

## Notations et abréviations

<b>C</b>	Constante de Plank.
<b>C<sub>em</sub></b>	Le couple électromagnétique.
<b>C<sub>r</sub></b>	Le couple résistant.
<b>D</b>	Le rapport cyclique.
<b>EnR</b>	Les énergies renouvelables.
<b>F</b>	La fréquence.
<b>f<sub>s</sub></b>	La fréquence d'alimentation.
<b>g</b>	Le glissement.
<b>G, Gn</b>	L'ensoleillement et l'ensoleillement de référence (1000 W/m <sup>2</sup> ).
<b>GW</b>	Gigawatts.
<b>GWc</b>	Gigawatt crête.
<b>GUI</b>	Interface graphique d'utilisateur.
<b>Hg</b>	La hauteur géométrique.
<b>HMT</b>	La hauteur manométrique totale.
<b>I<sub>L</sub></b>	Le courant parcouru dans l'inductance.
<b>I<sub>ph</sub></b>	Le courant photonique généré dans les conditions (STC) (A).
<b>I<sub>sc</sub></b>	Le courant de court-circuit(A).
<b>K</b>	La constante de Boltzmann.
<b>K<sub>i</sub></b>	Le coefficient de température court –circuit.
<b>KW</b>	Kilowatts.
<b>KW/m<sup>2</sup></b>	Kilowatts par mette carrée.
<b>KM</b>	Kilomètres.
<b>M</b>	Le gain de conversion.
<b>M<sub>L</sub></b>	Indice de modulation.
<b>MPPT</b>	La recherche de point maximale de puissance.
<b>M<sub>r</sub></b>	Rapport de modulation.

$M_{sr}$	L'inductance mutuelle.
$MW$	Mégawatts.
$N_p$	Nombre de cellules en parallèle.
$N_s$	Nombre de cellules en série.
$N_{ss}$	Le niveau statique.
$N_d$	Le niveau dynamique.
$p$	Le nombre de pair de pôles.
$PIB$	Produit intérieur brut.
$P_{max,m}$	La puissance maximale mesurée.
$P_{max,e}$	La puissance maximale expérimentale.
$PSC$	Condition d'ombrage ou de déséquilibre.
$PV$	Photovoltaïque.
$R_s$	La résistance série.
$R_P$	La résistance shunt (parallèle).
$Si$	Le silicium
$T$	La température ( $^{\circ}\text{C}$ ).
$Te$	La période d'échantillonnage.
$Tr$	Constante de temps rotorique.
$Ts$	Constante de temps statorique.
$V$	La tension à la borne de la cellule (v).
$V_{an}$	La tension simple.
$V_{dc}$	La tension de bus contenu.
$V_{in}$	La tension d'entrée de convertisseur.
$V_{oc}$	La tension de circuit ouvert.
$V_o$	La tension de sortie de convertisseur.
$V_s$	La tension d'une phase statorique.
$V_{sn}$	La tension d'une phase statorique nominale.

$W/m^2$	Watts par mètre carré.
$\Omega$	La vitesse mécanique.
$\omega_s$	La pulsation statorique.
$\omega_{sl}$	La pulsation du glissement.
$\lambda$	La longueur d'onde.
$\varphi_M$	Le flux maximal.
$\Phi_s$	Le flux statorique.
$\sigma$	Coefficient de dispersion.

**Indice :**

$a, b, c$	Variables exprimées dans le repère fixe triphasé.
$d, q$	Variables exprimées dans le repère synchrone (d,q) tournant à la vitesse.
$\alpha, \beta$	Variables exprimées dans le repère fixe biphasé ( $\alpha, \beta$ )

## **Table des matières**

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b><i>CHAPITRE 1:</i></b>	
<b>ENERGIES RENOUVELABLES –ENERGIE DU SOLAIRE EN ALGERIE</b>	
1.1.    Introduction .....	4
1.2.    Définition .....	4
1.3.    Les différentes sources d'énergies renouvelables.....	5
1.3.1.    La bioénergie (biomasse) .....	5
1.3.2.    La méthanisation – le biogaz.....	5
1.3.3.    La géothermie.....	5
1.3.4.    L'énergie hydraulique .....	6
1.3.5.    Les éoliennes .....	6
1.3.6.    L'énergie solaire.....	6
1.4.    L'irradiation solaire.....	8
1.5.    La réalité et les perspectives de production d'énergie d'origine renouvelables en Algérie.....	8
1.6.    L'état de l'art:.....	12
1.6.1.    Etat de l'art de la modélisation mathématique de la cellule solaire .....	12
1.6.2.    Etat de l'art de l'optimisation des pompes photovoltaïques .....	14
1.7.    Conclusion.....	16
<b><i>CHAPITRE 2 :</i></b>	
<b>LE GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE</b>	
2.1.    Introduction .....	17
2.2.    Notions essentielles sur le gisement solaire .....	17
2.2.1.    Irradiation et le rayonnement solaire.....	17
2.3.    Modélisation de générateur photovoltaïque .....	19
2.3.1.    Les types de cellules.....	19
2.3.2.    Le Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....	20
2.4.    Modélisation de la cellule solaire.....	21
2.4.1.    Modèle à une seule diode .....	21

2.4.2. Modèle à deux diodes.....	23
2.4.3. Modèle a trois diodes (modèle proposé) .....	23
2.5. Modélisation cas d'une d'installation: avec ombrage partiel (PSC) .....	25
2.5.1. Définition .....	25
2.6. Création d'interface graphique sous Matlab et LABView .....	27
2.7. Résultats de simulation et discussion pour le modèle à trois diodes.....	28
2.8. Conclusion.....	30

**CHAPITRE 3:**

**MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION,  
MOTOPOMPE**

3.1. Introduction .....	32
3.2. Méthodes de pompages .....	32
3.2.1. Pompage « au fil du soleil » .....	32
3.3. Les différents composants du système de pompage PV: .....	33
3.4. Les différentes configurations .....	33
3.5. Modélisation du convertisseur continu/continu DC-DC .....	35
3.5.1. Modélisation du convertisseur abaisseur (Buck).....	35
3.5.2. Modélisation du convertisseur BOOST .....	38
3.5.3. Modélisation du Buck-Boost.....	39
3.6. Modélisation du convertisseur DC-AC .....	41
3.7. Choix et modélisation de moteur .....	43
3.7.1. Technologie des moteurs.....	43
3.7.2. Moteur à courant continu .....	43
3.7.3. Moteur à courant continu sans balais (BLDC) .....	43
3.7.4. Moteurs à courant alternatif .....	44
3.8. Modélisation de la pompe .....	56
3.8.1. Les types des pompes .....	57
3.9. Conclusion.....	62

**CHAPITRE 4:**

**Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque**

4.1. Introduction .....	63
4.2. Aperçu sur le problème .....	63

4.3.	Catégorisation des techniques de poursuite du point de puissance maximale .....	64
4.3.1.	Les algorithmes MPPT classiques.....	65
4.3.2.	Les algorithmes MPPT à base des techniques d'intelligence artificielle .....	67
4.3.3.	L'MPPT à convergence rapide (Fast MPPT) .....	72
4.4.	Résultats et discussion.....	73
4.5.	Conclusion.....	81

## **CHAPITRE 5:**

### **Optimisation du fonctionnement de la pompe photovoltaïque**

5.1.	Introduction .....	82
5.2.	Conception du système de pompage PV .....	82
5.3.	Commande de la pompe photovoltaïque entraînée par moteur à induction .....	85
5.3.1.	Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu.....	85
5.3.3.	Principe du contrôle direct de couple .....	86
5.3.4.	Contrôle de flux et de couple électromagnétique .....	87
5.3.5.	Estimation du couple et de flux .....	92
5.3.6.	Elaboration de la table de commutation .....	92
5.3.7.	Fréquence de commutation du correcteur de couple.....	94
5.3.8.	Raccordement du modèle à une charge mécanique.....	95
5.3.9.	Contrôle de vitesse avec DTC .....	95
5.4.	Résultats et discussion.....	96
5.5.	Conclusion.....	100
	<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	101

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1.1	Irradiation solaire mondiale moyenne annuelle [KW/m <sup>2</sup> ]......	8
Figure 2.1	Carte d'irradiation journalière moyenne en Algérie .....	9
Figure 3.1	Structure du parc de la production nationale en MW[2] .....	9
Figure 4.1	Objectifs du programme Algérien des énergies renouvelables [13].....	10
Figure 5.1	Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh.....	11

Figure 2.1 Analyse spectrale du rayonnement solaire [17]. . . . .	18
Figure 2.2 Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord. . . . .	19
Figure 2.3 La trajectoire du Soleil à Alger [43]. . . . .	19
Figure 2.4 Schéma de Principe d'une photopile ou cellule photovoltaïque [44]. . . . .	21
Figure 2.5 Modèle d'une cellule photovoltaïque. . . . .	22
Figure 2.6 Modèle à deux diodes de la cellule photovoltaïque . . . . .	23
Figure 2.7 Modèle à trois diodes de la cellule photovoltaïque. . . . .	23
Figure 2.8 Organigramme de la méthode d'extraction des paramètres . . . . .	25
Figure 2.9 Schéma descriptif d'une chaîne photovoltaïque sous conditions de déséquilibre. . . . .	26
Figure 2.10 Schéma descriptive d'installation des diodes bypass et anti-retour. . . . .	26
Figure 2.11 l'interface d'estimation des résistances $R_s$ et $R_p$ . . . . .	28
Figure 2.12 Cas étudié. . . . .	28
Figure 2.13 Interface de modélisation de chaîne sous cas de déséquilibre. . . . .	29
Figure 2.14 Interface d'estimation des résistances $R_s$ et $R_p$ par LabVIEW . . . . .	30
Figure 2.15 interface de modélisation de chaîne sous cas de déséquilibre LabVIEW . . . . .	30
 Figure3.1Schéma descriptif de système de pompage solaire [44]. . . . .	33
Figure3.2 Schéma descriptif de PVPS à courant continu [45]. . . . .	34
Figure3.3 Schéma descriptif de PVPS basé sur le moteur BLDC . . . . .	34
Figure3.4 Schéma descriptif de PVPS utilisant moteur à courant alternatif [37]. . . . .	34
Figure3.5 Schéma descriptive de PVPS utilisant moteur AC à un seul étage [38]. . . . .	35
Figure3.6 Convertisseur DC-DC série . . . . .	36
Figure3.7 Block de simulation du convertisseur Buck sous Simulink. . . . .	36
Figure3.8 Resultats de simulation du convertisseur Buck sous Simulink. . . . .	37
Figure3.9 La caractéristique $M=f(D)$ du convertisseur Buck . . . . .	37

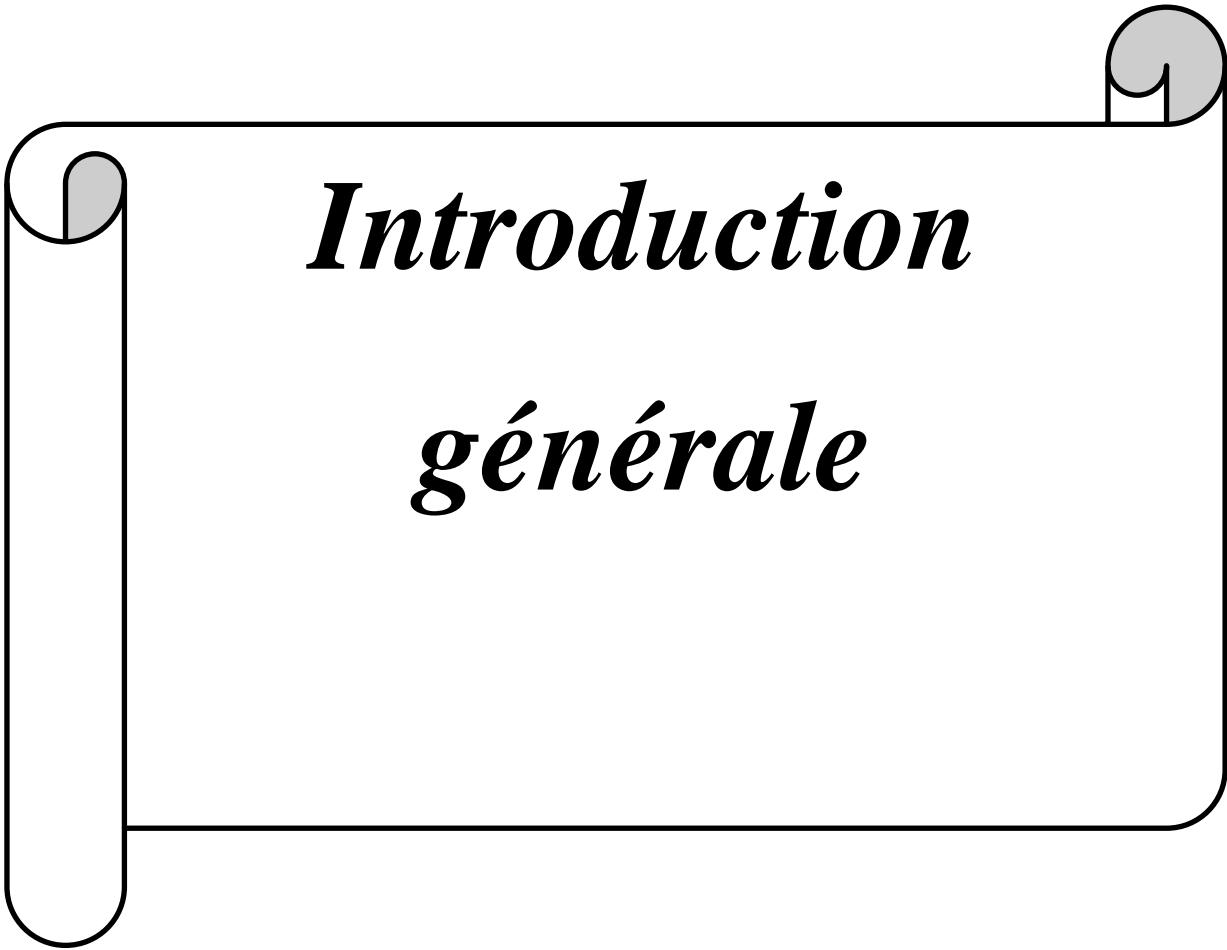
Figure3. 10 Convertisseur Boost .....	38
Figure3. 11 Tension de sortie du convertisseur BOOST .....	38
Figure3.12 Block de simulation du convertisseur Boost.....	39
Figure3.13 La caractéristique $M=f(D)$ de convertisseur Boost.....	39
Figure3. 14 Convertisseur Buck-Boost .....	40
Figure3. 15 Block Simulink de convertisseur Buck –Boost. ....	40
Figure3.16 Tension de sortie du convertisseur Buck-Boost. ....	40
Figure3.17 La caractéristique $M=f(D)$ du convertisseur Buck–Boost . ....	41
Figure3. 18 Schéma de l'onduleur triphasé.....	41
Figure3.19 Passage du système triphasé au système biphasé et inversement. ....	48
Figure3. 20 Définition des axes réels du moteur asynchrone triphasé par rapport aux différents référentiels .....	50
Figure3.21 Structure en schéma bloc de la MAS .....	55
Figure3.22 Fonctionnement à vide et en charge de la MAS. ....	56
Figure3.23 Hauteur manométrique total. ....	57
Figure3.24 Caractéristique couple vitesse A-Caractéristique Débit vitesse d'une pompe volumétrique B. ....	59
Figure3.25 Cheminement de l'écoulement dans une pompe centrifuge à étages multiples. ...	59
Figure3.26 Caractéristiques couple- vitesse A, Débit-vitesse B pompe centrifuge. ....	61
Figure3.27 Caractéristique $H=f(Q)$ de la pompe centrifuge .....	62
Figure4.1Schéma montrent l'importance de convertisseur MPPT. ....	63
Figure4. 2 Système photovoltaïque avec adaptateur de charge.....	64
Figure4.3 Schéma de principe de contrôle MPPT.....	64
Figure4.4 Caractéristique P -V d'un panneau solaire. ....	65
Figure4.5 Organigramme de la méthode MPPT P&O. ....	67
Figure4.6 Organigramme de la méthode Inc.Cond. ....	68

Figure4.7 Déférentes étapes d'un régulateur flou.....	71
Figure4.8 Schéma générale des algorithmes basé sur les réseaux de nouerons.....	71
Figure4.9 Résultats de simulation de l'algorithme P&O MPPT sous éclairement variable....	73
Figure4.10 Résultats de simulation de l'algorithme Inc-Cond MPPT sous éclairement variable .....	74
Figure4. 11 Inc-Cond sous différent niveaux d'éclairement.....	74
Figure4.12 Evolution dGet T durant une demi-journée.....	75
Figure4.13 P&O MPPT sous une variation lente de G et T.....	75
Figure4.14 Inc-Cond MPPT sous une variation lente de G et T.....	76
Figure4.15 Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques de l'erreur normalisée et de la variation de l'erreur normalisée.....	78
Figure4.16 Résultats de simulation de MPPT flou. ....	79
Figure4.17 Les résultats de la simulation de MPPT rapide sous variation du rayonnement solaire. ....	80
Figure4.18 Résultat de la simulation de l'MPPT classique.....	80
 Figure 5.1 Caractéristiques P-V du GPV. ....	83
Figure 5.2 Schéma du système. ....	84
Figure 5.3 caractéristique H(Q) des pompes disponibles.....	85
Figure 5.4 Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu. ....	86
Figure 5.5 Schéma de principe du contrôle direct de couple. ....	87
Figure 5.6 Evolution du vecteur flux stator[59]. ....	89
Figure 5.7 Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux statorique [50].....	89
Figure 5.8 Comparateur à hystérésis à trois niveaux utilisés pour le réglage. ....	91
Figure 5.9 Synoptique de commande de la stratégie DTC selon I. Takahashi [22].....	93
Figure 5.10 Choix de vecteur tension [50]. ....	94
Figure 5.11 Forme typique du couple [59], [60]. ....	94

Figure 5.12 Vitesse de référence optimale (rd/s) en fonction de variation d'éclairement. ....	96
Figure 5.13 Le système étudié.....	96
Figure 5.14 Schéma global du système. ....	97
Figure 5.15 Résultats de simulation (Grandeurs MAS). ....	98
Figure 5. 16Résultats de simulation (Grandeurs pompe.) .....	99
Figure 5. 17 L'évolution de debit et puissance de la pompe durant une journée.....	99

# **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau2.1 Technologies de cellule PV .....	20
Tableau4.1Modifications de la tension et du courant PV lors du changement d'irradiation solaire et de la résistance de charge.....	72
Tableau4.2 Table d'inférence de contrôleur flou.....	78
Tableau 5.1Table de commutation généralisée.	93
Tableau 5.2 Table de commutation de la commande DTC [15,16,17].	95



# *Introduction générale*

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

### **Introduction générale**

#### **Généralité:**

L'amélioration de la qualité de vie et l'avancement de l'industrie dans de nombreux pays ont considérablement aidé à augmenter la demande d'énergie dans le monde [1]. Cette demande est sans cesse croissante, ce qui a augmenté l'écart entre l'énergie produite et la demande. En plus de cela, les ressources en combustible fossile sont en épuisement constant. De même que, la pollution de l'environnement dans le monde est accrue grâce à l'utilisation des méthodes classiques de production d'énergie. Ces raisons encouragent les chercheurs à découvrir des sources d'énergie alternatives, renouvelables et durables[2]. L'énergie solaire est considérée comme source d'énergie renouvelable respectueuse de l'environnement . Dans le même temps, la technologie photovoltaïque (PV) devient de plus en plus compétitive car elle inépuisable, et sa technologie est maîtrisée de plus en plus surtout avec le développement des semi-conducteurs et le rendement croissant des cellules photovoltaïques.

#### **Historique :**

L'histoire du photovoltaïque remonte au XIXe siècle. Le premier appareil fonctionnel, intentionnellement fabriqué PV a été par Fritts [3] en 1883. La génération moderne de photovoltaïque a débuté en 1954 lorsque des chercheurs de Bell Labs aux États-Unis ont découvert que les diodes de jonction PN génèrent une tension lorsque les lumières de la chambre étaient allumées, Enfin, en octobre 1973, le premier embargo mondial sur le pétrole a été institué par les producteurs de pétrole du Golfe Persique. Cela a envoyé des ondes de choc dans le monde industrialisé. Plusieurs gouvernements ont lancé des programmes visant à encourager l'énergie solaire, inaugurant l'ère moderne du photovoltaïque et donnant un nouveau sentiment d'urgence à la recherche photovoltaïque pour les applications terrestres.

Les projections mondiales, les plus courantes prévoient un marché annuel entre 9 et 21 GWc pour 2020. Face à cette croissance, la recherche dans ce domaine s'oriente sur deux axes essentiels: augmenter le rendement des cellules, tout en diminuant les coûts de production.

#### **Objectifs de la recherche**

Les objectifs de la présente thèse étaient l'amélioration des techniques d'optimisation qui permet de maximiser le rendement global du système de pompage alimenté par une source

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

photovoltaïque.

### **Organisation de la thèse:**

Ce travail est subdivisé en cinq chapitres:

Le premier chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur les ressources énergétiques renouvelables et systèmes de production décentralisés d'électricité d'origines renouvelables existant en Algérie et les perspectives de leur développement. Malgré les ressources solaires immenses le parc du photovoltaïque est pratiquement insignifiant .Nous avons orienté notre recherche dans le domaine du photovoltaïque partant du principe que cette forme d'énergie présente un avenir certain ; au vu de la crise énergétique et des perspectives visées par la nouvelle politique du pays.

Dans le second chapitre des notions essentielles sur le gisement solaire sont présentées, ainsi la modélisation et la simulation numérique des caractéristiques et de la performance des générateurs photovoltaïques autonomes, commençant par la cellule pour aboutir au générateur GPV complet en utilisant les outils de simulation : Matlab/Simulink et LABView qui permettent de définir les principales caractéristiques des systèmes photovoltaïques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des éléments suivant:

1. Le convertisseur DC-DC (différents types)
2. Le convertisseur DC-AC
3. Le moteur à induction (MAS)
4. La pompe (deux types)

La modélisation et la simulation dans l'environnement Matlab/Simulink est ces éléments dans différentes configurations à donner lieux au choix du système avec deux étages d'adaptation avec le moteur à induction accouplés à la pompe centrifuge.

En outre, une classification des techniques d'algorithme de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) est présentée avec suffisamment de détails dans le quatrième chapitre.

1. Méthode P&O
2. Méthode Inc-cond (classique et amélioré).
3. Méthode à base de la logique floue.

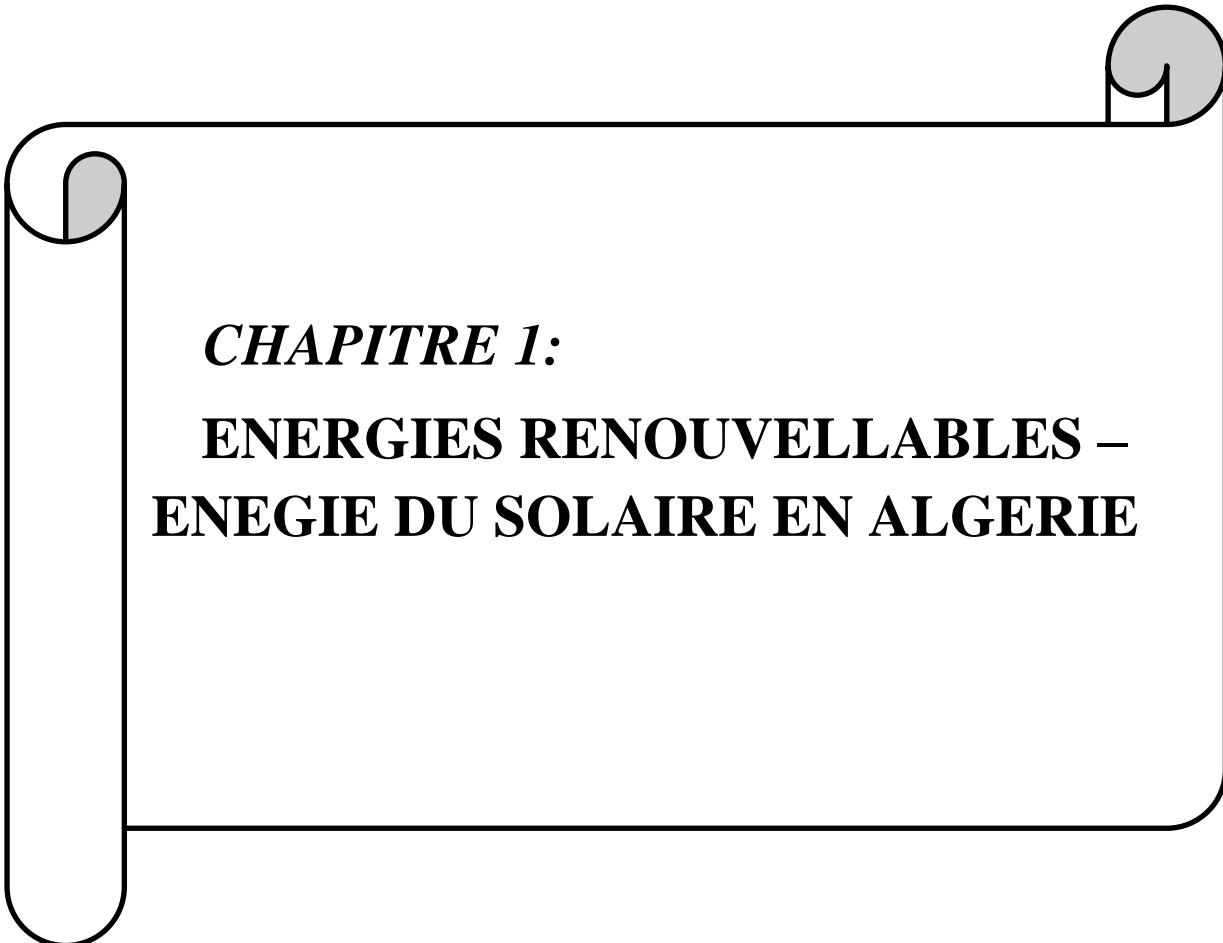
On a privilégié la commande MPPT flou au vu de ses avantages.

Dans le dernier chapitre on s'intéresse à l'optimisation de fonctionnement de la motopompe

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

photovoltaïque, la technique MPPT flou et la commande directe de couple(DTC) du moteur, pour assurer un fonctionnement optimal de l'ensemble GPV-Motopompe.



***CHAPITRE 1:***

**ENERGIES RENOUVELABLES –**

**ENERGIE DU SOLAIRE EN ALGERIE**

### **1.1. Introduction :**

Le secteur économique de l'énergie en Algérie occupe une place prédominante dans l'économie de l'Algérie : les hydrocarbures à eux seuls représentent 30 % du PIB, 60 % des recettes du budget et 95 % des recettes d'exportation [4].

L'Algérie est le 18<sup>ème</sup> producteur de pétrole, le 9<sup>ème</sup> producteur de gaz naturel et le 8<sup>ème</sup> exportateur de gaz naturel au monde.

Cependant, l'État algérien commence à envisager des solutions économiques et écologiques en investissant dans les énergies nouvelles et renouvelables.

Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE), l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030 [5].

Le développement de ces projets sera réalisé par étapes, une première étape :

- Première étape de 2011 et 2013, a été consacrée à la réalisation de projets es différentes techniques disponibles.
- la seconde étape, en 2014 et 2015, a été marquée par le début du déploiement du programme;
- la dernière étape, de 2016 à 2030, sera celle du déploiement à grande échelle.

Le but de ce chapitre est donc de donner quelques notions et définitions sur les différentes sources d'énergies renouvelables, un bref aperçu sur ces énergies en général, et plus en détail sur l'énergie solaire.

Les données statistiques sur les projets installés et autres prévisionnels seront abordées.

### **1.2. Définition :**

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent[6] .

Cette définition s'appliquant sur le cas de l'énergie du soleil, du vent, des courants d'eau, de la géothermie et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

### **1.3. Les différentes sources d'énergies renouvelables:**

#### **1.3.1. La bioénergie (biomasse)**

La bioénergie est considérée comme une voie agréable pour les énergies renouvelables surtout que les sources d'énergie traditionnelle qui convient des combustibles fossiles commencent à se raréfier [7].

On appelle biomasse l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale : bois, fourrage, déjections animales, déchets agricoles. La combustion de la biomasse est source d'énergie : elle permet de produire de la chaleur (chaudière à bois par exemple) et de l'électricité. La biomasse peut également être utilisée pour les transports avec les biocarburants (à base d'huiles végétales notamment) ; elle est caractérisée par son coût faible.

Sa conversion en éthanol à usage carburant devrait permettre de subvenir à une partie des besoins énergétiques, couverts jusqu'à présent essentiellement par les produits dérivés du pétrole, tout en générant de nouvelles opportunités pour le monde agricole.

La biomasse est une des sources les plus prometteuses d'énergies renouvelables, mais demande davantage de recherches pour prouver que le développement de la production d'électricité à partir de biomasse sera à la fois techniquement et économiquement viable.

#### **1.3.2. La méthanisation – le biogaz**

La méthanisation est un phénomène biologique par lequel la matière organique est transformée en biogaz par des bactéries vivantes en l'absence d'oxygène [6].

Le biogaz est composé de méthane principalement, de gaz carbonique et de traces d'autres gaz. Il peut être employé à l'état brut sur des chaudières, groupes électrogènes, générateurs d'air chaud.

Le biogaz est aussi utilisable, après épuration aux normes du gaz naturel, comme carburant automobile.

#### **1.3.3. La géothermie**

La géothermie ou 'chaleur de la terre' se présente sous forme de réservoirs de vapeur ou d'eaux chaudes ou encore de roches chaudes. Lorsque le réservoir géothermique est à une température modérée, cette ressource est exploitée pour de la production de chaleur distribuée par un réseau de chaleur. Elle est particulièrement développée dans les bassins aquitain et parisien pour le chauffage urbain. Lorsque la température du réservoir géothermique est plus

élevée et permet de produire de la vapeur, il est possible de produire de l'électricité.

En 1996 l'énergie géothermique se place au premier rang avec 79,6 % de la production électrique mondiale évaluée [8].

La géothermie se place au premier rang parmi les énergies renouvelables avec une production électrique représentant plus de 79 % de la production globale. Les travaux sur l'évaluation du potentiel géothermique à travers l'élaboration de l'atlas géothermique du Nord algérien nous permettent de dresser des cartes préliminaires de l'inventaire des sources thermiques et une esquisse du gradient géothermique.

Les sources thermiques représentent à elles seules plus de 14 MWh du potentiel existant [9].

#### **1.3.4. L'énergie hydraulique**

Hydroélectricité, l'énergie hydraulique ou de la puissance de l'eau est le pouvoir qui est dérivé de la force ou de l'énergie de l'eau en mouvement, qui peut être exploité à des fins utiles [9].

#### **1.3.5. Les éoliennes**

Par définition l'énergie éolienne est l'énergie que l'on peut extraire du vent et transformer en électricité, elle constitue un supplément intéressant à l'énergie de base fournie par les centrales thermiques et hydrauliques.

L'histoire de l'énergie éolienne retour à la première tentative à raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957. Un aérogénérateur de 100 kW est installé sur le site des Grands Vents (Alger) : conçu par l'ingénieur français ANDREAU [10].

Une première ferme éolienne de 10 MW de puissance sera implantée à Adrar. Le ministère de l'Énergie et des mines a projetées, dans son programme de développement des énergies Renouvelables, d'installer sept autres centraux éoliens d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme [11], pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030 [12].

Ces systèmes sont actuellement développés à l'échelle commerciale partout dans les pays industrialisés et en développement.

#### **1.3.6. L'énergie solaire**

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre (150 \* 106 km) [13]; La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à 90\*1015 GW.

La production d'électricité à partir l'énergie du soleil se devise à deux voix:

### **1.3.6.1 Energie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des turbo-alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques.

La radiation directe du soleil est concentrée par un collecteur sur un échangeur où elle est cédée à un fluide, soit vaporisé directement, soit transportant la chaleur à un générateur de vapeur. Tous les systèmes ont en commun un certain nombre d'organes : un collecteur qui concentre la chaleur, un liquide ou un gaz caloporteur qui la transporte jusqu'à un point d'extraction, un évaporateur, un condenseur, une turbine et un alternateur.

Deux projets pilotes de centrales thermiques à concentration avec stockage d'une puissance totale d'environ 150 MW chacune seront lancés sur la période 2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de Hassi R'Mel d'une puissance de 150 MW, dont 25 MW en solaire [12].

Sur la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1 200 MW devraient être mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030[5].

### **1.3.6.2 Energie solaire photovoltaïque**

Convertis directement les rayonnements lumineux en électricité.

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [14].

#### **Avantages de l'énergie photovoltaïque [3]:**

- Aucune émission, combustion ou des déchets radioactifs (ne contribue pas perceptible au changement climatique mondial ou de l'air / pollution de l'eau).
- Faibles coûts d'exploitation (pas de carburant).
- Pas de pièces mobiles (long durée d'utilisation).

- Pas de corrosion ou les questions de sécurité à haute température (fonctionnement à température ambiante)
- Haute fiabilité des modules solaires(les garanties des fabricants de plus de 30ans).
- Production annuelle assez prévisible.
- Modulaires (petits ou grands incrément).
- Peut-être intégré dans des structures nouvelles ou existant de construction..
- Peut-être installé très rapidement à presque n'importe quel point d'utilisation
- Le secteur économique du photovoltaïque autonome n'est pas encore totalement exploité.

**Inconvénients de l'énergie photovoltaïque [3]:**

- Les coûts de fabrication élevés.
- Production horaire ou quotidienne imprévisible.

La carte d'irradiation solaire annuelle mondiale moyenne, montre que l'Algérie est située dans la zone optimale des gisements solaires i.e dans la zone sud, où la moyenne annuelle est entre 2200 et 2500 KW/m<sup>2</sup> Figure 1.1.

**1.4. L'irradiation solaire**

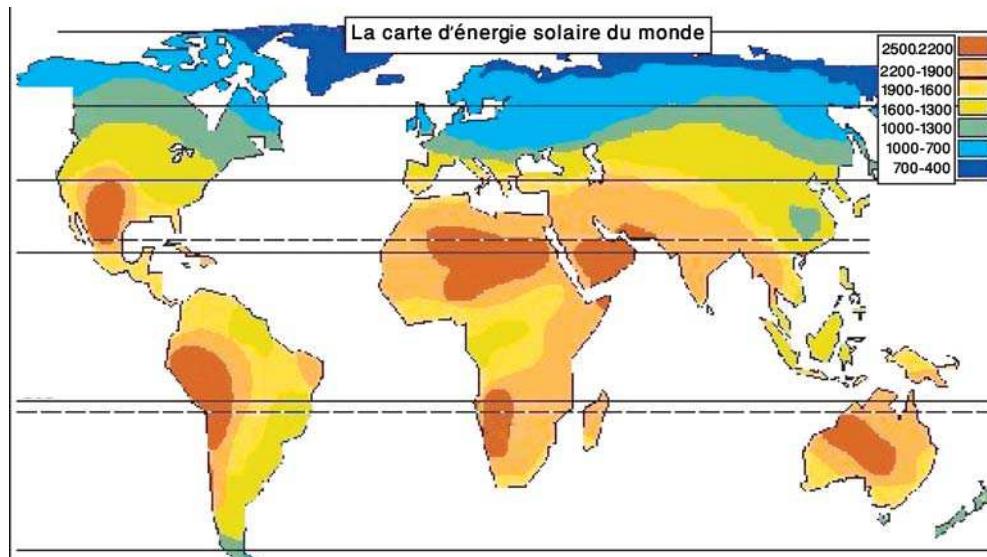


Figure 1.1 Irradiation solaire mondiale moyenne annuelle [KW/m<sup>2</sup>].

**1.5. La réalité et les perspectives de production d'énergie d'origine renouvelables en Algérie :**

L'Algérie est le plus grand pays en Afrique, plus de 80% de sa surface est le désert du Sahara, l'Algérie présente donc le plus grand gisement solaire en Afrique et aussi parmi les plus

grands gisements dans le monde Figure 1.2.

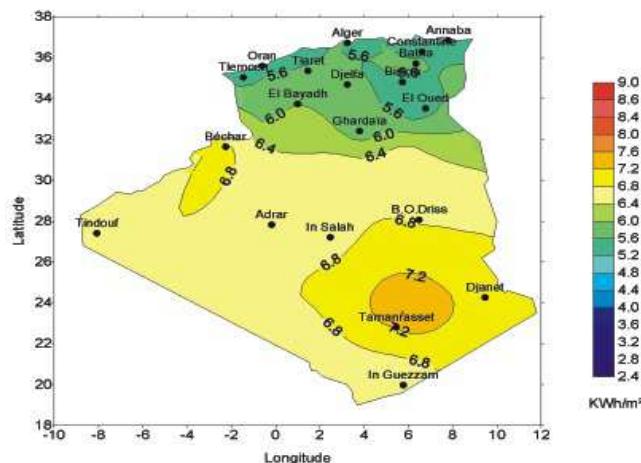


Figure 2.1 Carte d'irradiation journalière moyenne en Algérie

Le gouvernement algérien a adopté fin février 2015 son programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030. Une première phase du programme, démarrée en 2011, avait permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national. Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 : Figure 1.3

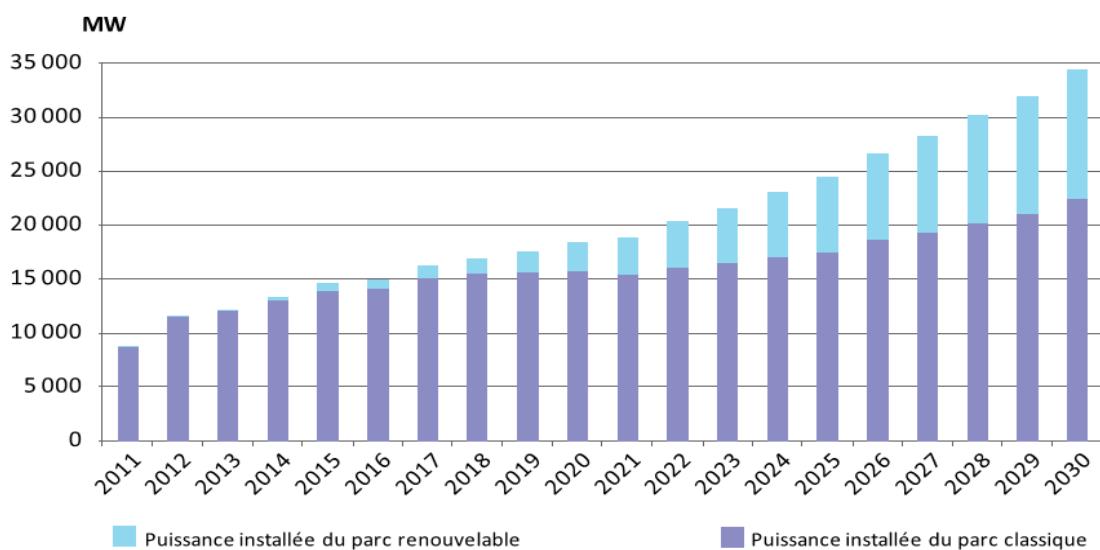


Figure 3.1 Structure du parc de la production nationale en MW[5].

Comme montre la Figure 1.4 l'énergie solaire photovoltaïque est la source d'énergie la plus importante.

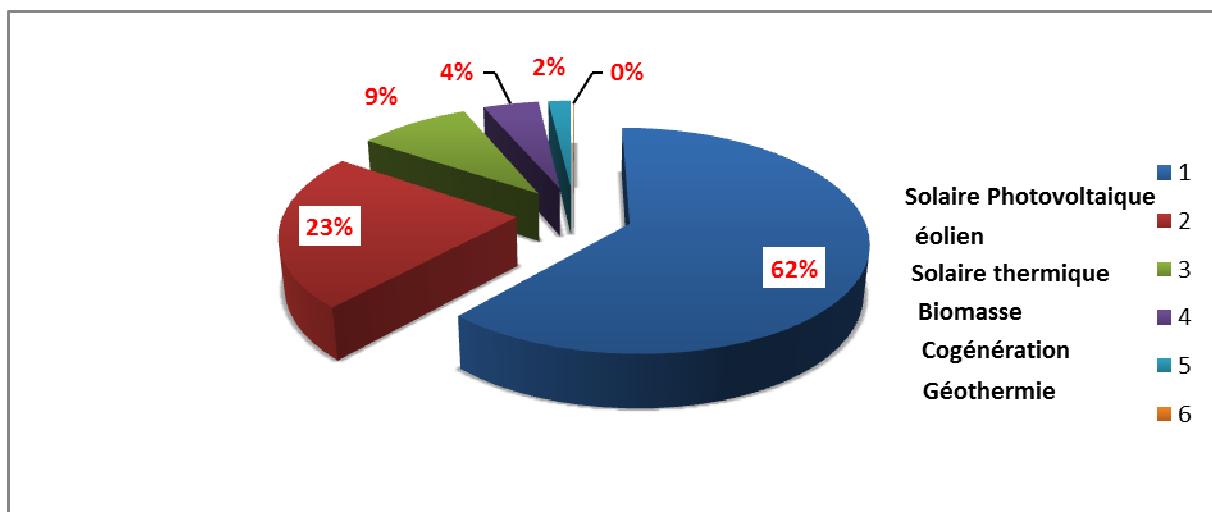


Figure -4.1 Objectifs du programme Algérien des énergies renouvelables [14].

- 13 575 MWc de solaire photovoltaïque.
- 5 010 MW d'éolien.
- 2 000 MW de solaire thermodynamique (CSP).
- 1 000 MW de biomasse (valorisation des déchets).
- 400 MW de cogénération.
- 15 MW de géothermie.

Le total s'élève ainsi à 22 GW, dont plus de 4,5 GW doivent être réalisés d'ici à 2020. En raison de leurs coûts encore élevés, les centrales hélio-thermodynamiques ne seront véritablement développées qu'à partir de 2021. Ce programme doit permettre à l'Algérie de produire 27 % de son électricité à partir des énergies renouvelables d'ici à 2030, afin d'épargner ses réserves en gaz.

La réalisation du programme est ouverte aux investissements publics et privés . Des tarifs d'achat garantis sur 20 ans ont été mis en place pour les filières photovoltaïque et éolienne. Les projets des autres filières seront financés à hauteur de 50 % à 90 %, taux variable selon la technologie et la filière, par le fonds national des énergies renouvelables et cogénération (FNERC), alimenté par un prélèvement de 1 % sur la redevance pétrolière.

Il est prévu que les parcs de production d'énergie à partir des sources renouvelables aient presque 40% de l'énergie totale produite Figure 1.5 est donc l'enivrent de 60 térawatts.

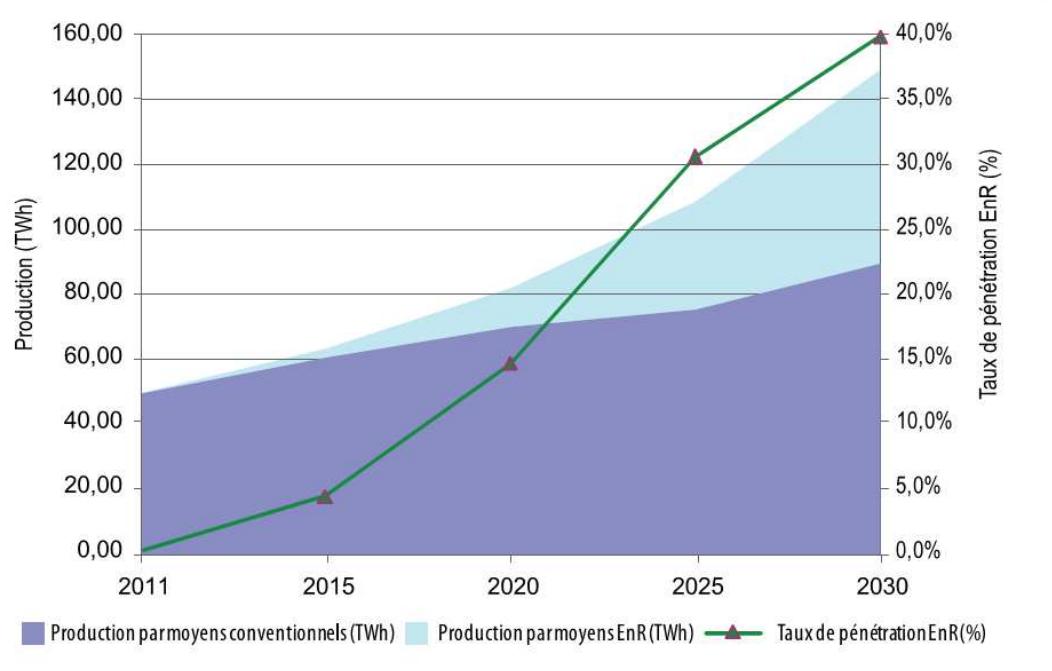


Figure-5.1 Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh

Dans le cadre de la concrétisation du programme national des énergies renouvelables, un projet de 400MW en photovoltaïque, représentant la première tranche de ce programme a été lancé durant le 2ème semestre de l'année 2013. Faisant partie du programme complémentaire de production de l'électricité, prévu pour l'été 2014, ce projet a bénéficié de mesures dérogatoires d'urgence de passation, d'exécution, de règlement et de contrôle des marchés.

Les contrats de réalisation y afférents ont été signés le 04 décembre 2013. Ce projet consiste en la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, dans la région des hauts plateaux : Ain Azel (Sétif), Ras el oued (B.B Arreridj), Oued El Ma (Batna), Chelghoum El Aïd (Mila), Oued El Kebrit (Souk Ahras), Ain El Melh (M'sila), Ain El Ibil (Djelfa), El Khoung (Laghouat), Hdjiret (Ouargla), Ain Skhouna (Saïda), Sedrat

Le ghzel (Naâma), Labiodh Sid Cheikh (El Bayadh) et Telagh (Sidi Belabbes) ; et dans la région du sud ouest : Ouadef, Zaouyet Kounta, Timimoun, Kabertene, Reggan, Adrar et Ain Salah pour une puissance globale de 318MW ; ainsi que dans la région du grand sud (Djanet, Tindouf et Tamanrasset) pour une puissance de 25MW.

"L'Algérie adopte la stratégie d'énergie renouvelable comme priorité nationale. A cet effet, 380 mégawatts énergies renouvelable sont produits par l'Algérie la fin 2016"[15].

L'Algérie investit environ 60 milliards de dollars dans le domaine des énergies renouvelables dans ses perspectives pour 2030", investissements allant jusqu'à 70 milliards de dollars seront

alloués pour la production de 12.000 mégawatts d'énergie solaire dirigés vers le marché intérieur. Il ya lieu de rappeler que 14 centrales électriques photovoltaïques d'une capacité installée de 268 mégawatts (MW) ont été mises en service en 2015,

C'est dans cette même optique, et dans le cadre du programme national de diversification des sources énergétiques et de développement des énergies renouvelables et propres, qu'une station d'énergie solaire photovoltaïque à Oued Keberit wilaya de SOUK AHRAS a été réceptionnée, la semaine dernière. La réalisation de cette station, première du genre dans la wilaya de Souk-Ahras, a été confiée à une entreprise chinoise spécialise [15].

## **1.6. L'état de l'art:**

### **1.6.1. Etat de l'art de la modélisation mathématique de la cellule solaire**

Afin d'estimer le comportement électrique des générateurs photovoltaïques tout en respectant la variation des paramètres environnementaux tels que la température et l'éclairement. Il y a plusieurs simulateurs numériques développés dans la littérature:

Walker [16] a proposé un modèle basé sur un circuit équivalent de la cellule photovoltaïque à une seule diode, ce modèle utilise l'équation Shokley pour modéliser la diode et une résistance (série) $R_s$  et il a été présenté sous forme fichier MATLAB script pour les utilisateurs et les développeurs. Chenni *et al*[17] a étudie un processus de modélisation et de configuration d'un modèle de simulation numérique en mesure de démontrer les caractéristiques de sortie de la cellule en matière de rayonnement et les changements de température, et a été testé pour simuler les trois types populaires des panneaux photovoltaïques construits avec des matériaux différents, Sera *et al* dans[18]ont présenté méthode de construction d'un modèle pour les panneaux PV à l'aide du modèle à une seule diode mais à cinq paramètres, Ce modèle prend en compte la résistance série et la résistance parallèle (shunt) du panneau ,Tsai et al [19]ont développé un modèle photovoltaïque généralisé utilisant environnement Matlab/Simulink, qui peut être représentatif pour la cellule PV, module, et le réseau et pour une utilisation facile sur la plateforme de simulation conçu avec une icône conviviale et une boîte de dialogue comme bibliothèques de blocs Simulink . Cela rend le modèle PV généralisé facilement simulé et analysé en conjonction avec l'électronique de puissance pour le suiveur point de puissance maximale, ce modèle le plus couramment utilisé dans la littérature[20]–[22].

Villalva *et al* dans [22]ont présente une approche globale de la modélisation et la simulation

des générateurs photovoltaïques, simple, rapide, précis et facile à utiliser mais il présentait pour le cas fonctionnement sous cas d'irradiation uniforme uniquement.,Ishaque *et al*[23]a proposé un simulateur (Simulink compréhensive) basé sur un circuit équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque, ce simulateur est caractérisé par leur temps exécution réduit par rapport aux autres simulateurs, Shannan *et al*[24]ont fait une comparaison entre le modèle à une seule diode et le modèle à deux diodes du GPV, la principale préoccupation de ce travail est la précision, le nombre de paramètres inconnus, et le temps d'exécution pour les paramètres inconnus.

Un nouveau modèle de circuit équivalent en utilisant trois diodes est présenté par Ramana *et al*[25], ce modèle a été proposée pour une meilleure explication des données expérimentales , par une comparaison avec les modèles à une diode ou deux diodes existants dans la littérature , modèle en trois diode avec  $n_1 = 1$ , les valeurs  $n_2 = 2$  estimées de ( $n_3 > 2$ ) ( $n_1, n_2, n_3$  sont les facteurs d'idéalité des diodes) s'est révélé être un meilleur modèle pour distinguer clairement les différentes composantes de courant de diode dans des échantillons de cellules solaires industrielles.

D'autres approches sont proposées dans la littérature, qui tentent d'éviter la modélisation détaillée et laborieuse à base de circuits de l'ensemble de l'installation. Ces méthodes mettent l'accent sur des points de fonctionnement spécifiques présentant un intérêt particulier, comme le modèle simplifie à l'aide des caractéristiques I-V ou P-V.

L'approche proposée par Batzelis et al dans [20]est un simulateur de GPV précis, prend en considération les paramètres suivants:

le courant de GPV, les courantes de saturation des diodes ( $I_{O1}, I_{O2}$ ), les facteurs d'idéalité des diodes ( $a_1, a_2$ ), la résistance série ( $R_s$ ) et la résistance shunt ( $R_p$ ) ,les performances du simulateur développées sont vérifiées par l'interface avec les convertisseurs d'électronique de puissance et avec le contrôleur MPPT, celui-ci dispose d'une flexibilité suffisante pour simuler différentes configurations de panneaux photovoltaïques avec les connexions série / parallèle. La robustesse du simulateur proposé est démontrée dans les conditions d'ombrage partiel.

Les paramètres utilisés dans les modèles électriques de la cellule photovoltaïque sont les paramètres présentés par les constructeurs dans les catalogues ,des cellules ou des modules ainsi que les paramètres extraits ou estimés à partir le catalogue,dans cette partie, on présente synthèse de différentes méthodes de détermination de ces paramètres., leurs

avantages et leurs inconvénients.

Les recherches ont donné une grande importance à la détermination du terme de résistance série parce que dans les premiers modèles la résistance série est la seule inconnue, ce terme (la résistance série) s'avère être un paramètre important, surtout pour les irradiations et températures loin de la condition de référence(STC), et ce qui donne une forme plus précise entre le point de puissance maximale et la tension en circuit ouvert [16]; la méthode proposée est basée sur une recherche itérative pour la valeur de  $R_s$  qui permet d'obtenir une meilleure précision. Le procédé utilise le coefficient de température de la tension circuit ouvert de  $V_{oc}$ , souvent fournies par le constructeur.

Ramana *et al* a développé un procédé de calcul adaptatif de la résistance série pour augmenter la précision des paramètres de circuit et permet de réduire le temps de calcul simulation [26].

D'autres méthodes numériques telles que la méthode Newton-Raphson [16], [22], [23], la méthode de Gauss–Seidel[21], ainsi que les méthodes basées sur les techniques d'intelligence artificielle telles que , le PSO (particle swarm optimization en anglais ) ou l'optimisation par essaims particulaires [25],[27]les algorithmes génétiques (GA)et les algorithmes évolutionnaires (EA) [26], [27] ont été développées pour la détermination des paramètres de modélisation.

Les performances de chacune de ces méthodes sont évaluées en fonction de plusieurs facteurs:

- la précision et la cohérence de la solution.
- la vitesse de convergence .
- l'efficacité de calcul et le nombre de paramètres de contrôle.

Nous avons estimé que parmi les méthodes numériques, la méthode de Newton-Raphson est caractérisée par son exactitude [28], nous avons opté pour cette méthode pour le calcul de notre modèle par la suite.

### **1.6.2. Etat de l'art de l'optimisation des pompes photovoltaïques**

Dans la littérature, il y a beaucoup de recherches développées autour de l'optimisation du contrôle des systèmes de pompage PV, citons l'étude comparative entre le système de pompage directement couplé et le système avec un seul étage d'adaptation[29], cette étude montre que l'efficacité du système à un seul étage d'adaptation atteint 91%, ces systèmes généralement utilisent les moteurs à courant continu pour entraîner la pompe, ce type d'entraînement est caractérisé par des inconvénients significatifs du remplacement des balais

de moteur dans des puits profonds ou la maintenance de moteur est très difficile [30]; Belarbi *et al* [31] ont remplacé le moteur à courant continu par le moteur asynchrone. Actuellement la technique de deux étages d'adaptation (deux convertisseurs) [31], [32]–[34] est la plus utilisée, car cette technique peut contrôler l'énergie produite par le générateur photovoltaïque indépendamment de contrôler de motopompe.

Le contrôle du premier étage d'adaptation (le convertisseur DC-DC) utilise généralement un contrôle MPPT, le convertisseur Buck est la meilleure solution dans le cas du moteur à courant continu [35], la topologie Boost est préférée dans la configuration quand nous avons un deuxième étage d'adaptation, car il fournit la tension de sortie plus grande que la tension de sortie de GPV [31] les deux topologies précédentes sont les plus utilisées, on citera aussi, la topologie Buck-Boost [35], la topologie Push-Pull est utilisé par [33].

Le contrôle du deuxième étage d'adaptation (convertisseur DC-AC) a connu un grand développement comme suit:

On parle alors de techniques de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

- MLI sinusoïdale [36], Commande scalaire.
- la commande vectorielle par orientation de flux rotorique direct et indirect [37].
- Le contrôle direct de couple.

Betka *et al* [38] propose une méthode pour l'optimisation et le contrôle du moteur à induction, son principe basé sur la détermination de la valeur optimale de l'indice de modulation de l'onduleur, ainsi que le courant et la pulsation de glissement afin d'améliorer la quantité d'eau pompé.

D'autres approches s'orientent vers le développement des méthodes efficace et des approches de contrôle de la vitesse du moteur en fonction de variation des paramètres climatique afin d'utiliser le maximum la puissance produite par le GPV par l'estimation de la vitesse de référence optimale, cette idée est réalisée selon deux méthodes :

La première est réalisée par Mansouri *et al* [39], se base sur le calcul de la vitesse de référence pour un fonctionnement optimal du GPV ce qui assure la puissance optimale de sortie vers le moteur à [33] induction.

La seconde méthode [40] est basée sur la détermination de la vitesse de référence optimale en fonction de l'irradiation solaire et le niveau d'eau dans le réservoir.

Vitorino *et al* [33] propose l'amélioration directe de la puissance délivrée et le rendement de moteur par la nécessité d'économiser l'énergie, qui peut être réalisée par l'optimisation de tension de bus continu et l'application des notions de P&O MPPT pour générer la référence de flux rotorique.

### **1.7. Conclusion**

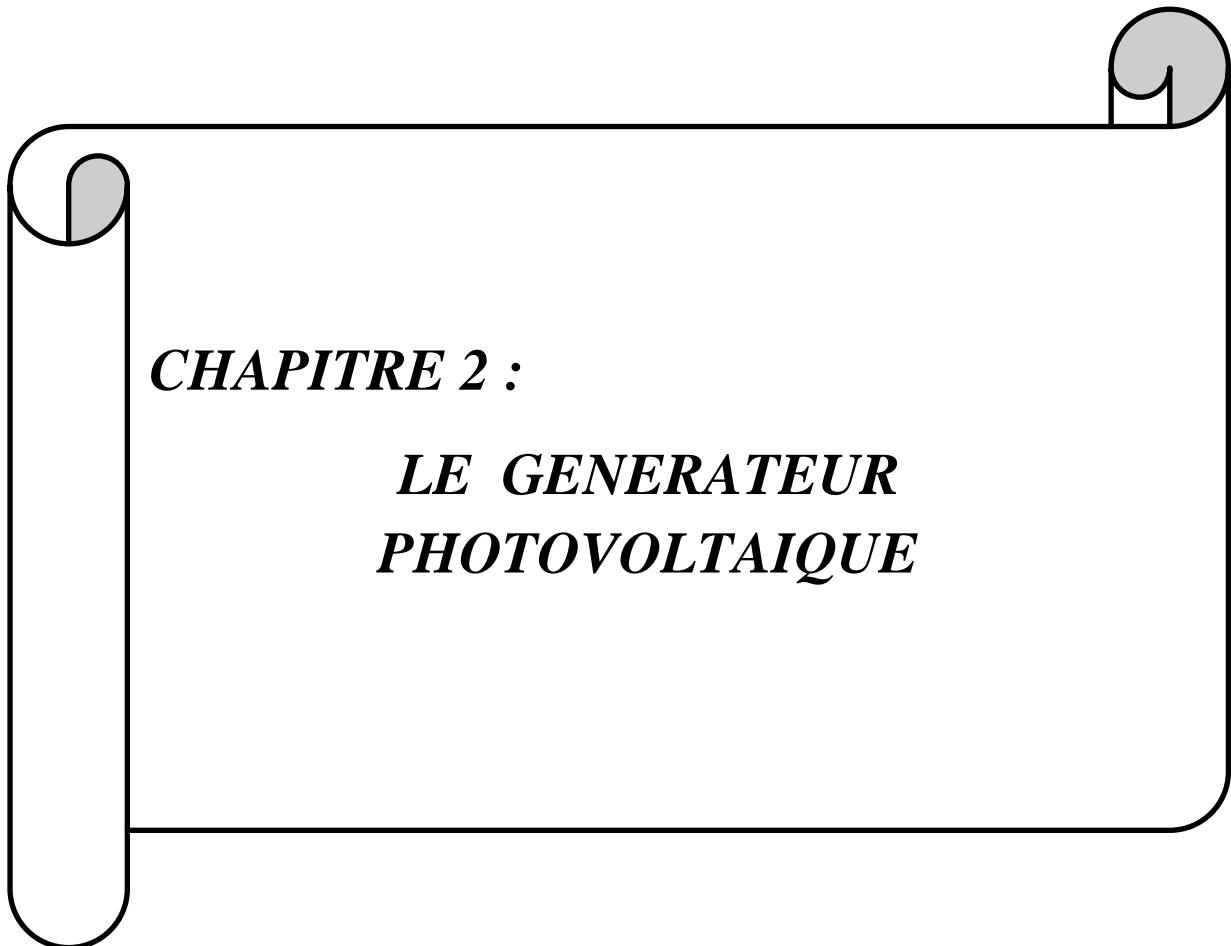
L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle.

Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

Une présentation des statistiques sur la consommation, la production et le potentiel énergétique en Algérie a été développée tout au long de ce premier chapitre, ainsi que le développement du photovoltaïque et les perspectives envisagées par le programme national. Ces statistiques montrent les rôles importants que jouent les sources d'énergie d'origines renouvelables en générales et l'énergie solaire en particulier pour s'assurer sa sécurité énergétique.

Pour cela nous orienterons notre recherche, vers l'utilisation de l'énergie solaire comme source d'alimentation pour l'entrainement des systèmes électromécaniques et précisément les systèmes de pompage PV.



## **2.1. Introduction:**

L'énergie photovoltaïque peut être considérée comme étant la plus attractive parmi les différentes sources d'énergies renouvelables du fait qu'elle présente plusieurs avantages tels que : la disponibilité de l'énergie solaire partout et gratuitement, la fiabilité des systèmes PV et la modularité de la puissance en fonction des besoins. De plus cette technologie est bien adaptée à un fonctionnement décentralisé et autonome et ne produit pas de gaz à effet de serre. Enfin, les systèmes PV des dernières décennies nécessitent peu d'entretien et affichent une longue durée.

Le but de ce chapitre est la présentation des connaissances théoriques nécessaires pour décrire le comportement des générateurs photovoltaïques et l'effet de variation de paramètre interne et externe de ce générateur ,ce modèle du générateur photovoltaïque présenté, peut être utilisé avec autres composants de commande et de régulation (bloc électronique de puissance, système de poursuite...etc.) pour déterminer l'optimum de la puissance électrique produite le PV autrement dit le MPPT dans le cas uniforme où cas déséquilibre.

## **2.2. Notions essentielles sur le gisement solaire:**

Le soleil est une source de lumière dont le spectre rayonnement peut être comparé au spectre d'un corps noir près de  $6000^{\circ}$  k [22].

### **2.2.1. Irradiation et le rayonnement solaire [28], [42]:**

- **L'irradiation:** est une quantité instantanée décrivant le flux de rayonnement solaire incident sur une surface ( $\text{kW/m}^2$ ).

- **Le rayonnement solaire (spectre solaire) :** Le rayonnement solaire est constitué l'énergie transportée par les photons  $E_{ph}$  qui est donnée par l'équation suivante (Figure 2.1) :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $h$  est la constante de Plank,  $C$  est la vitesse de la lumière.

Le rayonnement global comprend trois composantes:

-**Rayonnement solaire direct:** Le rayonnement solaire reçu directement du soleil. Ses rayements sont généralement parallèles entre eux.

- **Rayonnement solaire diffus :** généré par la lumière diffusée l'atmosphère, dépend des conditions métrologiques.

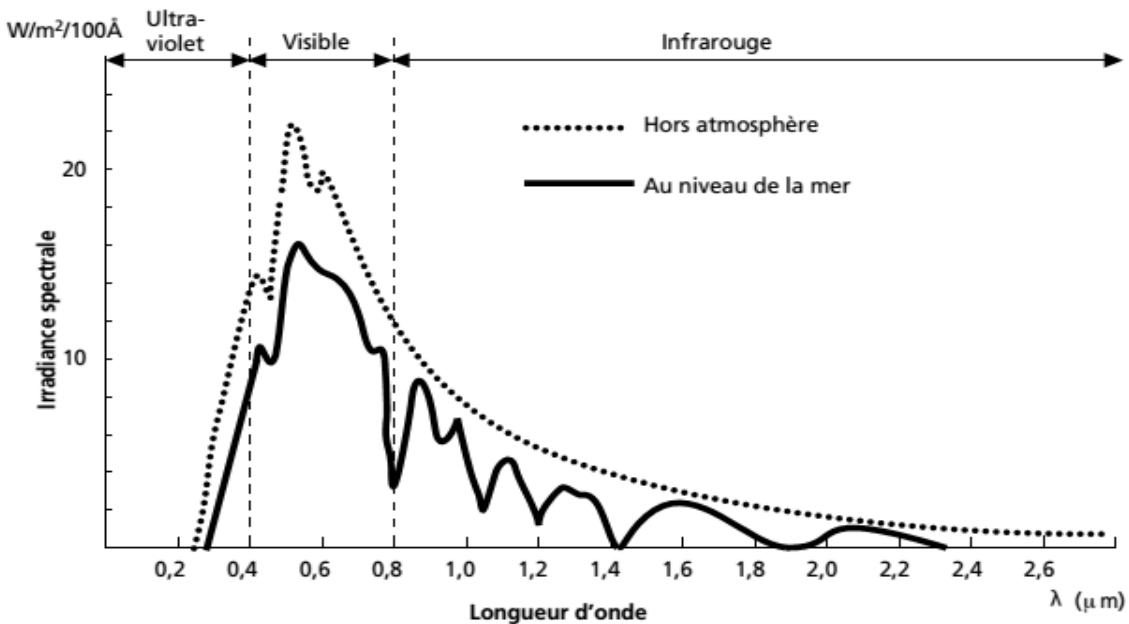


Figure 2.1 Analyse spectrale du rayonnement solaire [17].

**-L'albédo :** ses rayons représentent la partie réfléchie par le sol, ils dépendent de quelques paramètres tels que la neige, l'environnement de site... etc.

Le logiciel PVsyst est un logiciel pour l'étude le dimensionnement et l'analyse des données de systèmes PV complets, Il traite des systèmes PV connectés au réseau, autonomes, des systèmes de pompage, et comprend des systèmes extensifs de météo et PV composants bases de données, ce logiciel est conçu pour les besoins des architectes, des ingénieurs, des chercheurs [43].

Pour générer facilement la trajectoire de soleil (Figure 2.2) on peut utiliser le logiciel PVSYST, ce logiciel nous a permis de générer la trajectoire de soleil pour wilaya d'Alger Figure 2.3 , quelques journées étaient et autres d'hiver .On peut y lire la hauteur et l'azimut du soleil pour un instant quelconque de l'année.

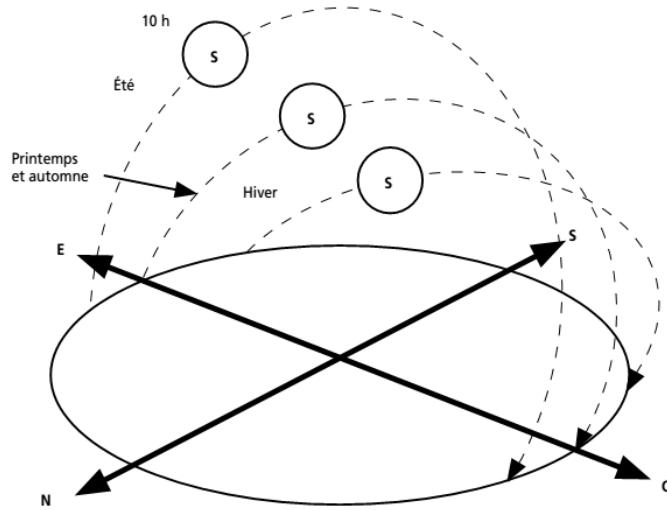


Figure 2.2 Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord

Trajectoire du soleil à Alger, (Lat. 36.3°N, long. 2.6°E, alt. 5 m)

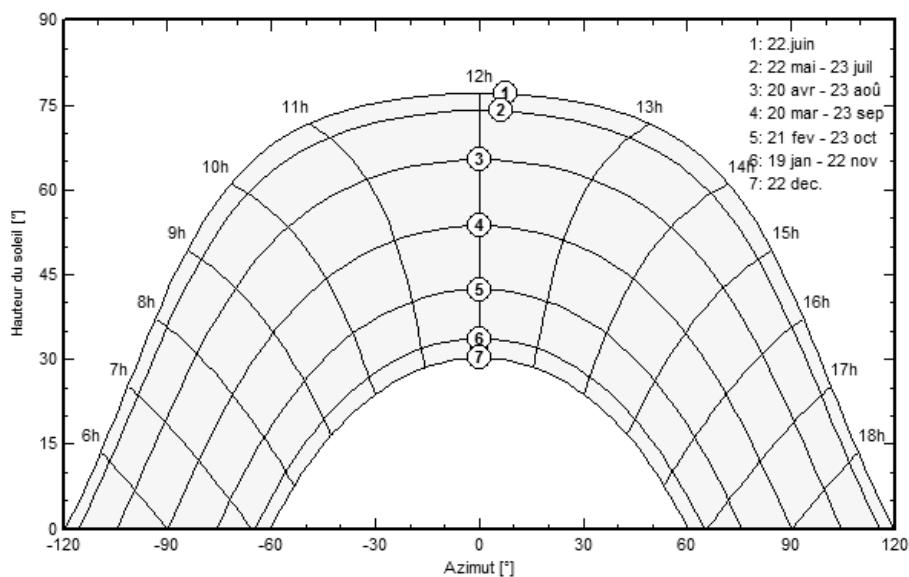


Figure 2.3 La trajectoire du Soleil à Alger [43].

### 2.3. Modélisation de générateur photovoltaïque

#### 2.3.1. Les types de cellules

**Les technologies au silicium cristallin se distinguent en deux groupes :**

Monocristallin (mono-Si) et polycristallin (poly-Si).

Les cellules monocristallines sont constituées d'un seul Cristal, ce qui leur confèrent des rendements de conversion supérieurs.

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui lorsqu'il est exposé au spectre

solaire génère une tension électrique par effet photovoltaïque. Alors que les cellules polycristallines sont composées de plusieurs cristaux, ce qui les rend moins chères que les mono-Si. En 2007, les cellules mono-Si et poly-Si représentaient respectivement 43% et 47% du marché PV. La technologie couches minces est la deuxième génération de cellules solaires qui appliquent un semi-conducteur photo-actif sur un substrat à bas coût, ce qui permet de réduire considérablement leur coût de fabrication. Enfin, il existe des technologies de générations futures: organiques, multi-jonction, ou à pigment photosensible. Les rendements et coût des technologies PV sont présentés sur le Tableau 2.1. Toutes les cellules sont créées à partir de matériaux semi-conducteurs. La plupart du temps, c'est le silicium (Si) qui est utilisé mais on rencontre aussi le sulfure de cadmium le tellure de cadmium, des alliages de cuivre indium et sélénium.

Tableau 2.1 Technologies de cellule PV.

	<b>Technologie</b>	<b>Rendement [%]</b>
<b>Première Génération</b>  Silicium Cristallin	Mono-Si	18-25
	Poly-Si	12-20
<b>Deuxième Génération</b>  Couches Minces	a-Si	6-9
	CIGS	9-15
	CDTE	10-16
<b>Troisième Génération</b>	Organique	4-6
	Pigment phtosenesible	8-11
	Multi-junction	30-40

### **2.3.2. Le Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [22]**

Une cellule photovoltaïque montrée dans la Figure 2.4 est essentiellement une diode à semi-conducteur dont la jonction p-n est exposée à la lumière, les cellules photovoltaïques sont constituées de plusieurs types de semi-conducteurs en utilisant différents procédés de fabrication.

L'incidence de la lumière sur la cellule génère des porteurs de charge provenant d'un courant électrique si la cellule est court-circuitée, ces chargées sont charges générées lorsque l'énergie du photon incident est suffisante pour détacher les électrons covalents de semi-conducteur, ce phénomène dépend de la matière semi-conductrice et sur la longueur d'onde de la lumière incidente. Ce phénomène dépend de la matière semi-conductrice et sur la longueur d'onde de la lumière incidente, la capacité d'absorption dépend principalement de la largeur de bande interdite de semi-conducteur, sur la réflexion de la surface de la cellule (qui dépend de la forme et de traitement de la surface).

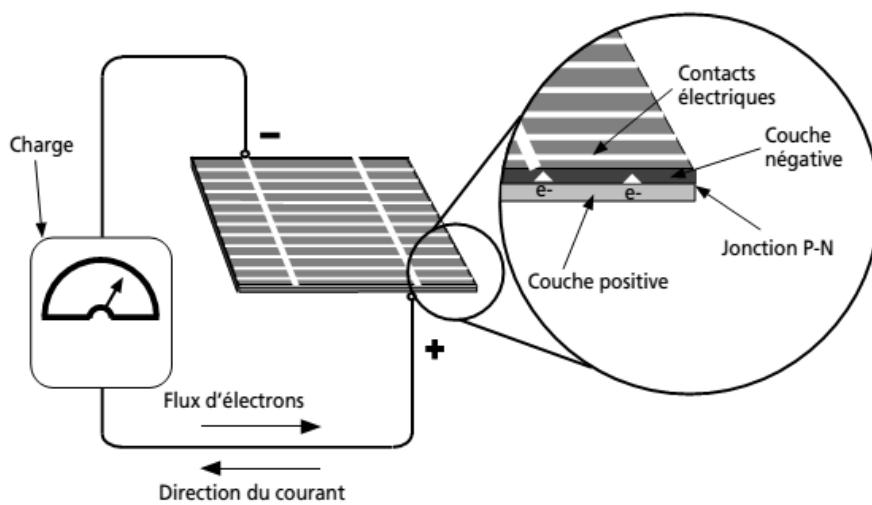


Figure 2.4 Schéma de Principe d'une photopile ou cellule photovoltaïque [44].

## 2.4. Modélisation de la cellule solaire

Nous proposons l'étude de trois configurations (schéma équivalent) de cellule photovoltaïque.

- Modèle à une seule diode [8].
- Modèle à deux diodes [9].
- Modèle à trois diodes [11].

### 2.4.1. Modèle à une seule diode

La Figure 2.5 présente le schéma équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque:

Le courant délivré par la cellule est exprimé comme suit:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.2)$$

Tel que:

$I_{ph}$  : le courant photonique généré dans les conditions standard(STC) (A).

Ce courant définit par :  $I_{ph} = (I_{ph,n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n}$  (2.3)

$$\Delta T = T - T_n$$

Tel que  $T$  : température de référence 298(k°).

$T_n$  : température de la cellule (k°).

$G$  et  $G_n$  : ensoleillement et l'ensoleillement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

$K_i$  : coefficient de température court -circuit

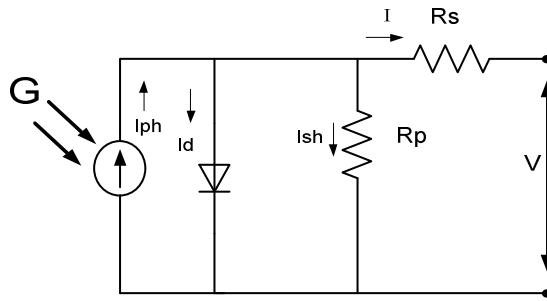


Figure 2.5 Modèle d'une cellule photovoltaïque

$T$  : température de référence 298(°k).

$T_n$  : température de la cellule(°k).

Le courant de la diode est défini par :  $I_d = I_0 [\exp(\frac{V + IR_s}{a V_T}) - 1]$  (2.4)

Bien que :  $I_0$ =courant de saturation de la diode qui égale [8]:

$$I_0 = \frac{(I_{sc\_n} + K_i \Delta T)}{\exp[(V_{oc,n} + K_v \Delta T) / a V_T] - 1} \quad (2.5)$$

Où:

$K = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K. ( constante de Boltzmann).

$q = 1.6 \times 10^{-19}$  °C.

$V_{co}$ =tension du circuit ouvert (v).

$I_{sc\_n}$  : courant de court-circuit(A) .

$R_s$  :la résistance série ( $\Omega$ ).

$V$  :la tension au borne de la cellule (v).

Le courant de la résistance shunt égale:  $I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_p}$  (2.6)

### 2.4.2. Modèle à deux diodes

Depuis le schéma équivalant à deux diodes de la cellule solaire Figure 2.6 on peut extraire le modèle.

De la même manière on peut donner la relation qui définit les grandeurs électriques aux bornes d'une cellule solaire:

Le courant délivré par la cellule solaire [23]:

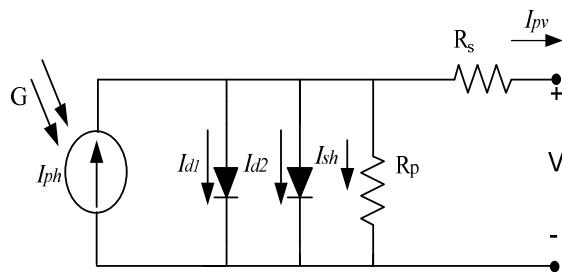


Figure 2.6 Modèle à deux diodes de la cellule photovoltaïque

$$I_{pv} = I_{Ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (2.7)$$

Ou

$$I_{d1,2} = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{a V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

### 2.4.3. Modèle à trois diodes (modèle proposé)

Les modèles à deux diodes ne sont pas en mesure de définir les différentes composantes de courant électrique de cellules solaires clairement [25], certains auteurs sont orientés vers le modèle à trois diodes Figure 2.7 afin de résoudre ce problème.

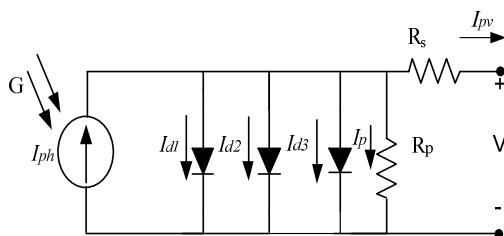


Figure 2.7 Modèle à trois diodes de la cellule photovoltaïque

$$I_{pv\_cell} = I_{Ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{d3} - I_p \quad (2.9)$$

Nous prenons  $a1 = 1$ ,  $a2 = 2$ ,  $a3 > 2$  [11].

Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant le caractéristique courant-tension.

L'objectif principal est de trouver les paramètres de l'équation I-V non linéaire en ajustant la courbe en trois points: circuit ouvert, puissance maximale, et de court-circuit.

La meilleure équation I-V pour le photovoltaïque modèle unique de diode (PV), y compris l'effet de la série et les résistances parallèles.

Avec les paramètres de l'équation I- V ajustée, on peut construire un modèle de circuit PV avec n'importe quel simulateur de circuit à l'aide de bases bloques mathématiques.

Procédures de modélisation et le modèle de circuit proposé sont utiles pour les concepteurs en électronique de puissance qui ont besoin d'un moyen simple, rapide, méthode de modélisation précise et facile à utiliser pour l'utilisation dans les simulations des systèmes PV.

- **L'ajustement de modèle :**

Deux paramètres restent inconnus dans le modèle et généralement on ne trouve pas dans le catalogue du constructeur la résistance parallèle  $R_p$  et la résistance en série  $R_s$ , quelques chercheurs sont intéressés par la proposition des moyens pour déterminer mathématiquement ces résistances.

La méthode d'estimation des résistances et d'ajustement proposé par [22] basés sur le principe d'existence d'une seule paire de valeur de  $\{R_s, R_p\}$  (Figure 2.8) qui garantit que :

$$P_{\max,m} = P_{\max,e} = V_{mp} I_{mp} \quad (2.10)$$

Telle quelle ( $V_{mp}, I_{mp}$ ) sont des points maximaux calculés de la caractéristique I-V .

$P_{\max,e}$  : est égale à la puissance maximale expérimentale donnée par le constructeur dans le catalogue .

$$P_{\max,m} = V_{mp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q}{kt} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{\alpha N_s} - 1\right) - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \right] \right\} = P_{\max,e} \quad (2.11)$$

$$R_p = V_{mp}(V_{mp} + I_{mp} R_s) / \left\{ V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \exp\left[\frac{(V_{mp} + I_{mp} R_s)}{N_s \alpha} \frac{q}{KT}\right] V_{mp} I_0 - P_{\max,e} \right\} \quad (2.12)$$

$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc,n} \quad (2.13)$$

$$R_{p,\min} = \frac{V_{mp}}{I_{sc,n} - I_{mp}} - \frac{V_{oc,n} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2.14)$$

- **Organigramme de l'algorithme de détermination de  $R_s$  et  $R_p$  de GPV**

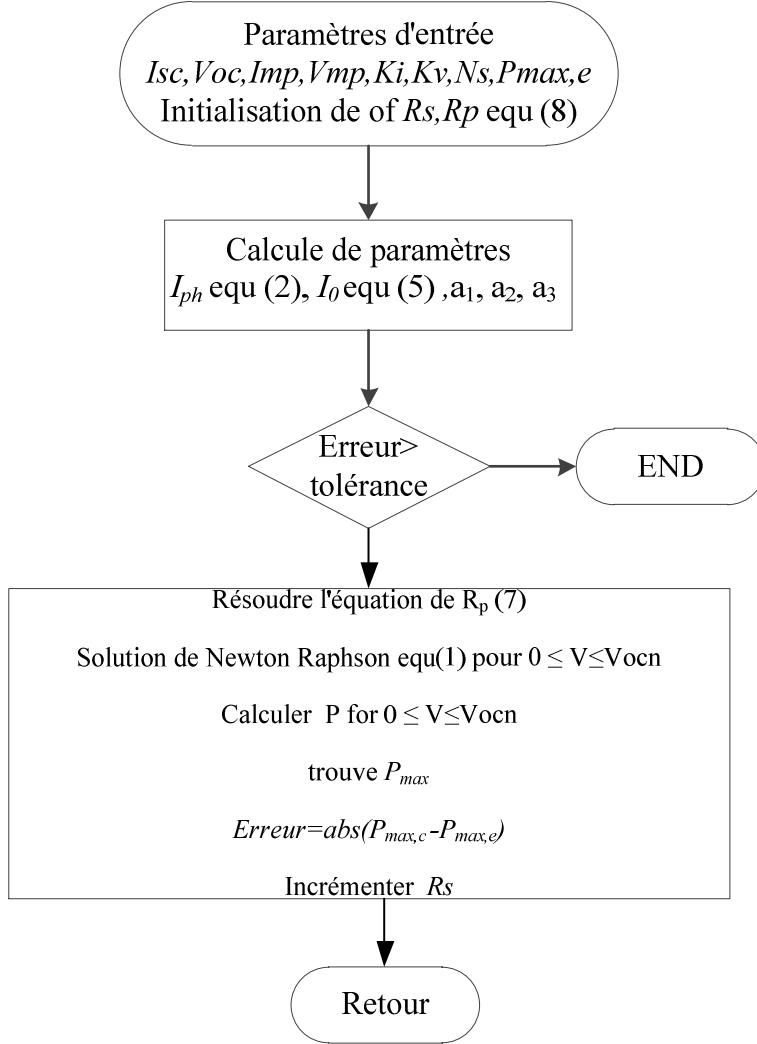


Figure 2.8 Organigramme de la méthode d'extraction des paramètres

## 2.5. Modélisation cas d'une d'installation: avec ombrage partiel (PSC)

### 2.5.1. Définition

Le phénomène de déséquilibre ou ombrage partiel en Anglais (PSC) présente une cause majeure de réduction de rendement énergétique dans une large installation de l'énergie solaire photovoltaïque.

Le phénomène d'ombrage partiel et ses implications sur la réponse électrique et le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques (PV) ont reçu une attention accrue dans les dernières décennies [19].

Pour bien comprendre ce phénomène on considère trois modules solaires identiques Figure 2.9 sous les trois irradiations solaires différentes respectivement G1, G2, G3.

Le courant délivré par le groupe des panneaux s'écrit comme suite (équation 2.15)

Dans le cas général où l'on a une chaîne contenant nombre de panneaux N le courant défini par l'équation (2.16)

$$\begin{cases} I_{pv} = I_{pv1} & I_{pv1} > I_{ph1} \\ I_{pv} = I_{pv2} & I_{ph1} > I_{pv2} > I_{ph2} \\ I_{pv} = I_{pv3} & I_{pv3} < I_{ph2} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} I_{pv} = I_{pv1} & I_{pv1} > I_{ph1} \\ I_{pv} = I_{pv2} & I_{ph1} > I_{pv2} > I_{ph2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{pv} = I_{pvn} & I_{pvn} < I_{ph(n-1)} \end{cases} \quad (2.16)$$

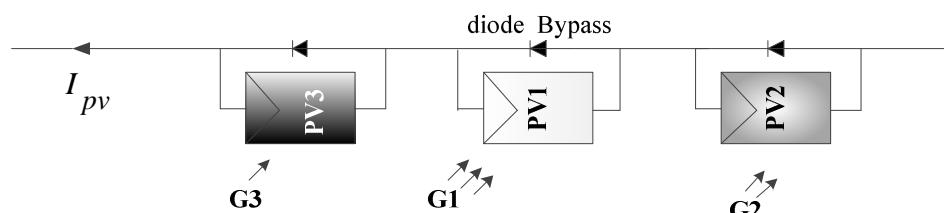


Figure 2.9 Schéma descriptif d'une chaîne photovoltaïque sous conditions de déséquilibre.

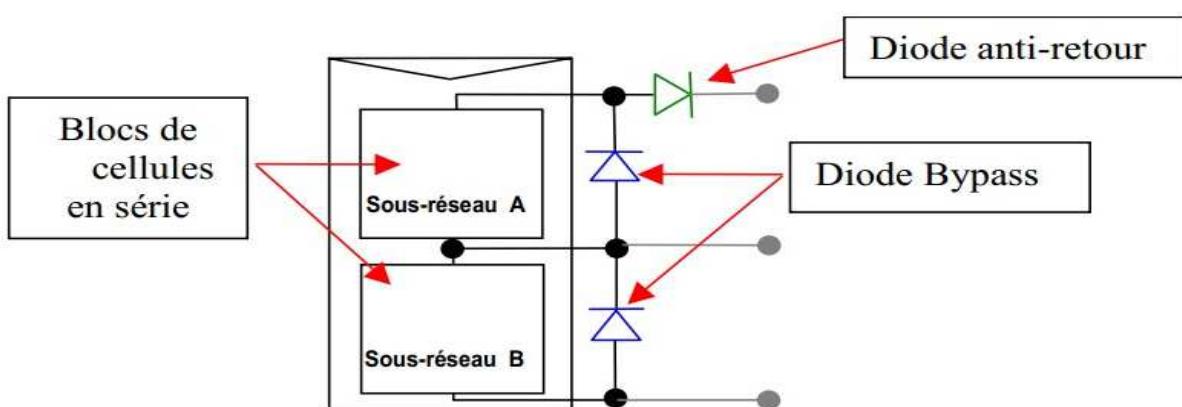


Figure 2.10 Schéma descriptive d'installation des diodes bypass et anti-retour.

Une fois que la condition d'ombrage se produit, le courant circule à partir de la diode de dérivation (ou bypass) (Figure 2.10) au lieu du module PV et donc de multiples pics sont observés à la sortie du générateur photovoltaïque.

Dans des conditions ombragées, les modules ombragés se comportent comme une charge à la place du générateur, ce problème peut être évité en entraînant le courant des modules photovoltaïques non ombragés par la diode de dérivation, les diodes de dérivation, ce qui limite l'effet de phénomène point chaud (hot spot).

Une diode de blocage (Anti retour) est utilisée en série avec le générateur photovoltaïque tel que représenté sur la Figure 2.10, cette diode empêche le module de chargement de la batterie la nuit en évitant la circulation du courant de la batterie à travers le panneau photovoltaïque.

Tableau 2.2 Paramètres du module Kyocera KD 320 W.

Grandeur	Unité	
<b>Mpp</b>	(w)	320
<b>Vocn</b>	(V)	49.5
<b>Iscn</b>	(A)	8.6
<b>Vmp</b>	(v)	40.1
<b>Imp</b>	(A)	7.99
<b>Kv</b>	(V/ ° C)	-0.178
<b>Ki</b>	(mA/° C)	5.16

## 2.6. Création d'interface graphique sous Matlab et LABView

Dans le but de rendre l'usage des catalogues du constructeur plus facile pour le dimensionnement; nous avons créé un GUI sous Matlab et LABView, en considérant la fiche technique réelle (voir Tableau 2.2).

## 2.7. Résultats de simulation et discussion pour le modèle à trois diodes

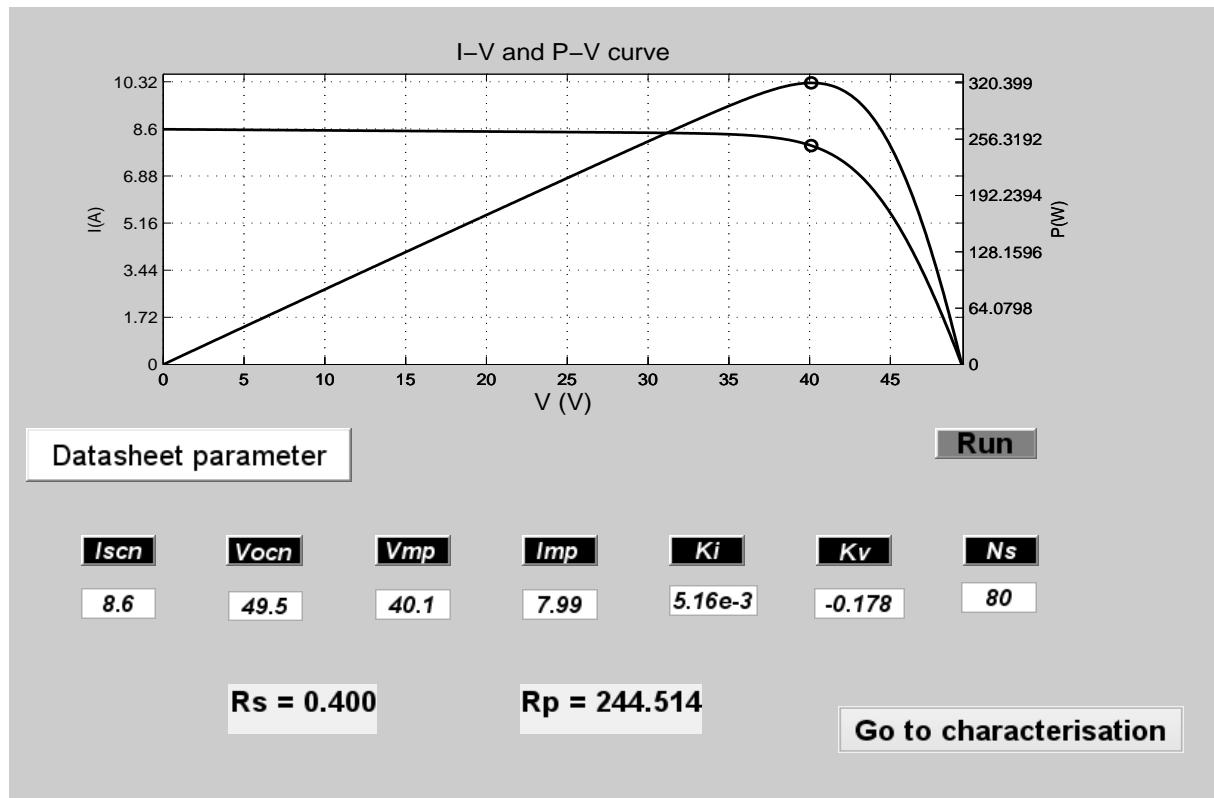


Figure 2.11 l'interface d'estimation des résistances  $R_s$  et  $R_p$

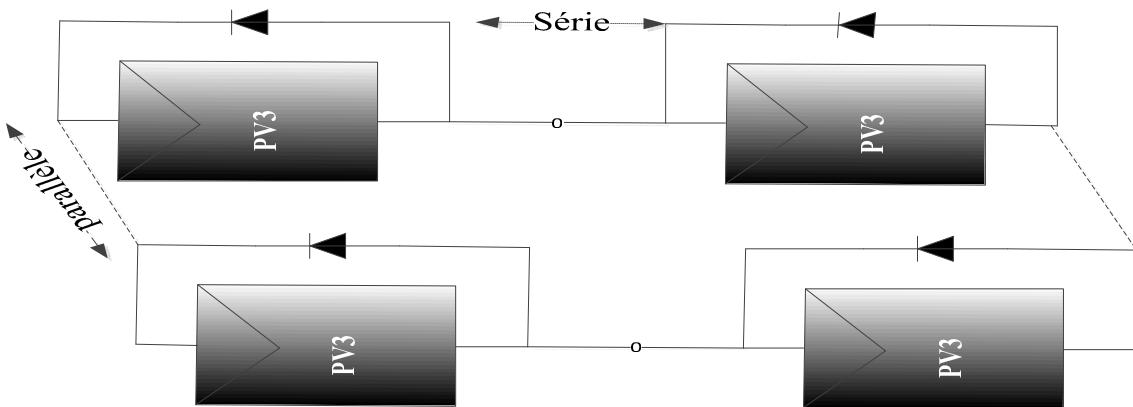


Figure 2.12 Cas étudié (un seul groupe).

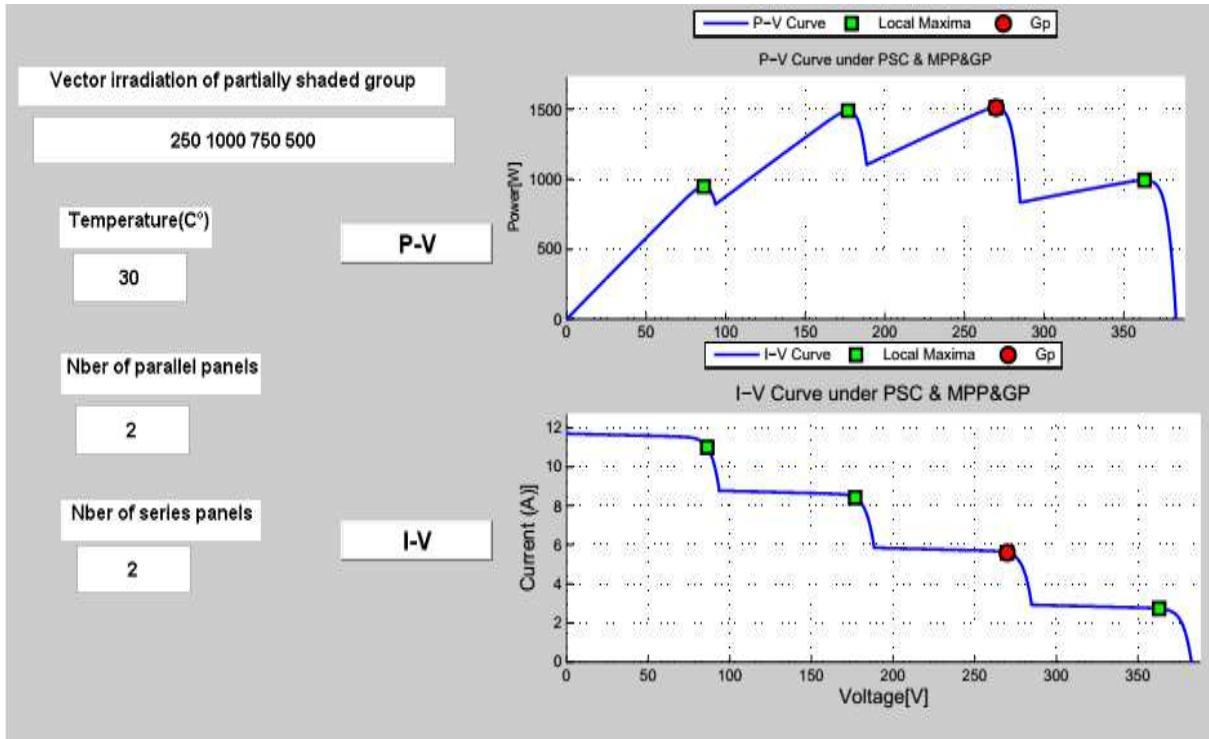


Figure 2.13 Interface de modélisation de chaîne sous cas de déséquilibre.

On constate que cette interface graphique sous Matlab/Simulink simple d'utilisation (Figure 2.11) nous permet de déterminer avec précision le MPP et estimer les paramètres  $R_s$  et  $R_p$  avec la méthode de Newton-Raphson.

D'après ces valeurs estimées, nous avons développé la deuxième interface (Figure 2.13) pour l'étude du cas pour le champ avec ombrage partiel pour la configuration (4 groupes identiques chaque groupe (Figure 2.12) contient 2 PV en série et 2 autres en parallèle.

Notons que cette interface permet de situer avec précision le MPP global (Point rouge sur le graphe).

Ces mêmes résultats ont été validés par LabVIEW Figure 2.14, Figure 2.15.

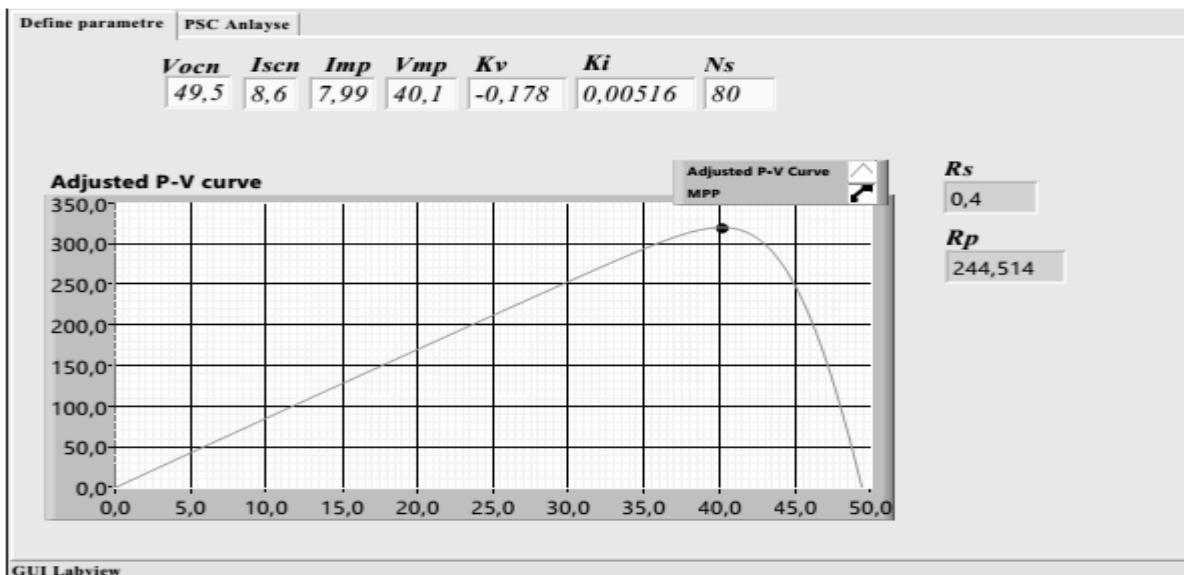


Figure 2.14 Interface d'estimation des résistances  $Rs$  et  $Rp$  par LabVIEW

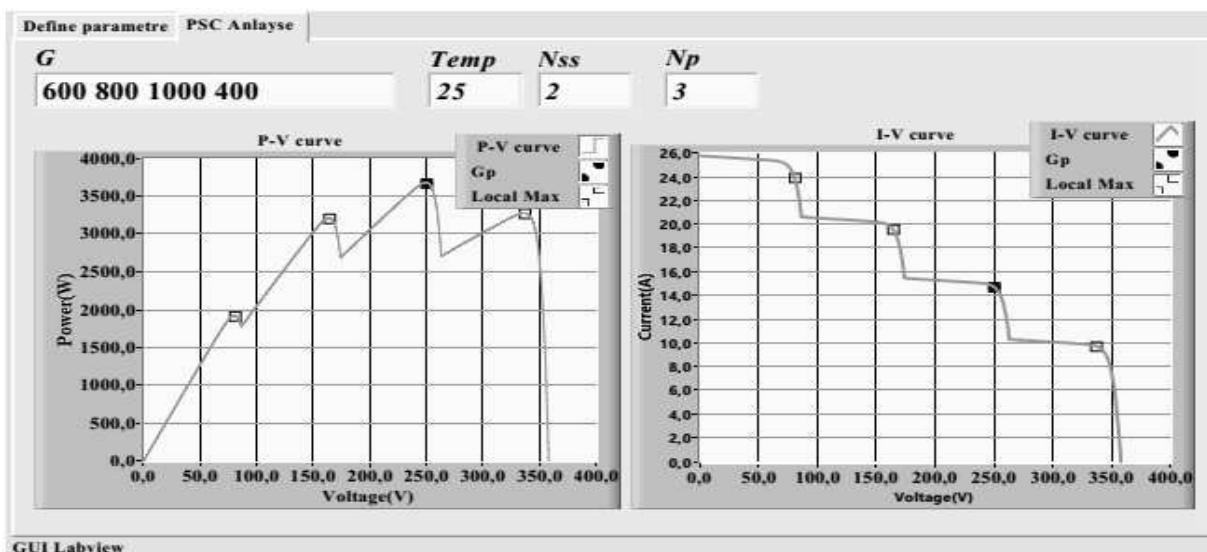


Figure 2.15 interface de modélisation de chaîne sous cas de déséquilibre LabVIEW

## 2.8. Conclusion

Nous avons présenté un état de l'art de modélisation mathématique des différents types de générateurs photovoltaïques, ainsi que les différentes générations de technologies. Les phénomènes d'ombrages contraignant la production, l'association de panneaux photovoltaïques ont été abordés brièvement.

Nous avons retenu la méthode de Newton Raphson pour l'appliquer à l'estimation des paramètres pour le modèle à trois diodes.

Finalement nous avons développé des interfaces graphiques simples d'utilisation sous deux

logiciels scientifiques Matlab/Simulink et LabVIEW et qui donnent des résultats pratiques très satisfaisants.

***CHAPITRE 3:***

***MODELISATION DE L'ENSEMBLE  
ETAGES D'ADAPTATION,  
MOTOPOMPE***

### **3.1. Introduction**

Dans ce chapitre on présente les différentes configurations du système de pompage photovoltaïque ainsi que leurs avantages et inconvénients, pour chaque configuration.

Il y a le système où le moteur d'entrainement est à courant continu voir Figure 3.2 et le système à courant alternatif que nous avons choisi pour développer notre recherche voir Figure 3.4.

On établira la modélisation mathématique de l'ensemble convertisseur machine pour l'entrainement à courant alternatif.

Suite à cela, on fera la simulation sous Matlab/Simulink du convertisseur statique; du moteur asynchrone à cage, et de la pompe centrifuge.

### **3.2. Méthodes de pompages**

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux techniques sont possibles:

Dans le première technique, l'énergie solaire est consommée en « temps réel » ; On parle alors d'un « pompage au fil du soleil ». Cette solution nécessite un stockage de l'eau dans un réservoir (l'eau pompée pendant la journée est stockée afin d'être utilisée plus tard, le soir par exemple).

La deuxième méthode consiste à utiliser un stockage de l'énergie, cette fois-ci, via des batteries. L'énergie stockée la journée peut être utilisée plus tard pour pomper l'eau.

#### **3.2.1. Pompage « au fil du soleil »**

Comme on va le constater, la méthode de pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système utilisant des batteries pour stocker de l'énergie d'abord. En effet, dans ce première technique, c'est l'eau elle-même qui est pompée et stockée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau est stockée dans un réservoir à une hauteur au-dessus du sol pour qu'elle soit, au besoin ensuite, distribuée par gravité. Il faut bien signaler ici que le réservoir d'eau peut souvent être construit localement. En plus, il ne requiert pas un entretien complexe et peut être réparé localement. La capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours selon les modèles.

### **3.2.2. Pompe avec batteries**

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée pour être utilisé aussi pour d'autres besoins ultérieures. L'inconvénient majeur, voire handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent, en outre, un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie.

### **3.3. Les différents composants du système de pompage PV:**

Figure 3.1 montre les composants essentiels d'un système de pompage PV.

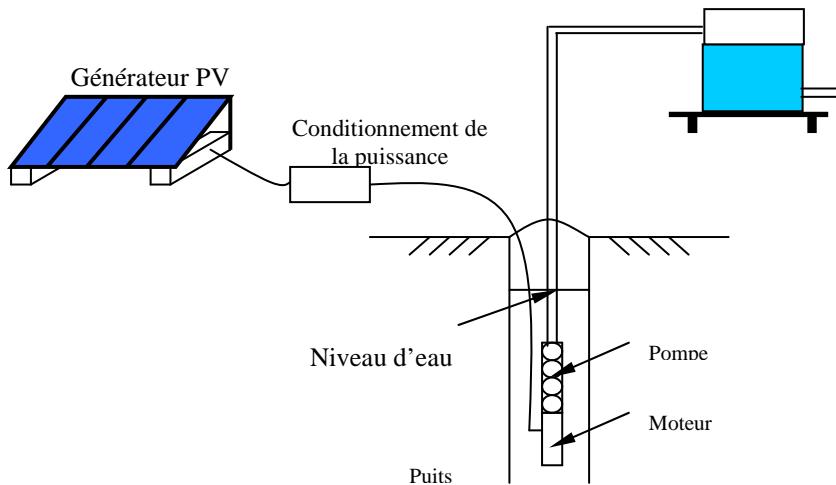


Figure 3.1 Schéma descriptif de système de pompage solaire [44].

### **3.4. Les différentes configurations**

-La Figure 3.2 montre le système de pompage à courant continu ce système est le plus simple, il s'agit d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC-DC avec contrôle MPPT.

-La Figure 3.3 montre le système de pompage solaire basé sur les moteurs sans balais ou le moteur BLDC (en Anglais Brushless DC Motor) sont généralement plus compliqué (Figure 3.3), par ce que la présence du convertisseur DC-AC qui un onduleur classique ou

### Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

---

onduleur avec Z –impédance, leur utilité c'est la commande de moteur.

-La Figure 3.4 montre le système de pompage qui se base sur le moteur à courant alternatif c.-à-d. Les moteurs asynchrones (appelé aussi les moteur à induction).

-La Figure 3.5 montre le système de pompage avec le moteur synchrone.

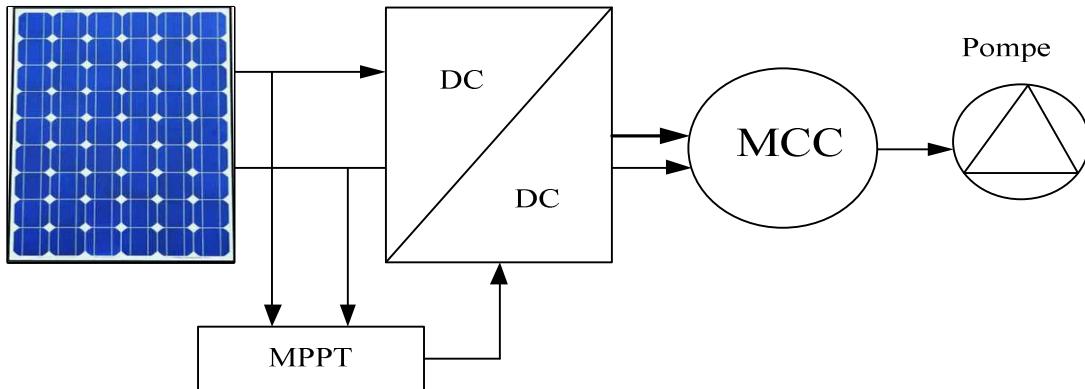


Figure3.2 Schéma descriptif de PVPS à courant continu [45].

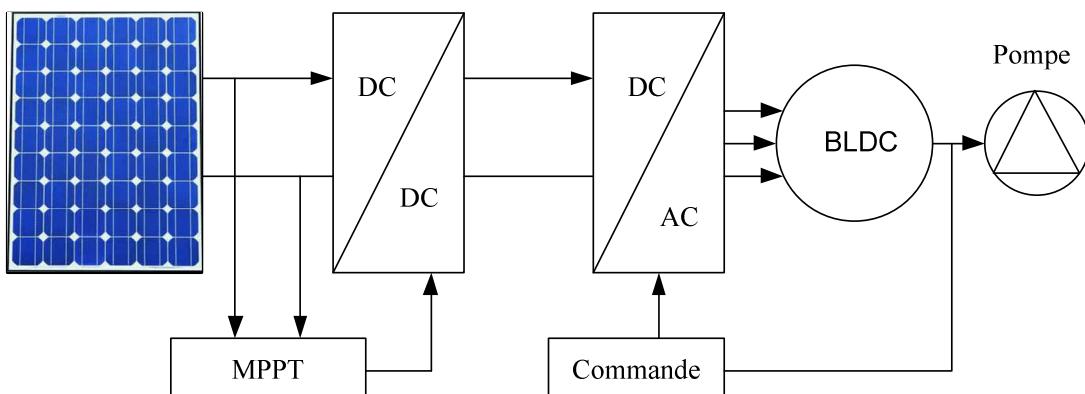


Figure3.3 Schéma descriptif de PVPS basé sur le moteur BLDC .

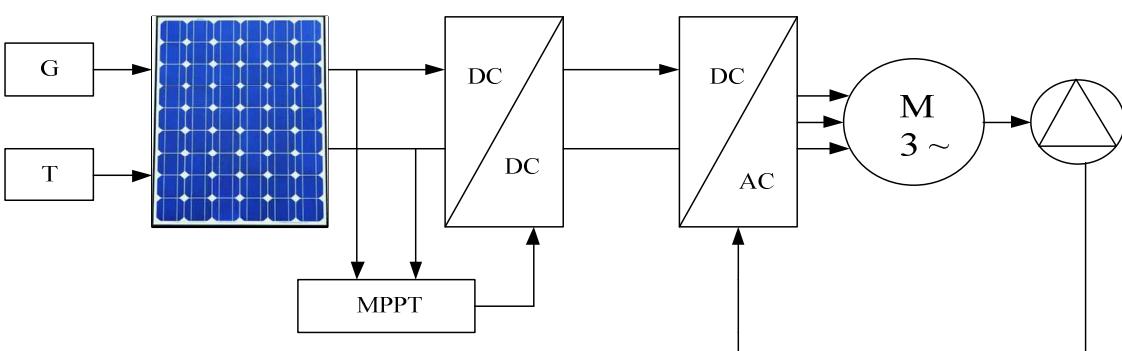


Figure3.4 Schéma descriptif de PVPS utilisant moteur à courant alternatif [37].

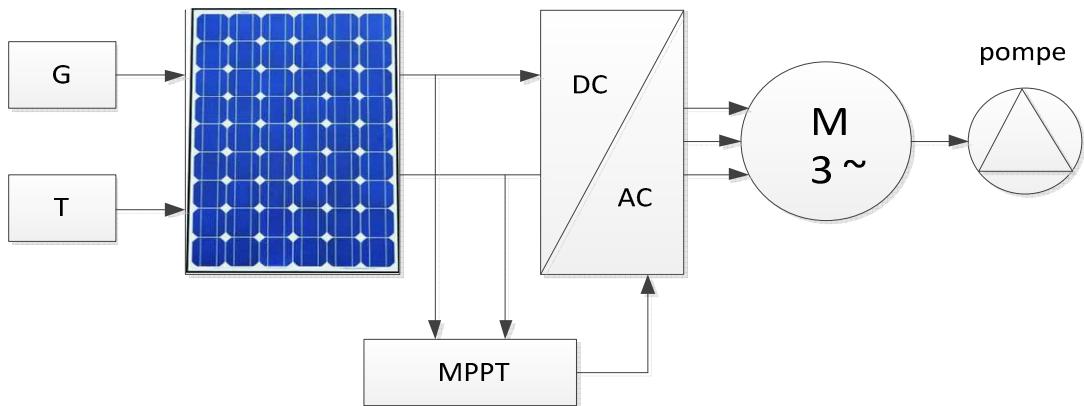


Figure 3.5 Schéma descriptif de PVPS utilisant moteur AC à un seul étage [38].

Il y a deux façons d'utilisation les moteurs à courant alternatif dans le pompage solaire soit à travers deux convertisseurs Figure 3.4 ou un seul convertisseur à deux degrés de liberté.

### 3.5. Modélisation du convertisseur continu/continu DC-DC

Le convertisseur est un élément essentiel dans les systèmes de pompage solaires il apparaît dans toutes les configurations sauf dans le système directement couplé.

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture telle que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires à effet de champ [46].

Les trois configurations de base sont:

- Convertisseur abaisseur « BUCK »
- Convertisseur élévateur « BOOST ».
- Convertisseur abaisseur-élévateur « BUCK-BOOST ».

#### 3.5.1. Modélisation du convertisseur abaisseur (Buck) [47], [48]:

Le convertisseur dévolteur est un dispositif de commutation idéal sera considéré avec période de commutation  $T$  et le rapport cyclique  $D$  (Figure 3.6) peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série.

L'utilisation du Buck dans les systèmes de conversions photovoltaïques est tout à fait adéquate, étant donné que le générateur photovoltaïque est une source de courant continu, tandis que le récepteur qui est généralement la batterie, à la nature d'une source de tension.

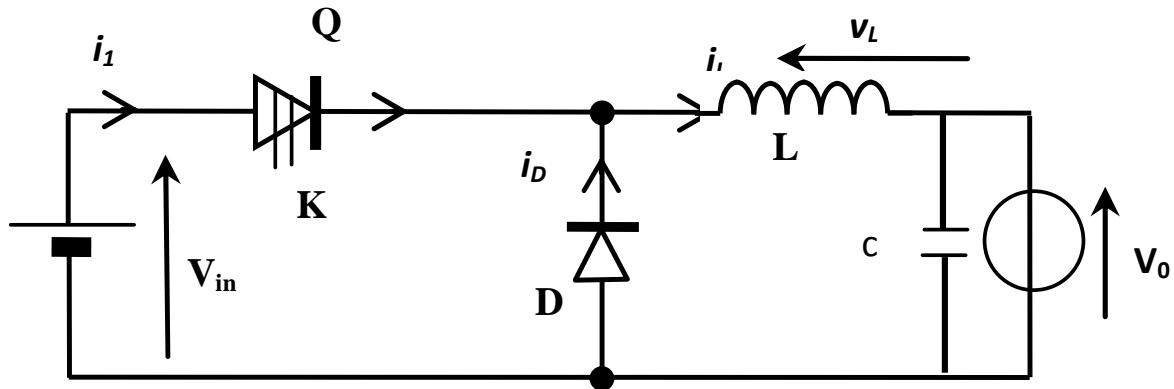


Figure3.6 Convertisseur DC-DC série

Les équations différentielles correspondant au convertisseur en mode de conduction continue(CCM) sont déduites en appliquant la loi de Kirchhoff .Dans cas idéal ; la dynamique du courant de bobine d'inductance et la tension de condensateur ont données par :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in} - v_o), & 0 < t < dT, \quad Q: ON \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - \frac{v_o}{R}) & \end{cases} \quad (3.1)$$

et lorsque l'interrupteur est ouvert.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(-v_o), & dT < t < T, \quad Q: OFF \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - \frac{v_o}{R}) & \end{cases} \quad (3.2)$$

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M=D$ (D le rapport cyclique) change avec le rapport cyclique du commutateur, la boîte outils *SimPowerSystems* de l'environnement Matlatb/Simulink nous permettons de simuler le fonctionnement de convertisseur Buck Figure 3.7, la tension d'entrée est 100 Volts, et le rapport cyclique est 50% .

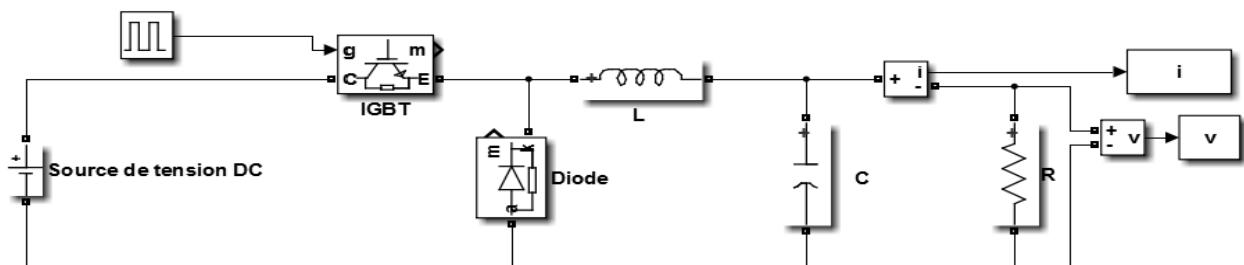


Figure3.7 Block de simulation du convertisseur Buck sous Simulink

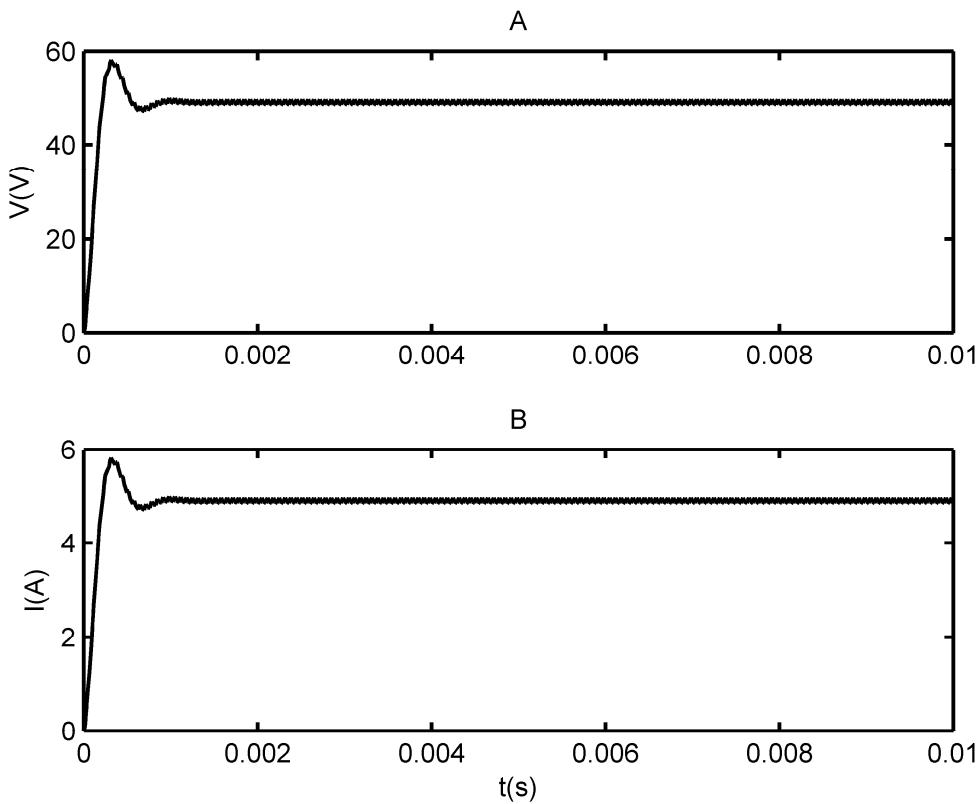


Figure3.8 Resultats de simulation du convertisseur Buck sous Simulink

Les résultats de simulation sont montrés par le Figures 3.8.

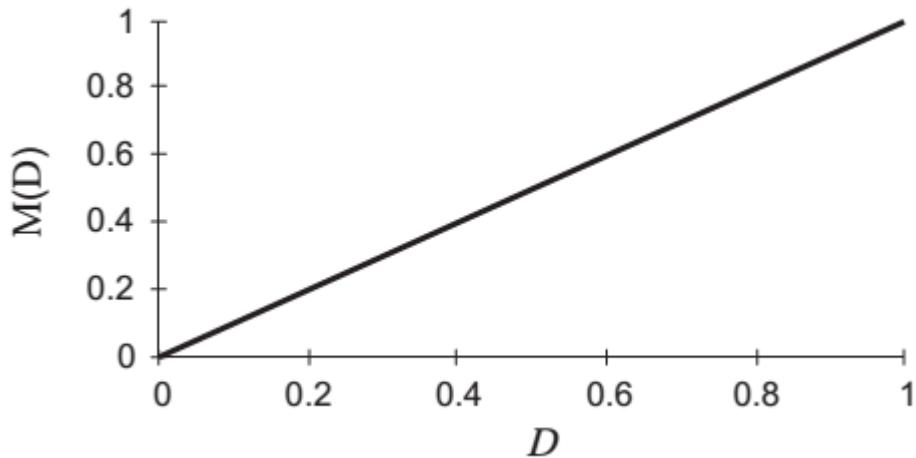


Figure3.9 La caractéristique  $M=f(D)$  du convertisseur Buck

La Figure 3.9 présente la variation de gain de conversion  $M$  en fonction de rapport cyclique  $D$ , d'après cette caractéristique on peut déduire que le convertisseur Buck est un convertisseur linéaire.

### 3.5.2. Modélisation du convertisseur BOOST [7,8]:

Le convertisseur élévateur, avec une période de commutation  $T$  et un rapport cyclique de  $D$  est représenté voir Figure 3.10 La description mathématique du système est donné par les équations différentielles (3.3) et (3.4)

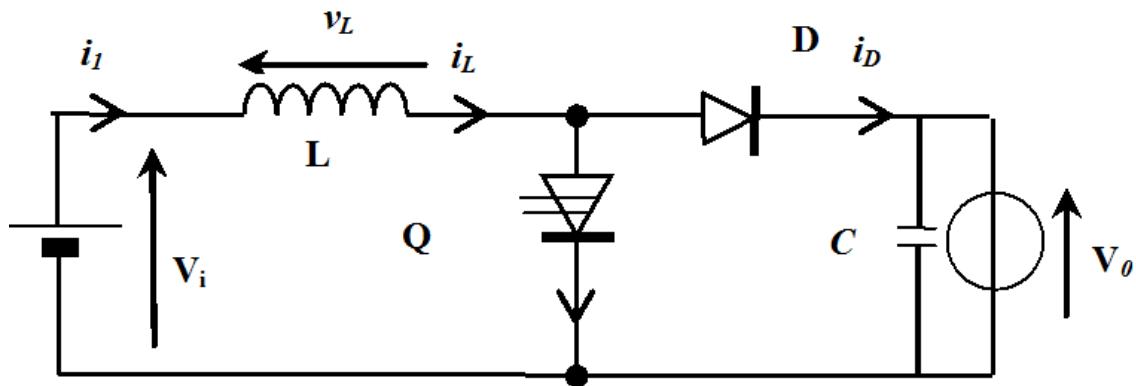


Figure3. 10 Convertisseur Boost

Dans le cas idéal, lorsque le circuit est fermé:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in}) \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}(-\frac{v_o}{R}) \end{cases}, \quad 0 < t < dT, \quad Q: ON \quad (3.3)$$

Et lorsque l'interrupteur est ouvert.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in} - v_o) \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - \frac{v_o}{R}) \end{cases}, \quad dT < t < T, \quad Q: OFF \quad (3.4)$$

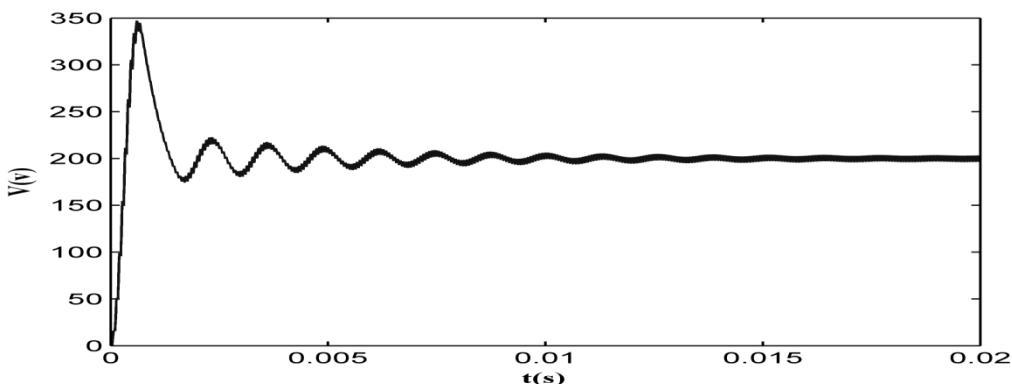


Figure3. 11 Tension de sortie du convertisseur BOOST

### Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

Le résultat de simulation de convertisseur Boost sous Simulink (Figure 3.12) présenté dans Figures 3.11.

La Figure 3.13 présente la variation de gain de conversion M en fonction de rapport cyclique D, d'après cette caractéristique on peut déduire que la tension de sortie peut atteindre 5 fois la tension d'entrée.

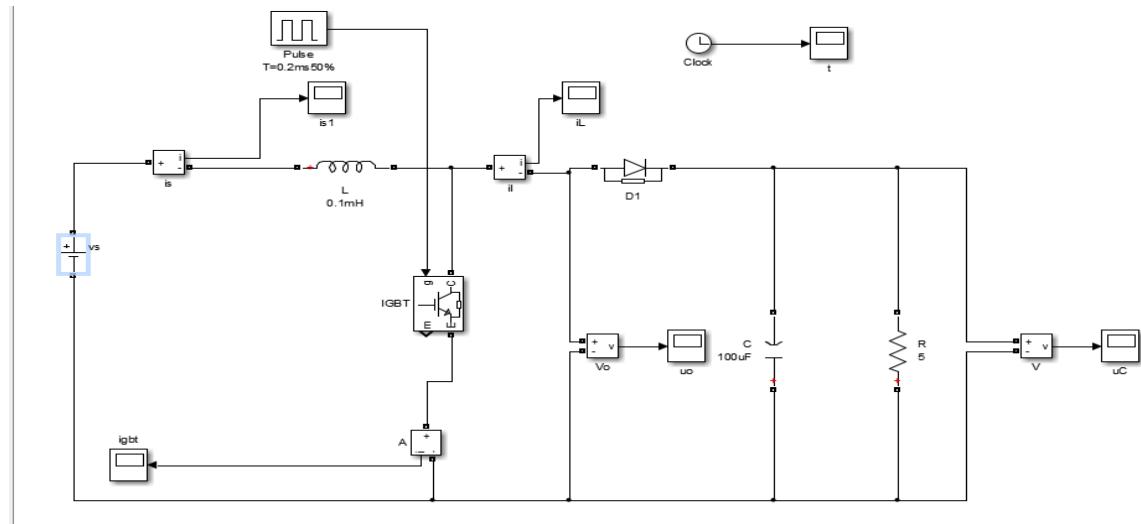


Figure3.12 Block de simulation du convertisseur Boost

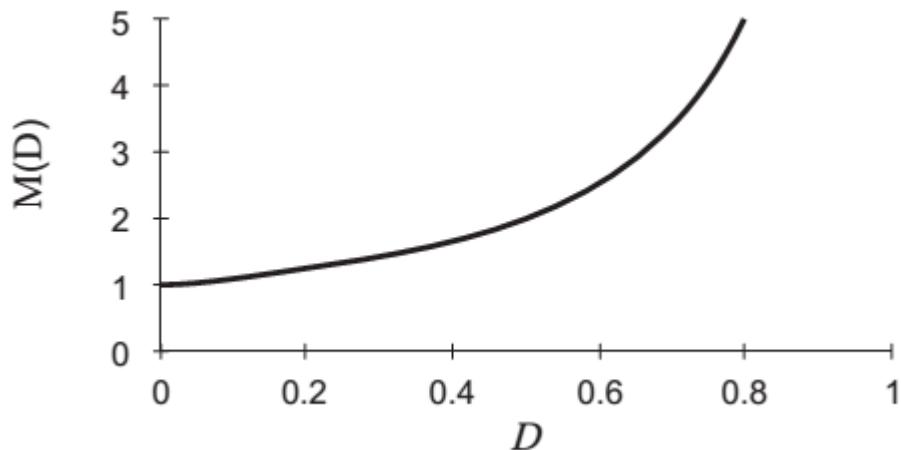


Figure3.13 La caractéristique  $M=f(D)$  de convertisseur Boost.

#### 3.5.3. Modélisation du Buck-Boost

Le convertisseur élévateur-abaisseur avec une période de commutation T et un rapport cyclique D est donné par la Figure. 3.14.

La représentation du système par ses équations différentielles est donnée par 3.5 et 3.6, [7].

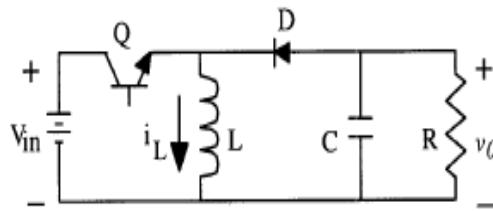


Figure3. 14 Convertisseur Buck-Boost

Lorsque l'interrupteur Q est fermé:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in}) \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}\left(-\frac{v_o}{R}\right) \end{cases}, \quad 0 < t < dT, \quad Q: ON \quad (3.5)$$

Lorsqu'il est ouvert :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(v_o) \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}\left(-i_L - \frac{v_o}{R}\right) \end{cases}, \quad dT < t < T, \quad Q: OFF \quad (3.6)$$

La Figure 3.15 montre le bloc de convertisseur Buck-Boost sous Simulink, les résultats de cette simulation figurant dans les Figures 3.16.

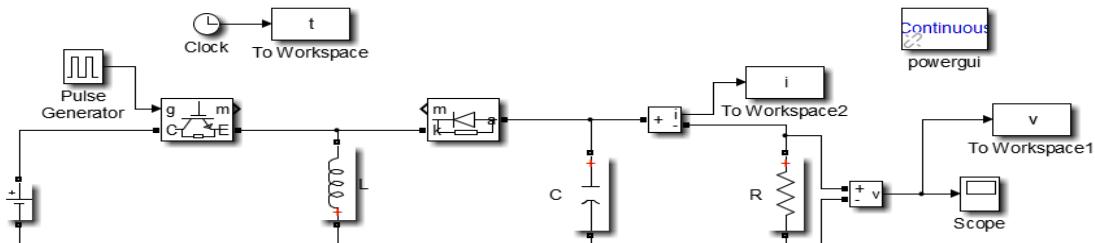


Figure3. 15 Block Simulink de convertisseur Buck –Boost.

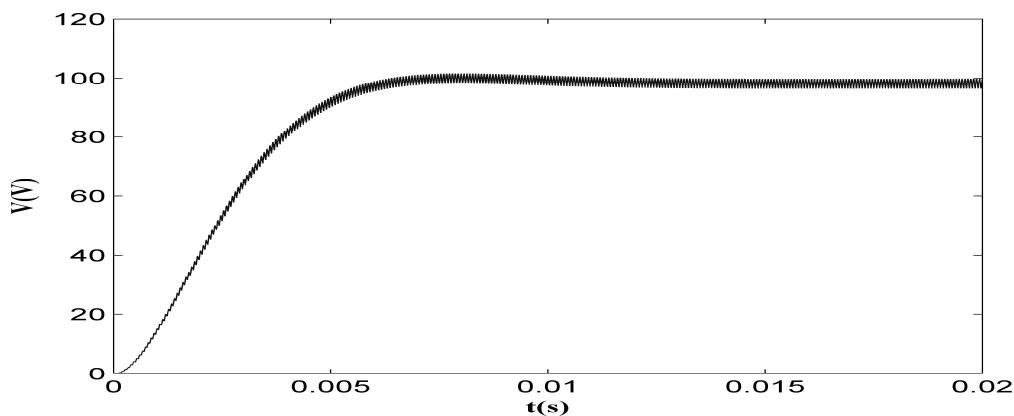


Figure3.16 Tension de sortie du convertisseur Buck-Boost.

D'après la Figure 3.17 on remarque que le convertisseur Buck-Boost est un convertisseur

### Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

inverseur ou le gain de conversion aller de 0 jusqu'à - 5 fois la tension d'entrée.

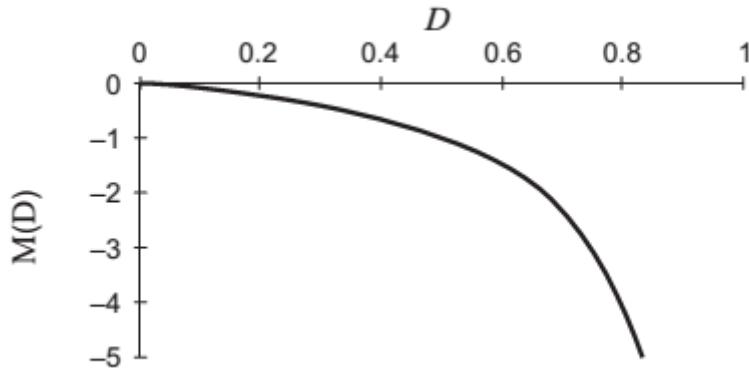


Figure3.17 La caractéristique  $M=f(D)$  du convertisseur Buck-Boost .

#### 3.6. Modélisation du convertisseur DC-AC :

Hypothèses simplificatrices: On se limite au cas idéal i.e. : résistance interne nulle pour état passant et infinie pour état bloquant.

Pour modéliser l'onduleur de tension Figure 3.18, on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être représentée par deux générateurs de F.E.M égale à  $U_0/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ .

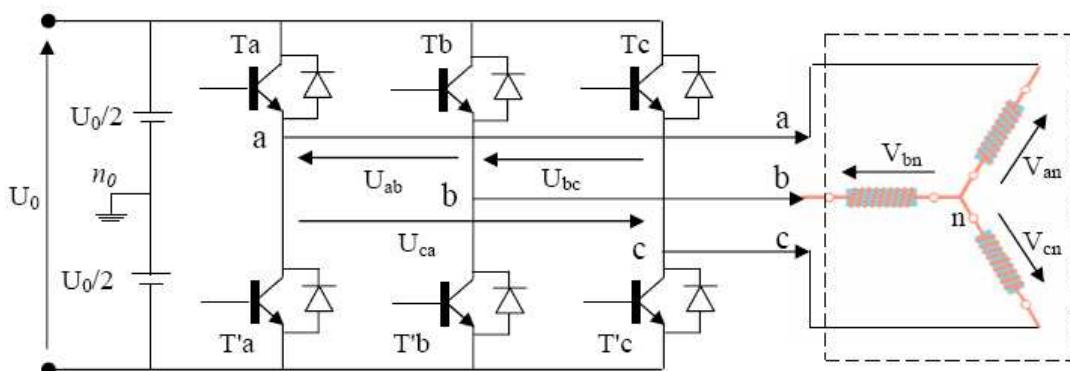


Figure3. 18 Schéma de l'onduleur triphasé.

La charge a été modélisée à partir des tensions simples qui nous notons  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ .

### **Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE**

---

On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors :

On a :

Si  $S_i = 1$ , Alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert

Si  $S_i = 0$ , Alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (3.9)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (3.10)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\text{Donc, on peut déduire que : } V_{nn0} = \left( \frac{1}{3} \right) [V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (3.12)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow S_i (i = a, b, c)$  on a :

$$V_{in0} = s_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (3.13)$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (3.14)$$

## **Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE**

---

En remplaçant (3.13) dans (3.14), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{2}{3}\right)V_{an0} - \left(\frac{1}{3}\right)V_{bn0} - \left(\frac{1}{3}\right)V_{cn0} \\ V_{bn} = -\left(\frac{1}{3}\right)V_{an0} + \left(\frac{2}{3}\right)V_{bn0} - \left(\frac{1}{3}\right)V_{cn0} \\ V_{bn} = -\left(\frac{1}{3}\right)V_{an0} - \left(\frac{1}{3}\right)V_{bn0} + \left(\frac{2}{3}\right)V_{cn0} \end{cases} \quad (3.15)$$

En remplaçant (3.14) dans (3.15), on obtient:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{bn} \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{3}\right)U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

### **3.7. Choix et modélisation de moteur**

#### **3.7.1. Technologie des moteurs [29], [49]:**

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

- Moteur à courant continu.
- Moteur à courant continu à aimant permanent sans balais(BLDC).
- Moteur à courant alternatif (asynchrone, synchrone).

#### **3.7.2. Moteur à courant continu**

En termes de simplicité le moteur à courant continu est une option attractive parce que le générateur photovoltaïque produit du courant continu [29],et moins d'équipement spécialisé sont nécessaires pour traitement de puissance.

Le problème avec le moteur à courant continu c'est qu'il a besoin des balais pour la commutation, les balais se détériorent avec le temps et doivent être remplacés après approximativement 1000 heures de l'opération.

Si des aimants permanents sont utilisés pour produire le champ magnétique, aucune puissance ne sera consommée dans les bobines d'excitation et par conséquent des rendements plus élevés seront obtenus. Cette augmentation de rendement est très appropriée aux systèmes de pompage photovoltaïques.

#### **3.7.3. Moteur à courant continu sans balais (BLDC)**

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

## **Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE**

---

Un moteur à courant continu sans balai est une machine électrique tournante où le stator est un stator classique triphasé comme celui d'un moteur asynchrone et le rotor a les aimants permanents montés extérieurs. À cet égard, le moteur à courant continu sans balais est équivalent à un moteur à courant continu avec les commutateurs sont inversés où l'aimant tourne tandis que les conducteurs restent stationnaires [29].

Le moteur à courant continu sans balais nécessite une excitation avec un onduleur triphasé de fréquence et d'amplitude variable. L'onduleur assure généralement la commutation électronique et la régulation du courant.

### **3.7.4. Moteurs à courant alternatif**

Les moteurs à courant alternatif comme le moteur asynchrone; sont des moteurs sans balais avec un rotor de construction robuste qui permet le fonctionnement fiable et sans entretien. La simplicité de la construction du rotor a également comme conséquence la baisse du prix du moteur et un rapport puissance /poids plus élevé est le plus utilisé dans les systèmes de pompage photovoltaïques [29].

Contrairement au moteur DC, ce moteur présente des caractéristiques non linéaires ce qui constitue un inconvénient pour le réglage de vitesse.

#### **-Hypothèses simplificatrices:**

Pour l'étude mathématique, le modèle de la machine asynchrone est généralement considéré [50] :

- ❖ La parfaite symétrie de la machine.
- ❖ L'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables).
- ❖ La répartition spatiale sinusoïdale des champs magnétiques le long de l'entrefer.
- ❖ L'équivalence du rotor en court-circuit à un enroulement triphasé monté en étoile.
- ❖ L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétriques.
- ❖ L'additivité de flux.
- ❖ La constance des inductances propres.
- ❖ La constance des résistances statoriques et rotoriques.
- ❖ La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

Les équations de la machine asynchrone à cage d'écureuil s'écrivent alors :

$$\begin{bmatrix} V_{As} \\ V_{Bs} \\ V_{Cs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{As} \\ \Phi_{Bs} \\ \Phi_{Cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{As} \\ i_{Bs} \\ i_{Cs} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Avec V, i et  $\Phi$  représentent respectivement la tension, le courant et le flux.

$R_s$  : La résistance statorique

$R_r$  : La résistance rotorique

### -Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées précédemment conduisent à des relations linéaires entre les courants, qui s'écrivent matriciellement comme suit :

$$[\Phi_s] = [L_{cs}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (3.19)$$

$$[\Phi_r] = [M_{rs}] \cdot [i_s] + [L_{cr}] \cdot [i_r] \quad (3.20)$$

Tel que  $[M_{rs}] = [M_{sr}]$

On désigne par :

$[L_{cs}]$  : Matrice d'inductance statorique

$[L_{cr}]$  : Matrice d'inductance rotorique

$[M_{rs}]$  : Matrice d'inductance mutuelle

Avec :

$$[L_{cs}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & M_s \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$[L_{cr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$L_{cr(s)}$  : Inductance cyclique propre du rotor (stator)

$M_{r(s)}$  : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques (statoriques)

### Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

---

$M_{rs}$  : Inductance mutuelle entre une phase du rotor et une phase du stator

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$\theta_r$  : Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases « A » et « a » pris comme axes de référence.

M : valeur maximale de l'inductance mutuelle lorsque les deux axes (A et a) se coïncident  
La résolution analytique du système d'équations (3.19) et (3.20) se heurte à des difficultés du fait que les termes trigonométriques de la matrice varient en fonction du temps. Cela conduira à l'usage de la transformation de Park qui permettra de rendre constant ces paramètres [50].

#### - Transformation de Park [14]

La transformation de Park permet le passage du système triphasé au système biphasé en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes Figure3.29 :

- homo polaire (indice 0)
- d'axes directs (indice u)
- d'axes en quadrature (indice v)

La conversion des variables du moteur réelles en variables du moteur primitives implique, la transformation des enroulements du moteur original, en enroulement disposé selon deux axes « U et V », cela a pour effet de rendre les inductances mutuelles et propres indépendantes de la rotation. La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétiques égales.

La Figure 3.19 représente le système d'axes réels triphasé «  $X_a, X_b, X_c$  » et le système d'axes fictif « U, V ». Considérons le vecteur spatial  $V_{sp}$  qui représente la valeur maximale de tension, de courant, ou de flux.

Le passage du système triphasé vers le système biphasé revient à exprimer les composantes « U, V » en fonction des anciens axes «  $X_a, X_b, X_c$  ». Les deux modèles sont identiques du point de vue électrique et magnétique.

$\Psi$  : représente l'angle entre le vecteur  $V_{sp}$  et l'axe de la phase  $X_a$

### Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

---

$\theta_a$  : représente l'angle instantané entre la phase de l'axe  $X_a$  et l'axe U

$\omega_a = \frac{d\theta_a}{dt}$  : La vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasés par rapport aux systèmes d'axes triphasés

Selon la Figure 3.19 la projection sur les axes triphasés donne les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{sa} = V_{sp} \cdot \cos(\psi) \\ V_{sb} = V_{sp} \cdot \cos(\psi - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{sc} = V_{sp} \cdot \cos(\psi - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.24)$$

La projection sur l'axe biphasé donne :

$$\begin{cases} V_{sU} = \frac{2}{3} \left[ V_{sa} \cdot \cos(\theta_a) + V_{sb} \cdot \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) + V_{sc} \cdot \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \right] \\ V_{sV} = \frac{2}{3} \left[ V_{sa} \cdot \sin(\theta_a) + V_{sb} \cdot \sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) + V_{sc} \cdot \sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \right] \end{cases} \quad (3.25)$$

Le terme «  $\frac{2}{3}$  » exprime le passage du système triphasé au système biphasé.

On ajoute l'expression homopolaire  $V_{so}$  à l'équation (3.25) pour équilibrer la transformation

$$V_{so} = \frac{1}{3} (V_{sa} + V_{sb} + V_{sc}) \quad (3.26)$$

$V_{so}$  : représente la composante homopolaire, elle est nulle pour les systèmes triphasés équilibrés. Et on ajoute  $V_{so}$  pour équilibrer la transformation trois à trois.

D'après les équations (2.24), (2.25) et (2.26), on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & -\sin(\theta_a) & 1 \\ \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sU} \\ V_{sV} \\ V_{so} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

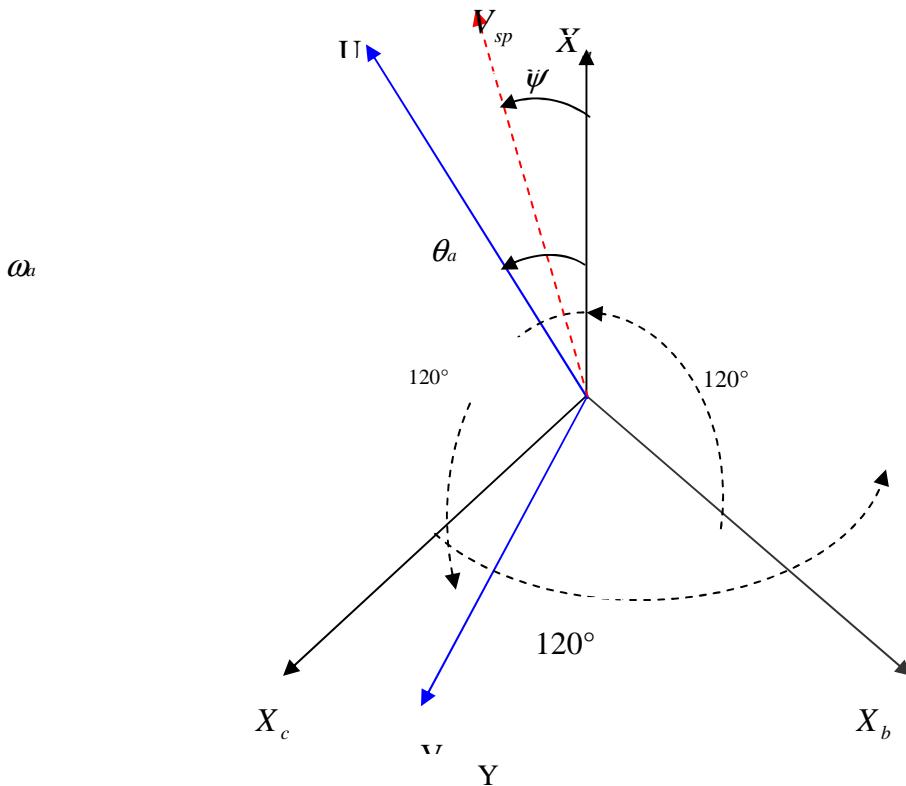


Figure 3.19 Passage du système triphasé au système biphasé et inversement.

Le passage du système triphasé au système biphasé s'obtient à partir de la matrice  $P(\theta_a)$ .

$$P(\theta_a) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & -\sin(\theta_a) & 1 \\ \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

La matrice de passage du système biphasé au système triphasé est donc:

$$[P(\theta_a)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_a) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Cette transformation est valable pour les courants, les tensions et les flux

- Le système « U, V » tourne à la vitesse  $(\omega_a - \omega_r)$  par rapport au rotor.

## Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

---

### -Modèle du moteur dans le système biphasé

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes « U », « V »

### -Equations électriques

En multipliant les deux équations (3.17) et (3.18) par la matrice de transfert de Park  $P(\theta_a)$  de deux cotés, et après tout calcul fait, annexe on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{sU} \\ V_{sV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sU} \\ i_{sV} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sU} \\ \Phi_{sV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_a \\ \omega_a & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{sU} \\ \Phi_{sV} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rU} \\ V_{rV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{rU} \\ i_{rV} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rU} \\ \Phi_{rV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_a - \omega_r) \\ (\omega_a - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{rU} \\ \Phi_{rV} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

### -Equations magnétiques

De même en multipliant les deux équations (3.19) et (3.20) par la matrice de transfert de Park «  $[P(\theta_a)]^{-1}$  » des deux côtés, et après tout calcul fait, Annexe on obtient :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sU} \\ \Phi_{sV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s \\ M_s & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sU} \\ i_{sV} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rU} \\ \Phi_{rV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r \\ M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{rU} \\ i_{rV} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

### -Définition des différents référentiels :

Il existe différentes possibilités pour le choix de l'orientation du repère d'axe « U », « V » qui dépendent généralement des objectifs de l'application. On peut choisir le référentiel le mieux adapté aux problèmes posés. Le choix se ramène pratiquement à trois référentiels orthogonaux Figure 3.20

- Référentiel des axes ( $\alpha, \beta$ ) : système biphasé à axes orthogonaux ( $\theta_a = 0$ ) (—)
- Référentiel des axes ( $d, q$ ) : système biphasé à axes orthogonaux ( $\theta_a = \theta_s$ ) (---)
- Référentiel des axes ( $x, y$ ) : système biphasé à axes orthogonaux ( $\theta_a = \theta_r$ ) (- · - )

Avec l'angle  $\theta_a$  : est une position quelconque d'observation que l'on peut choisir de trois manières différentes.

### -Référentiel fixe par rapport au stator

### Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

Ce système d'axe est immobile par rapport au stator.

Dans ce cas:

$$\theta_s = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} U \rightarrow \alpha \\ V \rightarrow \beta \end{cases}$$

$$\omega_a = \frac{d\theta_s}{dt} = 0, \Delta\omega = -\omega_r$$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{s\alpha} \\ \Phi_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_r \\ -\omega_r & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

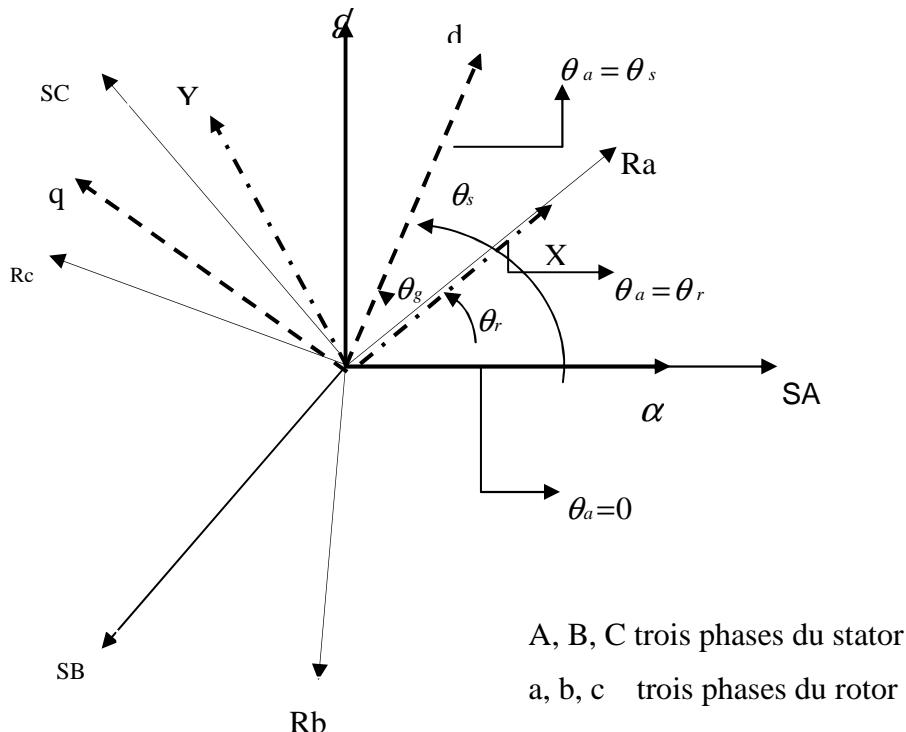


Figure3. 20 Définition des axes réels du moteur asynchrone triphasé par rapport aux différents référentiels

#### - Référentiel fixe par rapport au rotor

Ce système d'axes est immobile par rapport au rotor tournant à une vitesse  $\omega_r$ .

Dans ce cas :

$$\theta_a = \theta_r \Leftrightarrow \begin{cases} U \rightarrow x \\ V \rightarrow y \end{cases}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_a = \omega_r$$

Les équations électriques prennent la forme suivant:

$$\begin{bmatrix} V_{sx} \\ V_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sx} \\ \Phi_{sy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{sx} \\ \Phi_{sy} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rx} \\ V_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{rx} \\ i_{ry} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rx} \\ \Phi_{ry} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

#### -Référentiel fixe par rapport au champ tournant

Ce système d'axes tourne avec la vitesse de champ électromagnétique  $\omega_s$  créée par les enroulements du stator.

Dans ce cas :

$$\theta_a = \theta_s \Leftrightarrow \begin{cases} U \rightarrow d \\ V \rightarrow q \end{cases}$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_a = \omega_s, \Delta\omega_a = \omega_s - \omega_r = \omega$$

Les équations électriques prennent la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones, à fréquences variables, comme il est utilisé notamment dans la commandes des machines électriques dans les systèmes en boucle fermée ou les grandeurs à contrôler sont obligatoirement continus (non pulsés) [50].

#### -Expression du couple électromagnétique et de la puissance

L'expression du couple électromagnétique  $C_e$  est donnée par :

$$C_e = \frac{\partial w_e}{\partial \theta_{geo}} = p \cdot \frac{\partial w_e}{\partial \theta_{ele}} \quad (3.40)$$

Avec  $w_e$  : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

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

$$\theta_{geo} = \frac{\theta_{ele}}{p} \quad (3.41)$$

$p$  : Nombre des pôles

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

$$p(t) = V_{sA} \cdot i_{sA} + V_{sB} \cdot i_{sB} + V_{sC} \cdot i_{sC} \quad (3.42)$$

$$p(t) = \frac{3}{2} \cdot [V_{sU} \cdot i_{sU} + V_{sV} \cdot i_{sV}] + 3 \cdot V_{so} \cdot i_{so} \quad (3.43)$$

Le système étant équilibré, il vient :

$$p(t) = \frac{3}{2} \cdot [V_{sU} \cdot i_{sU} + V_{sV} \cdot i_{sV}] \quad (3.44)$$

En remplaçant  $V_{sU}$  et  $V_{sV}$  par leurs expressions il vient :

$$P(t) = R_s \cdot [i_{sU}^2 + i_{sV}^2] + \frac{3}{2} \cdot [i_{sV} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{sU} + I_{sV} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{sU}] + \frac{3}{2} \cdot \omega_a \cdot [\Phi_{sU} \cdot I_{sV} - \Phi_{sV} \cdot I_{sU}] \quad (3.45)$$

Cette dernière expression est composée de trois parties :

1)  $\frac{3}{2} \cdot R_s \cdot [i_{sU}^2 + i_{sV}^2]$  représente les chutes ohmiques.

2)  $\frac{3}{2} \cdot [i_{sV} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{sU} + I_{sV} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{sU}]$  représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée.

3)  $\frac{3}{2} \cdot \omega_a \cdot [\Phi_{sU} \cdot I_{sV} - \Phi_{sV} \cdot I_{sU}]$  Représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

Sachant que :  $P_e = C_e \cdot \omega_a$

On obtient :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot [\Phi_{sU} \cdot I_{sV} - \Phi_{sV} \cdot I_{sU}] \quad (3.46)$$

### -Equation de mouvement

### **Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE**

---

L'étude du comportement de la machine asynchrone aux différents régimes de fonctionnement en particulier, le régime transitoire met en évidence l'équation du mouvement qui est définie comme suit :

$$Ce - Cr = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (3.47)$$

Avec :

$\Omega$  : Vitesse de la machine.

$f$  : coefficient de frottement visqueux

$J$  : Moment d'inertie des masses tournantes.

$C_e$  : Couple électromagnétique.

$C_r$  : Couple résistant

#### **-Simulation de la machine asynchrone**

Le moteur asynchrone est normalement alimenté directement à partir du réseau industriel par un système de tensions triphasées.

Dans certaines applications pour lesquelles la variation de la vitesse est nécessaire, le moteur sera alimenté par un variateur de vitesse (convertisseur électrique) entre le générateur GPV et le moteur (MAS).

#### **-Simulation du moteur asynchrone triphasé dans le repère fixe lié au stator.**

Etude dynamique :

Description du modèle selon les axes  $(\alpha, \beta)$ .

En remplaçant les expressions (3.32 et 3.33) dans les équations (2.34) et (2.35), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} + M \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt} + M \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} = 0 = R_r i_{r\alpha} + L_r \cdot \frac{di_{r\alpha}}{dt} + M \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \omega L_r i_{s\beta} - \omega M i_{s\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = R_r i_{r\beta} + L_r \cdot \frac{di_{r\beta}}{dt} + M \frac{di_{s\beta}}{dt} + \omega L_r i_{r\alpha} + \omega M i_{s\alpha} \end{cases} \quad (3.48)$$

Considérons les tensions  $(V_{s\alpha}, V_{s\beta})$  comme grandeurs de commande, les courants

### Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

---

statoriques ( $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ ), et les flux rotoriques ( $\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$ ), la vitesse mécanique  $\Omega$  comme variables d'états et le couple résistant comme perturbation.

#### -Equations électriques

On cherche à obtenir un système d'équation écrit sous forme d'équation d'état. Le modèle sera de la forme :

$$\frac{dX}{dt} = A.X + B.U \quad (3.49)$$

$$[X] = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \Phi_{r\alpha} \quad \Phi_{r\beta}]^T ; \text{ Vecteur d'état.}$$

$$[U] = [V_{s\alpha} \quad V_{s\beta}]^T ; \text{ Vecteur de commande.}$$

$[A]$  : Matrice d'évolution d'état du système.

$[B]$  : Matrice de système de commande.

Après tout calcul fait on obtient :

$$A = \begin{bmatrix} -(\frac{1}{T_s.\sigma} + \frac{1}{T_r} \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma}) & 0 & \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{T_r.M} & \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{M} \cdot \omega \\ 0 & -(\frac{1}{T_s.\sigma} + \frac{1}{T_r} \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma}) & -(\frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{M}) \cdot \omega & \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{T_r.M} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s.\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s.\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

#### Equations mécaniques

L'équation mécanique de mouvement et l'équation de couple électromagnétique sont définies comme suit:

$$\begin{cases} Ce = P \cdot \frac{M}{Lr} (\Phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \\ j \cdot \frac{d\Omega}{dt} + \Omega \cdot f = C_e - C_r \end{cases} \quad (3.52)$$

### Bloc de simulation

Pour réaliser cette simulation nous traduisons le modèle représenté par les équations précédentes sous forme de structure en schéma-bloc que nous présentons par la Figure 3.21

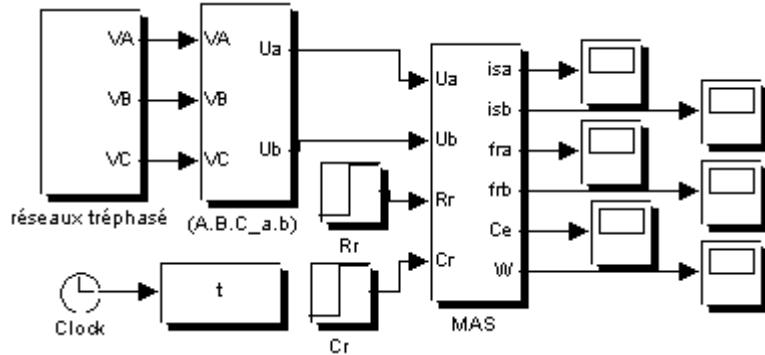


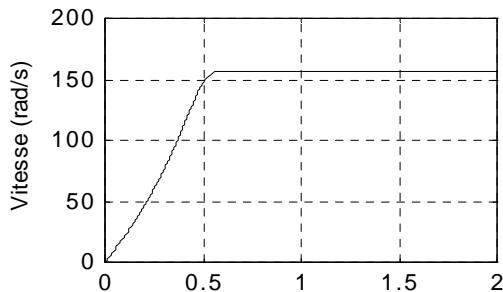
Figure 3.21 Structure en schéma bloc de la MAS

### Résultats de simulation

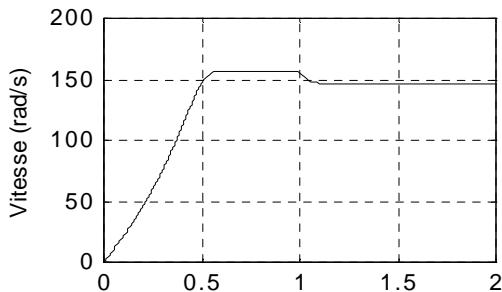
Les Figures suivantes illustrent les simulations effectuées sur un MAS dont les paramètres sont donnés en annexe.

Ces Figures présentent les principales caractéristiques du MAS pour un fonctionnement à vide, puis en charge.

Démarrage à vide  $C_r = 0$  N.m



Démarrage en charge  $C_r = 10$  N.m



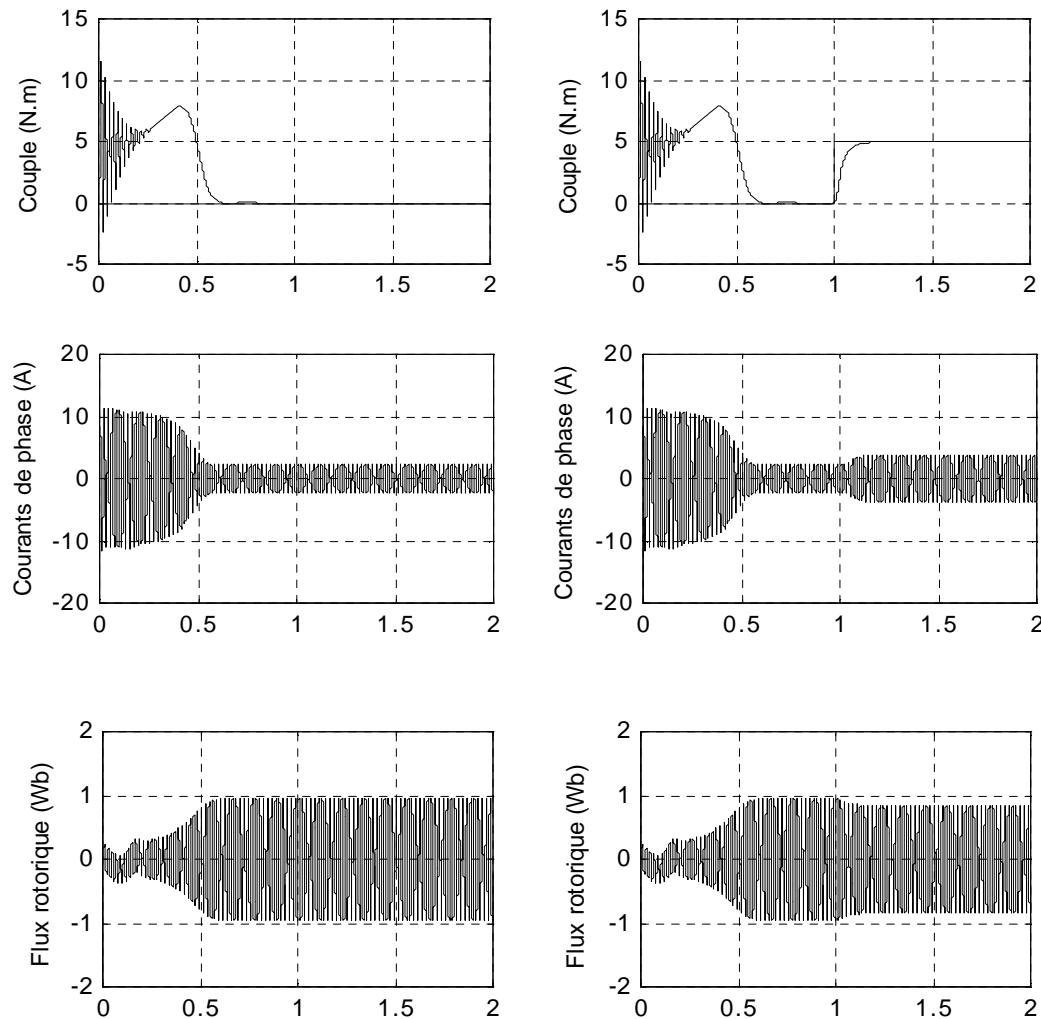


Figure 3.22 Fonctionnement à vide et en charge de la MAS.

### 3.8. Modélisation de la pompe

#### Notions hydrauliques

Les stations de pompage sont constituées d'une ou plusieurs pompes qui aspirent des volumes d'eau et les refoulent sous une certaine pression dans les canalisations du réseau. Les paramètres nécessaires pour dimensionner la pompe solaire sont le débit d'exploitation et la hauteur à laquelle la pompe devra refouler. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite.

#### Le débit Q:

Le débit fourni par une pompe est la quantité d'eau qu'elle refoule durant un intervalle de temps donné. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en  $\text{m}^3$  par jour. La hauteur manométrique totale HMT.

### **Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE**

C'est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur (Figure 3.23) peut être calculée comme suit :

$$H_{MT} = H_g + P_c \quad (3.53)$$

Avec :

$H_g$  : la hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation, elle est calculée par la formule suivante :

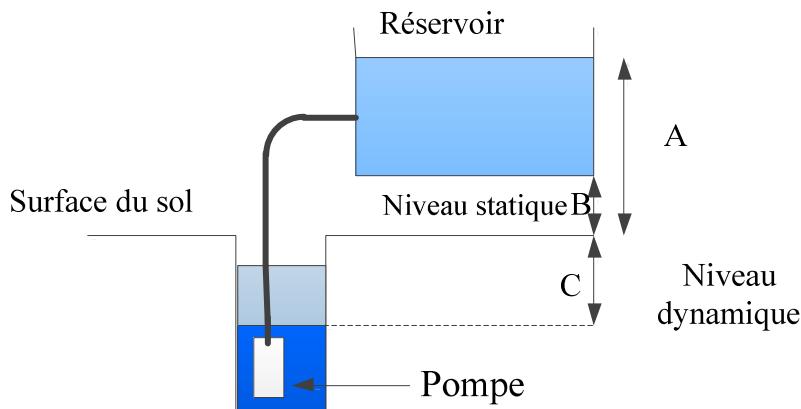


Figure 3.23 Hauteur manométrique total.

$$H_g = A + B + C \quad (3.54)$$

$P_c$  : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elles s'expriment en mètres d'eau et elles sont fonction de la distance des conduites ,de leur diamètre et du débit de la pompe.

$Nss$ : Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau avant pompage.

$Nd$ : Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance le sol et la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen.

Rabattement : La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique.

Rabattement maximal : est le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

#### **3.8.1. Les types des pompes**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée, et selon leur principe de fonctionnement.

**3.8.1.1. Selon l'emplacement de la pompe par rapport à l'eau pompée:**

- La pompe à aspiration
- La pompe à refoulement

**3.8.1.2. Selon leur principe de fonctionnement:**

**Les pompes volumétriques[44]:**

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

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

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

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT.

La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau.

On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multiples.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur, et la courbe est un droit représenté dans la Figure3.24, le couple du moteur est varié essentiellement en fonction de la HMT et est constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Donc le couple de démarrage est indépendant du débit et sera proportionnel à la hauteur manométrique totale e HMT.

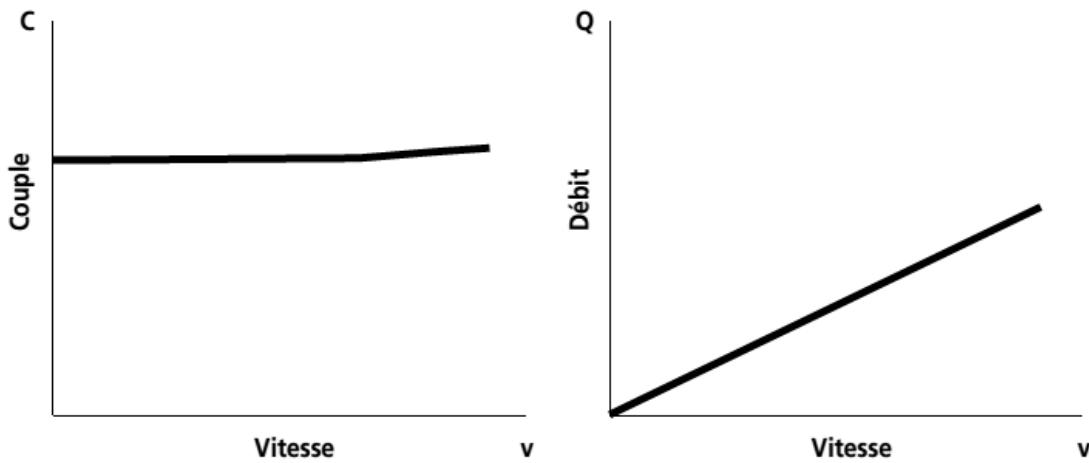


Figure3.24 Caractéristique couple vitesse A-Caractéristique Débit vitesse d'une pompe volumétrique B.

**-Les pompes centrifuges [1, 15] :**

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Afin d'augmenter la pression, donc la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés sur le même arbre de transmission. Chaque étage fait passer l'eau à l'étage suivant en relevant la pression jusqu'à l'étage final, délivrant un volume d'eau à pression élevée Figure 3.25.

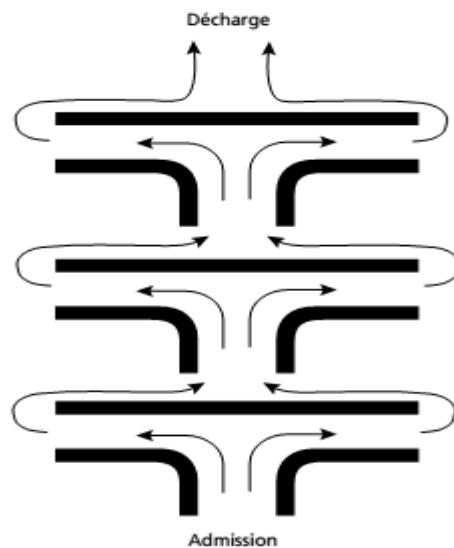


Figure3.25 Cheminement de l'écoulement dans une pompe centrifuge à étages multiples.

Ces pompes incluent les pompes submersibles avec moteur de surface ou submergé les pompes flottantes et les pompes rotatives à aspiration.

## **Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE**

---

### **-Constitution d'une pompe centrifuge:**

Une pompe centrifuge est construite pour répondre à des conditions précises de fonctionnement (débit Q et une hauteur Hm). D'une façon générale, une pompe comporte:

- 1- Un distributeur fixe, le plus souvent réduit à une simple tubulaire profilée, qui donne au fluide une vitesse et une direction convenables, et conduisant ce dernier depuis la section d'entrée de la machine jusqu'à l'entrée de la roue . Le distributeur est généralement constitué par un cône convergent qui permet de réaliser une meilleure disposition des filets liquides en améliorant le parallélisme et l'égalité des vitesses. Il est précédé, à l'amont par la canalisation d'aspiration;
- 2- Une roue ou impulseur, placée sur l'arbre de la pompe appelée aussi rotor (mobile) qui est l'élément actif de la pompe, son rôle est de transformer l'énergie mécanique appliquée à l'arbre en énergie hydrodynamique (énergie de pression et énergie cinétique).
- 3- Un diffuseur fixe qui transforme l'énergie cinétique du fluide à la sortie de la roue en énergie de pression (énergie potentielle).

### **Principe de fonctionnement:**

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge est basé sur le principe suivant : Lorsque la pompe est pleine d'eau, sous l'effet de la rotation de la turbine entraînée par le moteur, l'eau qui arrive dans la région axiale est projetée à la périphérie et de ce fait, engendre une dépression. Cela provoque un appel des tranches suivantes et par suite, un écoulement continu de la veine liquide. Cette dernière est recueillie par la volute ou par le diffuseur et dirigée dans la conduite de refoulement.

### **Caractéristiques de la pompe centrifuge:**

**Caractéristiques débit- vitesse:** Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit.

### **Caractéristiques couple - vitesse:**

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur Figure 3.26. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit de départ non nul. Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant Cr :

### Chapitre 3 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE ETAGES D'ADAPTATION, MOTOPOMPE

---

$$C_r = K_r \times \Omega^2 + C_s \quad (3.55)$$

Avec :  $K_r$  : coefficients de proportionnalité [ $(\text{Nm}/\text{rad.s}^{-1})^2$ ].

$C_s$  : le couple statique, très petite (négligeable).

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_{mec} = K_p * \Omega^3 \quad (3.56)$$

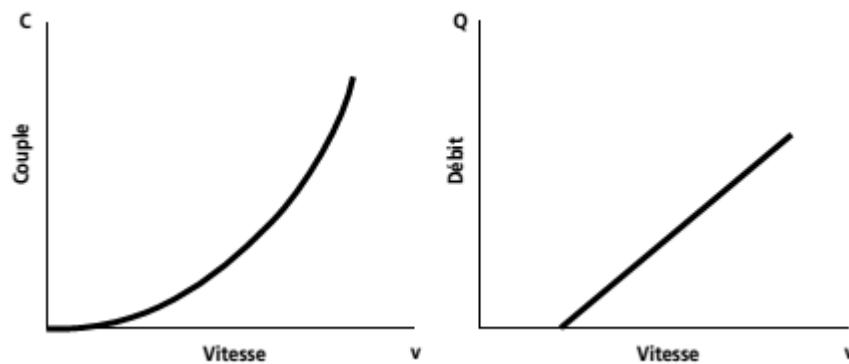


Figure 3.26 Caractéristiques couple- vitesse A, Débit-vitesse B pompe centrifuge.

#### Caractéristique Débit Hauteur:

Les constructeurs sont en mesure de fournir au client les courbes  $Q=f(H_m)$  Figure 3.27 maximale et minimale correspondant aux diamètres maximaux et minimal possibles de la roue. Si la charge de moteur est une pompe émergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale  $H_m$  en fonction du débit  $Q$ . En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN "

$$H = k_1 \omega^2 + k_2 \omega Q + k_3 Q^2 \quad (3.57)$$

Avec :  $k_1, k_2, k_3$ : des constantes propre de la pompe donnée par le constructeur

Lorsque la quantité d'eau est nulle, cela se manifeste par le phénomène de barbotage qui se traduit par la hauteur de barbotage  $H_1$ . Et l'équation précédent devient comme suit :

$$H_1 = k_0 \cdot \Omega^2 \quad (3.58)$$

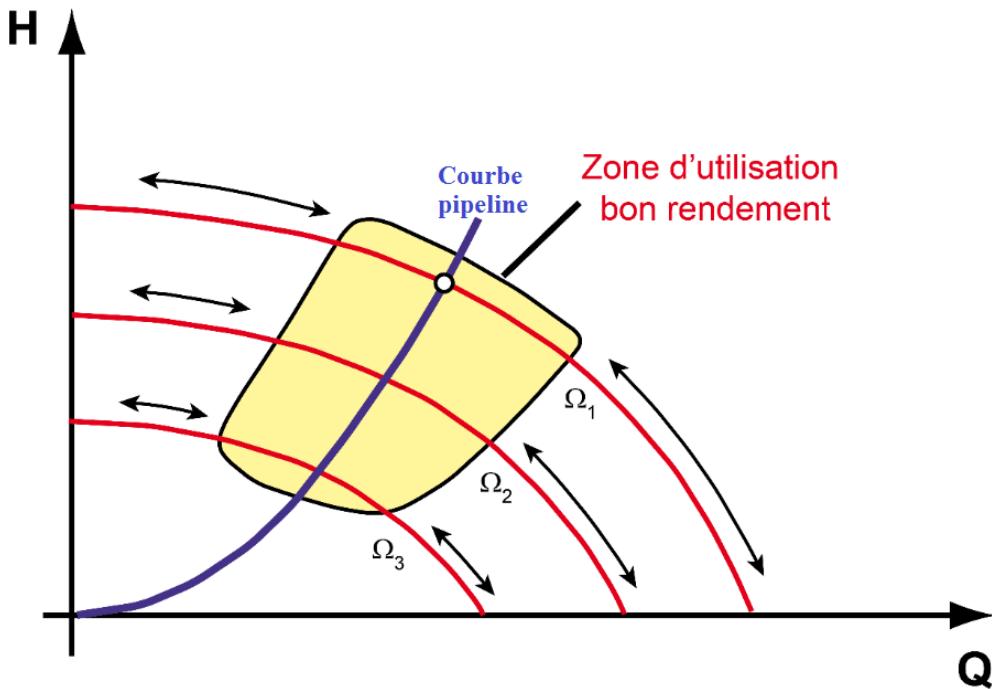
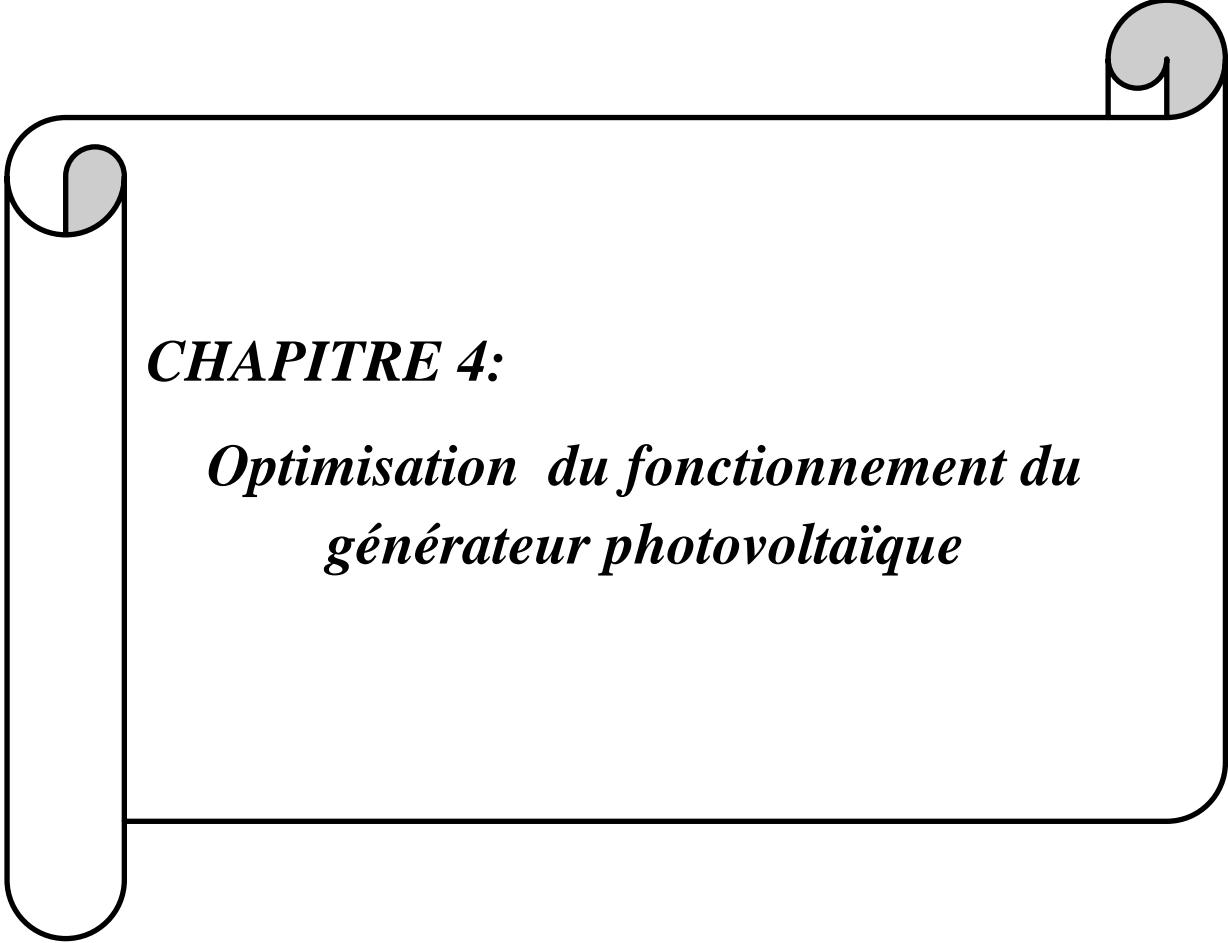


Figure3.27 Caractéristique  $H=f(Q)$  de la pompe centrifuge

### 3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé le pompage PV du type « au fil du soleil ». Nous avons également pu conclure que les systèmes de pompage photovoltaïque les plus courants, sont constitués d'une pompe centrifuge menée d'un moteur à induction triphasé. Le moteur est alimenté par un générateur photovoltaïque sans batteries, via un onduleur triphasé à fréquence variable conçu spécifiquement pour cette application. Nous avons aussi donné les définitions importantes et nécessaires pour la compréhension de l'étude qui sera présentée au chapitre suivant.



**CHAPITRE 4:**

*Optimisation du fonctionnement du  
générateur photovoltaïque*

## 4.1. Introduction

Le coût élevé des générateurs photovoltaïques peut justifier l'adjonction d'un appareillage annexe, même sophistiqué, permettant de gérer au mieux l'énergie disponible. En particulier, sur la caractéristique courant-tension du générateur (qui dépend des conditions d'éclairement, de température, de vieillissement) il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale .L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur. Dans ce chapitre on présente une synthèse des différentes techniques MPPT utilisé dans la littérature.

## 4.2. Aperçu sur le problème

Lorsqu'un générateur photovoltaïque est directement couplé à une charge, Figure 4.1, le point de fonctionnement de générateur sera à l'intersection de la caractéristique I-V et celle de la charge. En d'autres termes, l'impédance de charge détermine l'état de fonctionnement du module photovoltaïque. En général, ce point de fonctionnement est rarement à l'MPP, donc ne produit pas la puissance maximale. Une étude montre qu'un système à couplage direct utilise 31% de la capacité photovoltaïque [35], donc il faut avoir un adaptateur d'impédance ou adaptateur de charge Figure 4.2.

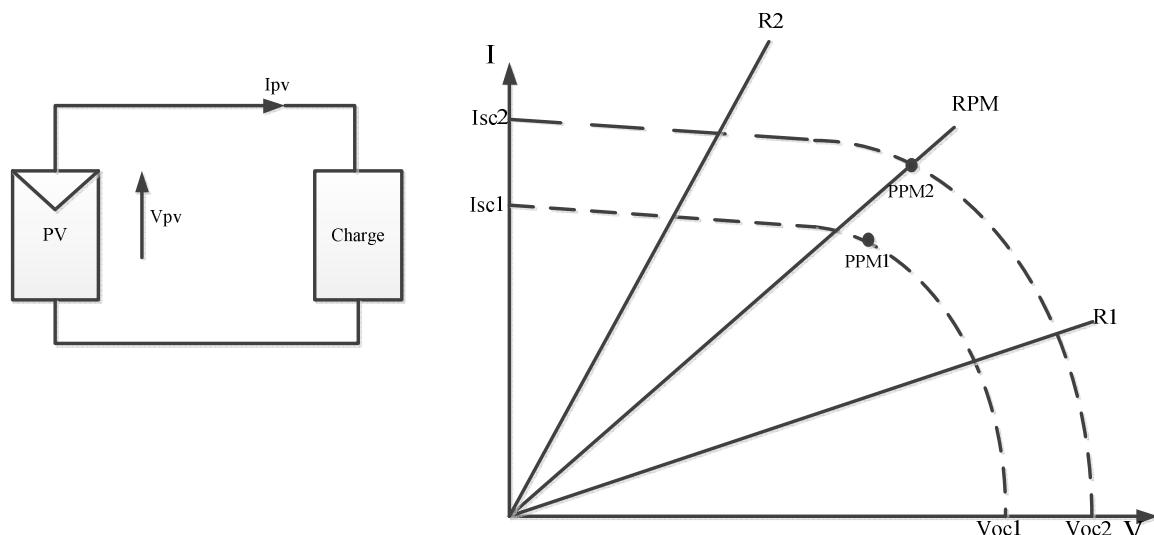


Figure 4.1 Schéma montre l'importance de convertisseur MPPT.

Le but de l'emploi MPPT est de garantir que dans toutes les conditions de l'environnement (en particulier le rayonnement solaire et de la température), la puissance maximale est extraite des modules PV. Ceci est réalisé en faisant correspondre le MPPT PV avec le convertisseur correspondant de puissance.

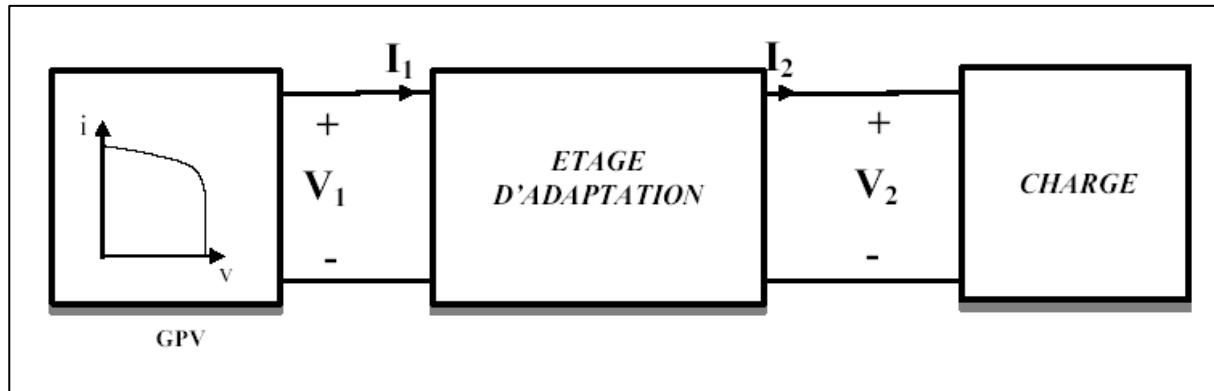


Figure4. 2 Système photovoltaïque avec adaptateur de charge.

Le contrôle MPPT est normalement employé en combinaison avec le convertisseur de puissance (convertisseur DC-DC et / ou l'onduleur DC-AC) [51], voir Figure 4.3.

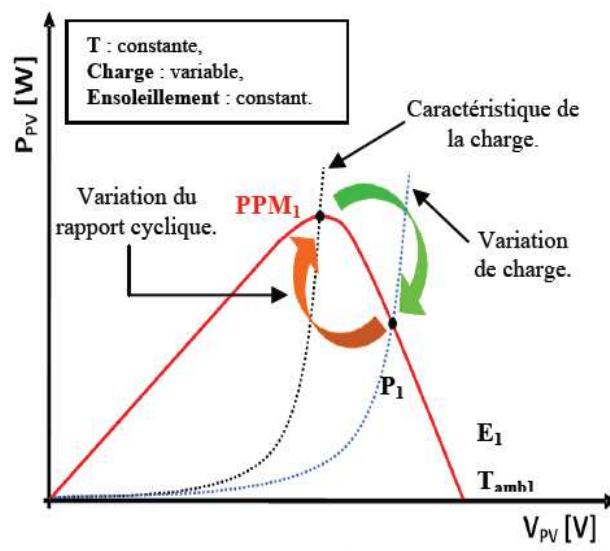


Figure4.3 Schéma de principe de contrôle MPPT.

### 4.3. Catégorisation des techniques de poursuite du point de puissance maximale

À ce jour, diverses méthodes MPPT ont été proposées [52], ces techniques varient en complexité, la précision et la vitesse, de chacune de ces méthodes peuvent être classées en fonction du type de la variable de commande utilisée:

- 1) la tension.
- 2) le courant.
- 3) le rapport cyclique.

#### 4.3.1. Les algorithmes MPPT classiques

##### a- Méthode de perturbation et d'observation (P&O) [13]

Le principe des commandes MPPT du type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte Ainsi, comme l'illustre Figure 4.4 on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P-V, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

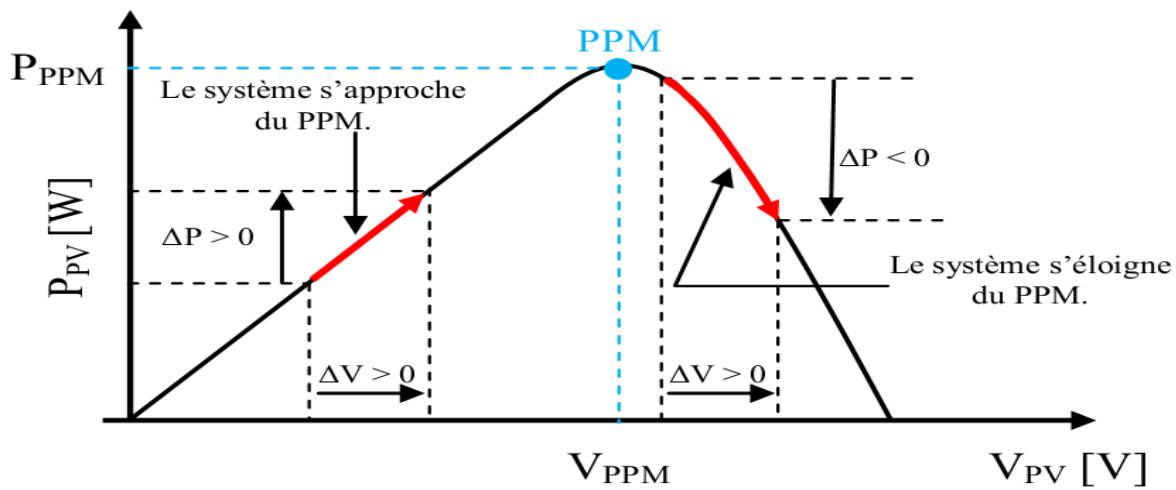


Figure 4.4 Caractéristique P - V d'un panneau solaire.

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

Figure 4.5 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type

## **Chapitre 4 : Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque PV**

---

de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

L'inconvénient de la technique de P&O réside dans le cas de changement rapide des conditions atmosphériques, tel qu'un nuage mobile; cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans la direction fausse.

Ainsi, l'algorithme de P&O continuera à déplacer le point de fonctionnement du convertisseur plus loin du point réel de puissance maximale, et il y aura plus de puissance perdue. Cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que le changement de l'éclairement ralentisse ou se stabilise. Un autre inconvénient de cette méthode est l'oscillation autour du point de puissance maximale dans les conditions de fonctionnement normal.

La première solution à ce problème est d'augmenter la vitesse d'exécution en employant un micro-contrôleur plus rapide.

La deuxième solution est de vérifier n'importe quel changement rapide d'irradiation en vérifiant la valeur  $dI/dt$  de GPV et en neutralisant l'ajustement de tension si le changement  $dI/dt$  de GPV dépasse une certaine limite.

### **b- Méthode conductance progressive (Inc-Cond) :**

Pour rechercher les PPM, cet autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un MPP. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I}{V}$$

et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module ( $P_{PV}$ ) par rapport à la tension ( $V_{PV}$ ) donne la position du point de fonctionnement par rapport au MPP (Figure 4.6). Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite.

Figure 4.6 permet d'écrire les conditions suivantes:

-Si  $\frac{dI}{dV} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche du MPP.

- Si  $\frac{dI}{dV} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le MPP.

-Si  $\frac{dI}{dV} < 0$ , le point de fonctionnement est sur la droite du MPP.

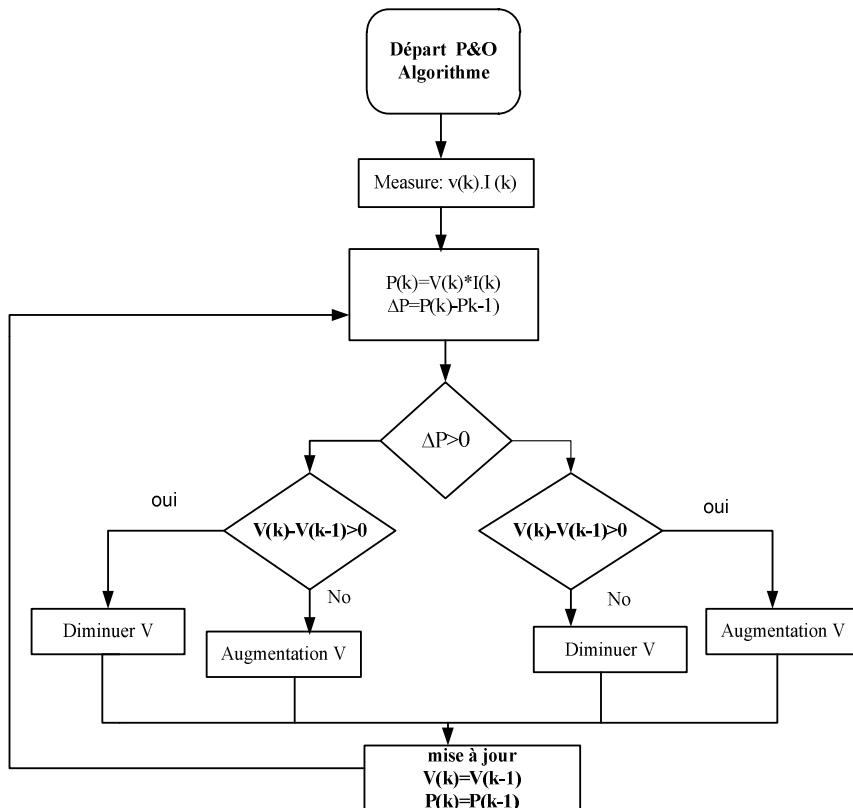


Figure4. 5 Organigramme de la méthode MPPT P&O.

#### 4.3.2. Les algorithmes MPPT à base des techniques d'intelligence artificielle

Les techniques qui entrent dans cette catégorie comprennent, la logique floue, réseaux de neurones artificiels (ANN), et algorithmes évolutionnaires (EA).

##### a- MPPT à la base des notions de logique floue:

La logique floue a fait son apparition en 1965 avec les travaux de L. Zadeh, ce dernier a formalisé la représentation et le traitement de connaissance imprécises ou approximatives afin de traiter des systèmes de grande complexité ou mal connu. La logique floue intervient dans la manipulation des connaissances imparfaites et elle est survenue comme une alternative efficace pour de tels systèmes populaires, les contrôleurs de logique floue ont les avantages de travailler avec entrées imprécises, n'ayant pas besoin d'un modèle mathématique

précis et non-linéarité de manutention.

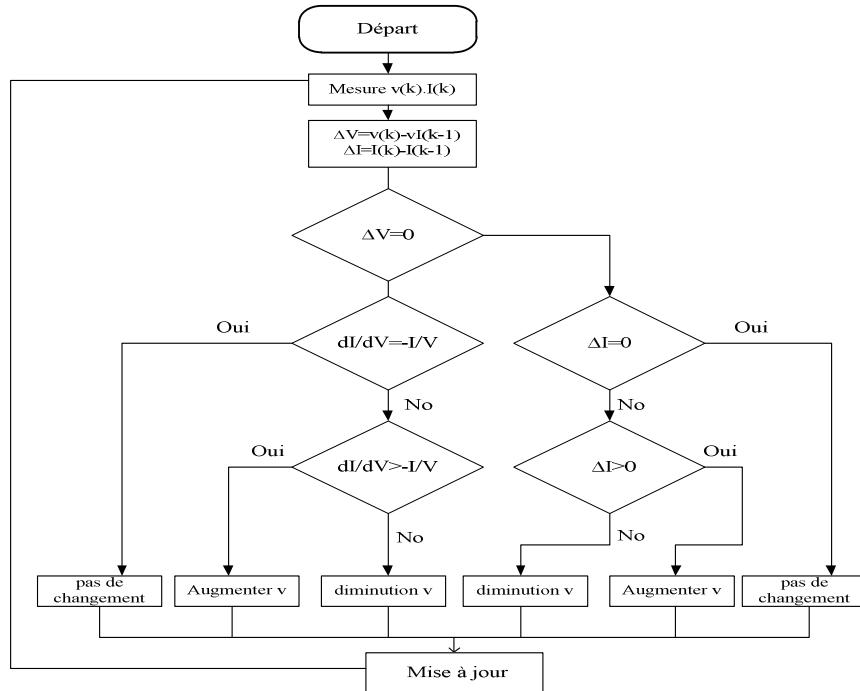


Figure 4.6 Organigramme de la méthode IncCond.

Généralement, la perception de l'homme pour un système donné n'est pas basée sur des modèles mathématiques précis.

En l'état actuel, les deux domaines d'applications de la logique floue qui deviennent de plus en plus important, sont décrits dans [53].

- la conception de régulateurs pour des procédés difficilement modélisables.
- la conception de régulateurs non linéaires pour des procédés modélisables.

Contrôle de la logique floue est généralement constitué de trois étapes Figure 4.7 :

#### a-Fuzzification :

L'étape de fuzzification consiste à définir des ensembles flous pour les variables d'entrée et de sortie.

Pour chacune de ces variables, on doit connaître a priori son intervalle de définition. Dans la plupart des cas, le régulateur flou reçoit comme variables d'entrée, l'erreur entre la sortie du processus et le signal de consigne ainsi que la variation de cette erreur.

#### B-Inférence:

C'est l'étape où l'on établit les règles floues qui permettent d'aboutir à la commande en fonction des valeurs de l'erreur et de sa variation.

## **Chapitre 4 : Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque PV**

---

En général, la commande dépend non seulement de l'erreur mais aussi de sa variation. Les règles floues lient la variable de sortie aux variables d'entrée afin de tirer des conclusions ou déductions floues.

Une règle floue comporte une prémissse du genre « Si l'erreur est négative ET la variation de l'erreur est négative » et une déduction floue du type « Alors u est positive grande ». Dans le cas où les deux variables d'entrée sont définies, chacune, par 3 ensembles flous, on aboutit à 9 règles floues, lesquelles, dans le cas particulier du pendule inversé sont données par la table, dite d'inférence, suivante :

Après l'édition des règles, il reste à calculer les degrés d'appartenance de la variable de sortie à tous les ensembles flous qui lui sont associés.

Chaque règle est composée de prémisses liées par les opérateurs ET, OU et donne lieu à une implication par l'opérateur ALORS. La méthode de Mamdani consiste à utiliser l'opérateur min pour le ET et l'opérateur max pour le OU.

Plusieurs règles peuvent être activées en même temps, i.e. que chacune de leurs prémisses possède un degré d'appartenance non nul. Ceci dépend des types de fonctions d'appartenance utilisées ; en l'occurrence toutes les règles sont, à chaque instant d'échantillonnage, plus ou moins activées si l'on choisit des fonctions d'appartenance de forme gaussienne.

L'agrégation de ces règles, opération qui doit aboutir à une seule valeur de la variable de sortie, se fait par l'opérateur max, comme si les règles étaient liées par l'opérateur OU.

Cette méthode peut être illustrée, comme suit, dans le cas de l'agrégation des règles 1 et 2.

Chaque prémissse de la règle 1 est mise en évidence par l'écrêtage de la fonction d'appartenance PG soit par le degré d'appartenance de  $e$  à l'ensemble N, soit par celui de  $\Delta e$  à l'ensemble N.

### **C-Etape de défuzzification :**

Lors de la fuzzification, pour chaque variable d'entrée réelle, on calcule ses degrés d'appartenance aux ensembles flous qui lui sont associés.

Dans l'étape de défuzzification, on réalise l'opération inverse, à savoir, obtenir une valeur réelle de la sortie à partir des surfaces obtenues dans l'étape d'inférence.

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, dont la plus utilisée est celle du centre de gravité.

## **Chapitre 4 : Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque PV**

---

La boîte à outils « Fuzzy Logic TOOLBOX » de l'enivrement MATLAB/Simulink dispose de plusieurs types de défuzzification :

- 'centroid' : centre de gravité de la surface,
- 'bisector' : bissecteur de la surface,
- 'mom' : moyenne des maximas,
- 'som' : plus petit des maximas en valeur absolue,
- 'lom' : plus grand des maximas en valeur absolue

Parmi ces méthodes, les plus utilisées sont la méthode du centre de gravité 'centroid' et celle de la moyenne des maximas 'mom'.

La méthode 'centroid' calcule le centre de gravité de la surface obtenue après l'étape d'inférence et le projette sur l'axe horizontal. On réalise ainsi la moyenne de toutes les valeurs de la variable de sortie, chacune pondérée par son degré d'appartenance.

La méthode 'mom' ou la moyenne des maximas correspond à un simple calcul de moyenne arithmétique des valeurs ayant le plus grand degré d'appartenance (1 dans le cas de la figure précédente pour toutes les valeurs allant de -8 à -4 par pas de 0.1).

Les méthodes som et lom consistent à prendre, respectivement, le plus petit et le plus grand des maximas, qui sont, dans le cas précédent, les valeurs -8 et -4.

Ces 2 dernières méthodes, ne requièrent aucune opération en virgule flottante car il s'agit seulement de la recherche des valeurs maximales dont on prend le minou le max; en contrepartie les valeurs sont très imprécises car il n'y a qu'une seule valeur qui est retenue (la plus faible ou la plus élevée).

La méthode la plus précise où toutes les valeurs de l'univers de discours interviennent plus ou moins fortement suivant le degré d'appartenance est celle du centre de gravité.

Dans notre cas, l'objective de la commande est d'extraire et de poursuivre la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque pour différentes insolations et différentes valeurs de température. La puissance maximale qui correspond au point de fonctionnement optimal est déterminée pour différentes d'éclairements solaires..

Le modèle mathématique du système n'est pas requis. C'est en soi un avantage important montré la convergence rapide vers le MPP et la fluctuation minimale à l'MPP.

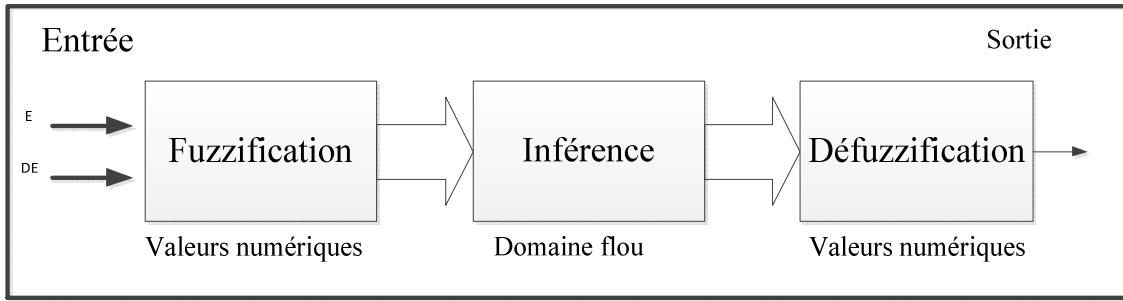


Figure4.7 Déférentes étapes d'un régulateur flou.

#### b- MPPT a la base des notions de réseau de neurones artificiel:

Les neurones sont les cellules de base du système nerveux central. Chaque neurone reçoit des influx nerveux à travers ses dendrites (récepteurs), les intègre pour en former un nouvel influx nerveux qu'il transmet à un neurone voisin par le biais de son axone (émetteur).

La modélisation des neurones biologiques par des neurones formels, datant des années quarante, a été faite par Mac Culloch et Pitts.

Les réseaux de neurones ont généralement trois couches: entrée, cachés, et un ou plusieurs couches de sortie comme représenté sur la Figure 4.8.

La capacité de l'ANN à reconnaître et à estimer des paramètres inconnus a inspiré son application pour le suivi MPP [54], les variables d'entrée à l'ANN peuvent être des paramètres de GPV tel que  $V_{oc}$  et  $I_{sc}$ , l'irradiation ou la température ou une combinaison quelconque de ceux-ci.

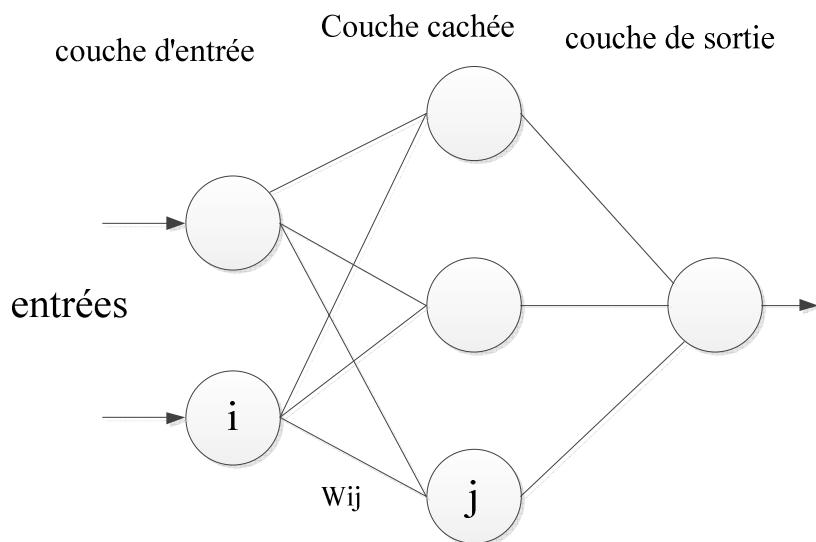


Figure4.8 Schéma générale des algorithmes basé sur les réseaux de nouerons.

Le résultat est habituellement un signal de référence, qui peut être soit la tension, le courant

## **Chapitre 4 : Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque PV**

---

ou le rapport cyclique .Pour identifier avec précision le MPP, les poids associés aux neurones doivent être soigneusement calculée grâce à un processus complet de formation.

Une fois formée, l'ANN peut être utilisée comme l'estimateur MPP qui donnera la référence valeur de ( $V_{mp}$  ou  $I_{mp}$ ) au contrôleur de MPPT.

### **c- L'optimisation par essaims particulaires (PSO en Anglais) :**

En 1995, le Dr Eberhart et le Dr Kennedy développés l'algorithme PSO [55], cette méthode est basée sur l'optimisation stochastique, permettant de simuler le déplacement d'un groupe d'oiseaux. Bien que PSO soit similaire aux algorithmes génétiques, en termes de l'initialisation de la population avec des solutions aléatoires et la recherche d'optimum global.

L'algorithme MPPT basé sur les notions de PSO a une meilleure performance dans le cas de conditions de déséquilibre, et il est largement utilisé dans ce cas.

Cet algorithme est inspiré du comportement social de flocage d'oiseaux ou de la scolarisation de poisson.

#### **4.3.3. L'MPPT à convergence rapide (Fast MPPT)**

Il existe deux inconvénients principaux dans les méthodes classiques (Inc.Cond et P&O) [56], [57], qui sont l'oscillation en régime stationnaire et également la confusion lorsque le niveau d'irradiation solaire augmente. La forme de la courbe P-V est utilisée par la méthode de Inc.Cond cette forme est affectée par le niveau d'irradiation solaire et la résistance de charge. Ensuite, l'algorithme utilise la valeur de courant et de tension du PV dans le calcul. Il est donc nécessaire de tenir compte de l'effet de l'irradiation solaire et des changements de charge par rapport à la valeur de courant et de tension du GPV tableau 4.1.

Tableau4.1 Modifications de la tension et du courant PV lors du changement d'irradiation solaire et de la résistance de charge

		Changement dV	Changement dI
Irradiation	Augmente	Augmente	
	Diminue		Diminue
Charge (résistance)	Augmente	Augmente	Diminue
	Diminue	Diminue	Augmente

Le tableau 4.1 résume les réponses de la tension et de la valeur de courant du GPV aux

variations du niveau d'irradiation solaire et de la résistance de charge.

Une erreur autorisée est appliquée pour éliminer l'oscillation en régime permanent et l'équation (4.1) est utilisée. La figure 4 montre l'organigramme de la méthode proposée.

$$|I + V(dI/dV)| < 0.06 \quad (4.1)$$

#### 4.4. Résultats et discussion

Dans cette section nous présentons les résultats on présente les résultats de simulation de trois types d'algorithmes MPPT sous Matlab/Simulink sous un scénario d'éclairement et /ou température variable.

Figure 4.9,et Figure 4.10 représentent les résultats des algorithmes MPPT traditionnelles P&O Figure 4.9 et Inc-Cond Figure 4.10 sous une variation rapide de l'éclairement a partir 500 W/m<sup>2</sup> entre [0s, 1s] vers 1000W/m<sup>2</sup>entre [1s, 2s].

Les résultats de simulation montrent que sous une variation d'une forme d'échelon [500 1000] W/m<sup>2</sup>,les deux algorithmes suivant le point optimal (100 Watt pour 500 W/m<sup>2</sup> et 200 Watt pour 1000 W/m<sup>2</sup>), le type de module PV utilisé KC-200GT leur caractéristique est présentée dans le deuxième chapitre, en régime permanent on remarque la présence des oscillations autour du point maximal.

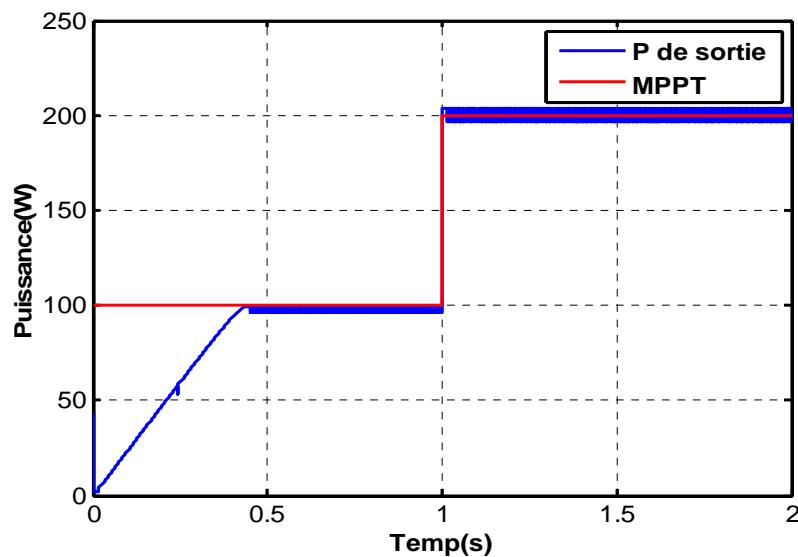


Figure4.9 Résultats de simulation de l'algorithme P&O MPPT sous éclairement variable.

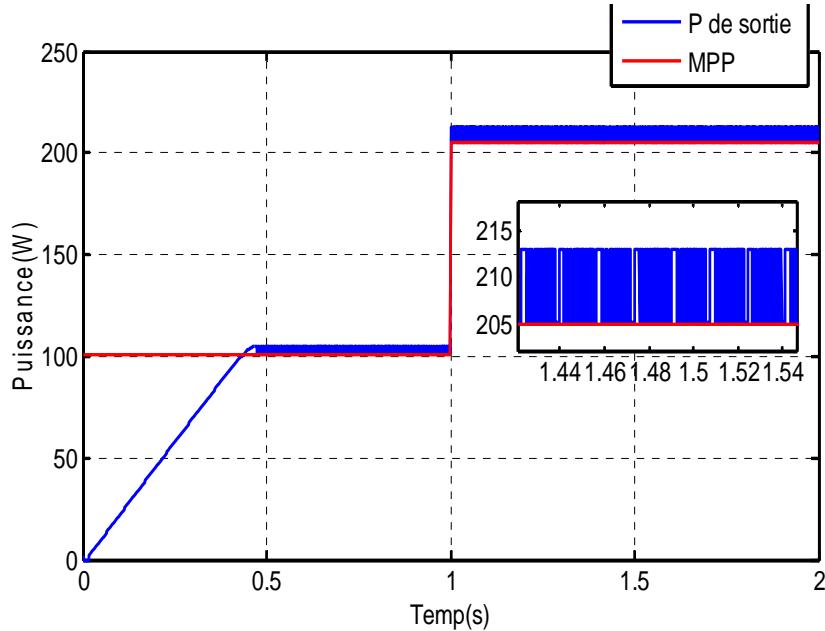


Figure4.10 Résultats de simulation de l'algorithme Inc-Cond MPPT sous éclairement variable

**Remarque:** l'amplitude des oscillations augment avec l'augmentation de l'irradiation solaire voir Figure 4.11.

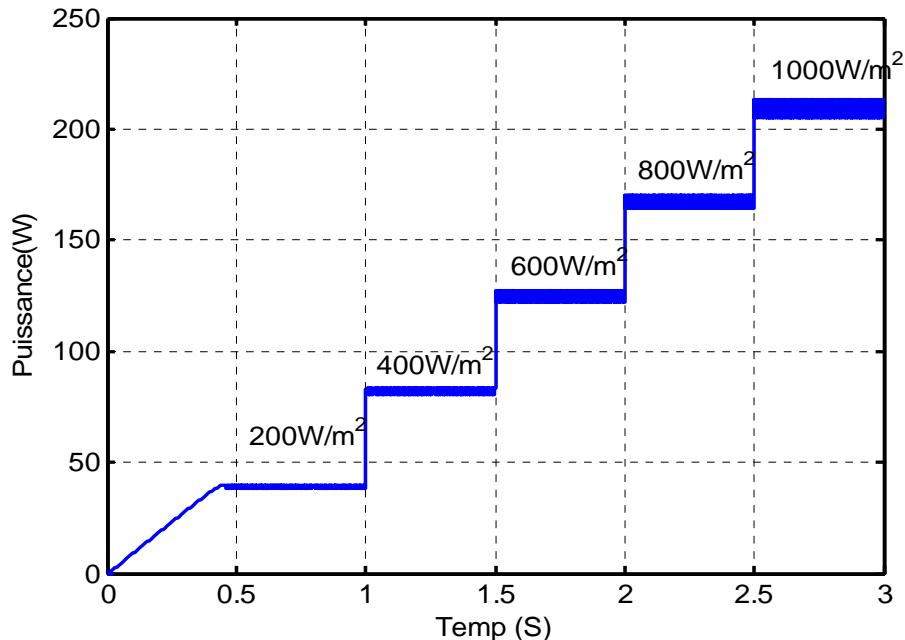


Figure4. 11 Inc-Cond sous différent niveaux d'éclairement.

Pour étudier l'effet de variation de température et d'éclairement (cas réel) , un scénario de variation de G et T durant une demi-belle journée Figure 4.12 les résultats de simulation Figures 4.13,4.14 montrent une forte oscillation autour les points maximaux .

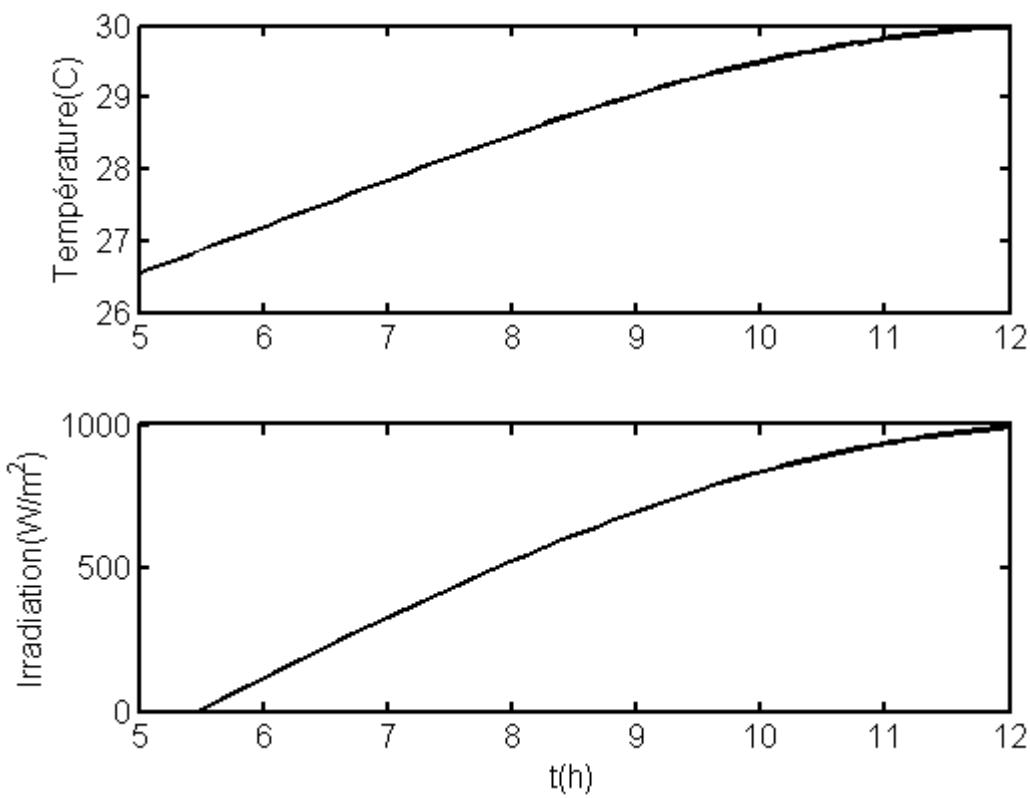


Figure 4.12 Evolution d'après T durant une demi-journée.

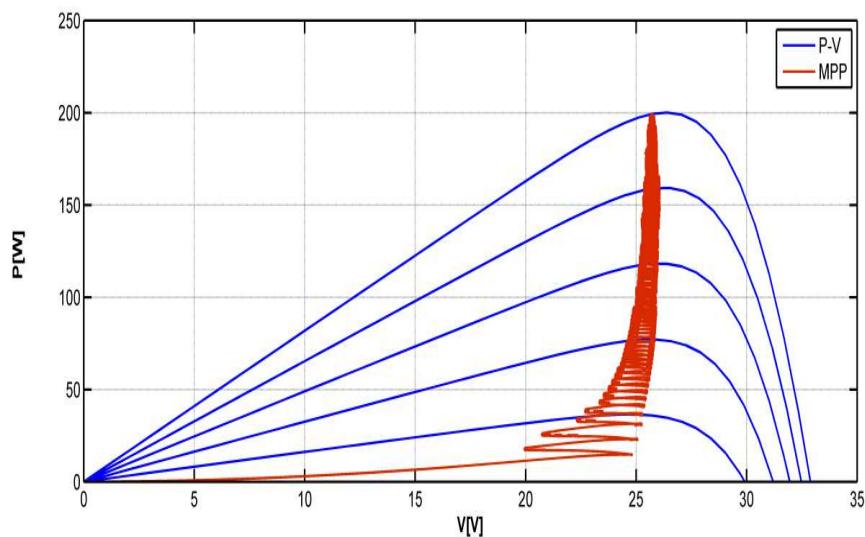


Figure 4.13 P&O MPPT sous une variation lente de G et T.

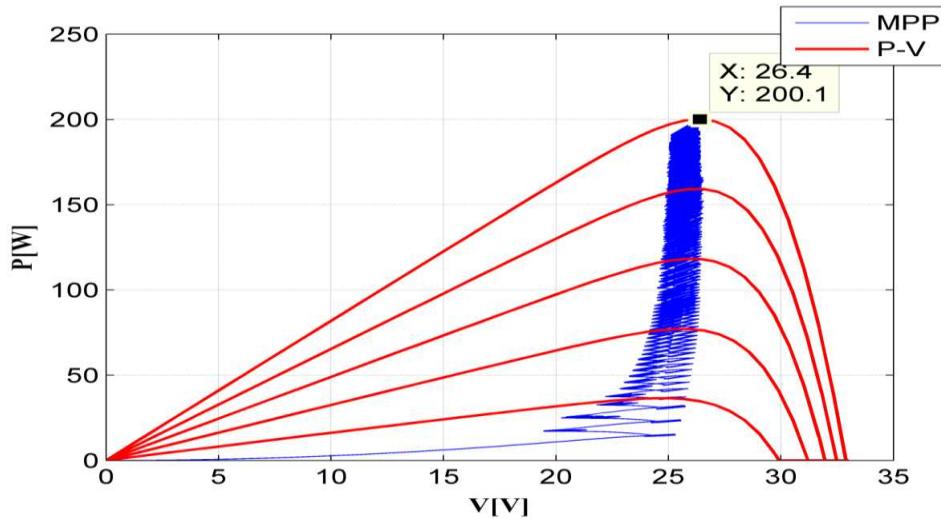


Figure 4.14 Inc-Cond MPPT sous une variation lente de G et T.

#### Construction d'un régulateur flou pour MPPT:

Dans ce qui suit, on va détailler les étapes de réalisations du contrôleur flou:

dont le but poursuivre le MPP; comme dans toutes les méthodes précédentes un convertisseur DC-DC est généralement utilisé entre la source d'entrée (GPV) et la charge .

Les variables  $E$ ,  $dE$  et sont exprimés comme suit :

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{i_{pv}(k) - i_{pv}(k-1)} \quad (4.2)$$

Et

$$dE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (4.3)$$

Où  $P_{ph}(k)$  et  $I_{ph}(k)$  sont la puissance et le courant du générateur photovoltaïque, respectivement. Par conséquent,  $E(k)$  est nulle au point de puissance maximale d'un GPV .

L'entrée  $E(k)$  indique si le point de la charge d'exploitation est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe de PV. Si cette valeur est positive, alors le point de fonctionnement est à la gauche de MPP, sinon, le point de fonctionnement est à la droite du MPP.

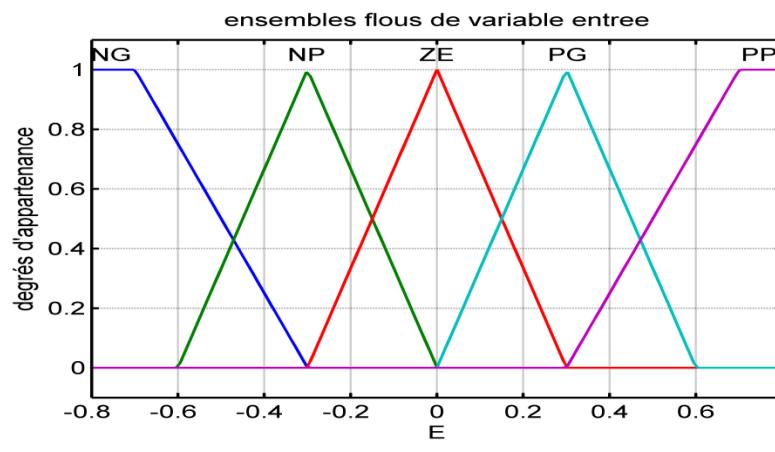
La deuxième variable d'entrée  $dE(k)$  indique la direction et nous permet d'estimer la vitesse de convergence vers le point le point MPP d'exploitation.

La connaissance de ces deux entrées nous pouvons décider ce que sera le changement que nous devons imposer le cycle de service donné à un convertisseur élévateur. Pour augmenter

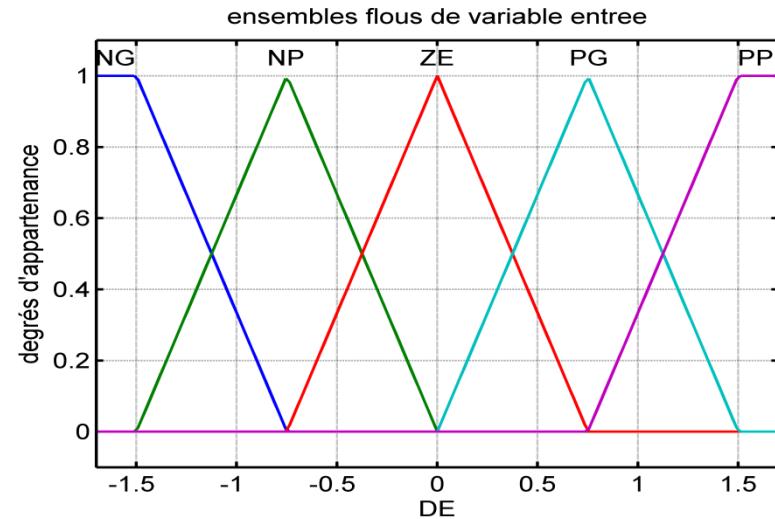
le point de fonctionnement de tension, D doit être augmentée et vice-versa.

Procédé d'inférence utilisée est "Mamdani", qui est la méthode d'inférence la plus couramment utilisée. Il utilise l'opération *MIN* pour l'opérateur "AND" et *MAX* pour le «OU». Les règles d'inférence peuvent prendre la bonne décision pour la sortie D à partir des valeurs d'entrées E et DE. Dans notre travail, nous avons choisi les règles présentées dans le (Tableau 4.2).

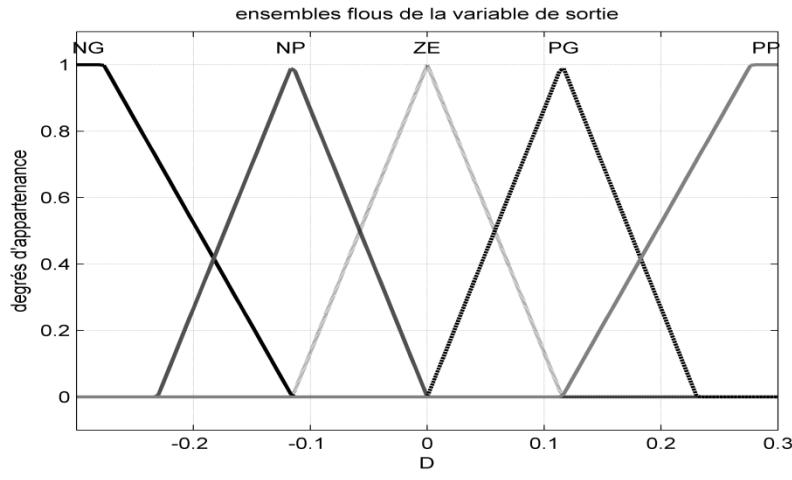
La méthode de défuzzification utilisée dans ce travail est le centre de gravité FLC la Figure 4.15



A



B



c

Figure4.15 Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistique de l'erreur normalisée et de la variation de l'erreur normalisée.

Tableau4.2 Table d'inférence de contrôleur flou.

E	dE	NG	NP	ZE	PG	PP
NG		PG	PG	PG	PG	PG
NP		PG	PP	PP	PP	ZE
ZE		PP	PP	ZE	NP	NP
PG		NP	NP	NP	NP	NP
PP		NG	NP	NP	NP	ZE

Les résultats de simulation de FLC MPPT sous une variation rapide d'éclairement [500, 1000] W/m<sup>2</sup> est présenté par Figure 4.16, cette résultat montre l'efficacité de cette méthode sous les variations brusque des paramètres climatiques.

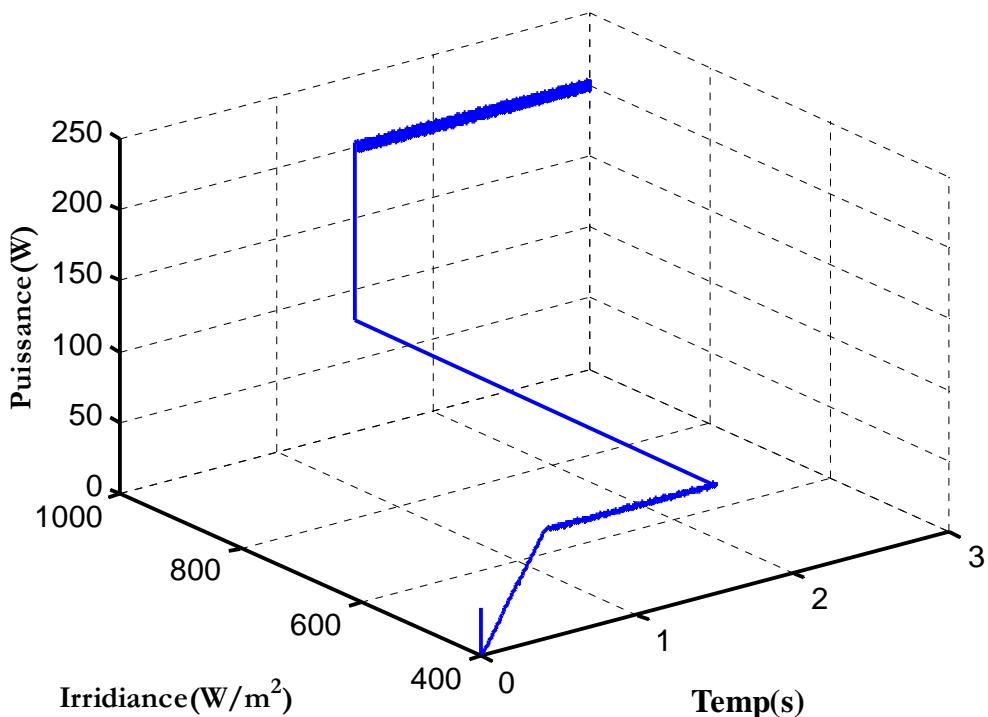
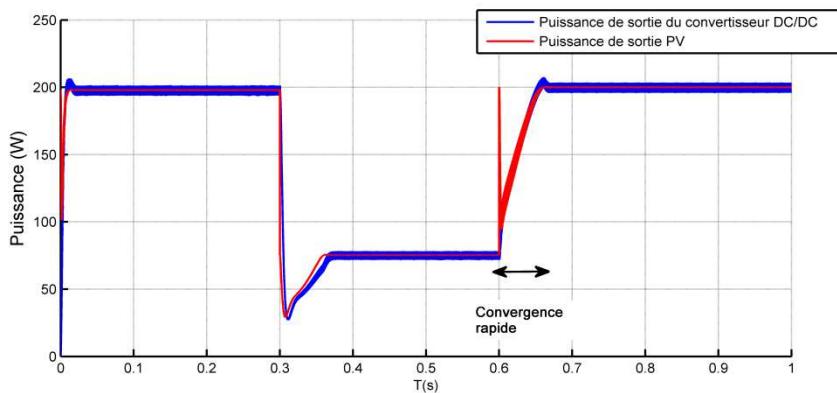


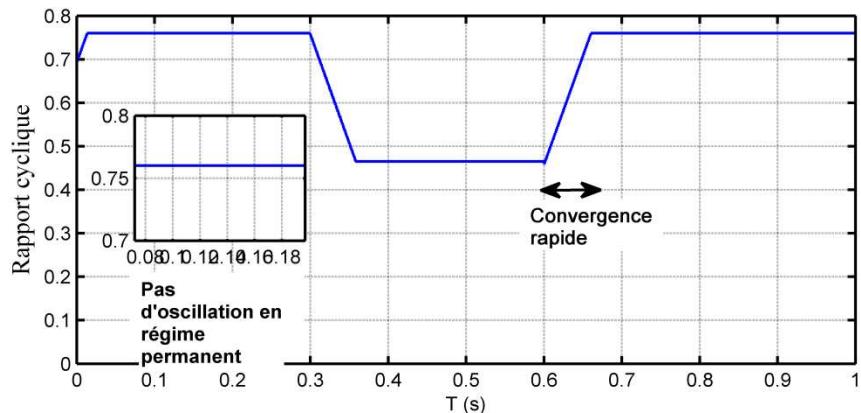
Figure 4.16 Résultats de simulation de MPPT flou.

Une comparaison a été faite entre l'algorithme de IncCond classique et IncCond rapide, les résultats de la simulation avec convertisseur DC-DC et une charge résistive sous variation rapide d'irradiation solaire sont représentés sur Figure 4.17, et Figure 4.18 .

Le scénario appliqué est: à partir de 0,3 seconde d'irradiation solaire 0 est de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ , et à partir de 0,3 s jusqu'à 0,6 s est  $400 \text{ W}/\text{m}^2$ , et après 0,6s retour à  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ .

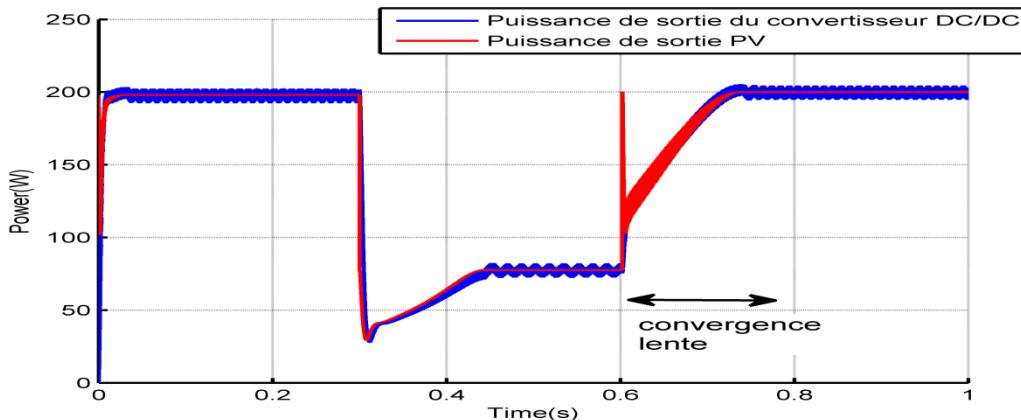


a

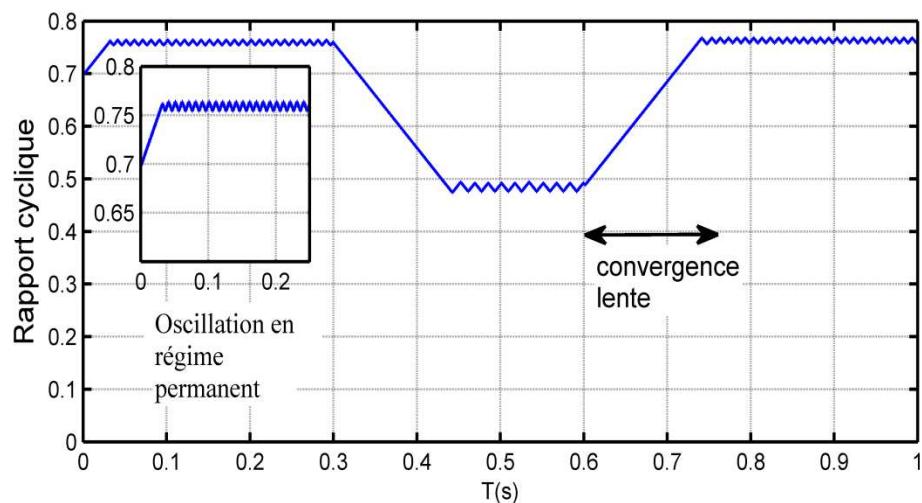


b

Figure4.17 Les résultats de la simulation de MPPT rapide sous variation du rayonnement solaire.



a



b

Figure4.18 Résultat de la simulation de l'MPPT classique.

## **Chapitre 4 : Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque PV**

---

On remarque que l'MPPT INC- rapide caractérisé par l'absence des oscillations dans le régime permanent ainsi que rapidité par rapport aux INC classique.

### **4.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons commencé par la présentation des différentes topologies des MPPT

- P&O
- IncCond
- Logique flou (Fuzzy-logic)
- MPPT rapide (fast MPPT)

Les résultats obtenus ont montré que :

Les méthodes conventionnelles ont une faiblesse qui a échoué le suivi des points de puissance maximum avec le changement des paramètres extérieur (climatiques, charge) .

Pour les deux modèles MPPT développés (FLC MPPT, MPPT rapide) :

Pour MPPT rapide :

- L'algorithme proposé est capable de suivre le MPP correctement plus rapidement par rapport à l'algorithme conventionnel.
- éliminer l'oscillation en régime permanent.

FLC MPPT présente comme avantages :

- Le non nécessité du modèle du système (souplesse de la méthode).
- Bonne performance dynamique du contrôleur pour suivre le MPP du GPV même en cas de changement rapide de l'irradiation.
- Elimination de d'oscillation dans le régime permanent.
- La disponibilité du système de développement efficace, soit par microprocesseur ou FPGA.
- L'utilisation d'un contrôleur de logique floue peut améliorer l'efficacité du système global en minimisant les pertes d'énergie lorsque le changement d'irradiation est fréquent plutôt que les méthodes classiques.

Ce type MPPT sera utilisé dans le chapitre suivant avec des commandes de motopompe pour améliorer le fonctionnement de la pompe photovoltaïque.

***CHAPITRE 5:***

***Optimisation du fonctionnement de la  
pompe photovoltaïque***

## **5.1. Introduction**

Le fonctionnement d'un groupe motopompe exige une machine d'entrainement qui peut être à courant continu ou à courant alternatif. Actuellement la majorité des pompes utilisées dans les systèmes de pompage photovoltaïques sont entraînées par les moteurs électriques à inductions. Le développement de l'électronique de puissance et l'informatique industrielle rendent ce choix très compétitif par rapport à l'entrainement classique par machine à courant continu qui exige beaucoup d'entretien. Le système de pompage PV est caractérisé par le fonctionnement à vitesse variable. Cette caractéristique exige une commande de réglage de la vitesse qui peut contrôler d'une manière précise et continue la vitesse et le couple avec des transitions performantes et un rendement élevé. Par conséquent dans le travail actuel un moteur asynchrone a été étudié et l'analyse a été effectuée du point de vue l'optimisation du système. Dans les systèmes de pompage photovoltaïques le problème majeur à prendre en considération est la variation en permanence de l'ensoleillement qui va se répercuter sur le fonctionnement du groupe ; on doit donc toujours rechercher le MPPT [29], afin d'optimiser la vitesse et le couple en même temps. Au vu des recherches déjà élaborées nous avons orienté notre travail vers la modélisation de la commande MPPT flou associé à la commande DTC du MAS.

## **5.2. Conception du système de pompage PV**

Une conception et des spécifications appropriées de GPV+ CPU+ Motopompe, joue un rôle important dans l'opération souhaitée de la pompe PV. Les éléments du système sont sélectionnés de sorte que le fonctionnement du système ne soit pas détérioré même par des perturbations soudaines dans les conditions atmosphériques.

### **Le générateur PV:**

Un GPV avec une puissance maximale de 3.2 KW à STC (Figure 5.1) est conçu selon les évaluations d'une pompe entraînée par moteur à induction sélectionnée.

En connectant 10 modules du type Kyocera KD320W en série, la taille requise du GPV est conçue pour le système.

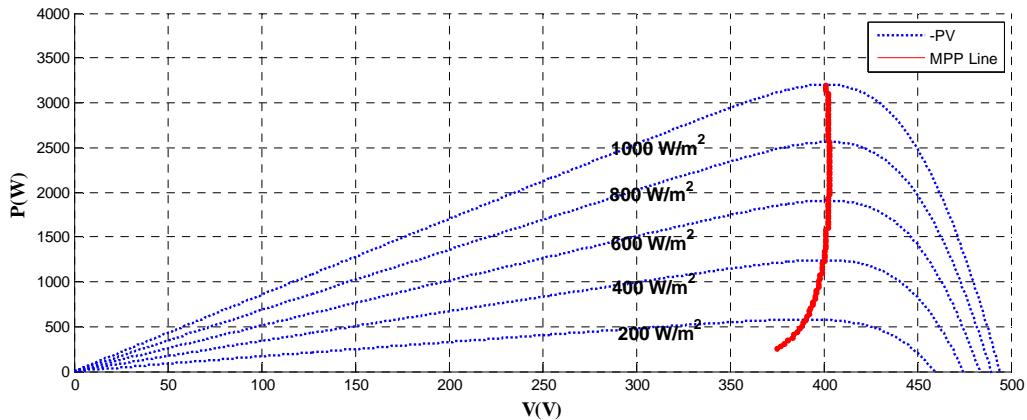


Figure 5.1 Caractéristiques P-V du GPV.

La capacité de puissance de fonctionnement du GPV sélectionné est suffisante pour faire fonctionner le système la motopompe à son état nominal, en plus de compenser les pertes de puissance associées au CPU et à la motopompe.

#### **Conception de convertisseur DC-DC:**

Le système proposé utilise un convertisseur élévateur comme premier étage de conditionnement entre le GPV et le moteur.

On considère la fréquence de commutation  $f=10$  KHz, et le taux de l'ondulation dans l'inductance égale à  $\Delta i_L = 25\% * i_L$

Donc l'inductance  $L$  est calculée comme suit [5]:

$$L = \frac{V_{pv} * D}{\Delta i_L * f} = \frac{400 * 0.5}{0.5 * 10^4} = 0.08H$$

#### **La pompe centrifuge:**

Une pompe centrifuge doit être choisie selon les caractéristiques réelles de l'installation dans laquelle on doit l'installer voir Figure 5.2.

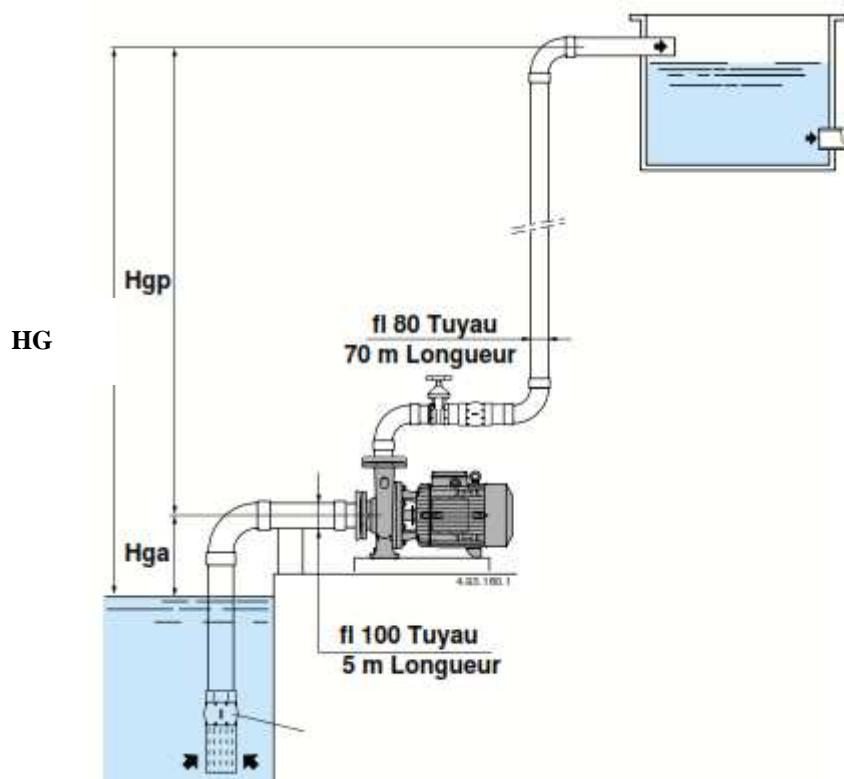


Figure 5.2 Schéma du système.

Les données nécessaires pour un dimensionnement correct sont les suivantes:

Le débit et la hauteur manométrique totale HMT qui est la somme de la hauteur géométrique dans les niveaux du liquide et les pertes de charge causées par des frottements intérieurs qui se forment au passage du liquide dans les tuyaux, dans la pompe et les accessoires hydrauliques.

L'expression à l'identifier est la suivante :

$$HMT = Hg + \Delta pc$$

Hg= hauteur géométrique à l'aspiration /Hga + hauteur géométrique au refoulement (Hgp)

$\Delta pc$ = somme des pertes de charge dans l'installation calculée selon les éléments suivants:

- $Hga$  (hauteur géométrique à l'aspiration) = 1,5 m

-  $Hgp$  (hauteur géométrique au refoulement = 12m.

- Tuyau d'aspiration 5 m de longueur diamètre  $DN$  100 mm avec 1 coude et 1 clapet de pied

- Tuyau de refoulement 70 m de longueur diamètre  $DN$  80 mm avec 1 clapet de non-retour, 1 vanne et 3 coude.

$Hg = Hgp + Hga = 12 + 1,5 = 13,5$  m hauteur géométrique de l'installation

$\Delta pc$ = Somme des pertes de charge

On suppose que  $\Delta pc = 6,5$  m.

$Hmt = Hg + \Delta p = Hgp + Hga + \Delta pc = 12 + 1,5 + 6,5 = 19$  m totaux.

On peut choisir la pompe ‘3KW3’ (voir diagramme de la pompe Figure 5.3)

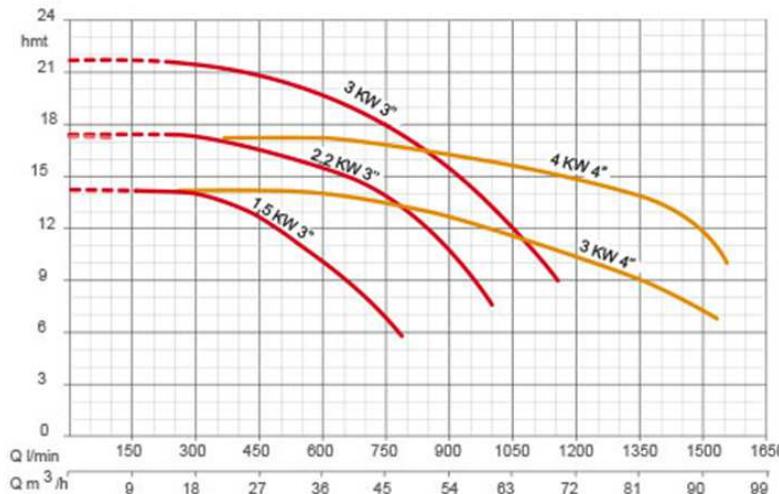


Figure 5.3 caractéristique  $H(Q)$  des pompes disponibles.

### 5.3. Commande de la pompe photovoltaïque entraînée par moteur à induction

#### 5.3.1. Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu

Pour faire une analogie entre le moteur asynchrone et MCC il faut d'abord voir le principe de commande du moteur à courant continu:

Le couple électromagnétique d'une machine à courant continu est donné par :

- Le flux est contrôlé par le courant d'excitation  $I_f$
- Le couple est contrôlé par le courant d'induit  $I_a$ .

#### 5.3.2. Les commandes en amplitude

Ces commandes sont basées sur le modèle instantané du processus. Comme la Commande Directe du Couple (DTC), ou le Contrôle Vectoriel Direct du flux statorique (DSC) . Ces commandes consistent à imposer un vecteur de tension à l'onduleur, en utilisant des comparateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et du couple électromagnétique (Figure. 5.4).

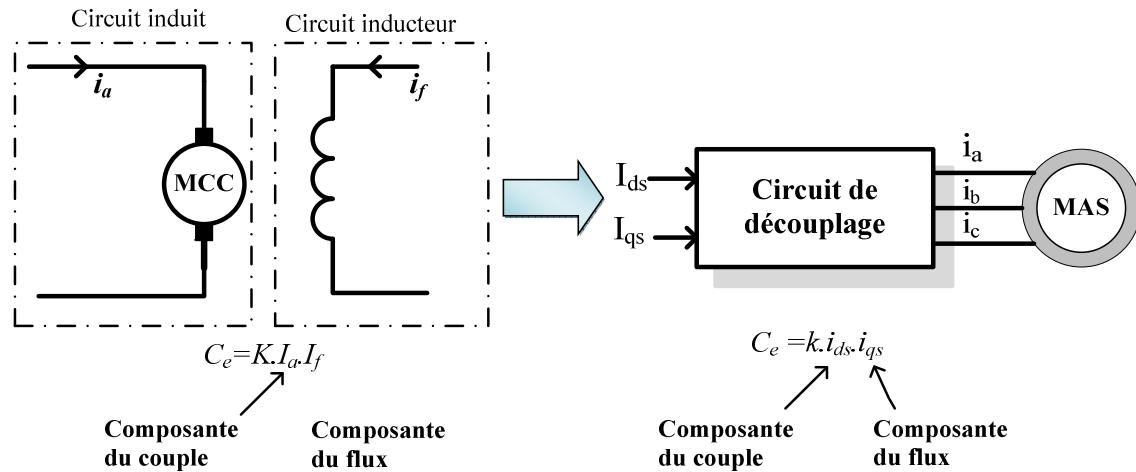


Figure 5.4 Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu.

### 5.3.3. Principe du contrôle direct de couple

Le contrôle direct de couple (DTC) d'une machine à induction, est basé sur la détermination de la séquence de commande à appliquer aux interrupteurs de l'onduleur de tension à chaque instant de commutation[50].

Pour chacune des grandeurs contrôlées, flux stator et couple électromagnétique, on définit une ou plusieurs bandes ; La valeur estimée de chaque grandeur est comparée avec une valeur de référence à l'aide d'un régulateur à hystérésis.

La séquence de commande est choisie selon :

- ❖ Le signal de sortie du régulateur à hystérésis du couple électromagnétique.
- ❖ Le signal de sortie du régulateur à hystérésis du flux stator.
- ❖ Le signal informant sur la position du vecteur flux stator.

L'objectif de ce choix est de déterminer le vecteur de tension optimal pour le contrôle de l'amplitude du flux et du couple, et les maintenir dans leurs bandes d'hystérésis

La commande de l'onduleur est instantanée, ce qui nécessite une période d'échantillonnage très faible [50].

Son principe (Figure 5.5) est de sélectionner un des huit vecteurs tensions générés par l'onduleur de tension pour contrôler, à la fois du couple et du flux statorique, après la détermination des composantes du vecteur flux statorique.

Soit par estimation en intégrant directement les tensions statoriques soit préférablement par observation, par la suite le couple électromagnétique est estimé à partir des courants

statoriques mesurés.

L' erreur instantanée du couple est ensuite calculée et appliquée à un régulateur à hystérésis double bande, générant à sa sortie la variable  $S_{ce}$  à trois niveaux (-1,0,1), représentative du sens d'évolution temporelle souhaité pour le couple [50]. De même, le module du vecteur flux statorique est calculé à partir des valeurs de ses coordonnées, et l' erreur de flux statorique injecté dans un régulateur à hystérésis de bande unique, générant à sa sortie la variable binaire  $S_{\varphi_s}$ , représentative de l'évolution souhaité pour le flux [50], [58] . La variable  $\theta_s$  correspond à une discrétisation de l' angle du vecteur flux statorique, et identifie le secteur angulaire dans lequel se trouve ce vecteur.

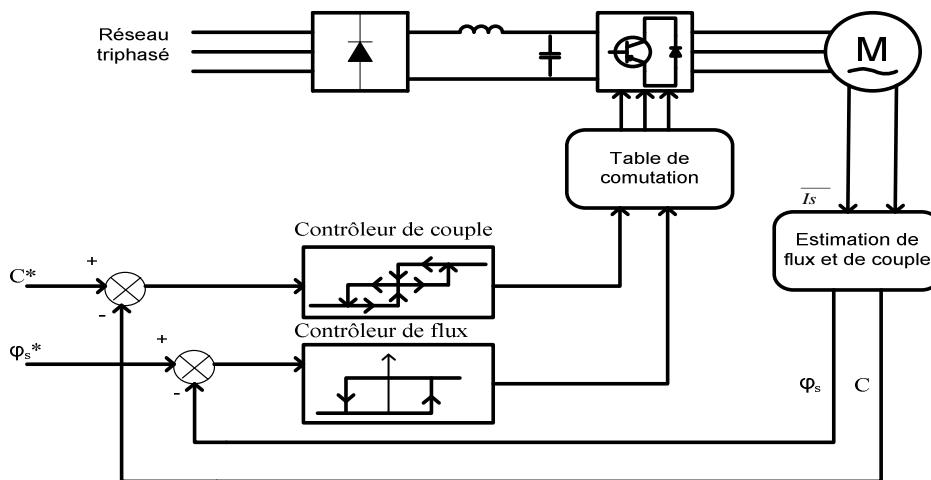


Figure 5.5 Schéma de principe du contrôle direct de couple.

#### 5.3.4. Contrôle de flux et de couple électromagnétique

##### A-Contrôle du flux statorique:

Le contrôle direct du couple est basé sur l'orientation du flux statorique ; De l'équation(5.1)on déduit l'expression du flux statorique dans le référentiel( $\alpha,\beta$ )lié au stator de la machine asynchrone, et est donnée par l'équation suivante :

$$\overline{\varphi}_s(t) = \int_0^t (\overline{V}_s - R_s \overline{I}_s) dt + \overline{\varphi}_{s_0} \quad (5.1)$$

Pendant une période d'échantillonnage  $T_e$ , soit un intervalle de temps  $[0, T_e]$  durant lequel on applique un vecteur de tension non nul à la machine, en négligeant la chute de tension due à la résistance statorique ( $R_s I_s \ll V_s$ ) par conséquent l'équation devient

$$\overline{\varphi}_s(t) = \overline{\varphi}_s(0) + \overline{V}_s(t)T_e \quad (5.2)$$

L'équation (5.2) est illustrée à la Figure 5.3, l'extrémité du vecteur flux statorique  $T_e$  se déplace sur une droite dont la direction est donnée par la vectrice tension appliquée  $\overline{V}_s$ .

Pour augmentation de flux, on applique un vecteur tension  $\overline{V}_s$  parallèle à  $\overline{\varphi}_s$  et de même sens et de sens opposé pour le diminuer ; Tandis que l'application d'un vecteur tension en quadrature avec  $\overline{\varphi}_s$  fait varier sa phase et n'agit pas sur son amplitude.

Le choix de la séquence adéquate des vecteurs  $\overline{V}_s$  durant chaque période d'échantillonnage, permet de garder l'amplitude de  $\overline{\varphi}_s$  autour d'une valeur constante, et l'extrémité du vecteur aura une trajectoire pseudo circulaire, à conditions que la période d'échantillonnage  $T_e$  soit très faible devant celle du flux statorique.

Un comparateur à hystérésis à deux niveaux est utilisé pour la correction de flux, a pour but de maintenir l'extrémité du vecteur flux statorique  $\varphi_s$  dans une couronne circulaire comme le montre la Figure 5.4 la sortie de ce comparateur est une variable booléenne prenant la valeur (1) lorsque l'erreur du flux est positive et (0) lorsqu'elle est négative[17] la largeur de la bande d'hystérésis est choisie suivant l'intervalle de commande des interrupteurs, lui-même choisi en fonction de la fréquence de commutation des interrupteurs ainsi que du temps de calcul dans les applications pratiques.

On peut écrire ainsi

$$\begin{cases} \text{si } \Delta\varphi_s > h_{\varphi_s} \\ \text{si } 0 \leq \Delta\varphi_s \leq h_{\varphi_s} \text{ et } \frac{d\Delta\varphi_s}{dt} > 0 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\varphi_s \leq h_{\varphi_s} \text{ et } \frac{d\Delta\varphi_s}{dt} < 0 \\ \text{si } \Delta\varphi_s < -h_{\varphi_s} \end{cases} \begin{cases} S_{\varphi_s} = 1 \\ S_{\varphi_s} = 0 \\ S_{\varphi_s} = 1 \\ S_{\varphi_s} = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

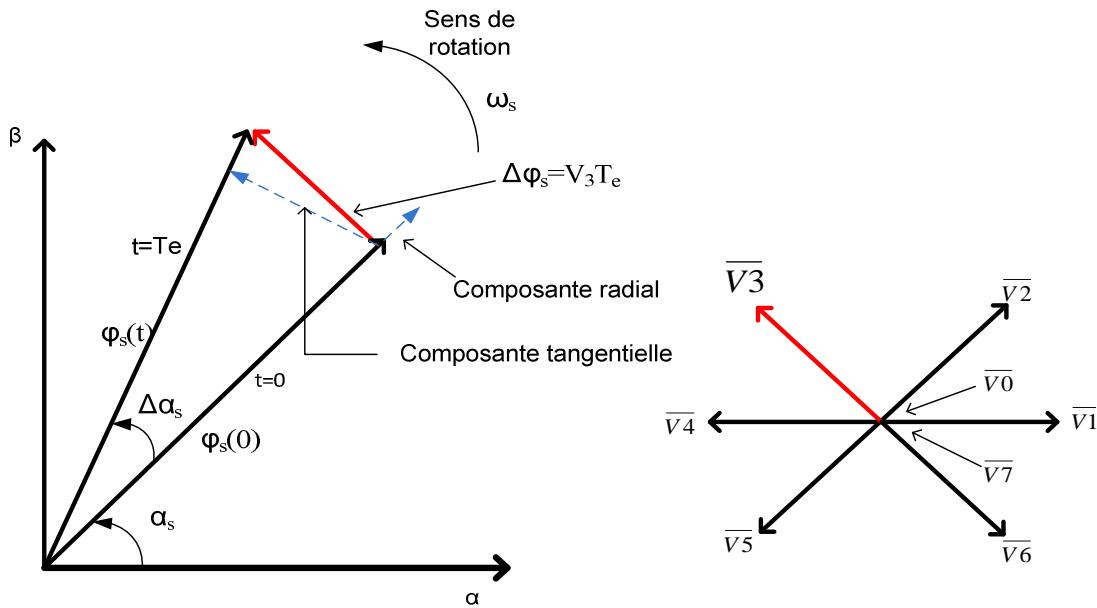


Figure 5.6 Evolution du vecteur flux statorique[59].

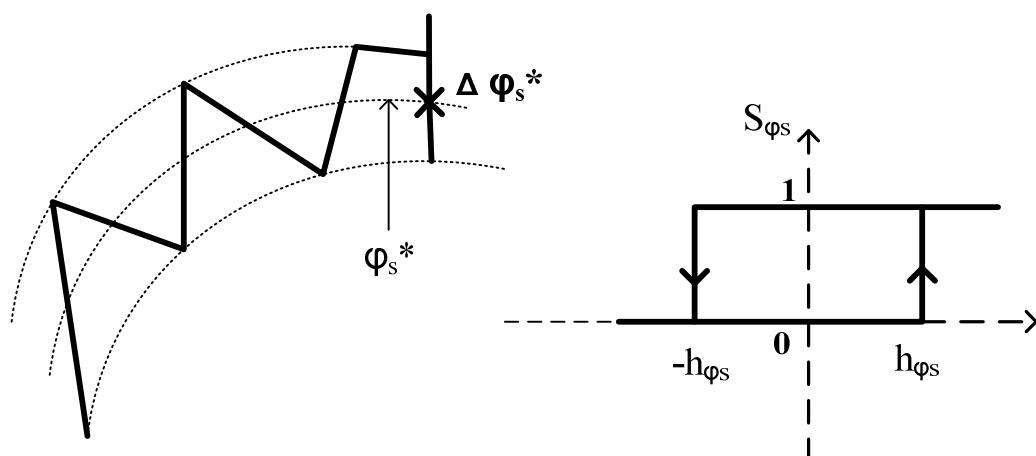


Figure 5.7 Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux statorique [50].

### b- Contrôle du couple électromagnétique :

Pour représenter la machine asynchrone, on choisit le référentiel ( $\alpha, \beta$ ) lié au stator qui est généralement le plus adapté à l'implantation de la DTC.

Le modèle de la machine dans ce référentiel est donné par les équations suivantes

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} \\ \bar{V}_r = \bar{0} = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\varphi}_r}{dt} - j\omega \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (5.4)$$

$$\text{Et } \begin{cases} \overline{\varphi_s} = L_s \overline{i_s} + M_{sr} \overline{i_r} \\ \overline{\varphi_r} = L_r \overline{i_r} + M_{sr} \overline{i_s} \end{cases} \quad (5.5)$$

De l'équation (5.5) on peut écrire l'expression du courant  $i_r$ :

$$\overline{i_r} = \frac{1}{\sigma} \left( \overline{\varphi_r} - \frac{M_{sr}}{L_r L_s} \overline{\varphi_s} \right) \quad (5.6)$$

De (5.6) et (5.4) on obtient :

$$\begin{cases} \overline{V_s} = R_s \overline{i_s} + \frac{d\overline{\varphi_s}}{dt} \\ \frac{d\overline{\varphi_r}}{dt} + \left( \frac{1}{\sigma T_r} - j\omega \right) \overline{\varphi_r} = \frac{M_{sr}}{L_s} \frac{1}{\sigma T_r} \overline{\varphi_s} \end{cases} \quad (5.7)$$

Cette dernière équation (5.7) montre que:

- ❖ Il est possible de contrôler le vecteur  $\overline{\varphi_s}$  à partir du vecteur  $\overline{V_s}$  à la chute de tension  $R_s \overline{i_s}$  près.
- ❖ Le flux  $\overline{\varphi_r}$  suit les variations de  $\overline{\varphi_s}$  avec une constante de temps  $\sigma T_r$ , qui détermine aussi la rapidité de variation de l'angle  $\theta_{sr}$  entre les deux flux statorique et rotorique agit comme un filtre de constante de temps  $\sigma T_r$  entre les flux  $\overline{\varphi_s}$  et  $\overline{\varphi_r}$

La relation du flux en régime permanent s'exprime par :

$$\overline{\varphi_r} = \frac{M}{L_s} \frac{\overline{\varphi_s}}{1 + j\omega \sigma T_r} \quad (5.8)$$

En posant  $\theta_{sr} = (\widehat{\varphi_s \varphi_r})$  l'angle entre les vecteurs flux, le couple s'exprime par:

$$C_e = p \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \varphi_s \varphi_r \sin(\theta_{sr}) \quad (5.9)$$

Les relations (la première équation de (5.7), (5.8), (5.9) montrent que :

Le couple dépend des amplitudes des deux vecteurs  $\overline{\varphi_s}$  et  $\overline{\varphi_r}$  et de leur position relative; Si l'on parvient à contrôler le vecteur de flux  $\overline{\varphi_s}$  et en module et en position on peut donc contrôler  $\overline{\varphi_r}$  en module et en position, et donc le couple.

Ceci est possible à condition que la période d'échantillonnage est telle que  $T_e \ll \sigma T_r$ .

Pour la correction du couple en utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux, donné par la Figure 5.5 utilisé pour contrôler le moteur dans les deux sens de rotation. Ce comparateur est modélisé par l' algorithme de l' équation (5.10), tels que 'S<sub>ce</sub>' représente l' état de sortie du comparateur et 'hc' la limite de la bande d' hystérésis.

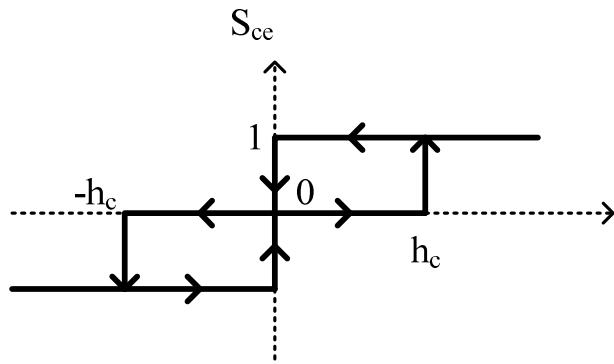


Figure 5.8 Comparateur à hystérésis à trois niveaux utilisés pour le réglage.

On peut écrire alors:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \Delta C_s > h_c \\ \text{si } 0 \leq \Delta C_s \leq h_c \text{ et } \frac{d\Delta C_s}{dt} > 0 \\ \text{si } 0 \leq \Delta C_s \leq h_c \text{ et } \frac{d\Delta C_s}{dt} < 0 \\ \text{si } \Delta C_s < -h_c \\ \text{si } -h_c \leq \Delta C_s \leq 0 \text{ et } \frac{d\Delta C_s}{dt} > 0 \\ \text{si } -h_c \leq \Delta C_s < -h_c \text{ et } \frac{d\Delta C_s}{dt} < 0 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} S_{ce} = 1 \\ S_{ce} = 0 \\ S_{ce} = 1 \\ S_{ce} = -1 \\ S_{ce} = 0 \\ S_{ce} = -1 \end{array} \right. \quad (5.10)$$

L'écart  $\Delta C_e$ , entre le couple de référence  $C_e^*$  et le couple estimé  $C_e$  est introduit dans le comparateur à hystérésis à trois niveaux, ce dernier va générer à sa sortie la valeur  $S_{ce}=1$  pour augmenter le couple,  $S_{ce}=-1$  pour le réduire et  $S_{ce}=0$  pour le maintenir constant à l'intérieur d'une bande  $h_c$  autour de sa référence[59].

L'augmentation des niveaux du correcteur entraîne une minimisation de la fréquence de commutation moyenne des interrupteurs, car la dynamique du couple est généralement plus rapide que celle du flux[37], [50]. Ce type de correcteur autorise une décroissance rapide du couple électromagnétique.

De plus, ce comparateur autorise une décroissance rapide du couple, en plus l'

application des vecteurs nuls fait arrêter la rotation du vecteur flux statorique  $\varphi_s$ .

Ce type de comparateur confère à la commande de la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants sans intervention sur la structure de commande.

### 5.3.5. Estimation du couple et de flux

#### A-Estimateur du flux statorique :

L'estimation de flux statorique peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques courant et tension de la machine en utilisant l'équation suivante[60]:

$$\overline{\varphi}_s(t) = \int_0^t (\overline{V}_s - R_s \overline{I}_s) dt \quad (5.11)$$

Le vecteur flux statorique est calculé à partir de ses deux composantes sur les axes  $\alpha$  et  $\beta$  :

$$\begin{cases} \varphi_{\alpha s}(t) = \int_0^t (V_{\alpha s} - R_s I_{\alpha s}) dt \\ \varphi_{\beta s}(t) = \int_0^t (V_{\beta s} - R_s I_{\beta s}) dt \end{cases} \quad (5.12)$$

Les composantes  $\alpha$  et  $\beta$  du vecteur courant statorique  $I_\alpha$  et  $I_\beta$  sont obtenues par l'application de la transformation de Concordia aux courants mesurées.

$$\begin{cases} I_{\alpha s} = \sqrt{2/3} I_{as} \\ I_{\beta s} = \sqrt{1/2} (I_{bs} - I_{cs}) \end{cases} \quad (5.13)$$

#### b- Estimation du couple :

Le couple électromagnétique peut se mettre sous la forme suivante :

$$C_e = [\varphi_{\alpha s} I_{\beta s} - \varphi_{\beta s} I_{\alpha s}] \quad (5.14)$$

A partir de cette équation, l'estimateur de couple utilise seulement des grandeurs statoriques, flux  $\varphi_{\alpha s}$  et  $\varphi_{\beta s}$  et les courant [60].

### 5.3.6. Elaboration de la table de commutation

D'après le principe de la DTC, la sélection adéquate du vecteur tension, à chaque période d'échantillonnage, est faite pour maintenir le couple et le flux dans les limites des deux bandes à hystérésis [60].

## Chapitre 5 : Optimisation du fonctionnement de la pompe photovoltaïque

En particulier la sélection est effectuée sur la base de l'erreur instantanée du flux et du couple.

En considérant le vecteur flux  $\overline{\varphi_s}$  dans le référentiel statorique divisé en six secteurs, les vecteurs  $V_i, V_{i-1}, V_{i+1}$  peuvent être sélectionnés pour augmenter son amplitude.

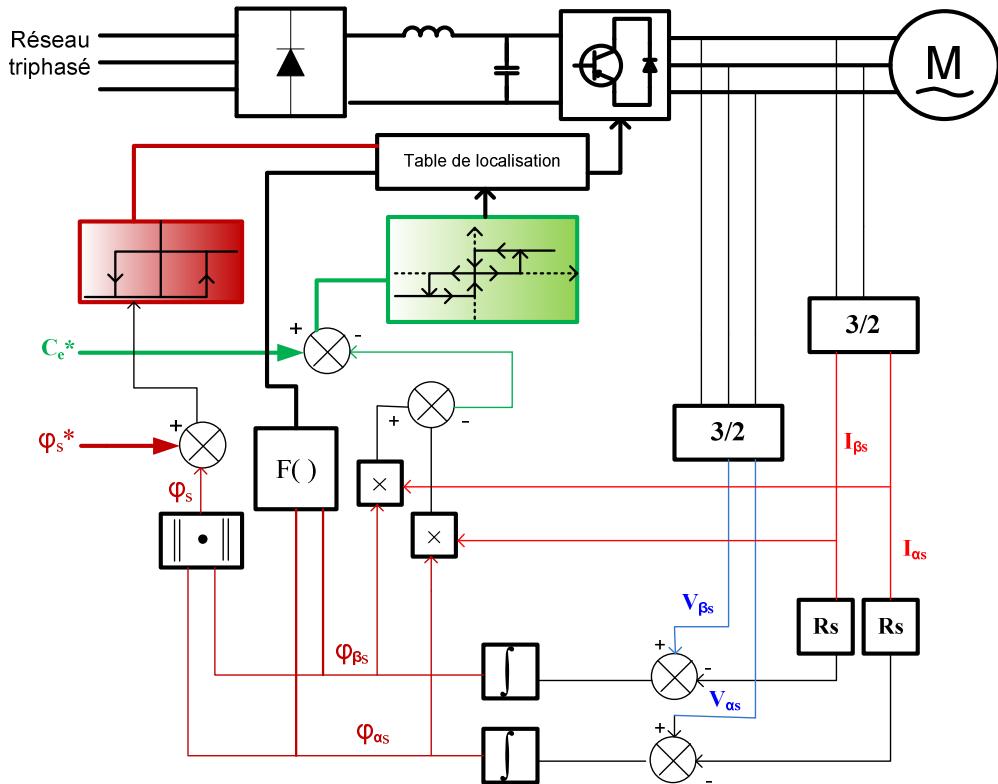


Figure 5.9 Synoptique de commande de la stratégie DTC selon I. Takahashi [22].

Inversement la décroissance de  $\overline{\varphi_s}$  peut être obtenue par la sélection des vecteurs  $V_{i+2}, V_{i-2}$ , et  $V_{i+3}$  le vecteur nul n'affecte pratiquement pas le vecteur flux statorique, à l'exception d'un petit affaiblissement due à la chute de tension statorique  $R_s \overline{i_s}$ .

La table résume l'action combinée de chaque configuration sur le flux statorique et le couple:

Tableau 5.1 Table de commutation généralisée.

	Augmentation	Diminution
$\varphi_s$	$V_i, V_{i-1}, V_{i+1}$	$V_{i+2}, V_{i-2}$ , et $V_{i+3}$
$C_e$	$V_{i+1}$ et $V_{i+2}$	$V_{i-1}$ et $V_{i-2}$

La table de commutation définie par ITAKAHASHI [21] est donnée par le tableau (5.2)

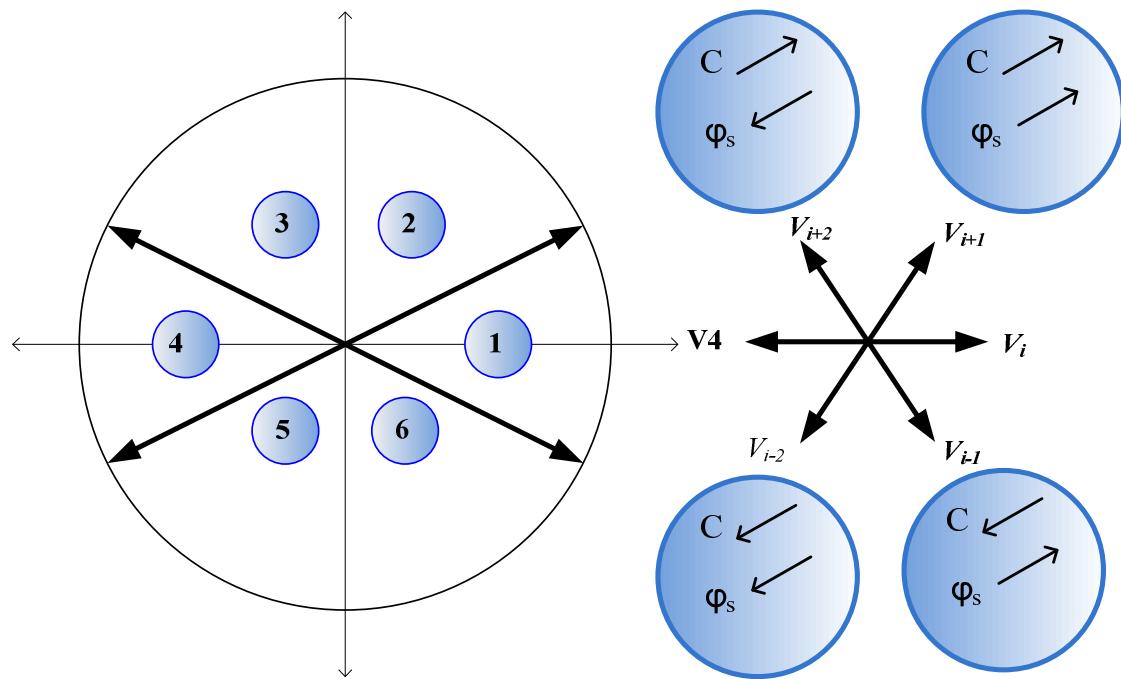


Figure 5.10 Choix de vecteur tension [50].

### 5.3.7. Fréquence de commutation du correcteur de couple

Nous considérons que le vecteur flux statorique se trouve dans le secteur  $i = 1$ , suivant la table de commutation (5.2). Les deux vecteurs  $\bar{V}_2$  et  $\bar{V}_6$  sont utilisés respectivement pour augmenter et diminuer le couple électromagnétique. La forme typique de couple est donnée par la Figure 5.8.

Pour illustrer le fonctionnement de la commande et réaliser les études prospectives, un modèle de simulation de la commande a été mis en place à partir d'un logiciel de simulation d'association Machine/Convertisseur/Commande en (Matlab/Simulink).

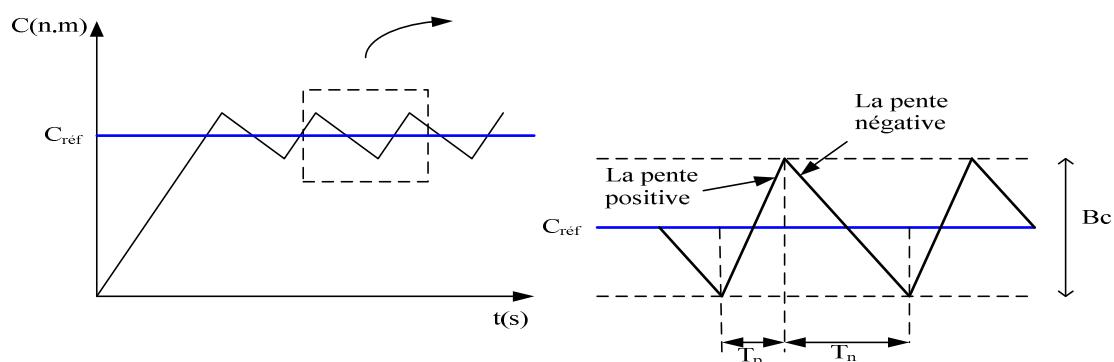


Figure 5.11 Forme typique du couple [59], [60].

Tableau 5.2 Table de commutation de la commande DTC [50], [61], [62]

		Région					
		1	2	3	4	5	6
$\Delta\varphi_s = 1$	$\Delta C_e = 1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_I$
	$\Delta C_e = 0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	$\Delta C_e = -1$	$V_6$	$V_I$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$\Delta\varphi_s = 0$	$\Delta C_e = 1$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_I$	$V_2$
	$\Delta C_e = 0$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$
	$\Delta C_e = -1$	$V_5$	$V_6$	$V_I$	$V_2$	$V_3$	$V_4$

### 5.3.8. Raccordement du modèle à une charge mécanique

L'entrée du bloc représente le couple de charge appliqué à l'arbre du moteur à induction. Dans ce cas, le couple de charge est opposé (la pompe).

Ce type de couple est généralement une fonction quadratique de la vitesse, comme le montre dans l'équation:

$$C_{mec} = K \cdot \omega_m^2 = K' \cdot N_m^2 \quad (5.15)$$

Pour calculer le couple de charge mécanique, la vitesse du moteur à induction est nécessaire. La valeur de vitesse peut être obtenue à partir du vecteur de sortie du moteur du modèle développé un couple nominal [63] l'équation (5.15) .

### 5.3.9. Contrôle de vitesse avec DTC

Pour améliorer les performances de la vitesse du moteur, tel que le dépassement, et avoir temps de réponse plus rapide, réduire l'erreur ou état zéro-erreur en régime permanent, la solution proposée est le contrôle de vitesse par le contrôleur avec régulateur PI anti-aimablement, la Figure 5.11 donne le schéma de principe global du système , la sortie du régulateur est la valeur de commande de référence de couple, qui compare l'erreur entre la vitesse référence et la vitesse réelle.

### . Définir le point de consigne:

Il est alors impératif de déterminer une relation explicite de la vitesse de consigne en fonction de l'ensoleillement. Pour ce faire, on considère qu'en régime optimal, selon [39] cette relation est donnée par la Figure 5.9.

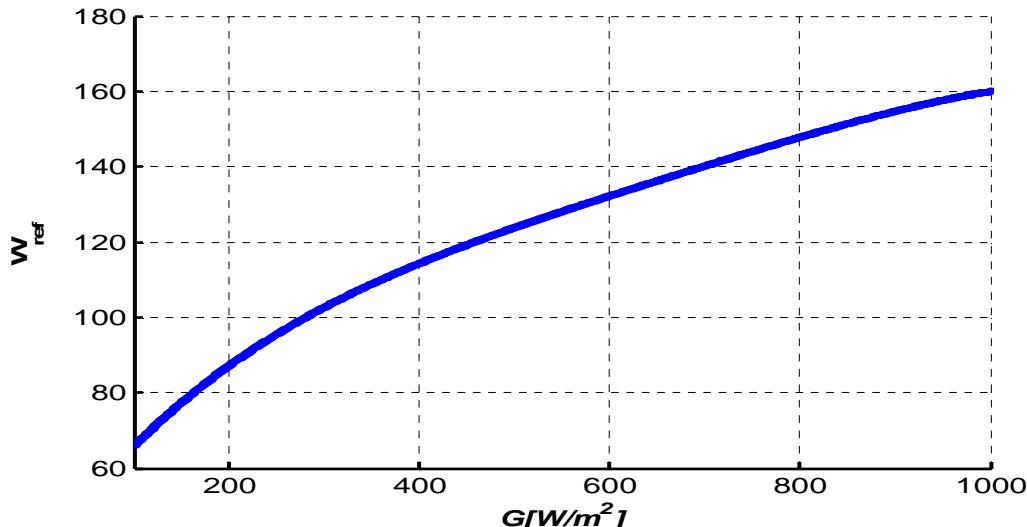


Figure 5.12 Vitesse de référence optimale (rd/s) en fonction de variation d'éclairement.

### 5.4. Résultats et discussion

Dans cette section, nous avons présenté les variations en fonction du temps de débit de la pompe  $Q$ , la vitesse du moteur  $\omega$  et les couples  $C_{em}$  et  $C_r$ , la tension de bus continu  $V_{dc}$ , qui sont illustrés par les Figures 5.15 jusqu'à 5.17.

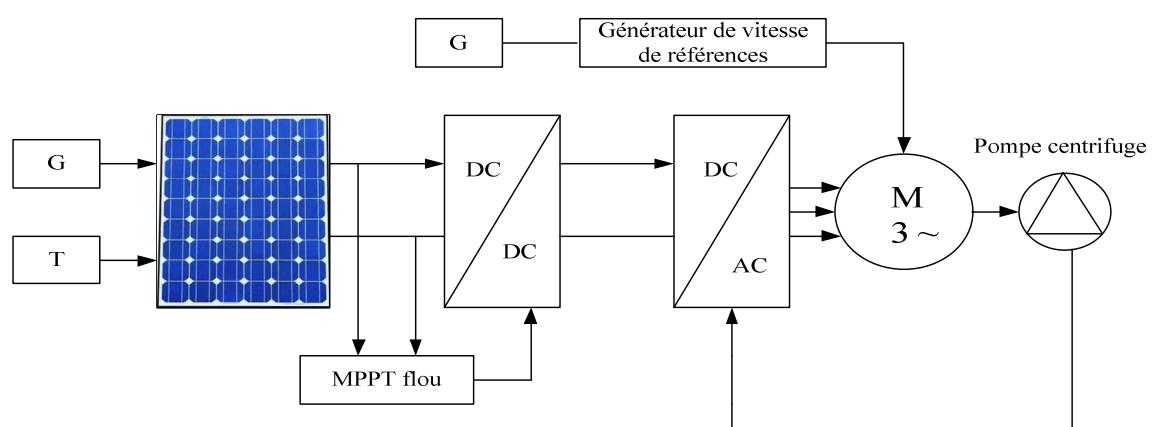


Figure 5.13 Le système étudié.

Ces figures montrent les résultats obtenus après la simulation numérique sous l'environnement Matlab /Simulink, sous une variation rapide de l'irradiation solaire, pour le scenario suivant:

## Chapitre 5 : Optimisation du fonctionnement de la pompe photovoltaïque

On appliquant le premier niveau (échelon) d'éclairement entre [0, 0.2s], 400 W/m<sup>2</sup> et en maintenir la température à une valeur fixe égale à 25 °C.

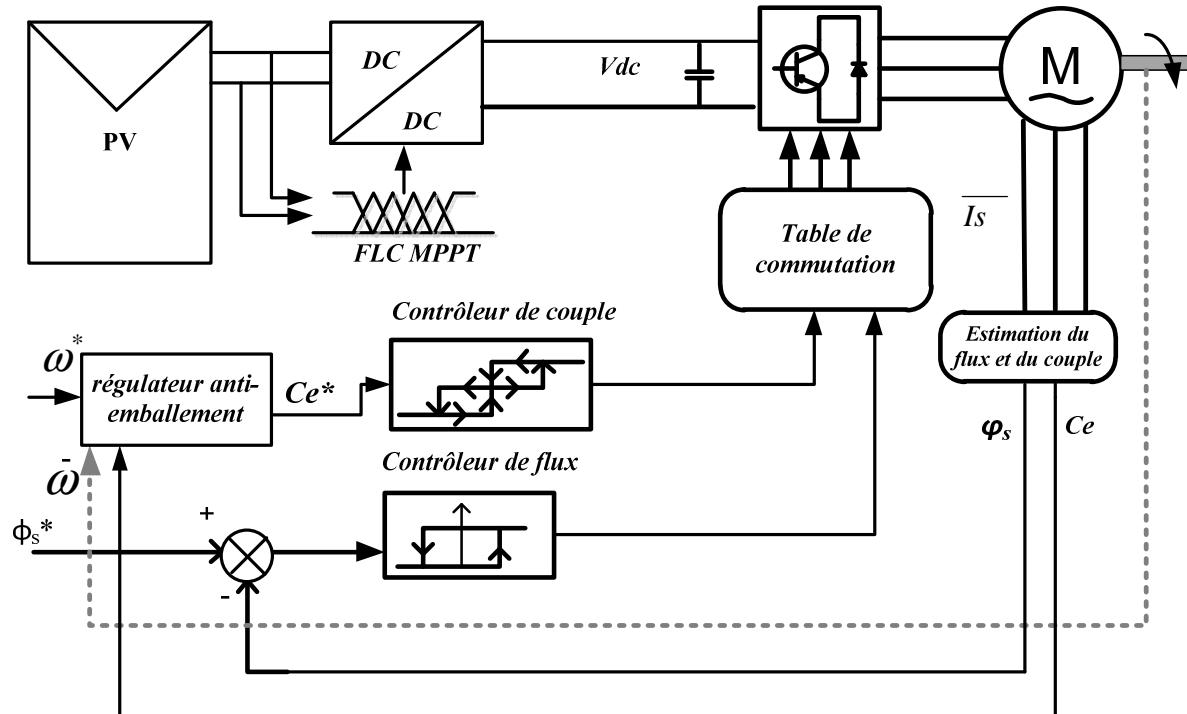


Figure 5.14 Schéma global du système.

Dans le régime transitoire, dans la phase de démarrage la vitesse presque linéairement, jusqu'à atteindre la valeur de référence optimale qui égale 114.6 rd/s Figure 5.15 c.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, à partir l'exploitation de la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible Figure 5.16a.

La vitesse de la machine suit sa consigne sans dépassement montrant l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse. Ce qui permet par la suite d'atteindre le débit et la hauteur manométrique totale désirée Figure 5.15c et Figure 5.16a.

Chaque fois que l'ensoleillement change, la vitesse de consigne suit sa valeur optimale.

Des bonnes performances dans le régime transitoire et à l'état stable, et une réponse dynamique rapide Figure 5.15c.

Les résultats montrent l'amplitude du flux a été maintenue aussi constant un couple présente une réponse rapide.

À partir de 0,2 jusqu'à 0,4 S changement de l'irradiation solaire vers la valeur 600W / m<sup>2</sup>, cette augmentation d'éclairement affecte les caractéristiques de moteur asynchrone et par la

suite sur les performances de la pompe.

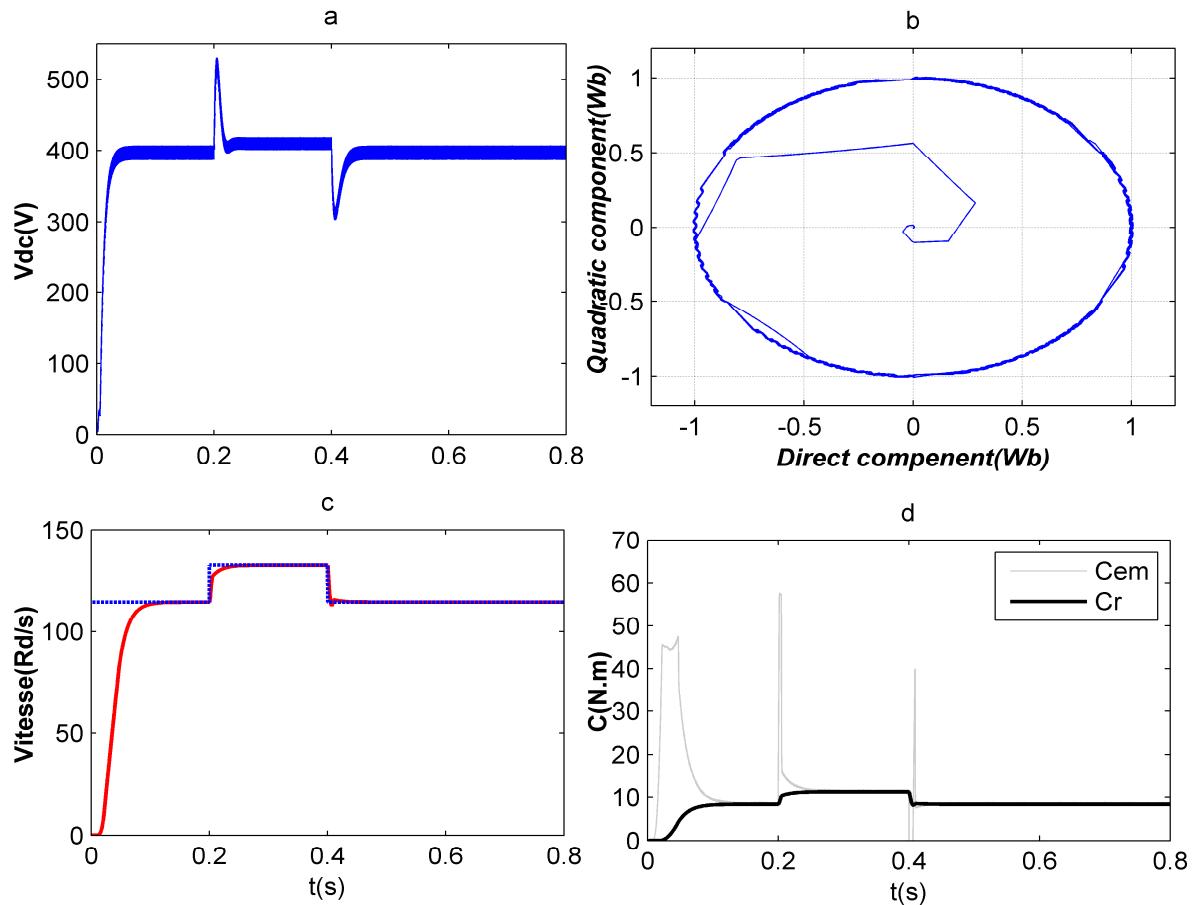


Figure 5.15 Résultats de simulation (Grandeur MAS).

Une fois que d'irradiation solaire change, la vitesse de référence suivant la valeur optimale 132,5rd/s, et la tension GPV convergent vers leurs valeurs optimales (Figure 5.15a) à 0,4 s l'irradiation solaire retour à  $400\text{W/m}^2$ , nous renvoie au premier scénario.

Une bonne dynamique de couple est également observée, et suit la variation de couple imposée par la pompe centrifuge (de couple de charge) Figure 5.15 d, le flux rotorique est maintenu constant (1 Wb) au voisinage de sa valeur de consigne montrant l'efficacité de la boucle de régulation de flux Figure 5.15b . Le temps de réponse de boucle de vitesse est d'environ 0,1s; déposé est clairement visible.

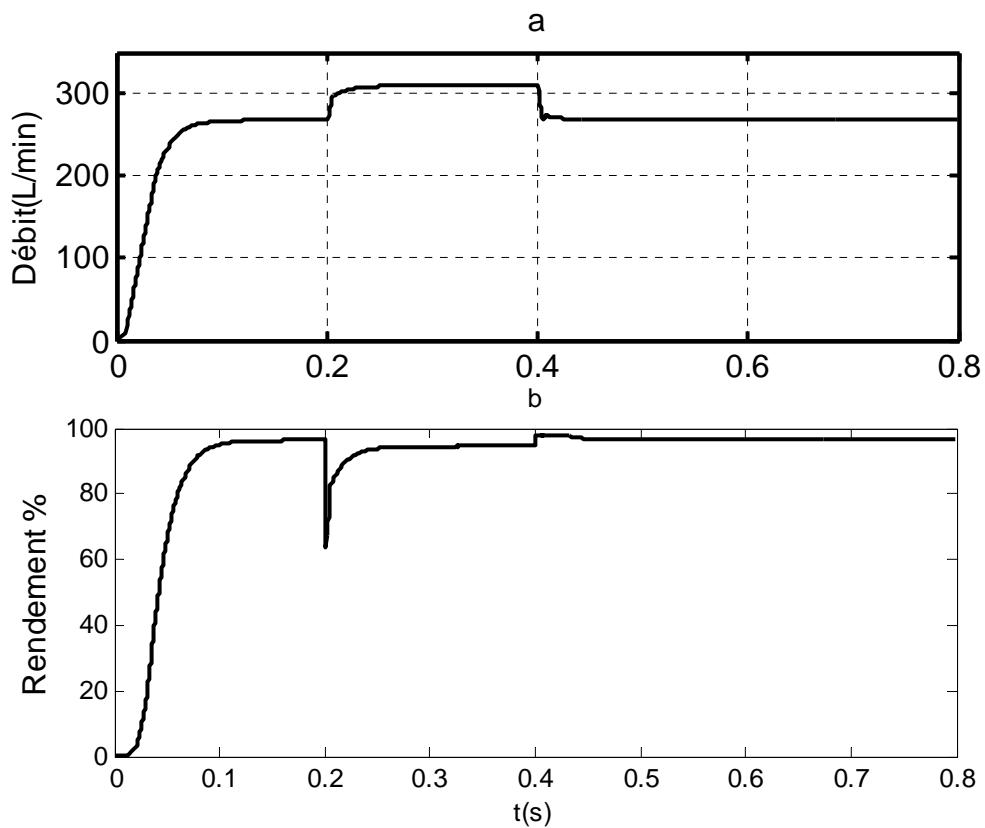


Figure 5. 16 Résultats de simulation (Grandeurs pompe.)

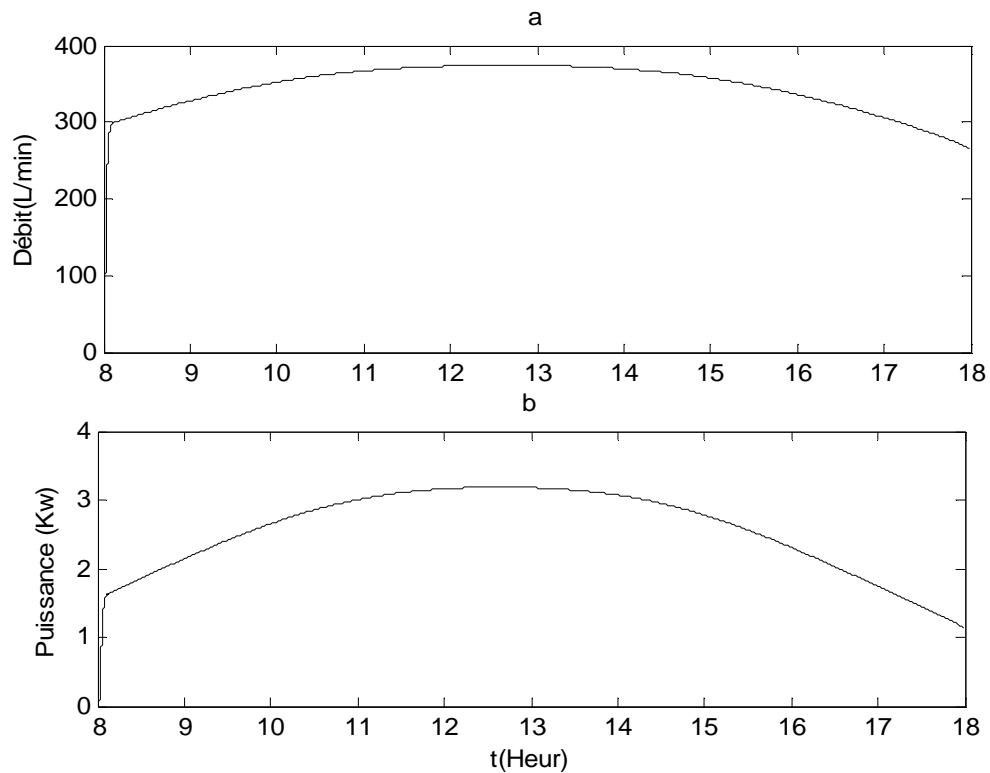


Figure 5. 17 L'évolution de débit et puissance de la pompe durant une journée

## ***Chapitre 5 : Optimisation du fonctionnement de la pompe photovoltaïque***

---

La vitesse de la machine suit sa consigne sans dépassement montrant l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse.

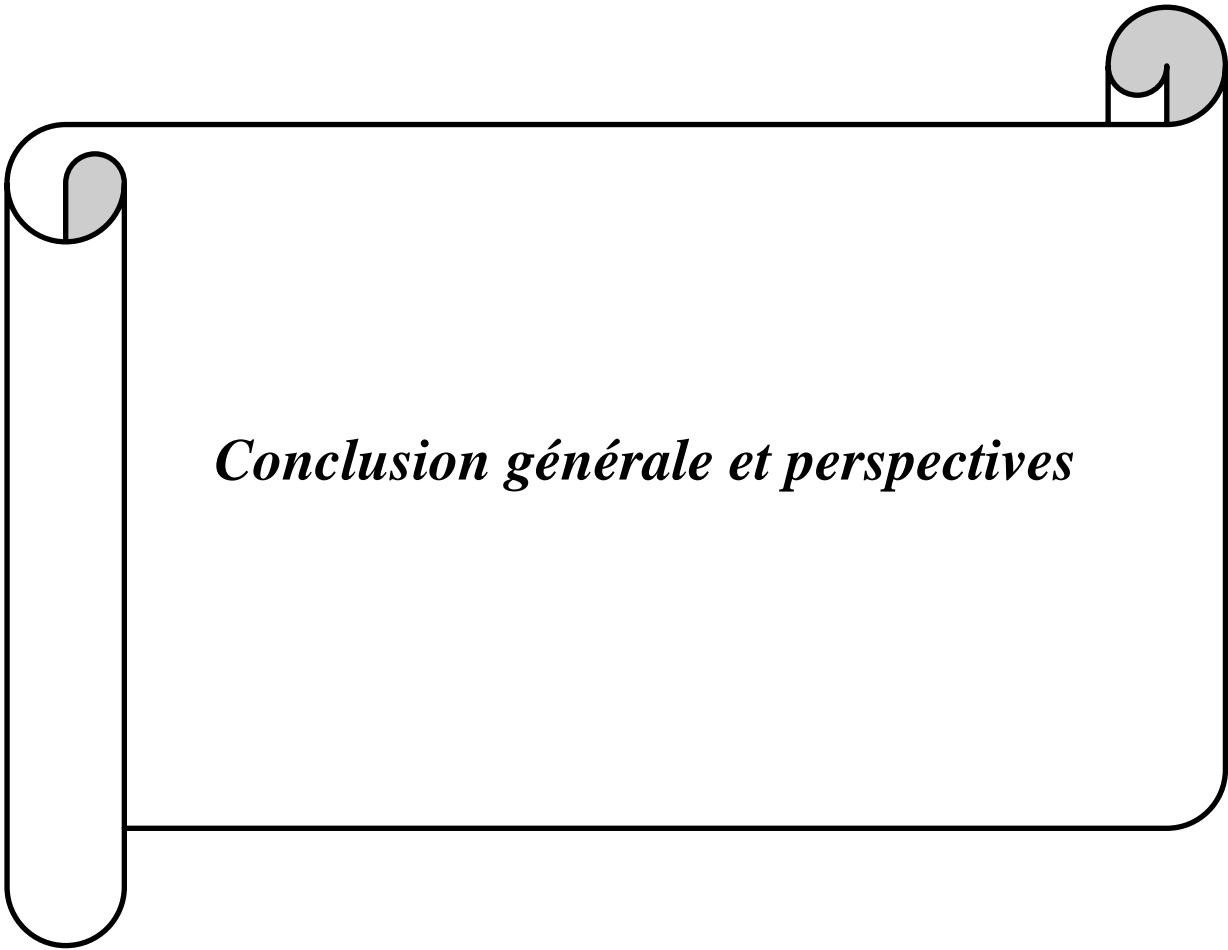
Le rendement de la pompe est 96 % pour  $400 \text{ W/m}^2$  et 94.49 % pour l'irradiation  $600 \text{ W/m}^2$

Figure 5.16 b.

Figure 5.17 montre le débit et la puissance instantanée de débit et puissance de la pompe durant une journée.

### **5.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons étudié une structure de commande utilisant à la fois le concept de la méthode du flux orienté pour le moteur asynchrone et le fonctionnement en MPPT pour l'adaptateur de puissance. La stratégie de commande vectorielle par orientation du flux rotorique a servi ici comme une solution pour contrôler le débit et la hauteur manométrique totale du groupe de pompage. La commande avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement. Ce qui a permis de faire fonctionner la motopompe au point de fonctionnement optimal. Notre contribution principale a été l'introduction du MPPT floue associée à la commande DTC avec asservissement de vitesse optimisée en fonction du couple.



*Conclusion générale et perspectives*

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Le travail présenté dans cette thèse a porté sur l'optimisation du contrôle d'un système de à vitesse variable alimentée par un générateur PV .L'utilisation de l'énergie solaire a énormément d'avantages, une fois l'investissement initial réalisé, elle permet de faire des économies d'énergie conventionnelle et d'éviter les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes.

L'exploitation des potentiels énergétiques (solaire) pour la production de l'électricité s'avère être rentable dans les régions isolées, là où l'extension du réseau électrique conventionnel serait impossible et onéreuse. Nous avons procédé dans cette étude à une modélisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil qui comprend un générateur PV avec des convertisseurs électroniques de puissance permettant une poursuite du point de fonctionnement optimum, l'ensemble alimentant un moteur à courant alternatif accouplé à une pompe centrifuge.

Le premier chapitre a été consacré aux perspectives de développement des énergies renouvelables en Algérie pour savoir la place consacrée au solaire.

Le deuxième chapitre nous avons procédé à la modélisation et la simulation sous Matlab/Simulink et LABView du générateur PV avec création d'interfaces graphiques pour une utilisation simple et conviviale pour le choix des panneaux.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation des modèles des différents éléments constituant la chaîne de commande du système de pompage ; Convertisseurs-Machines sous différentes configurations. Ces modèles ont été utilisés aussi bien pour la simulation du système que pour la synthèse des lois de commande.

Le chapitre quatre à porter sur le contrôle commande MPPT classique et MPPT flou. Parmi toutes ces techniques d'optimisation du générateur PV, nous avons opté pour le MPPT flou qui présente les avantages de robustesse, de rapidité et de précision bien meilleurs que les techniques classiques.

La commande DTC du moteur asynchrone accouplé à la pompe centrifuge est réalisée dans le cinquième chapitre. Nous avons recherché le point de fonctionnement optimal de la pompe correspondant au MPPT flou du générateur PV, pour optimiser l'ensemble.

A la suite du travail de recherche, nous pensons qu'il serait possible de développer ce

## ***Conclusion générale***

---

travail par des investigations sur les points suivants :

- Insertion d'un système de poursuite du soleil (Sun tracker) à deux axes.
- Hybridation du système par l'adjonction de l'éolien.
- L'automatisation de la partie réservoir qui doit être en adéquation avec le système de production et de distribution.

## Références bibliographiques

- [1] G. Ardizzon, G. Cavazzini, and G. Pavesi, “A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 746–761, 2014.
- [2] M. Vafaeipour, S. H. Zolfani, M. H. M. Varzandeh, A. Derakhti, and M. K. Eshkalag, “Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach,” *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 653–663, 2014.
- [3] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] Page web de “International Energy Agency.” <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=ALGERIA&product=balances&year=2014>( consulter le 15/10/2016).
- [5] “Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique.” Mars 2011(consulter le 10/10/2016)[http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=le-programme-des-energies-renouvelables-et-de-l-efficacite-energetique ..](http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=le-programme-des-energies-renouvelables-et-de-l-efficacite-energetique)
- [6] O. Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur,” École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [7] A. Saidi, “La biomasse lignocellulosique et la bioénergie.” Extrait du Portail Algérien des ENERGIES RENOUVELABLES, décembre-2011.
- [8] A. Fekraoui and A. Abouriche, “Ressources Géothermiques du Nord de l’Algérie-Éléments de l’Atlas Géothermique.” *Revue des Energies Renouvelables* , ,pp 159-162, 1999
- [9] R. Banos, F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, and J. Gómez, “Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1753–1766, 2011.
- [10] O. GUERRI, “L’Énergie Éolienne en Algérie : Un bref aperçu.” Bulletin des Energies Renouvelables, 2011.
- [11] “Equilibres.” La lettre de la Commission de Régulation de l’Electricité et du Gaz, N° 12, Mar-2011.
- [12] “La centrale hybride de Hassi R’mel.” R’melExtrait du Portail Algérien des ENERGIES RENOUVELABLES, février-2012.
- [13] Z. Laid, “Etude technique d’un système d’énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau,” Thèse de doctorat Université Mentouri de Constantine 2010.
- [14] “Objectifs nouveau programme des Energies Renouvelables en Algérie (2015-2020-2030).” Extrait du Portail Algérien des Energies Renouvelables, Avril-2015.
- [15] “Energie renouvelable : Une capacité de 380 MW en 2016.” Extrait du Portail Algérien des Energies Renouvelables.
- [16] G. Walker and others, “Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model,” *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia*, vol. 21, no. 1, p. 49, 2001.

- [17] R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache, and A. Bouzid, “A detailed modeling method for photovoltaic cells,” *Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1724–1730, 2007.
- [18] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, “PV panel model based on datasheet values,” in *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 2392–2396.
- [19] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, Y.-J. Su, and others, “Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK,” in *Proceedings of the world congress on Engineering and computer science*, 2008, vol. 2008, pp. 1–6.
- [20] E. I. Batzelis, P. S. Georgilakis, and S. A. Papathanassiou, “Energy models for photovoltaic systems under partial shading conditions: a comprehensive review,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 4, pp. 340–349, 2014.
- [21] A. Chatterjee, A. Keyhani, and D. Kapoor, “Identification of photovoltaic source models,” *IEEE Transactions on Energy conversion*, vol. 26, no. 3, pp. 883–889, 2011.
- [22] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.
- [23] K. Ishaque, Z. Salam, and others, “A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2217–2227, 2011.
- [24] N. M. A. A. Shannan, N. Z. Yahaya, and B. Singh, “Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison,” in *Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, pp. 210–214.
- [25] V. Khanna, B. K. Das, D. Bisht, P. K. Singh, and others, “A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm,” *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 105–113, 2015.
- [26] D. Jena and V. V. Ramana, “An accurate modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance,” *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 5, no. 1, pp. 29–40, 2015.
- [27] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, and A. Shamsudin, “A critical evaluation of EA computational methods for Photovoltaic cell parameter extraction based on two diode model,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 1768–1779, 2011.
- [28] G. Liu, S. K. Nguang, and A. Partridge, “A general modeling method for I–V characteristics of geometrically and electrically configured photovoltaic arrays,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 12, pp. 3439–3445, 2011.
- [29] A. Mohamed, “Optimisation de l’ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque,” 2007.
- [30] C. Gopal, M. Mohanraj, P. Chandramohan, and P. Chandrasekar, “Renewable energy source water pumping systems—A literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 351–370, 2013.
- [31] K. Benlarbi, L. Mokrani, and M. S. Nait-Said, “A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system,” *Solar energy*, vol. 77, no. 2, pp. 203–216, 2004.
- [32] A. B.-A. Bouzid, “Improvement of synchronous and asynchronous motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control,” *Journal of electrical engineering*, vol. 59, no. 4, pp. 169–177, 2008.

- [33] M. A. Vitorino, M. B. de Rossiter Corrêa, C. B. Jacobina, and A. M. N. Lima, “An effective induction motor control for photovoltaic pumping,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1162–1170, 2011.
- [34] A. Terki, A. Moussi, A. Betka, and N. Terki, “An improved efficiency of fuzzy logic control of PMLDC for PV pumping system,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36, no. 3, pp. 934–944, 2012.
- [35] A. Oi, “Design and simulation of photovoltaic water pumping system,” Citeseer, 2005.
- [36] N. Hamrouni, M. Jraidi, A. Cherif, and A. Dhouib, “Measurements and simulation of a PV pumping systems parameters using MPPT and PWM control strategies,” in *Electrotechnical Conference, 2006. MELECON 2006. IEEE Mediterranean*, 2006, pp. 885–888.
- [37] M. F. Mimouni, M. N. Mansouri, B. Benghanem, and M. Annabi, “Vectorial command of an asynchronous motor fed by a photovoltaic generator,” *Renewable Energy*, vol. 29, no. 3, pp. 433–442, 2004.
- [38] A. Betka and A. Moussi, “Performance optimization of a photovoltaic induction motor pumping system,” *Renewable energy*, vol. 29, no. 14, pp. 2167–2181, 2004.
- [39] M. N. Mansouri, N. Ghanmi, and M. F. Mimouni, “Commande et analyse des performances d’une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal,” *Revue des énergies renouvelables*, vol. 11, no. 1, pp. 1–17, 2008.
- [40] A. Khiareddine, C. Ben Salah, and M. F. Mimouni, “New methodology of speed-control of photovoltaic pumping system,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5, no. 5, p. 053109, 2013.
- [41] B. Mehimmedetsi, “Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque,” Thèse, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [42] D. Rekioua and E. Matagne, *Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [43] “User’s Guide PVsyst Contextual Help.” .
- [44] I. de l’énergie des pays ayant en commun l’usage du français, J. Royer, and E. J. Schiller, *Le pompage photovoltaïque: manuel de cours a l’intention des ingénieurs et des techniciens*. Québec: Institut de l’énergie des pays ayant en commun l’usage du français, 1998.
- [45] M. A. Elgendi, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, “Comparison of directly connected and constant voltage controlled photovoltaic pumping systems,” *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 1, no. 3, pp. 184–192, 2010.
- [46] S. Abada, “Etude et optimisation d’un générateur photovoltaïque pour la recharge d’une batterie avec un convertisseur sepic,” Citeseer, 2011.
- [47] T. L. Skvarenina, *The power electronics handbook*. CRC press, 2001.
- [48] A. Khajezadeh, A. Ahmadipour, and M. S. Motlagh, “DC-DC CONVERTERS VIA MATLAB/SIMULINK.”
- [49] A. Hamidat, B. Benyoucef, and T. Hartani, “Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions,” *Renewable Energy*, vol. 28, no. 7, pp. 1081–1096, 2003.
- [50] R. Toufouti, “Contribution à la commande directe du couple de la machine

- asynchrone,” Thèse de doctorat, 2008.
- [51] K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, and S. Mekhilef, “An improved particle swarm optimization (PSO)–based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation,” *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 8, pp. 3627–3638, 2012.
- [52] T. Esram and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [53] N. Martaj and M. Mokhtari, *MATLAB R2009, SIMULINK et STATEFLOW pour Ingénieurs, Chercheurs et Etudiants*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [54] K. Ishaque and Z. Salam, “A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 475–488, 2013.
- [55] A. Khare and S. Rangnekar, “A review of particle swarm optimization and its applications in solar photovoltaic system,” *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 5, pp. 2997–3006, 2013.
- [56] K. S. Tey and S. Mekhilef, “Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level,” *Solar Energy*, vol. 101, pp. 333–342, 2014.
- [57] T. K. Soon and S. Mekhilef, “A fast-converging MPPT technique for photovoltaic system under fast-varying solar irradiation and load resistance,” *IEEE transactions on industrial informatics*, vol. 11, no. 1, pp. 176–186, 2015.
- [58] M. Salima, “Commandes adaptative et prédictive de la machine asynchrone,” 2009.
- [59] A. Ameur, “Commande sans capteur de vitesse par DTC d’une machine synchrone à aimants permanents dotée d’un observateur d’ordre complet à modes glissants,” Université de Batna 2, 2003.
- [60] Y. Daili, “Contrôle de la fréquence de commutation des hysteresis utilisés dans les commandes d’une Machine à Induction,” *Mémoire de Magister, université de Batna, Algérie*, 2007.
- [61] C. Moulay-Idriss and B. Mohamed, “Application of the DTC control in the photovoltaic pumping system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 655–662, 2013.
- [62] A. Zekkour, “Contrôle Direct du Couple du Moteur à Induction Sans Capteur de Vitesse Associé à un Observateur Adaptatif,” Université de Batna 2, 2010.
- [63] S. U. Guide, *Hydro-Québec and the MathWorks. Inc*, 2012.

## Publications:

- ❖ **Ouada Mehdi**, M. S. Meridjet, M. Saad Saoud, N. Talbi, *Increase Efficiency of Photovoltaic Pumping System Based BLDC Motor Using Fuzzy Logic MPPT Control*, WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS,N°3,vol8 , July 2013.
- ❖ Merwan Saad Saoud, Hadj Ahmed Abbassi, Saleh Kermiche, **Mehdi Ouada** *Improved incremental conductance method for maximum power point tracking using cuk converter*, WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS,N°3,vol8 , July 2013.
- ❖ SAADSAOUD, M. Hadj AHmed abbassi, salah kermiche, **Mehdi Ouada**. Study of Partial shading Effects on Photovoltaic Arrays with Comprehensive Simulator for Global MPPT control. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 6(2), 413-420,2016.
- ❖ **Ouada, M.**, Meridjet, M.S. and Dib, D. (xxxx) ‘Comprehensive three-diode model of photovoltaic array with partial shading capability’, Int. J. Power and Energy Conversion, Vol. X, No. Y, pp.xxx–xxx.

DOI: 10.1504/IJPEC.2017.10001986

## Conférences:

- ❖ **Ouada M**, Tarfaya A, M.S. Meridjet, Dib D ‘*Etude et Caractérisation sous Matlab/Simulink d'un Générateur photovoltaïque* ’ The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies, URAER , Ghardaïa, Algérie,2012.
- ❖ N.talbi ,S ;Benzahioul ,A, Metatla ,**Ouada M**,M Hassani ‘*Comparative study of photovoltaic Générator models*’International Conference on Electromechanical Engineering , Skikda, Algérie, 2012.
- ❖ **Ouada M**, Tarfaya A, M.S. Meridjet, Dib D ‘*Comparative study between traditional MPPT Algorithms and fuzzy logic MPPT* ’First International Conference on Renewable Energies and Nanotechnology impact on Medicine and Ecology , Consrantine, Algérie, 2013.
- ❖ *Saad Saoud M, Abbassi HA, kermiche M, and Ouada M " Modeling of a photovoltaic storage system "The International Conference On Electronics And Oil: From Theory To Applications , March 05-06, 2013, Ouargla, Algeria.*

- ❖ **Ouada M**, M.S. Meridjet , Talbi N ‘*Optimization photovoltaic pumping system based BLDC using Fuzzy MPPTcontrol*’ *International Renewable and Sustainable Energy Conference* ,March 7 -9 2013, Ouarzazate, Morocco.
- ❖ Saad saoud M,Abbassi HA,Kermiche S, **Ouada M**, Simple Methode of Modeling and Search of Global Power Peak Under Mismatching Conditions on PV Array, ICNCRE13,JIJEL , 22-23, September, 2013.
- ❖ **Ouada, M.**, Meridjet, M. S., Saoud, M. S., & Derradji, N. (2014, November). Study of new configuration photovoltaic pumping system. In *Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), 2014 International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- ❖ **Ouada, M.**, Meridjet, M. S., & Dib, D. (2016, July). Adaptive smart simulator for characterization and MPPT construction of PV array. In *TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR RENEWABLE ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY: TMREES* (Vol. 1758, No. 1, p. 030036). AIP Publishing.

## Annexes

- Comparaison de modèle trois-diode avec les modèles du littérature (un et deux diodes) :

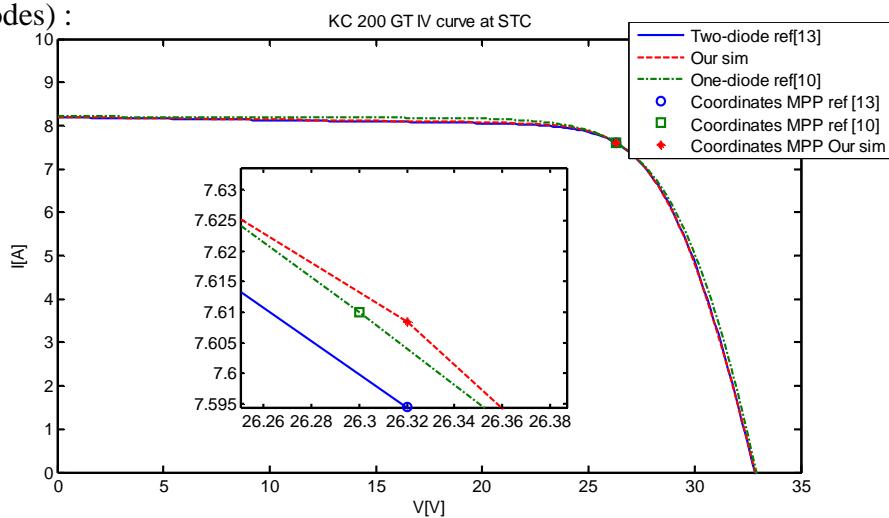


Figure (A1).La courbe I-V ajusté du module KC200GT (les trois modèles)

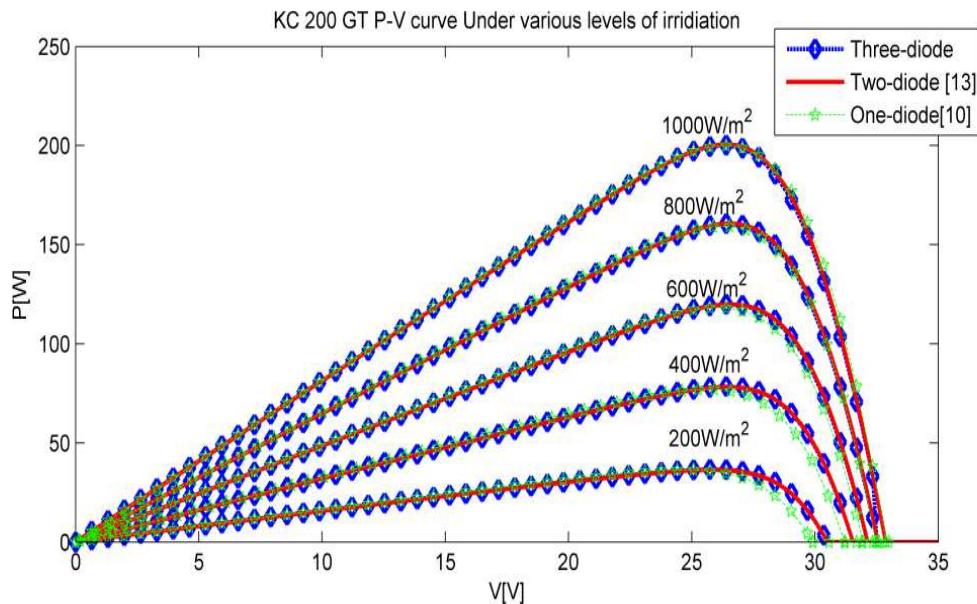


Figure.(A2) Comparaison avec la littérature de la courbe P-V du module KC200GT sous différentes niveau d'irradiation.

## Annexes

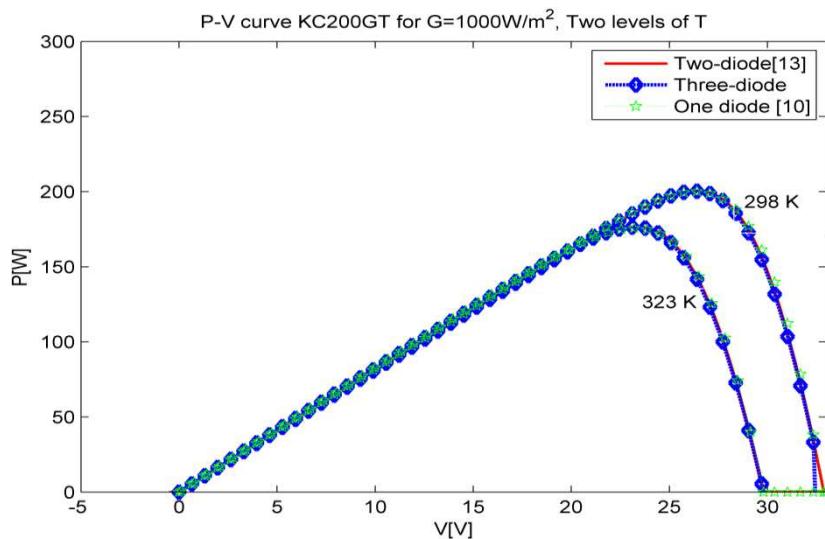


Figure (A3) Comparaison avec la littérature de la courbe P-V du module KC200GT sous 2 niveau de température.

Les paramètres de convertisseur chapitre 3 :

Paramètre	valeur
L'inductance (L)	0.1 mH
Capacité (C)	100 $\mu$ F

### Les paramètres de MAS

Paramètres	valeur
Puissance nominale	3 KW
Résistance statorique	1.84 $\Omega$
Résistance rotorique	1.84 $\Omega$
Inductance cyclique au stator	0.17 H

## Annexes

Inductance cyclique au rotor	0.17 H
Inductance mutuelle	0.16 H
Nombre de paires de pôle	2

### Paramètres de régulateur PI Anti- Emballement :

Gain P	40
Gain I	0.01574
Gain Anti –emballement	10

### Paramètres de la pompe centrifuge:

Débit (en m <sup>3</sup> /h)	Dimensions	Hauteur manométrique	Poids(en KG)	Puissance en KW
0-72	DNA4-DNR4	22-9	35	3