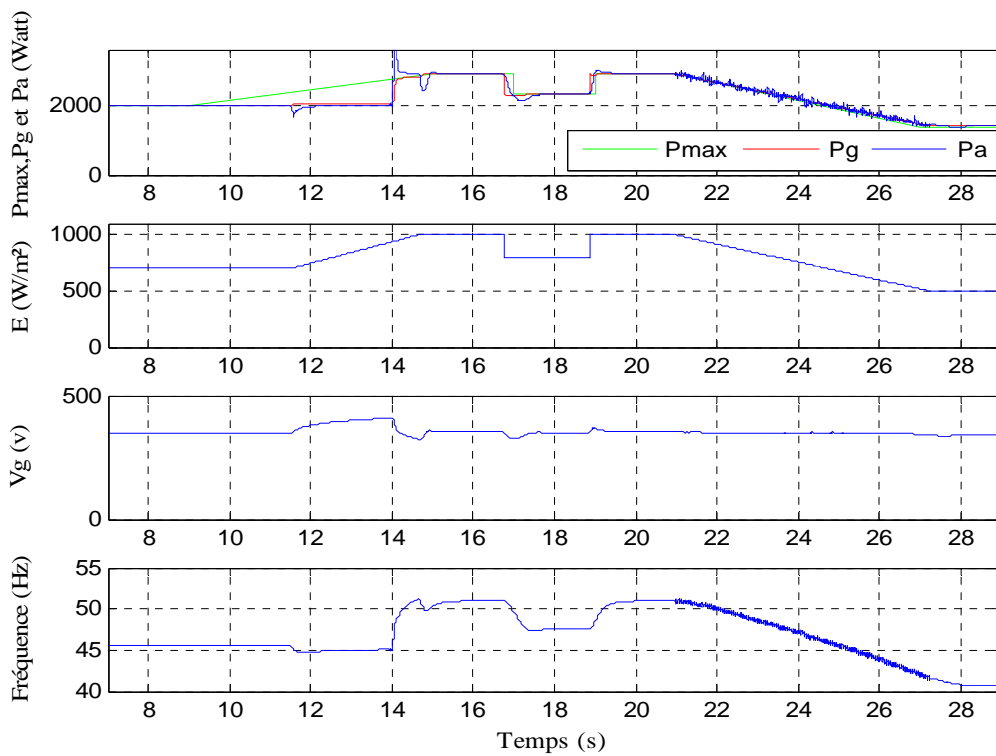
### V.3.1.5. Defuzzification

La méthode de defuzzification, utilisée dans ce contrôleur est la méthode du centre de gravité.

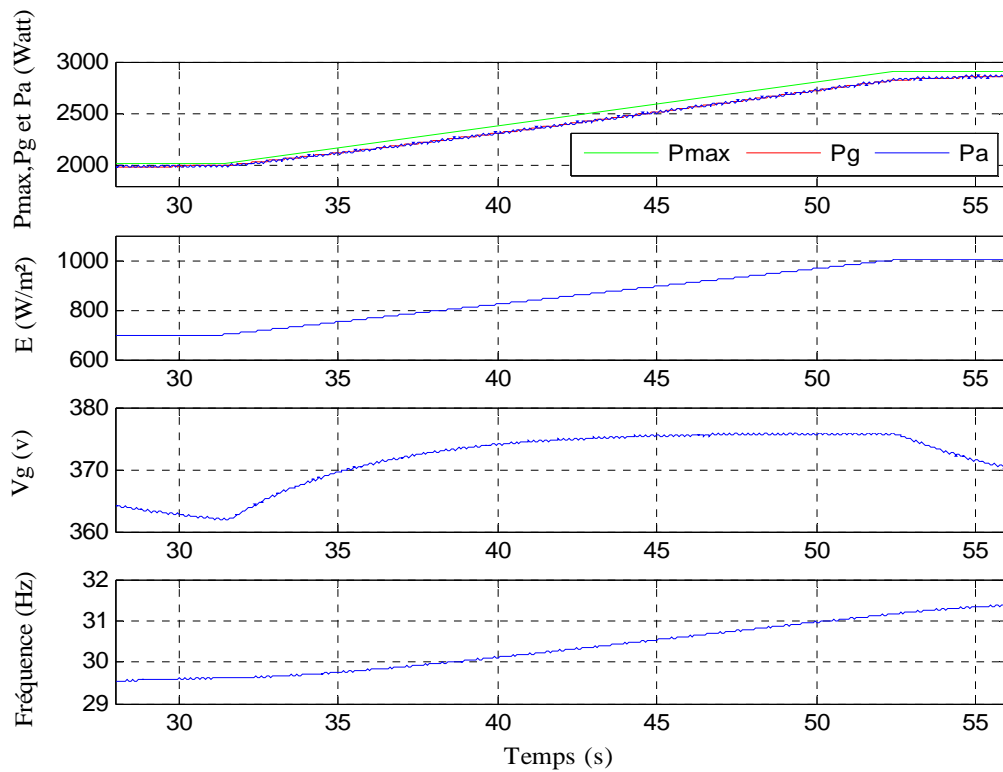
Les figures suivantes donnent le résultat de simulation du contrôleur MPPT flou.



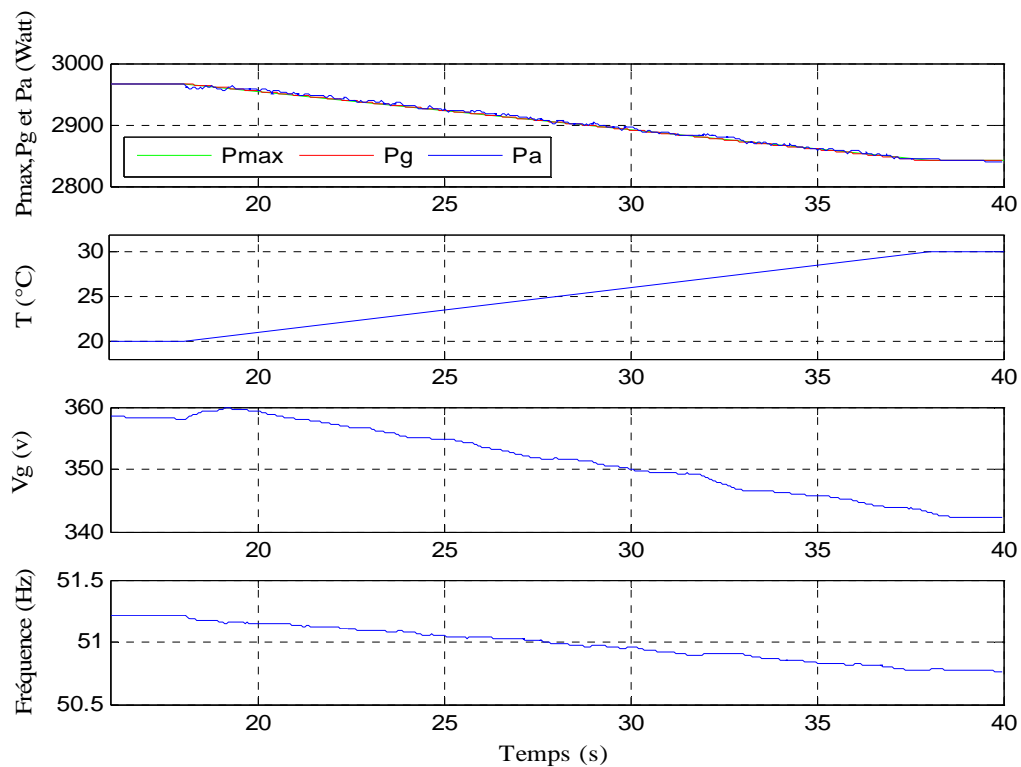
**Figure V.154 :** Réponse du système pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m<sup>2</sup>.



**Figure V.15 :** Réponse du système pour des variations rapides et brisques de l'ensoleillement avec une température de 25 °C.



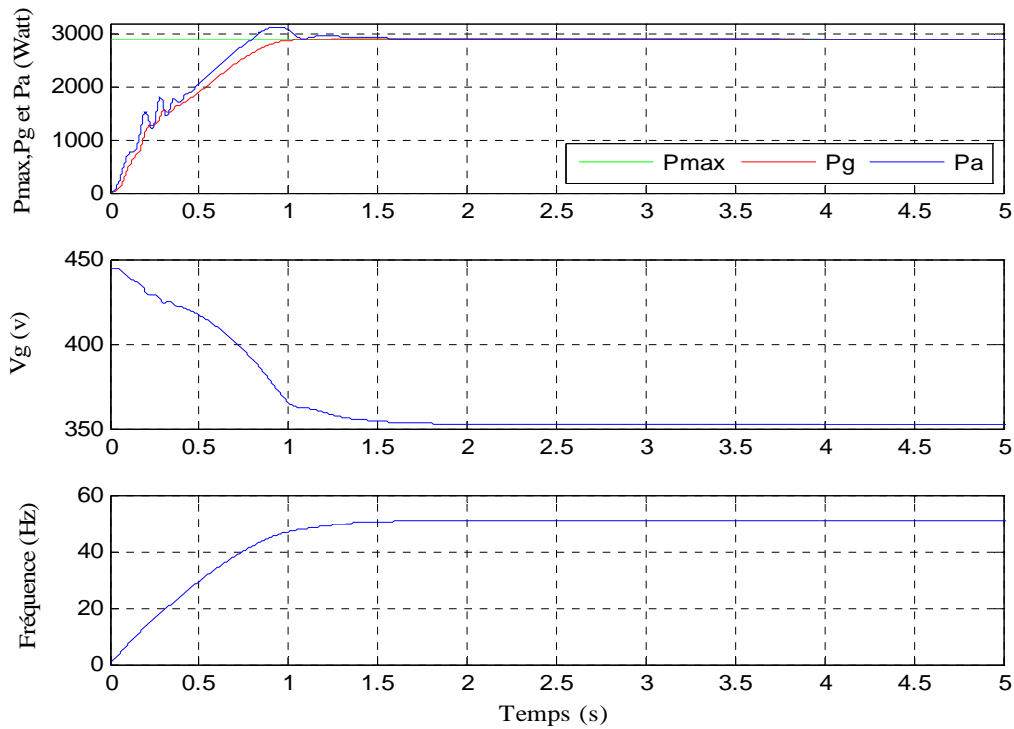
**Figure V.17 :** Réponse du système pour une augmentation lente de l'éclairement de 700 à 1000 w/m<sup>2</sup> en 20 s.



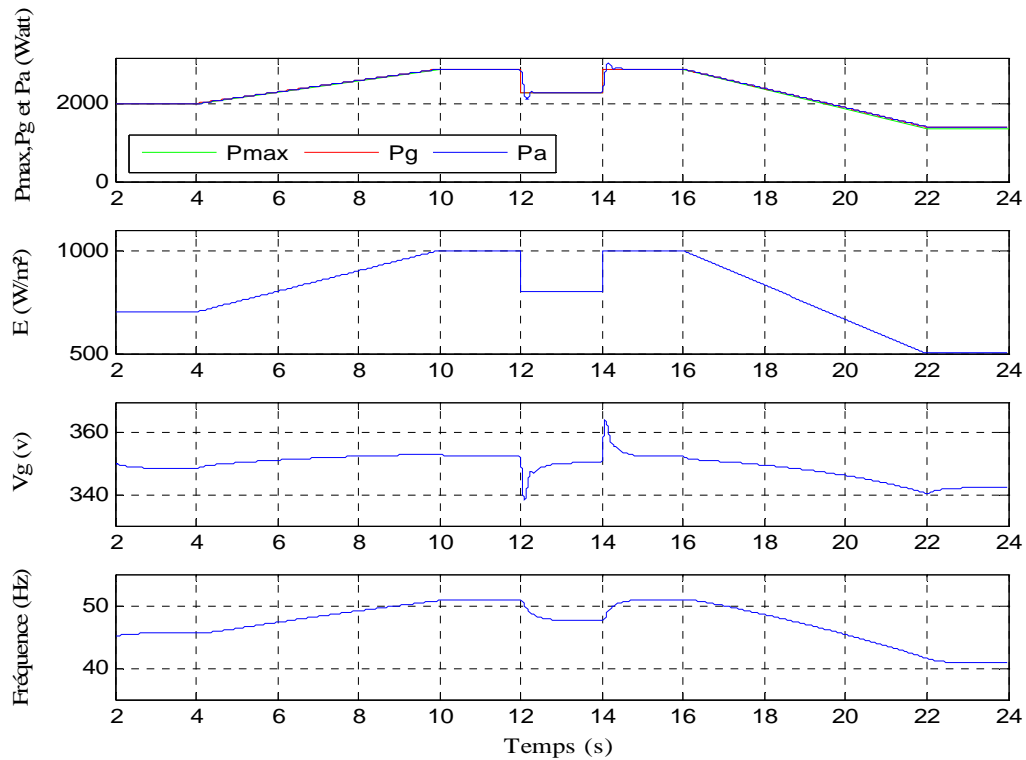
**Figure V.16 :** Réponse du système pour une augmentation de la température de 20°C à 30°C en 20 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup>.

### V.3.2. Substitution du comparateur par un contrôleur flou

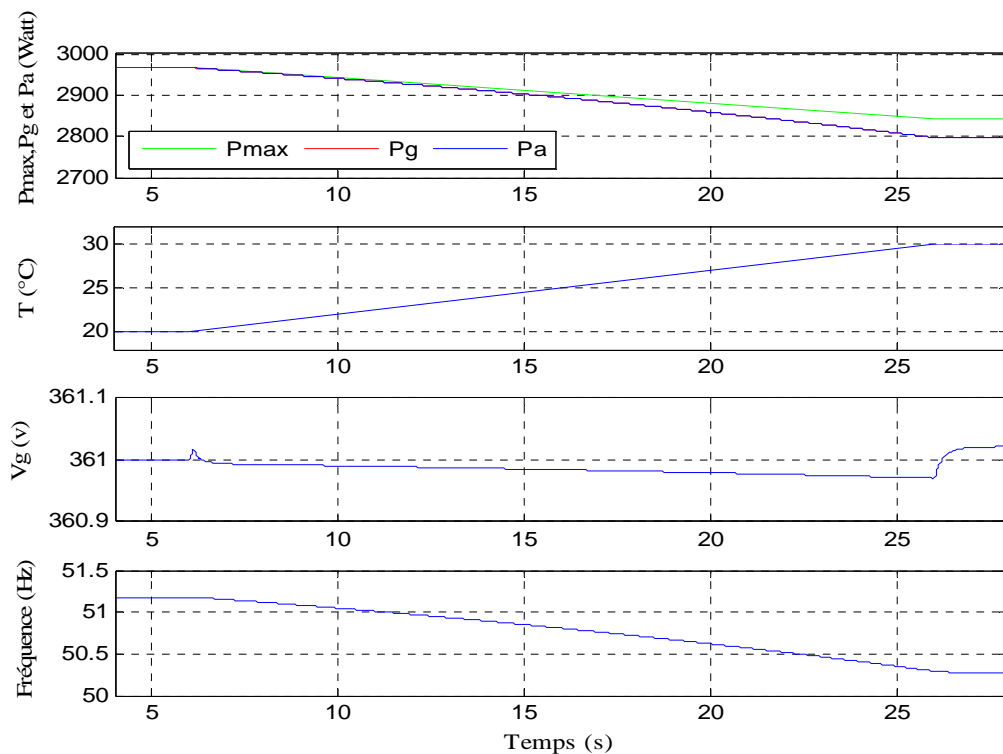
Dans ce cas en garde le réseau de neurones qui donne la tension de consigne pour chaque éclairage et température, et on insère un contrôleur flou qui permet d'annuler l'erreur entre la tension générateur et la tension cosigne. Les figures suivantes donnent le résultat de simulation.



**Figure V.167 :** Réponse du système pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m<sup>2</sup>.

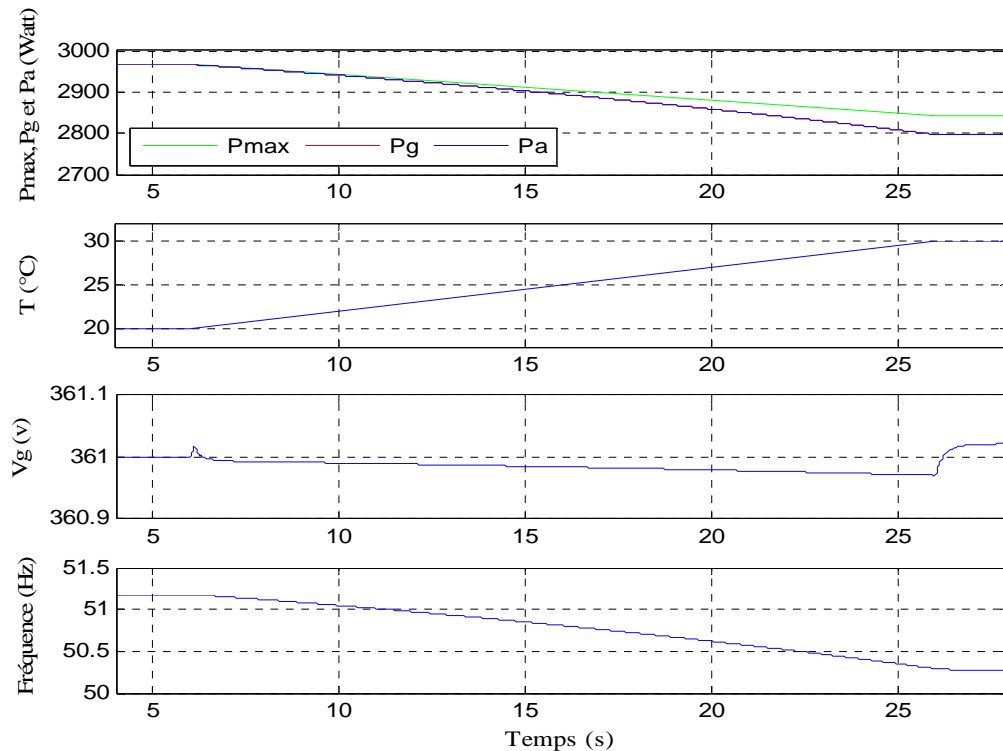


**Figure V.18 :** Réponse du système pour des variations rapides et brisques de l’ensoleillement avec une température de 25 °C.



**Figure V.19 :** Réponse du système pour une augmentation de la température de 20°C à 30°C en 20 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m².





**Figure V.20 :** Réponse du système pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m<sup>2</sup> avec une variation de 25% des paramètres du moteur.

### V.4. Interprétation des résultats obtenus

Dans la première solution nous avons introduit un bloc intelligent qui permet une adaptation permanente de la tension de référence en fonction des conditions climatiques, cette adaptation force le système à fonctionner à une tension optimale, qui engendre un fonctionnement optimal du système, le problème de cette solution réside dans le fait que la constante d'intégration dépend de la charge utilisée. Et le pas de recherche du PPM est fixe.

La deuxième solution consiste à introduire un contrôleur intelligent du type neuronal, ce contrôleur estime à chaque variation climatique la fréquence à laquelle doit fonctionner le système. Les résultats obtenus sont satisfaisant, le PPM est atteint en un temps minime. L'inconvénient de cette solution réside dans la variation paramétrique au niveau du moteur, la figure (V.11) montre que le MPPT neuronal est sensible à cette variation.

Dans la troisième solution, nous avons proposé un contrôleur MPPT flou, ce contrôleur ne nécessite pas la connaissance des conditions météorologiques, il suffit d'avoir

une information sur la tension et le courant du générateur pour forcer le système à fonctionner au PPM. Le résultat obtenu avec ce contrôleur acceptable, la réponse est oscillatoire et le mécanisme ne prend pas en considération les variations rapides sous forme de rampes mais ces oscillations peuvent être supprimées en agissant sur les fonctions d'appartenances.

Du fait que le contrôleur MPPT flou nécessite une optimisation par algorithme génétique, La quatrième solution consiste à garder le bloc d'adaptation de la tension de référence et de substituer l'intégrateur par un contrôleur flou qui donne un bon résultat sans avoir recours à l'optimiser.

Les résultats de simulation obtenus montrent l'intérêt de l'utilisation des contrôleurs MPPT dans la poursuite du point de puissance maximale, afin d'exploiter le maximum d'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque. Ces contrôleurs sont de plus en plus performants.

CHAPITRE VI

# Expérimentation

### VI.1. Description du système de pompage photovoltaïque du CDER

Le système de pompage photovoltaïque disponible au CDER, est constitué principalement d'un générateur photovoltaïque de type UDTS50, d'un convertisseur DC/AC qui transforme l'énergie électrique continue fournie par le générateur en une énergie électrique alternative, d'un groupe moteur-pompe et d'un système de stockage d'eau (système en boucle fermée constitué d'un réservoir et de conduites d'évacuation d'eau). Le dispositif est illustré sur la figure suivante.



**Figure VI.1 :** Système de pompage photovoltaïque disponible au CDER

### VI.1.1. Générateur photovoltaïque

Le système de pompage est alimenté en énergie électrique par le générateur photovoltaïque UDTS50, ce générateur est constitué de 17 modules en série. Disposés en rangs est inclinés d'un angle particulier. (Figure VI.2).



Figure VI.2 : Générateur photovoltaïque UDTS 50

Ce générateur est conçu au CDER, sous licence d'Arco/Siemens, pour avoir ses caractéristiques nous avons utilisé la base de données du logiciel PVSYSYST ainsi que quelques mesures sur le système réel.

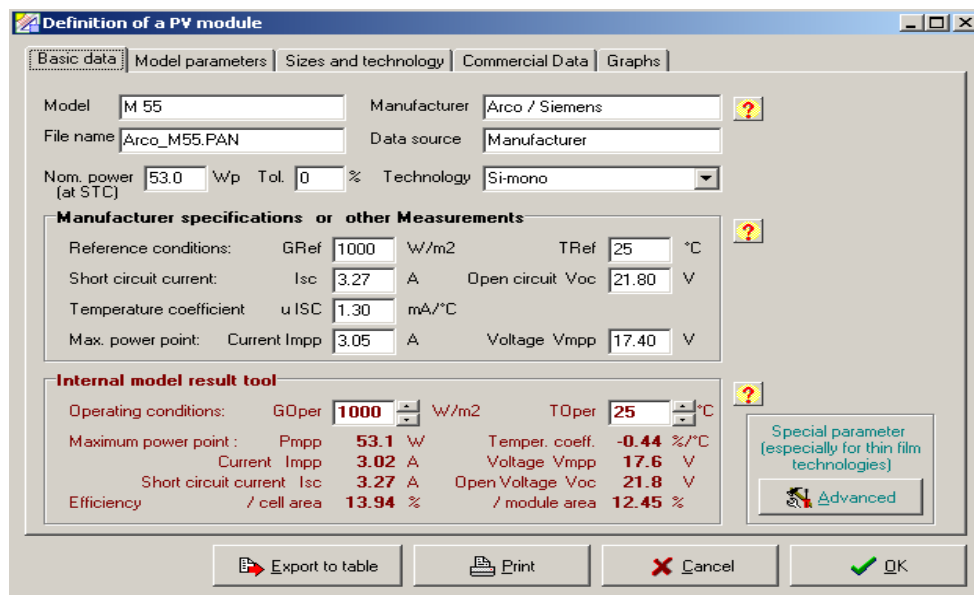


Figure VI.3 : Interface du logiciel PVSYSYST

### VI.1.2. Dispositif électronique

Le dispositif électronique est constitué d'une partie de puissance (Convertisseur DC/AC) et d'une partie de commande ainsi qu'un filtre d'entrée (Capacité).

#### VI.1.2.1. Filtre d'entrée

Le filtre d'entrée supprime les variations brusques de la tension, réduit son ondulation, il permet d'obtenir une tension d'entrée sensiblement constante.

#### VI.1.2.2. Le Convertisseur DC/AC

Le convertisseur DC/AC est commandé en MLI et fonctionne avec un circuit de génération des signaux PWM commandé par un circuit de régulation et de protection. Ce dernier assure le transfert de puissance du générateur vers le groupe moteur-pompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits.



**Figure VI.4 :** Vue générale du dispositif électronique

### VI.1.3. Moteur Asynchrone

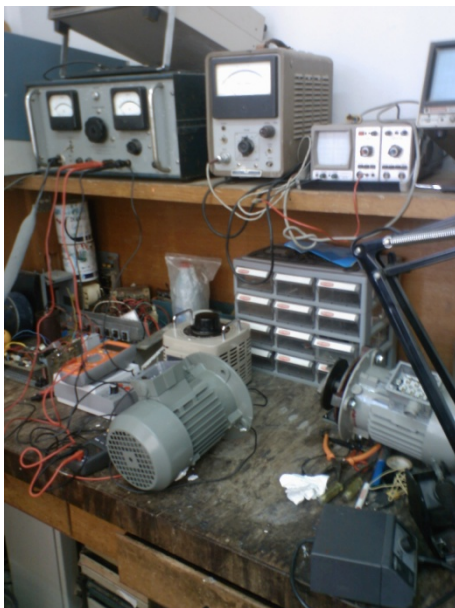
Le moteur asynchrone triphasé utilisé dans ce système est du type ENEL 750 watt, il est couplé à une pompe centrifuge et alimenté par le générateur photovoltaïque à travers un onduleur.



**Figure VI.5 :** Moteur asynchrone couplé avec une pompe Mitidja 36

#### VI.1.3.1. Identification des paramètres du moteur

Afin d'avoir une image du comportement du système de pompage photovoltaïque disponible au niveau du CDER, nous avons effectué des essais sur la machine asynchrone ENEL 750 watt (essai en continu, à rotor bloqué et à vide), afin de déterminer ses paramètres.



**Figure VI.6 :** essai à vide du moteur.

**Figure VI.7 :** Essai du moteur en continu pour avoir la résistance statorique par phase.

### VI.1.3.2. Méthode de calcul des paramètres

La méthode donnée dans l'annexe (B), permet à partir des essais effectués de calculer les paramètres du moteur, ainsi nous pouvons établir un schéma équivalent par phase. Le traitement des résultats des essais que nous avons effectués nous donne :

La résistance statorique :  $R_s = 8.73 \Omega$

La résistance rotorique :  $R_r = 6.18 \Omega$

L'inductance statorique :  $L_s = 3.65 j\Omega$

L'inductance rotorique :  $L_r = 2.28 j\Omega$

La mutuelle :  $M = 213.73 j\Omega$

### VI.1.4. La pompe

La pompe couplée au moteur est du type Centrifuge Monobloc Mitidja 32, elle est généralement destinée pour les usages domestiques et la petite irrigation. Elle refoule des eaux non agressives, jusqu'à une température de 80°C avec 2% en addition mécanique et une granulométrie de 0.5 mm.

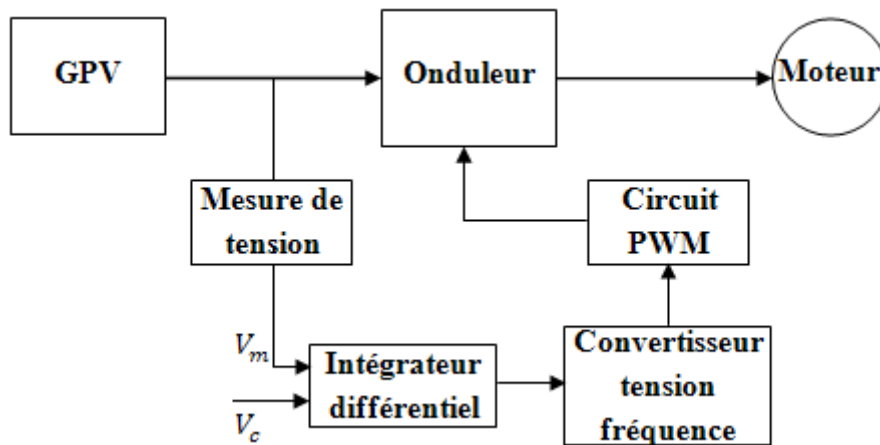


**Figure VI.8 :** Pompe centrifuge MITIDJA 32



### VI.2. Fonctionnement du système de pompage photovoltaïque

Pour un éclairement et une température donnés, la puissance demandée par le moteur dépend de la fréquence d'alimentation. Pour une fréquence d'alimentation donnée  $f$ , le couple moteur est déterminé par l'égalité des couples du moteur et de la pompe, auquel correspond une puissance absorbée par le moteur. Plus la fréquence augmente, plus la puissance augmente, par conséquent la fréquence est limitée et le système fonctionne tant que la puissance d'appel du moteur reste inférieure à la puissance maximale que peut fournir le générateur photovoltaïque. En plus ce système fonctionne avec un rapport tension-fréquence constant, ou plus exactement le rapport taux modulation-fréquence constant.



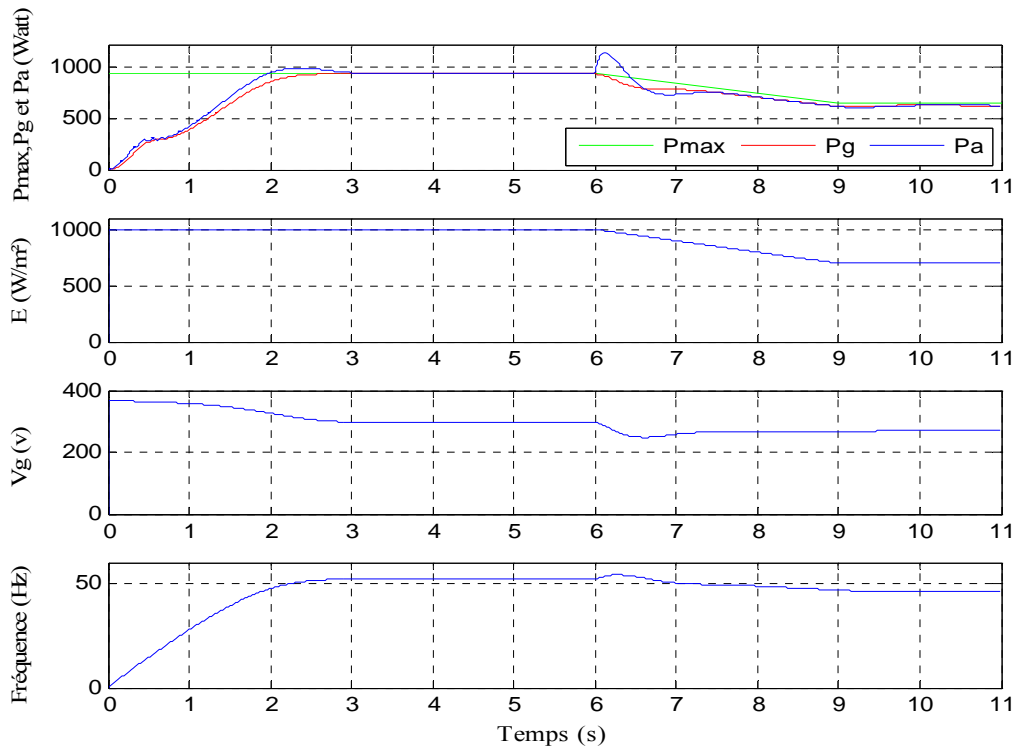
**Figure VI.9 :** Schéma synoptique du système de pompage.

### VI.3. Simulation du système

Le système de pompage du CDER utilise la méthode à tension de référence fixe, Cette méthode résulte du fait que la tension des photopiles à la puissance maximale est en première approximation constante lorsque l'éclairement varie. Par conséquent il suffit de maintenir constante la tension au borne du générateur quel que soit l'éclairement. Cette méthode assure un transfert optimal d'énergie uniquement pour quelques valeurs d'éclairement et température. Pour résoudre ce problème nous avons proposé deux solutions la première consiste à utiliser un bloc intelligent pour adapter la tension de référence et dans la deuxième on utilise un MPPT intelligent par réseaux de neurones.

### VI.3.1. Adaptation de la tension de référence par réseau de neurone

Cette solution consiste à adapter la tension de référence, afin d'avoir un transfert optimal pour toutes les valeurs de l'éclairement et température. La simulation du système avec adaptation de la tension de référence par un réseau de neurone est illustrée sur la figure suivante.

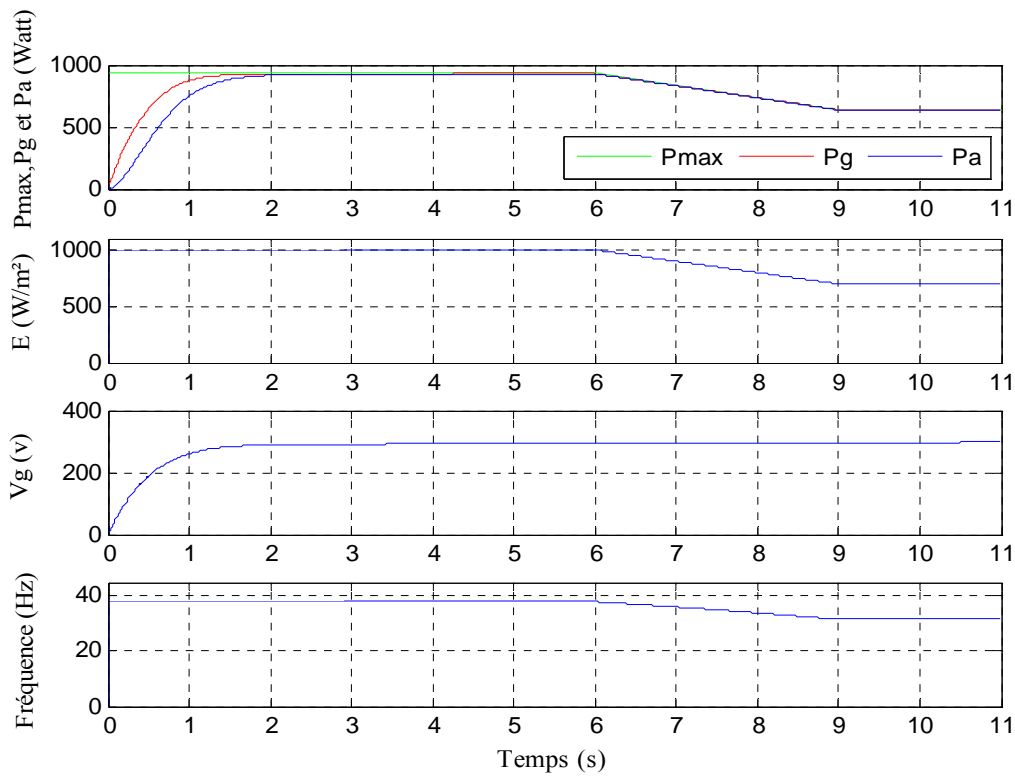


**Figure VI.10 :** Réponse du système avec bloc d'adaptation de la tension de référence.

Le résultat de simulation montre que cette solution donne un résultat satisfaisant, le point PPM est atteint et la poursuite du PPM est assurée.

### VI.3.2. MPPT neuronal

Cette solution consiste à utiliser un réseau de neurones qui donne directement pour chaque éclairement et température la fréquence optimale de fonctionnement du système qui est synonyme d'un transfert optimal d'énergie. La simulation du système avec MPPT neuronal est illustrée sur la figure suivante.



**Figure VI.11 :** Réponse du système avec MPPT neuronal.

Le résultat de simulation obtenu, montre La puissance du MPPT neuronal qui réside d'une part, dans sa rapidité à estimer la position du PPM sans oscillations, et d'autre part, l'obtention d'une puissance maximale dépourvue de toutes oscillations.

### VI.4. Relevés expérimentaux

Nous avons vu dans la partie théorique que l'introduction d'un bloc intelligent par réseaux de neurones permet soit d'adapter la tension de référence, soit de donner directement la fréquence à laquelle le moteur doit fonctionner pour absorber le maximum de puissance. Du fait qu'il y a des différences entre les valeurs théoriques (simulation) et les mesures. On peut proposer de relever des mesures sur le système réel en le forçant à fonctionner à la puissance maximale du générateur. Ces mesures sont rendues possibles grâce à un changement que nous avons effectué au niveau de la carte de commande (introduction d'un potentiomètre pour faire varier l'image de la tension de consigne). A l'issue des séries de mesures nous pouvons ainsi dresser un tableau donnant la correspondance entre éclairage, température, tension de référence, et fréquence de fonctionnement du moteur (annexe F). Ce tableau servira de base de données pour l'entraînement du réseau de neurone.



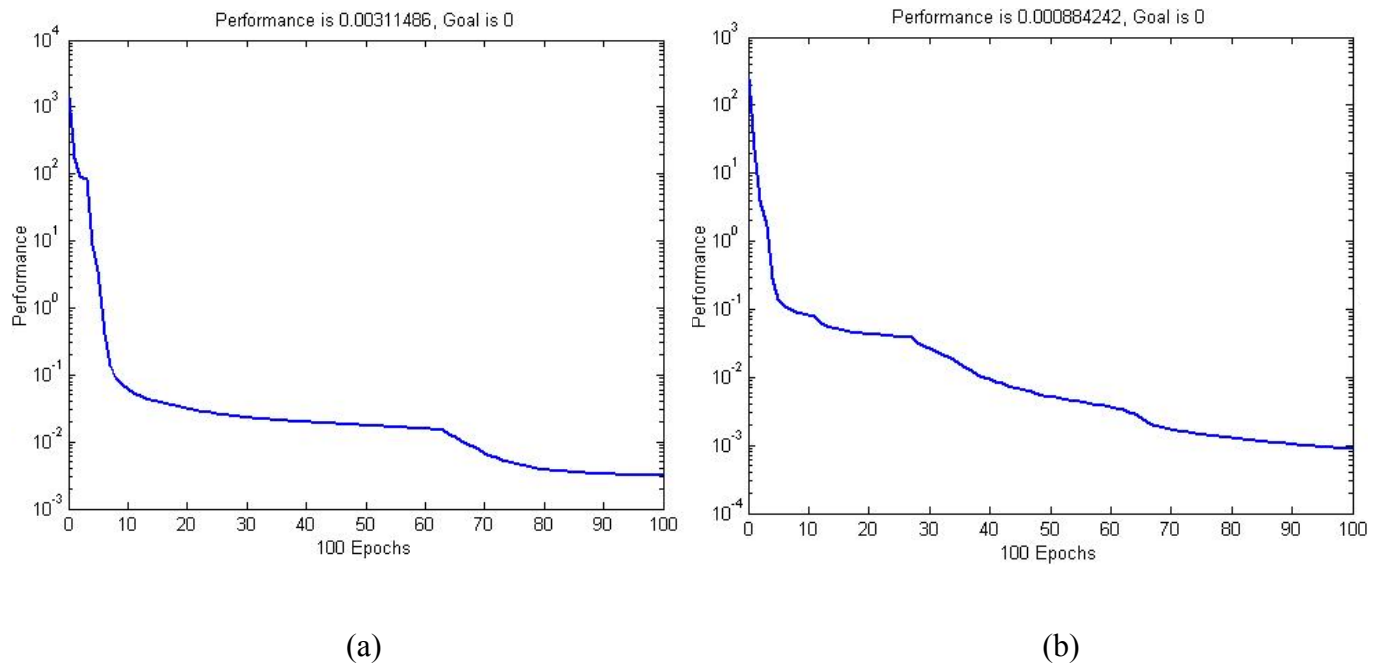
**Figure VI.12 :** Relevé des mesures sur banc d'essai

### VI.5. Choix de la méthode à implémenter

Comme nous sommes limités en matériel, coût économique de la réalisation, simplicité, nous avons choisi d'implémenter les deux solutions utilisant les réseaux de neurones, nous avons aussi réduit le nombre de neurones afin de pouvoir charger le programme dans la mémoire du PIC16F877 qui comprend uniquement 8ko de mémoire.

### VI.6. Entraînement du réseau de neurone

Après avoir dressé la base de données, reliant les conditions climatiques avec la tension de référence et la fréquence de fonctionnement optimale en se basant sur les mesures ainsi que les données théoriques courgées, nous avons choisi une structure de réseau constituée de deux trois couches, une couche d'entrée, une couche de 10 neurone, et l'autre d'un neurone. L'entraînement a été effectué sous MATLAB. (Figure (VI.13 et VI.14)).



**Figure VI.13 :** (a) Apprentissage du réseau donnant la tension de référence

(b) Apprentissage du MPPT neuronal

### VI.7. Implémentation du MPPT sur PIC16F877

La fonction qui lie l'entrée du réseau de neurone avec sa sortie s'écrit sous la forme :

$$s = f(w(f_1(w_1p + b_1)) + b)$$

Cette fonction comprend un opérateur de sommation, suivi d'un opérateur non linéaire (fonction d'activation).

Tel que :

$w$  et  $w_1$  : Matrices des poids

$b$  et  $b_1$  : Vecteurs de biais

$p$  : Entrée du réseau (éclairage et température)

$f$  et  $f_1$  : Fonctions d'activation

Le principe de cette implémentation consiste à programmer la fonction reliant l'entrée du réseau avec sa sortie, sur PIC16F877, la matrice  $w$  et le vecteur  $b$  sont donnés à l'issue de l'entraînement du réseau sous MATLAB. Les entrées  $p$  sont issues des capteurs de mesures.

### VI.8. Réalisation de la carte de commande sous PROTEUS

Pour simuler le fonctionnement de l'association PIC 16F877, circuits de conditionnements des capteurs, le convertisseur numérique analogique, nous avons utilisé le logiciel PROTEUS.

#### VI.8.1. Conditionnement des capteurs

La mesure de l'éclairage et de la température s'effectue par le biais de deux capteurs, un circuit LM35 pour la mesure de la température et une cellule de référence pour la mesure de l'éclairage. Pour convertir ces mesures en données exploitables dans le programme implémenter sur le pic, deux circuit de pré conditionnement ont été mis au point afin d'avoir une image des deux grandeurs entre 0 et 5v.



## VI.8.3. Vue générale de la carte de commande

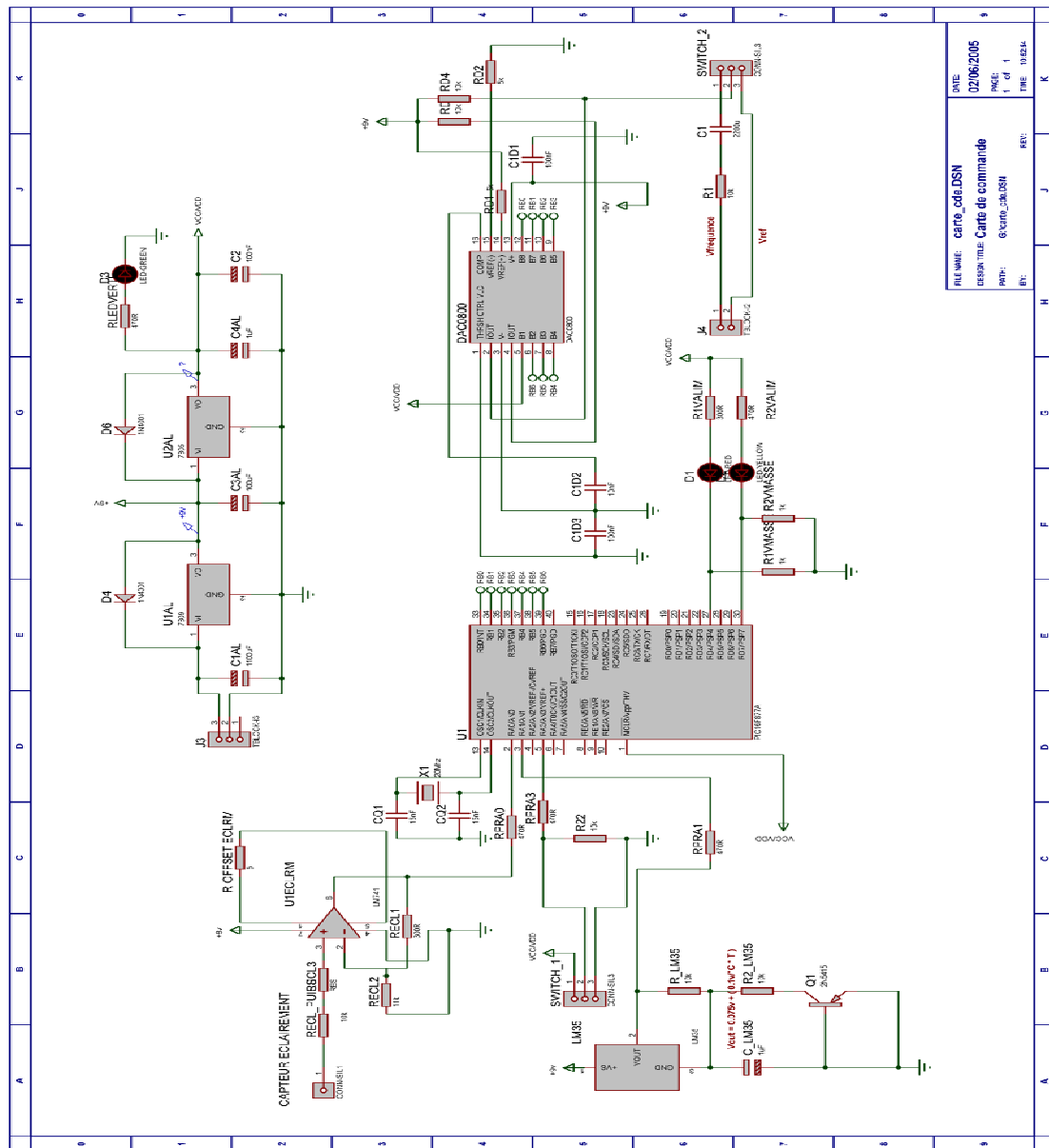


Figure VI.16 : Carte de commande sous PROTEUS.



VI.9. Organigramme de fonctionnement de la carte

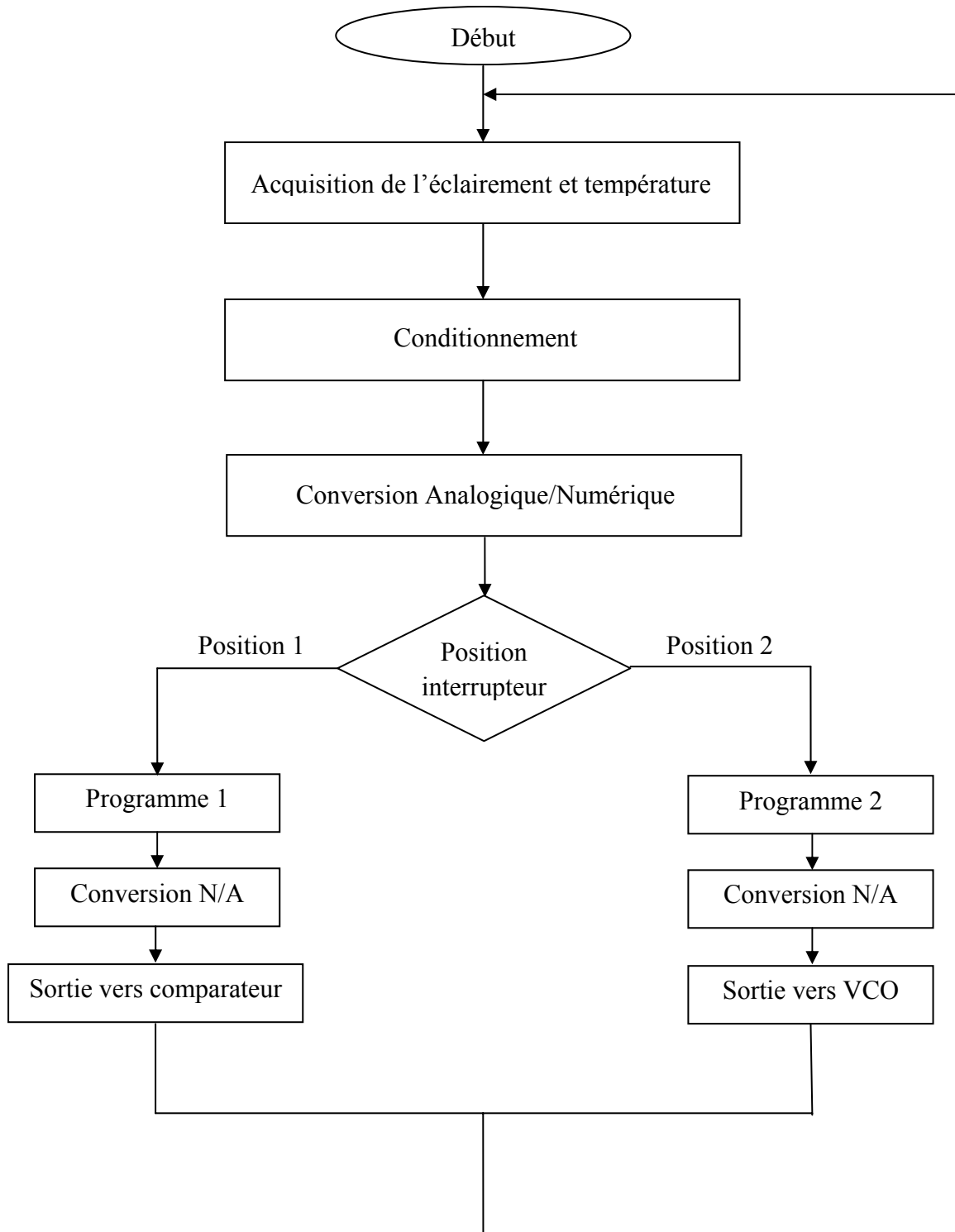


Figure V.17 : Organigramme de fonctionnement de la carte

### VI.10. Simulation de la carte de commande sous PROTEUS

Nous avons effectué une simulation de la carte de commande sur logiciel PROTEUS, et nous avons eu les résultats suivants :

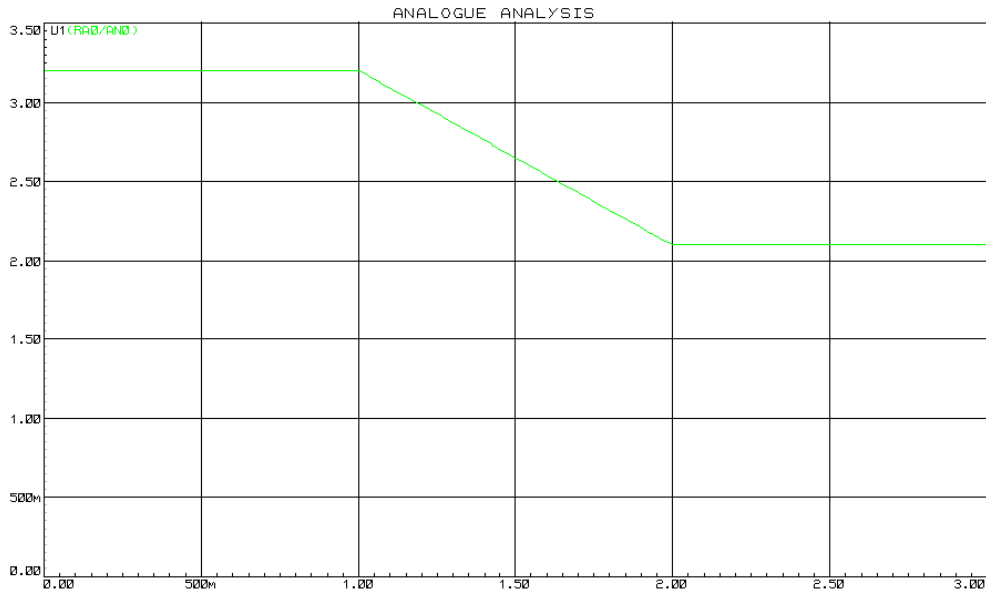


Figure VI.18 : variation éclairciment

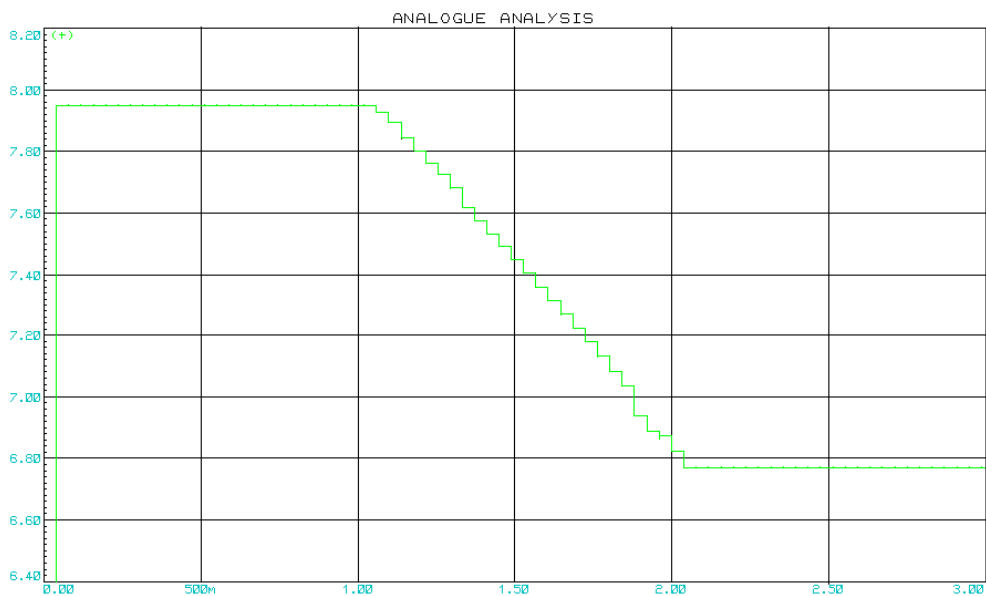
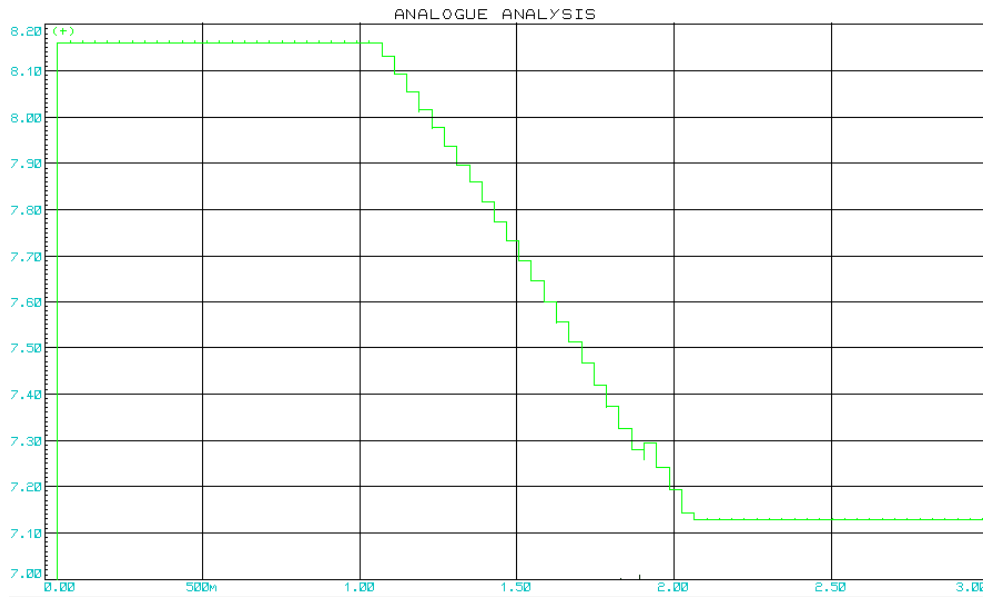
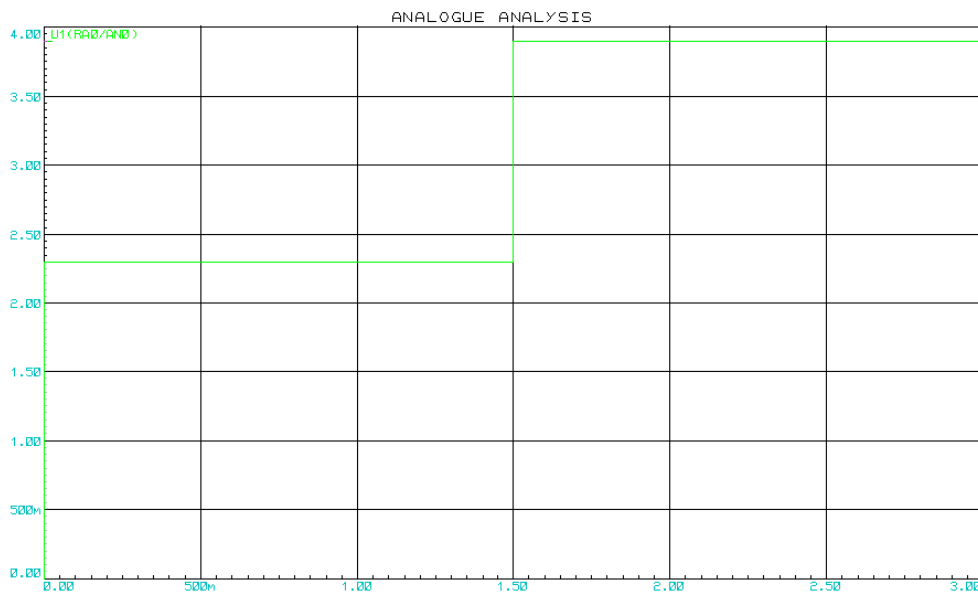


Figure VI.19 : Réponse programme 1

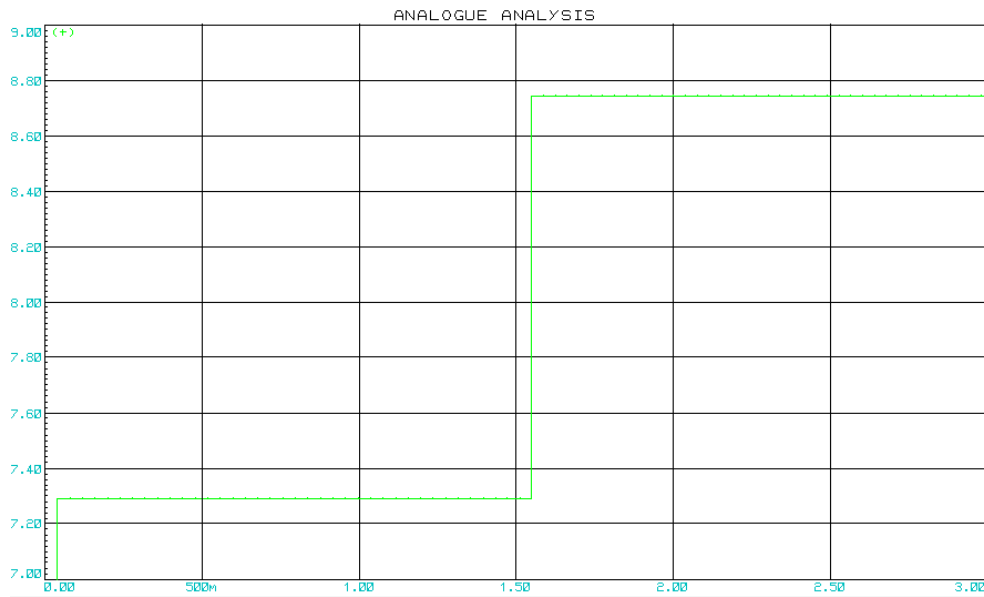


**Figure VI.20** : Réponse programme 2

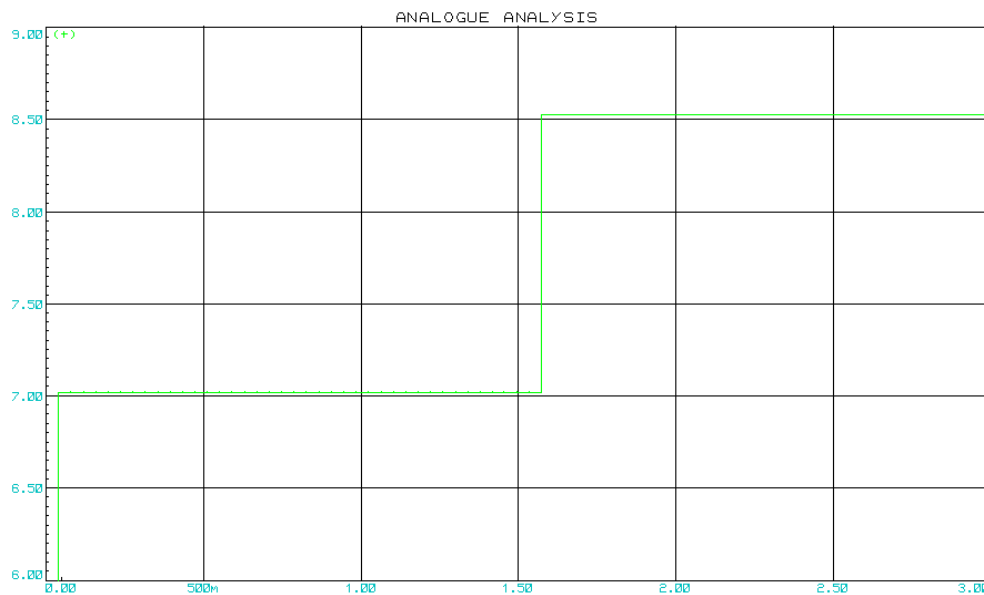
Ces réponses correspondent à une variation de l'éclairement de  $800 \text{ w/m}^2$  à  $513 \text{ w/m}^2$  avec une  $T=25^\circ\text{C}$ . La figure (VI.19) représente l'image en tension de l'éclairement, et les figures (VI.20 et VI.21) représentent l'image en tension de la sortie du PIC (sortie pour programme1 et programme2). Les résultats de simulations sont très proche des valeurs calculées théoriquement.



**Figure VI.21** : variation éclairement



**Figure VI.22** : Réponse programme 1



**Figure VI.23** : Réponse programme 2

Ces réponses correspondent à une variation brusque de l'éclairage avec une  $T=25^{\circ}\text{C}$ . Elles représentent les images en tension de l'éclairage, et de la sortie du PIC. Le résultat est pratiquement le même que le calcul théorique.

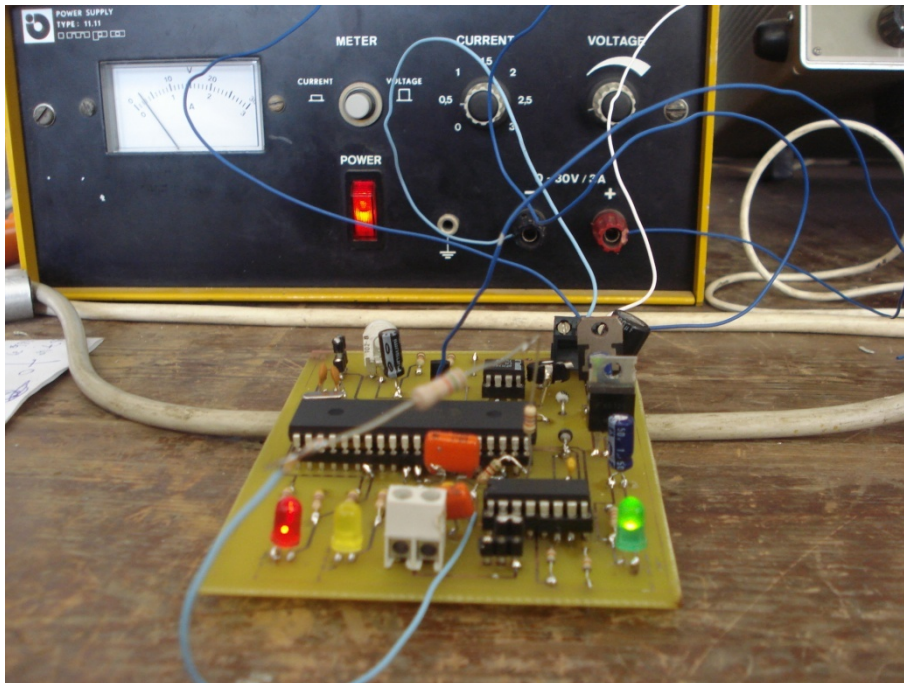
### VI.11. Réalisation pratique de la carte de commande

#### VI.11.1. Circuit imprimé

La suite ARES qui est intégré à POTEUS, nous permet à partir des schémas saisis, d'avoir le circuit imprimé qui constitue la dernière étape avant de passer à la mise au point du circuit sur une plaque en cuivre, et de placer chaque composants à sa place.

#### VI.11.2 Vue générale de la carte de commande réalisée

La figure suivante illustre la carte de commande que nous avons réalisée au cours de notre travail.



**Figure VI.24 :** Carte de commande réalisée au cours du projet

#### VI.11.3. Validation pratique des performances de la carte réalisée

Avant de monter la carte de commande sur le système réel, nous avons effectué des essais sur la carte en utilisant des alimentations continues (elles nous permettent d'émuler le comportement des capteurs d'éclairage et de température) et un voltmètre pour mesure les tensions délivrées par la carte, à la première mise en marche le PIC donne un résultat similaire à la simulation, mais le problème réside dans le circuit de conversion numérique/analogique.

### VI.12. Conclusion

Au terme de cette partie, il est important de noter que la mise en pratique des études théorique s'avère une étape très difficile, il n'est pas évident d'avoir une réalisation qui marche dès la première fois, c'est difficile de détecter la source du problème, chose que nous avons constaté au cours de notre étude pratique du système de pompage disponible au niveau du CDER, car au cours des simulations plusieurs phénomènes qui apparaissent dans la réalité ne sont pas pris en considération.

### CONCLUSION GENERALE

L'électricité solaire est vue comme étant une importante source d'énergie renouvelable. Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions climatiques, un mécanisme de poursuite s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque travaille avec une meilleure efficacité.

Ce mécanisme de poursuite est le contrôleur MPPT qui recueille des informations du générateur et génère en conséquence un signal pour commander l'onduleur intercalé entre le générateur photovoltaïque et le groupe moteur-pompe.

Dans ce travail notre intérêt s'est porté sur l'amélioration du rendement du système de pompage photovoltaïque disponible au niveau du CDER, en optimisant son générateur photovoltaïque.

Nous avons tout d'abord commencé par une étude théorique des cellules solaires et générateur photovoltaïque, éléments de base du système, on a élaboré le modèle mathématique de chaque organe constituant le système de pompage photovoltaïque, à savoir le générateur, l'onduleur, le groupe moteur-pompe, nous avons exposé les différentes méthodes classiques et intelligentes de poursuite du point de puissance maximale.

Ensuite nous avons simulé le système avec et sans contrôleur MPPT, une simulation qui nous a permis de voir l'intérêt des MPPT intelligents dans la poursuite du point de puissance maximale, afin d'optimiser le générateur photovoltaïque.

Enfin, nous avons choisi d'implémenter la solution utilisant le réseau de neurone sur PIC 16F877 et nous avons réalisé une carte de commande en utilisant le PIC 16F877, qui permet ainsi de commander le convertisseur DC/AC et optimiser le générateur photovoltaïque.

### **Perspectives :**

- Implémentation du réseau de neurone sur d'autres circuits puissants.
- Réalisation d'une carte d'acquisition des grandeurs des modules photovoltaïques.
- Optimisation du MPPT flou par algorithme génétique.
- Utilisation d'autre approche tel le neuro-flou.
- Optimisation de l'installation complète (choix du moteur de la pompe...).



# ANNEXES

---

## **ANNEXE A**

Paramètres du moteur, Générateur photovoltaïque et pompe

## **ANNEXE B**

Méthode d'identification des paramètres du moteur asynchrone

## **ANNEXE C**

Microcontrôleur 16F877

## **ANNEXE D**

Détermination de la fréquence de fonctionnement du moteur

## **ANNEXE E**

Programme implémenté sur PIC16F877

## **ANNEXE F**

Relevés expérimentaux

### Paramètres des modules du type SOLAREX 110

<b>MODULES SOLAREX 110</b>			
$I_{sc}$	[A]	Courant de court circuit	2.3
$V_{oc}$	[V]	Tension de circuit ouvert	22.25
$I_{mp}$	[A]	Courant à puissance maximale	17.25
$V_{mp}$	[V]	Tension à puissance maximale	2.1
$R_s$	[ $\Omega$ ]	Résistance série	0.75
$\alpha$	[A/C°]	Coefficient de température du courant	0.0025
$\beta$	[V/C°]	Coefficient de température de la tension	0.096

### Paramètres des modules du type UDTS50

<b>MODULES UDTS50</b>			
$I_{sc}$	[A]	Courant de court circuit	3.43
$V_{oc}$	[V]	Tension de circuit ouvert	21.28
$I_{mp}$	[A]	Courant à puissance maximale	3.16
$V_{mp}$	[V]	Tension à puissance maximale	16.65
$P_{max}$	[W]	Puissance maximale	52.66
$R_s$	[ $\Omega$ ]	Résistance série	0.9
$S$	[cm <sup>2</sup> ]	Surface	10x10
$\alpha$	[A/C°]	Coefficient de température du courant	0.00343
$\beta$	[V/C°]	Coefficient de température de la tension	-0.059584

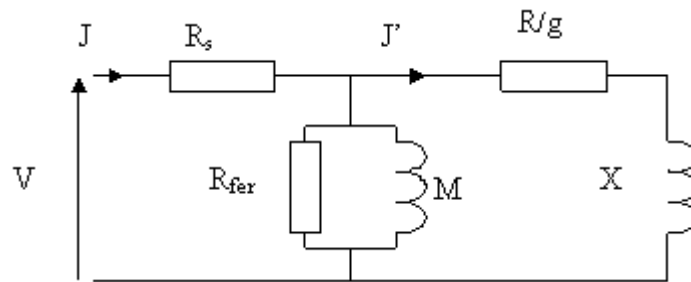
### Paramètres moteur 3 Kw

Type	Asynchrone 3 phases
Puissance utile	2576 Kw
Tension nominale	220 V
Rendement nominal	0.78
Facteur de puissance nominal	0.8
Vitesse nominale	1420 tr/mn
Courant nominal	6.2 A (Y) et 10.7 (Δ)
Fréquence nominale	50 Hz
Résistance statorique	2.1 Ω
Résistance rotorique	2.7 Ω
Inductance cyclique stator	0.0107 H
Inductance cyclique rotor	0.0128 H
Inductance mutuelle cyclique	0.1926 H
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie	0.1 Kg.m2

### Pompe MITIDJA 32

<b>Débit nominal</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	<b>8</b>
<b>Hmt nominale</b>	<b>m</b>	<b>14</b>
<b>Puissance absorbée nominale</b>	<b>kw</b>	<b>0.8</b>
Puissance moteur	Kw	1.1
Vitesse rotation	Tr/mn	2900
Rendement	%	40
Nphs requis	m	1.4
Roue centrifuge	mm	113
Aspiration	mm	32
Refoulement	mm	32
Type de garniture		Mecanic
Matière		
Roue	ft 20	Iron
Corps Spiral	ft 20	Iron

**Modèle équivalent par phase d'un moteur asynchrone :**

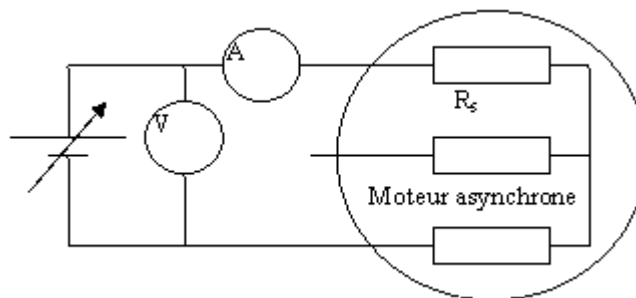


Pour déterminer ces paramètres, on effectue trois essais :

**Essai en continu :**

Il a pour but de mesurer la résistance statorique par phase. On utilise un montage voltampèremétrique, en continu, et on mesure tension et courant (sans dépasser  $I_n$ ). On obtient la valeur de la résistance en appliquant la loi d'ohm.  $R_s = V/2I$

**Montage :**

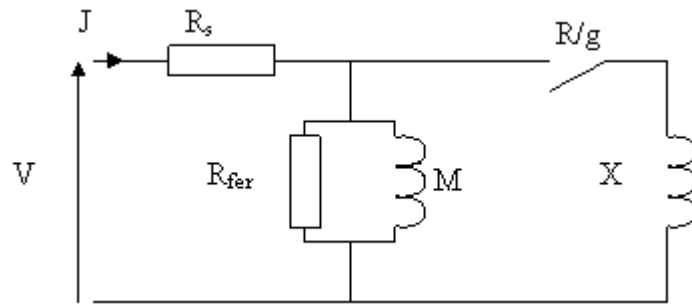


**Essai à vide :**

C'est un essai à vide. Si on considère que la vitesse à vide est très proche de la vitesse nominale, on a un glissement  $g = 0$ . Dans ce cas, la résistance  $R/g$  est infinie et le schéma équivalent par phase du moteur devient :

La mesure des puissances active et réactive permet donc de calculer  $R_{fer}$  et  $X_m$ .

On a  $P_{js} = 3R_s I^2$  et pour  $g = 0$   $P_{fer} = P - P_{js}$  donc  $R_{fer} = 3V^2/P_{fer}$  et  $X_\mu = 3V^2/Q$



**Essai à rotor bloqué :**

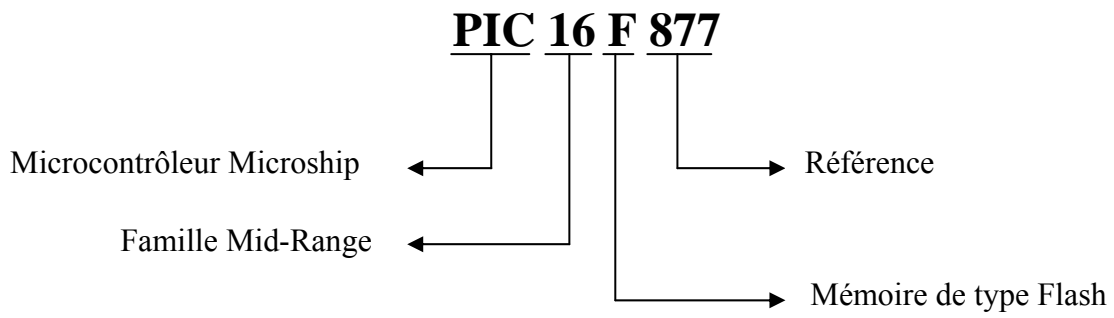
Il consiste à effectuer des mesures à rotor bloqué (sous tension réduite et courant nominal). Dans ce cas, le glissement est égal à un. Les puissances dans  $R_{fer}$  et dans  $X_{\mu}$  deviennent négligeables devant les autres. Cet essai nous permet de calculer  $R$  et  $X$ .

On a par phase :  $P = P_{ph} - R_s I_{ph}^2$

Donc  $R = P / I_{ph}^2$  et  $X = Q_{ph} / I_{ph}^2$

De plus  $X = L_s + L_r$  et  $R_s / R_r = L_s / L_r$

Nomenclature du PIC16F877



Branchement du PIC16F877

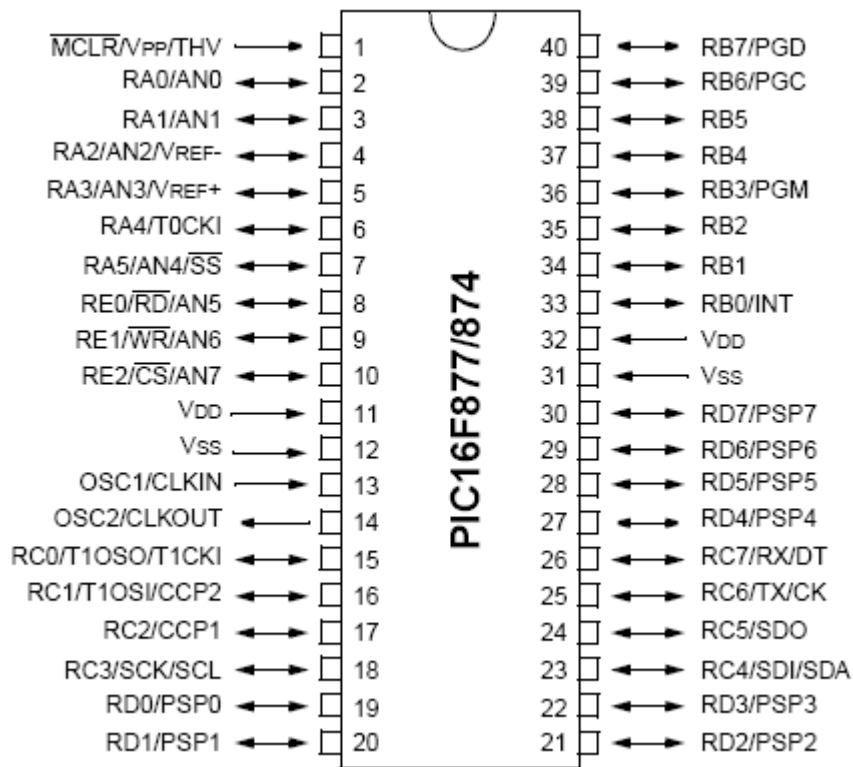


Figure : Brochage du PIC 16F877

**Caractéristiques principales du PIC16F877**

Les principales caractéristiques du 16F877 sont regroupées dans le tableau suivant :

<b>Key Features PIC micro™ Mid-Range Reference Manual (DS33023)</b>	<b>PIC16F877A</b>
Fréquence System	DC - 20 MHz
RESETS (et Délais)	POR, BOR (PWRT, OST)
Mémoire Programme de type FLASH (mots de 14 bits)	8K
Mémoire de données	368 Octets
Mémoire de données EEPROM	256 Octets
Sources d'interruptions	14
Les Ports d'Entrées/Sorties	Ports A (6 bits), B (8 bits), C (8 bits), D (8 bits), E (3 bits)
Les timers	3
Les modules de captures et de comparaison avec PWM (modulation de largeur d'impulsions)	2
Communications séries	MSSP, USART
Communications parallèles	PSP
Convertisseur A/N de 10 bits	8 entrées multiplexées
Jeu d'instruction	35 instructions

**Détermination de la fréquence de fonctionnement du moteur:**

La puissance délivrée par le générateur est donnée par :

$$P_g = V_g I_g$$

La puissance absorbée par le moteur, en négligeant les pertes fer et par effets Joule au stator, est égale à :

$$P_a = 3 \frac{R_r}{g} I_r^2$$

En supposant que l'onduleur a un rendement voisin de l'unité, on peut écrire l'égalité des puissances :

$$P_g = P_a$$

La puissance mécanique est égale au produit couple vitesse :

$$P_m = N_r C_m \text{ avec : } N_r = N_s (1 - g) = \frac{\omega}{p} (1 - g)$$

Donc l'expression du couple moteur est donnée par :

$$C_m = \frac{3p}{g\omega} R_r I_r^2 = \frac{3p}{2\pi f g} R_r I_r^2$$

En négligeant les pertes fer et pertes stator, le courant rotorique  $I_r$  s'écrit :

$$I_r = \frac{U_s}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + (L_r \omega)^2}}$$

L'expression du couple devient :

$$C_m = \frac{3p R_r}{2\pi} \left(\frac{U_s}{f}\right)^2 \frac{f g}{R_r^2 + (2\pi L_r f g)^2}$$

Le rapport tension fréquence est égale à :

$$\frac{U_s}{f} = \left(\frac{r}{f}\right) U / (2\sqrt{2})$$

Où  $(r/f)$  est le rapport taux de modulation de modulation – fréquence a été maintenu constant.



L'expression du couple développé par la pompe est :

$$C_p = K_p N^2$$

Où :  $N$  est la vitesse de rotation et  $K_p$  est constante de la pompe

Dans notre cas  $N = N_r$  où  $N_r$  est la vitesse de rotation du rotor d'où :

$$C_p = K_p \left( \frac{2\pi f}{p} \right)^2 (1 - g)^2$$

Comme le moteur entraîne la pompe on a l'égalité des couples :  $C_p = C_m$

Le système d'équation obtenu est le suivant :

$$\begin{cases} C_m = C \\ C_p = C \end{cases}$$

Où  $C$  est le couple donné par :  $C = p P_g / 2\pi f$

La résolution de ce système pour une puissance donnée nous donne deux paires de fréquence -glissement qui correspondent à deux zones de fonctionnement ; la zone à tension constante et la zone à courant constant. La zone à tension constante offre une meilleure stabilité de fonctionnement car la tension est suffisante pour alimenter le moteur.

Nous avons choisi une structure à deux couches : une couche d'entrée ayant 15 neurones et une couche de sortie.

L'apprentissage effectué est un apprentissage supervisé basé sur des données connues en entrée/sortie.

## ANNEXE E

---

### Programme implémenté sur PIC16F877

```
#include "stdio.h"

#include "math.h"

#include "pic.h"

#include "delay.h"

/***** Reseau de Neurone V frequence *****/

/*W1Vf*18*/

__EEPROM_DATA(41,67,158,3,29,104,22,37);

__EEPROM_DATA(9,17,178,11,4,83,10,91);

__EEPROM_DATA(3,73,221,158,90,79,235,11);

__EEPROM_DATA(1,50,110,9,1,66,167,54);

__EEPROM_DATA(204,155,241,13,9,62,3,70);

/*W2Vf    b1Vf/10 */

__EEPROM_DATA(1,98,36,169,6,234,58,9);

__EEPROM_DATA(103,151,1,197,3,203,244,75);

__EEPROM_DATA(1,103,214,23,174,96,20,11);

__EEPROM_DATA(16,9,27,199,69,229,185,144);

__EEPROM_DATA(190,61,4,147,146,33,11,177);

/* S Vf ( 0-->1 1-->-1 ) */

__EEPROM_DATA(1,0,0,0,0,1,1,1);

__EEPROM_DATA(0,1,1,0,0,0,1,0);

__EEPROM_DATA(0,0,1,1,1,0,0,1);

__EEPROM_DATA(0,1,1,0,0,1,1,1);

__EEPROM_DATA(1,0,0,0,1,0,1,1);

/***** Reseau de Neurone V reference *****/

/*W1Vref*18*/

__EEPROM_DATA(34,19,145,2,92,77,65,82);

__EEPROM_DATA(15,59,31,90,8,61,1,19);

__EEPROM_DATA(16,143,268,9,106,57,27,80);

__EEPROM_DATA(1,236,62,5,1,116,110,47);
```

## ANNEXE E

---

```
__EEPROM_DATA(73,114,140,9,3,80,1,60);
/*W2Vref    b1Vf/10*/
__EEPROM_DATA(2,249,4,133,5,41,244,43);
__EEPROM_DATA(125,146,31,255,5,151,163,22);
__EEPROM_DATA(2,175,251,33,127,54,232,117);
__EEPROM_DATA(209,131,5,126,58,187,225,179);
__EEPROM_DATA(150,77,26,197,197,54,18,221);
/* S Vref   ( 0-->1 1-->-1 ) */
__EEPROM_DATA(1,0,0,0,0,1,1,0);
__EEPROM_DATA(0,0,1,1,1,0,1,0);
__EEPROM_DATA(0,0,1,0,0,1,0,1);
__EEPROM_DATA(1,1,0,0,0,1,1,1);
__EEPROM_DATA(1,1,0,0,1,0,1,0);
double Logsig(double x);
void main (void)
{
double C1,C2,C3,C4,C5,A,B;
unsigned char a,b,i,c,d,e,f,g,h;
unsigned char s1,s2,s3,s4,p;
/*float A,B;*/
int A1,B1;
/***** A *****/
    TRISA = 0xFF;
    TRISD = 0x00;
    ADCON1=0x06;
    if (RA3==0)
    {
        p=0;
        RD4=1;
        RD5=0;
```

## ANNEXE E

---

```
}  
else  
{  
p=120;  
RD4=0;  
RD5=1;  
}  
ADCON1= 0x80;  
ADCON0= 0x81;  
DelayUs(100);  
ADGO = 1;  
while (ADGO)  
    continue;  
A1=ADRESL+ADRESH*256;  
DelayUs(200);  
/***** B *****/  
ADCON0= 0x89;  
DelayUs(100);  
ADGO = 1;  
while (ADGO)  
    continue;  
B1=ADRESL+ADRESH*256;  
DelayUs(200);  
/*****/  
/*B=B1/22;  
A=A1;*/  
/*B=24.7631;  
A=666.95;*/  
C1=(double)((double)((double)B1*5)/1023);  
B=(double)((double)((double)C1-0.075)*10);
```

## ANNEXE E

---

```
A=(double)((double)((double)A1*1282.5)/1023);
while(WR) continue;
C3=0;
for(i=0;i<40;i=i+4)
{
a=EEPROM_READ(i+p);
b=EEPROM_READ(i+1+p);
s1=EEPROM_READ((i/2)+80+p);
if (s1==0)
C1=(double)a/b;
else
C1=-((double)a/b);
c=EEPROM_READ(i+2+p);
d=EEPROM_READ(i+3+p);
s2=EEPROM_READ((i/2)+81+p);
if (s2==0)
C2=(double)c/d;
else
C2=-((double)c/d);
e=EEPROM_READ((i/2)+60+p);
f=EEPROM_READ((i/2)+61+p);
s3=EEPROM_READ((i/4)+110+p);
if (s3==0)
C4=(double)e/f;
else
C4=-((double)e/f);
g=EEPROM_READ((i/2)+40+p);
h=EEPROM_READ((i/2)+41+p);
s4=EEPROM_READ((i/4)+100+p);
if (s4==0)
```

## ANNEXE E

---

```
C5=(double)g/h;
else
C5=-((double)g/h;
C3=C3+(double)Logsig((double)(C4*10)+(double)((double)C1*A+(double)C2*B)/18)*(double)C5;
}
/*C3=(double)C3;*/
if (p==0)
C3=(double)(C3+5.8737);
else
C3=(double)(C3+4.0331);
C3=(double)((double)((double)C3*255)/9);
/*C3=836,58;*/
C1=(double)(100*(C3-(int)C3));
A1=(int)C3;
B1=(int)C1;
TRISB = 0x00;
TRISD = 0x00;
RD7 = 1;
PORTB = A1;
RD7 = 0;
RD6 = 1;
PORTB = B1;
RD6 = 0;
}
double Logsig(double x)
{
double y;
if (x<(-89))
y=0;
else
```

## ANNEXE E

---

```
if (x>90)
y=1;
else
y= 1/(1+exp(-x));
return y;
}
```

## ANNEXE F

### Relevés expérimentaux

$$f = f_{\text{mesurée}} / 3.36$$

20/05/2008

$E$ (W/m <sup>2</sup> )	$T$ (°C)	$P_g$ (W)	$V_g$ (v)	$f_{\text{mesurée}}$ (Hz)	$V_{\text{ref}}$ (v)	$V_f$ (v)
605	23	475	265	133	7.36	7.46
600	22	450	264	132	7.3	7.39
550	23	435	257	129	7.14	7.26
520	22	425	252	127.3	7	7.13
470	23	390	243	123.17	6.75	6.9
450	22	390	240	121.5	6.6	6.82
400	21	350	223	118.1	6.2	6.68
350	20	325	216	113	6.05	6.35
300	20	295	210.4	107.6	5.8	6.07
250	20	250	195.3	101.6	5.45	5.83
200	19	210	180	96.54	5	5.48
150	19	160	160	86	4.4	5.07
100	19	125	130.2	75.6	3.6	4.33

03/06/2008

$E$ (W/m <sup>2</sup> )	$T$ (°C)	$P_g$ (W)	$V_g$ (v)	$f_{\text{mesurée}}$ (Hz)	$V_{\text{ref}}$ (v)	$V_f$ (v)
750	25	550	285	140	7.8	7.7
725	24	545	281	139	7.74	7.6
700	24	520	277.9	137.1	7.65	7.5
670	23	510	273.2	136.3	7.5	7.5
650	23	500	270.3	135.56	7.4	7.4
625	23	475	266.6	132.4	7.34	7.25
600	23	460	266.1	131.1	7.33	7.3
575	23	440	259.3	129.2	7.14	7.1
550	22	428	254.6	128.16	7.02	7
525	22	400	250.7	124.85	6.8	6.8
500	22	380	246	123.09	6.77	6.8
475	23		239	121.2	6.5	6.6
450	23	320	237.9	115.6	6.5	6.3
175	22	150	175	82.8	4.8	4.6
325	21	158	210	105	5.78	5.8

04/06/2008

$E$ (W/m <sup>2</sup> )	$T$ (°C)	$P_g$ (W)	$V_g$ (v)	$f_{\text{mesurée}}$ (Hz)	$V_{\text{ref}}$ (v)	$V_f$ (v)
650	21		268	130	7.44	7.2
660	21	490	269.3	132	7.5	7.3
620	20	450	263	131.7	7.3	7.2
650	22	480	269.2	132.52	7.48	7.3



**ANNEXE F**

---

**07/06/2008**

$E$ ( $W/m^2$ )	$T$ ( $^{\circ}C$ )	$P_g$ ( $W$ )	$V_g$ ( $v$ )	$f_{mesurée}$ ( $Hz$ )	$V_{ref}$ ( $v$ )	$V_f$ ( $v$ )
680	21	495	271.7	133.2	7.54	7.3
700	21	500	276.2	134.5	7.67	7.4
715	21	525	275.6	135	7.65	7.5
725	21	540	278.7	137.3	7.72	7.6
735	21	545	280	137.7	7.7	7.6
750	22	550	282.5	138.8	7.8	7.6
770	22	550	285.8	140.4	7.9	7.7
780	22	575	286	140.7	7.91	7.7
790	23	563	288	140.5	7.98	7.7
775	23	551	287.4	140	7.99	7.68
760	22	551	284.8	139.75	7.9	7.6
750	22	550	283	139.3	7.85	7.65
740	21	550	281.5	138.19	7.81	7.61
720	21	520	278.9	136.7	7.74	7.57
700	21	510	276.3	135.5	7.66	7.51
675	20	498	272	133.9	7.5	7.41
620	20	420	264.3	128.2	7.34	7.3

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **W. Palz** " L'électricité Solaire ", Dunod Unesco, Paris, France, 1981.
  
- [2] **M. T. Boukadoum** " Contribution à l'étude et à la conception d'un convertisseur statique DC/AC triphasé destiné à un système de pompage photovoltaïque ", Centre de développement des énergies renouvelables, thèse Magister, Alger, 1990.
  
- [3] **F. Belhachat C. Larbes L. Barazane et S. Kharzi** " Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT ", 4th international Conférence on Computer integrated Manufacturing CIP, Novembre 2007.
  
- [4] **S. Chikhi F. Chikhi et A. Chikh** " Convertisseur triphasé à microcontrôleur pour système de pompage photovoltaïque au fil du soleil ", Bulletin des énergies renouvelables, Centre de développement des énergies renouvelables, Alger, N° 10 Décembre 2006.
  
- [5] **T. Obeidi** " Commande des hacheurs MPPT par logique floue ", Ecole Nationale Polytechnique, thèse Magister, Alger, 2006.
  
- [6] **O. Thameur** " Application des algorithmes génétiques dans la commande de hacheurs MPPT ", Ecole Nationale Polytechnique, thèse Magister, Alger, 2006.
  
- [7] **J. Royer T. Djiako E. Schiller et B. S. Sy** " Le Pompage photovoltaïque ", Manuel de cours, université d'Ottawa, Canada, 1998.
  
- [8] **L. Protin et S. Astier** " Convertisseurs Photovoltaïques ", Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 3 360.
  
- [9] **M.A. Green** " Advanced Solar Energy Conversion ", Springer-Verlag, Berlin, 2003.

- [10] **A. Ricaud** " photopiles solaire de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés ", Presses polytechniques et universitaires romandes, 1<sup>ère</sup> édition, Lausanne, Suisse, 1997.
- [11] **J.C. Muller** " Electricité Photovoltaïque Principes ", Technique de l'ingénieur, BE 8 578.
- [12] **S. Khaled** " Etude et réalisation d'un hacheur MPPT à contre réaction de tension ", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Novembre 2003.
- [13] **M. T. Boukadoum A. Hamidat N. Ourabia** " Le pompage photovoltaïque " Rev. Energ. Ren, Zone Arides, Algérie, 2002.
- [14] **G. Segulier et F. Labrique** " Les convertisseurs de l'électronique de puissance ", Technique et documentation-Lavoisier, Paris, France, 1989.
- [15] **M. Dessoude** " Moteurs Asynchrones Choix et Problèmes Connexes ", Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 3 490.
- [16] **G. Segulier et F. Notelet** " Electrotechnique industrielle ", Technique et documentation-Lavoisier, 3<sup>ème</sup> édition, Paris, France, 2006.
- [17] **J. Chatelain** " Machines électriques ", Tome 1, Presse polytechnique romandes, 1983.
- [18] **T. Esram** " Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques ", IEEE Transactions On Energy Conversion, 2006.
- [19] **F. Belhachat** " Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT ", Ecole Nationale Polytechnique, thèse Magister, Alger, 2007.

- [20] **L.N. Paquin** " Application du backstepping à la colonne de flottation ", Mémoire, Département de Mines et Métallurgie faculté des sciences et de Génie université Laval, Canada, juillet 2000.
- [21] **G.B. Gardon F. Bardran S. thiria et L. Herault** " Réseaux de Neurones Méthodologie et Application ", Eyrolles, 2<sup>ème</sup> édition, Marsat, France, Aout 2002.
- [22] **E. Davalo et P. Naim** " Des Réseaux de Neurones ", Eyrolles, 2<sup>ème</sup> édition, France, 1993.
- [23] **F. Sorin L. Broussard et P. Roblin** " Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones ", technique de l'ingénieur, S7582.
- [24] **S. Bezzaoucha** " Différentes stratégies de commande floue appliquées à une colonne d'absorption ", Ecole Nationale Polytechnique, thèse Magister, Alger, 2007.
- [25] **T. Hagan et B. Demuth** " Neural networks for control ", Proceeding of American Control Conference, San Diego, Californie, Juin 1999.
- [26] **M. Mokhtari et M. Marie** " Application de MATLAB 5 et SIMULINK 2 ", Springer-Verlag, France, 1998.
- [27] **P. Borne J. Rozinoer J.Y. Dieulot et L. Dubois** " Introduction à la Commande Floue", Technip, Paris, France, 1998.
- [28] **H. Buhler** " Réglage par logique floue ", presses polytechniques et universitaires romandes, 1<sup>ère</sup> édition, Lausanne, Suisse, 1994.
- [29] **J. Godjevac** " Idées nettes sur la logique Floue ", presses polytechniques et universitaires romandes, 1<sup>ère</sup> édition, Lausanne, Suisse, 1999.

- [30] **A. Tlemçani** " Contribution à l'application des commandes adaptatives par les systèmes flous à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur multicellulaire série ", thèse doctorat, Ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [31] **K.M. Passino** et **S. Yurkovich** " Fuzzy Control ", Addison Wesley Longman, Californie, 1998.