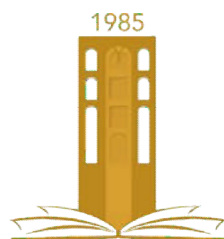


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : .....



جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

par :

- Mr. HADJI Djamel
- Mr. CHABI Amar Abdelmoumin

Thème :

**Application d'une nouvelle technique MPPT sur  
un GPV en vue de l'alimentation d'une MADA**

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. DJRIOU Salim	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
Mr. ROUABHI Riyadh	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co Encadreur
.....	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
.....	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

# Remerciements

*A l'issue de ce projet de fin d'études nous adressons nos remerciements*

*à **Dieu** tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné toutes ces longues années d'études.*

*Nos remerciements vont aussi à nos parents qui nous ont soutenus le long de notre cycle d'étude.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. ROUABHI Riyadh** et **Mr. DJERIOU Salim** d'avoir posé un sujet intéressant et pour ses conseils, sa disponibilité et pour nous avoir fait profiter de ses connaissances et de ses qualités tant professionnelles qu'humaines. Nous le remercions encore une fois d'avoir relu, corrigé et stimulé avec grande patience des discussions autour de ce manuscrit.*

*Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté sur notre travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à ceux que sont Les plus chers  
À mon cœur, mes parents (mama et papa) qui m'ont encouragé  
au cours de ma formation.*

*À mes très chers frères et ma petite sœur et à ma grande  
famille.*

*Tous mes amis Tous mes collègues d'étude.*

*Toute la promotion de 2<sup>ème</sup> année Master  
Réseaux électrique, Génie Electrique 2019-2020.*

*Tous ceux qui m'aiment et ceux qui j'aime.*

*Mr. HADJI Djamel*

## *Dédicace*

*Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force et la patience d'aller jusqu'au bout du rêve*

*Je dédie ce travail à ma mère et mon père*

*A mes sœurs et mes frères*

*A toute ma grande famille : Chabi, Lamine*

*A mes collègues des études et à tous mes amis*

*A tous les êtres chers et chers à mon cœur*

*Mr. CHABI Amar Abdelmoumin*

# Sommaire

Sommaire .....	I
Listes des figures ..... ;.....	II
Listes des tableaux .....	III
Nomenclature .....	IV
Lexique .....	V
Introduction générale .....	1

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.

<b>I.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2</b>	<b>APERÇU SUR LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE .....</b>	<b>4</b>
I.2.1	Systèmes de pompage au fil du soleil.....	4
I.2.2	Systèmes de pompage avec stockage électrochimique (batteries).....	5
I.2.3	Avantages et inconvénients des systèmes de pompage photovoltaïque .....	6
<b>I.3</b>	<b>PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE AU FIL DU SOLEIL ....</b>	<b>7</b>
I.3.1	Aperçu sur la source de système de pompage photovoltaïque au fil du soleil.....	8
	I.3. 1.1 l'énergie solaire en L'algerie .....	8
	I.3. 1.2 Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale.....	10
	I.3.1.2.1 Rendement relatif d'un panneau solaire.....	10
	I.3. 1.3 Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque .....	11
I.3.2	Aperçu sur la machine utilisée dans le système de pompage photovoltaïque au fil du soleil.....	12
	I.3. 2.1 Description de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	12
	I.3. 2.2 Les différentes configurations de la machine asynchrone à double alimentation .....	13
	I.3. 2.3 Les applications des machines asynchrone à double alimentation.....	16
	I.3. 2.4 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation .....	17
I.3.3	Aperçu sur les convertisseurs utilisés dans le système de pompage photovoltaïque au fil du soleil .....	18
	I.3.3.1 Les convertisseur DC/DC (hacheur) .....	19
	I.3.3.2 Les convertisseur DC/AC (Onduleur).....	20
I.3.4	Aperçu sur les pompes utilisées dans le système de pompage photovoltaïque au fil du soleil.....	20
	I.3.4.1 La pompe centrifuge .....	20
	I.3.4.2 La pompe volumétrique .....	21
	I.3.4.3 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique.....	22
<b>I.4</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>22</b>

### CHAPITRE II : MODELISATION DE LA CHAINE DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.

<b>II.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>24</b>
<b>II.2</b>	<b>MODELISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>24</b>
II.2.1	Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	24
	II.2.1.1 Modèle à une diode sans résistance shunt :(Cellule idéale).....	24
	II.2.1.2 Modèle à une diode :(Cellule réelle).....	24
II.2.2	Modèle d'un GPV .....	29
	II.2.2.1 Association des cellules photovoltaïque en parallèle.....	30
	II.2.2.2 Association des cellules photovoltaïque .....	31
<b>II.3</b>	<b>MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION .....</b>	<b>31</b>
II.3.1	Hypothèses simplificatrices .....	32
II.3.2	Equations mathématiques de la MADA dans le repère (abc).....	32
	II.3.2.1 Equations électriques .....	33
	II.3.2.2 Equations magnétiques .....	34
	II.3.2.3 Equations mécaniques .....	34
II.3.3	Transformation de Park.....	35
II.3.4	Equations mathématiques de la <b>MADA</b> dans le repère (dq) .....	36
	II.3.4.1 Equations électriques .....	37
	II.3.4.2 Equations magnétiques .....	37
	II.3.4.3 Equation du couple électromagnétique .....	38
II.3.5	Choix de repère de référence de Park .....	38
II.3.6	Modèle d'état de la MADA .....	39
<b>II.4</b>	<b>MODELISATION ET COMMANDE DES CONVERTISSEURS UTILISEES .....</b>	<b>40</b>
II.4.1	Modélisation et technique de commande du convertisseur côté machine .....	40
	II.4.1.1 Modélisation du convertisseur côté machine.....	40
	II.4.1.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion.....	43
II.4.2	Modélisation du convertisseur côté PV (hacheur).....	44
	II.4.2.1 Représentation d'un hacheur survolteur .....	45
	II.4.2.2 Modélisation d'un hacheur survolteur .....	46
<b>II.5</b>	<b>MODELISATION DE LA POMPE CENTRIFUGE .....</b>	<b>49</b>
II.5.1	La Hauteur Manométrique HMT .....	50
II.5.2	Calcul de puissance .....	50
II.5.3	Calcul du rendement.....	51
<b>II.5</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>51</b>

### CHAPITRE III : COMMANDE ET OPTIMISATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.

<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>52</b>
<b>III.2</b>	<b>DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE .....</b>	<b>52</b>
III.2.1	Les critères de choix.....	52
	III.2.1.1 Evaluation des besoins en eau .....	52
	III.2.1.2 Valeur de l'énergie hydraulique nécessaire .....	53
III.2.2	Dimensionnement de la pompe centrifuge .....	53
III.2.3	Dimensionnement du champ photovoltaïque .....	54
<b>III.3</b>	<b>COMMANDES D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>55</b>
III.3.1	Commandes de la source du système de pompage (générateur photovoltaïque).....	55
	III.3.1.1 La technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT).....	55
	III.3.1.1.1 Principe de la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) ...	55
	III.3.1.2 Les algorithmes de commandes appliqués .....	58
	III.3.3.2.1 La commande "Perturbation et Observation" (P&O) .....	58
	III.3.3.2.2 La commande "Golden section search" (GSS).....	60
III.3.2	Commandes de la machine utilisée dans le système de pompage (Commande vectoriel) .....	63
	III.3.2.1 Principe de la commande vectoriel.....	64
	III.3.2.2 Application de la commande vectoriel a la MADA .....	65
	III.3.2.3 Découplage par compensation.....	68
	III.3.2.4 Synthèse des différents régulateurs .....	69
	III.3.2.5 Calcul des régulateurs .....	69
	III.3.2.5.1 Régulateur du courant.....	69
	III.3.2.5.2 Régulation de vitesse.....	71
	III.3.2.6 Résultats de simulation numérique (MADA-Commande vectoriel).....	73
<b>III.4</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>73</b>

### CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.

<b>IV.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>74</b>
IV.1.2	Simulation de la chaîne de pompage PV avec la commande Golden Section Search .....	74
	IV.1.2.1 Résultats de simulation de la commande GSS .....	75
	IV.1.2.2 Interprétation des résultats .....	79
<b>IV.2</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>79</b>

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>80</b>
---------------------------------	-----------

# *Listes des figure*

## *Chapitre I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE*

<b>Figure I.1</b> : Schéma du principe de pompage au fil du soleil.....	5
<b>Figure I.2</b> : Schéma du principe de pompage avec stockage d'énergie .....	5
<b>Figure I.3</b> : Diagramme du pompage PV par électropompe DC.....	6
<b>Figure I.4</b> : Diagramme du pompage PV par électropompe AC .....	7
<b>Figure I.5</b> : Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque.....	7
<b>Figure I.6</b> : Zones climatiques de l'Algérie.....	9
<b>Figure I.7</b> : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur.....	14
<b>Figure I.8</b> :Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cycloconvertisseur. ....	15
<b>Figure I.9</b> : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux onduleurs.....	16
<b>Figure I.10</b> : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge. ....	18
<b>Figure I.11</b> : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.....	19
<b>Figure I.12</b> : Pompe centrifuge. ....	21
<b>Figure I.13</b> : Pompe volumétrique.[18].....	22
 <i>Chapitre II : MODELISATION DE LA CHAÎNE du système de pompage photovoltaïque</i>	
<b>Figure II.1</b> :Modèle électrique équivalent à la cellule solaire. ....	25
<b>Figure II.2</b> : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	30
<b>Figure II.3</b> : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.....	31
<b>Figure II.4</b> : Représentation schématique du modèle d'une MADA.....	32
<b>Figure II.5</b> : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.....	33

## Listes des figure

---

<b>Figure II.6:</b> Représentation de la MADA dans le repère de Park.....	35
<b>Figure II.7:</b> Repère statorique et rotorique et repère de Park.....	36
<b>Figure II.8:</b> Schéma synoptique de la MADA et de son alimentation.....	40
<b>Figure II.9 :</b> Onduleur de tension triphasé à deux.....	41
<b>Figure II.10:</b> Représentation d'un IGBT.....	41
<b>Figure II.11 :</b> Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.....	44
<b>Figure II.12 :</b> Schéma d'un convertisseurs DC-DC .....	45
<b>Figure II.13 :</b> Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge.....	47
<b>Figure II.14 :</b> Allure des variables dynamiques IL.....	48
<b>Figure II.15:</b> Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.....	50
<i>Chapitre III : Commande et optimisation du système de pompage photovoltaïque</i>	
<b>Figure III.1:</b> La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.....	56
<b>Figure III.2 :</b> Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque. ....	56
<b>Figure III.3:</b> Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge, (c) suite à une variation de température.....	57
<b>Figure III.4:</b> Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau solaire.....	58
<b>Figure III.5:</b> Organigramme de l'algorithme perturbation et observation[38].....	59
<b>Figure III.6 :</b> Schéma explicatif du GSS.....	60
<b>Figure III.7 :</b> Modèle du MPPT proposé.....	62
<b>Figure III.8:</b> Organigramme de l'algorithme GSS MPPT proposé.....	63

## Listes des figure

---

<b>Figure III.9 :</b> Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la machine à courant continu MCC.....	65
<b>Figure III.10 :</b> Illustration de l'orientation du flux statorique. ....	65
<b>Figure III.11 :</b> Schéma de principe de la commande vectorielle directe à flux statorique orienté du MADA.....	68
<b>Figure III.12:</b> Schéma bloc de la commande vectorielle avec compensation des f.é.m.....	69
<b>Figure III.13:</b> Schéma de régulation du courant $I_{rd}^*$ .....	70
<b>Figure III.14 :</b> Schéma de régulation du courant $I_{rq}^*$ .....	70
<b>Figure III.15:</b> Schéma fonctionnel de régulation de vitesse.....	72
<b>Figure III.16 :</b> Le schéma bloc de simulation de la commande vectorielle.....	73

## *CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE*

<b>Figure IV.1:</b> Schéma bloc de système de pompage photovoltaïque à base GSS.....	75
<b>Figure IV.2 :</b> Allure d'irradiation solaire.....	75
<b>Figure IV.3 :</b> Allure de Puissance PV.....	76
<b>Figure IV.4 :</b> Allure de Tension PV et tension de référence en utilisant GSS. ....	76
<b>Figure IV.5:</b> la tension à la sortie de l'hacheur. ....	76
<b>Figure IV.6 :</b> la vitesse de l'arbre de MADA et sa vitesse de référence.....	77
<b>Figure IV.7 :</b> le couple électromagnétique de MADA et sa couple résistant. ....	77
<b>Figure IV.8 :</b> les Courant statoriques de MADA. ....	77
<b>Figure IV.9:</b> la puissance utile de la motopompe. ....	78
<b>Figure IV.10 :</b> Allure du débit de pompe centrifuge. ....	78
<b>Figure IV.11 :</b> Allure du Couple résistant de la motopompe.....	78

# *Liste des tableaux*

## *Chapitre I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE*

Tableau I.1. Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries [1].

Tableau 1.2: Potentiel solaire en Algérie.

Tableau I.3 : les avantages et les quelques inconvénients de la MADA

Tableau I. 4.Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique [1].

## *Chapitre II :MODELISATION DE LA CHAÏNE du système de pompage photovoltaïque*

Tableau II.1 Conditions de test.

Tableau II.2 Caractéristiques du GPV.

Tableau II.3 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC

## Nomenclature

$V_t$ : tension thermique à la température T.

$K$ : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/k)

$K_1$ : constante ( $1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$ )

$K_2$ : constante ( $2.9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^{5/2}$ )

$n$ : facteur de non idéalité de la jonction

$T$ : température effective de la cellule en Kelvin

$E_g$ : énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV )

$I$ : le courant fourni par la cellule.

$V$ : la tension aux bornes de la cellule.

$\alpha$ : le coefficient de variation du courant en fonction de température

$T_{ref}$ : la température de référence, 298K (25°C).

$P(W)$ : Puissance fournie par la cellule PV.

$V(v)$ : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I(A)$ : Intensité débitée par la cellule PV.

$V_{CO}$ : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule.

$I_{CC}$ : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

$f$ : Facteur de forme.

$I_{CC}$ : Intensité de court-circuit.

$M$ : indice affecté au module.

$n_s$ : nombre de cellules en sérié.

$n_p$ : nombre de cellules en parallèle.

$I_{SrM}$ : Courant de saturation référence du module.

$I_{CCrM}$ : Courant de court-circuit référence du module.

$P_{max}$ : Puissance maximale

$V_{Pmax}$ : Tension à  $P_{max}$

$I_{Pmax}$ : Courant à  $P_{max}$

$I_{CCr}$ : Courant de court circuit de référence

$V_e$ : La tension d'entrée.

$V_s$ : La tension de sortie.

$D$ : Le rapport cyclique du convertisseur.

$V(k)$ : Tension en sortie du panneau à l'itération k

## Nomenclature

---

**I(k)** : intensité en sortie du panneau à l'itération k

**P(k)** : puissance en sortie du panneau à l'itération k

**R<sub>a</sub>** : La résistance de l'induit

**L<sub>a</sub>**: L'inductance de l'induit

**e<sub>m</sub> (t)**:Une tension appelée f.é.m. (force électromotrice).

**ω(t)**:la vitesse angulaire

**I<sub>a</sub> (t)** : Le courant traversant le circuit d'induit

**T<sub>em</sub>(t)** : Le couple électromagnétique instantané produit .

**φ<sub>f</sub>**: L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique

**J<sub>t</sub>**: Inertie totale entraînée (moteur J<sub>m</sub>et charge J<sub>ch</sub>) .

**B<sub>m</sub>**: Coefficient de frottement visqueux.

**T<sub>r</sub>**:Couple résistant.

**T<sub>f</sub>**:Couple de frottement de coulomb.

**ω**: la vitesse angulaire de la pompe.

**K<sub>q</sub>,K<sub>h</sub>** :constantes données de la pompe.

**H**:Hauteur totale du pompage.

**H<sub>S</sub>**: Hauteur statique

**H<sub>d</sub>**: Est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

**λ**:Coefficient de pertes de charges linéaires.

**L**:Longueur de la tuyauterie (m).

**D** : Diamètre de la tuyauterie (m).

**g** : Accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>)

**v**:Vitesse moyenne du fluide (m/s)

**ε**:Coefficient de pertes de charges locales .

**K<sub>fr</sub>**: Constante de la canalisation.

**K<sub>r</sub>** : Coefficients de proportionnalité [(Nm/rad.s<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>] .

**C<sub>S</sub>** :Le couple statique, très petite.

**K<sub>0</sub> ,K<sub>1</sub> , K<sub>2</sub>**Des constants propre de la pompe donnée par le constructeur

**ρ** :La masse volumique de l'eau étant de 1000kg/m<sup>3</sup>.

**g** :Accélération de la pesanteur (9,81m<sup>2</sup>/s) .

**η<sub>gm</sub>**: le rendement GPV-MCC

**E** :la radiation captée par le PV.

**S<sub>g</sub>** :surface du générateur (m<sup>2</sup>).

## *Lexique*

**PV:** Photovoltaïque.

**GPV:** Générateur Photovoltaïque.

**FF:** Facteur de forme.

**MPPT:** Maximum Power Point Tracking.

**P&O:** Perturbation et Observation.

**GSS :** Golden section shearch.

**DC:** Courant Continu (Direct Current).

**AC:** Courant Alternatif (Alternative Current).

**MADA:** Moteur asynchrone double alimentation.

**MCC:** Moteur à courant continu.

**HMT :** Hauteur manométrique totale

# Introduction Général

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelle réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [1,2].

À la différence des énergies fossiles les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et la biomasse offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement sans pollution et dans une moindre dépendance des ressources et doivent jouer un rôle important pour atteindre cet objectif. Dans ce contexte, l'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital. En effet, La consommation de ces sources possède des conséquences néfastes sur l'environnement. Par exemple l'émission de gaz à effet de serre provoquant l'augmentation de la pollution et des perturbations climatiques. Ainsi, la production électrique à partir des combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiale de CO<sub>2</sub>. L'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentielle d'exportation de l'énergie électrique solaire [3].

Les applications des énergies renouvelables, solaire (thermique ou photovoltaïque), représentent une solution excellente pour le problème, l'utilisation de ce type d'énergie pour le pompage d'eau, surtout dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec où c'est justement le moment où l'on a accès au maximum d'énergie solaire [4].

Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque et un sous-système de pompage. Le pompage photovoltaïque est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse et se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée "pompe au fil du soleil", utilise un réservoir pour

stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe[1]. Les moteurs des pompes solaires de petite puissance (petite HMT et faible débit journalier) sont généralement en courant continu. Cependant, ces dernières années, le moteur asynchrone double alimentations est de plus en plus utilisé pour les applications industrielles, ça nous attire de s'appliquer aux pompes solaires à cause de la diminution du coût de l'onduleur, sa simplicité, sa robustesse et son faible coût.

L'objectif de notre travail est l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil basé sur un moteur asynchrone double alimentations entraînant une pompe centrifuge qui aspire l'eau d'un puits et le refoulé (stockage) dans un réservoir. Dans ce contexte, nous avons structuré notre travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre correspond à une recherche bibliographique sur les systèmes de pompage photovoltaïque, Nous allons présenter les différentes parties des constituant, à savoir, la source photovoltaïque, ou une description de son principe de fonctionnement ainsi que ces avantages et inconvénients seront présentés. Ensuite, une présentation sur l'énergie solaire en l'Algérie et un aperçu théorique sur les pompes utilisées dans le système de pompage photovoltaïque au fil du soleil.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément qui constitue le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone double alimentations et la pompe centrifuge afin de nous permettre une excellente simulation de ce système.

Pour le troisième chapitre, notre étude intéresse à l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale pour obtenir un algorithme qu'est donner une bonne qualité d'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque alimentant un système de pompage à base la MADA, Une application de l'algorithme MPPT basé sur Golden Section Search dans les systèmes de pompage photovoltaïque a proposer pour ce travail. Elle sera étudiée en termes de l'efficacité pour le suivi du point de puissance maximale dans des conditions climatiques variables et sa simplicité, afin de nous dimensionner notre système de pompage photovoltaïque.

Dans le quatrième chapitre sera consacré à la simulation du système de pompage à base de la machine MADA avec l'application de l'algorithme GSS de la MPPT.

## **Introduction générale**

---

Enfin, notre travail est clôturé par une conclusion générale à travers laquelle, on a exposé les principaux résultats qu'on a obtenu.

# **CHAPITRE I :**

**GENERALITE SUR LES SYSTEMES  
DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.**

## **I.1 Introduction**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Actuellement, la production de l'énergie est basée, en grande partie, sur des ressources limitées à savoir : le pétrole, le nucléaire, l'hydraulique, ...etc. Ces sources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques dans le monde s'élèvent continuellement ; ce qui mène à la recherche de d'autres sources d'énergie plus économiques et non polluantes, telles que la production d'énergie à partir du soleil ou du vent.

La demande croissante d'eau dans les zones rurales et sites isolés nécessite la réalisation d'une solution pratique et économique pour amener en surface les eaux souterraines. Le pompage de l'eau par l'énergie solaire est une solution attrayante pour les régions bien ensoleillées de la planète.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'architecture complète du système de pompage photovoltaïque autonome. Ensuite, nous présentons d'une façon descriptive plus détaillée les principaux composants de notre système constitué par les éléments : panneau photovoltaïque (PV) ; machine asynchrone à double alimentation (MADA) ; hacheur boost ; onduleur et la pompe centrifuge.

## **I.2 Aperçu sur les systèmes de pompage photovoltaïque :**

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant de l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable. La performance du pompage photovoltaïque dépend des caractéristiques du site (ensoleillement, température, obstacles géographiques), du rendement des modules photovoltaïque, mais aussi des caractéristiques des modules photovoltaïque, onduleur, moteur, pompe, etc.

Dans les systèmes nous avons deux techniques possibles : pompage au fil du soleil et pompage avec stockage d'énergie.

### **I.2.1 Systèmes de pompage au fil du soleil :**

Dans le cas où l'énergie solaire est consommée en temps réel ; on parle alors d'un pompage au fil du soleil sans batterie (Figure. I.1). Cette technique permet d'utiliser directement une

puissance continuellement variable, celle issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'ensoleillement .

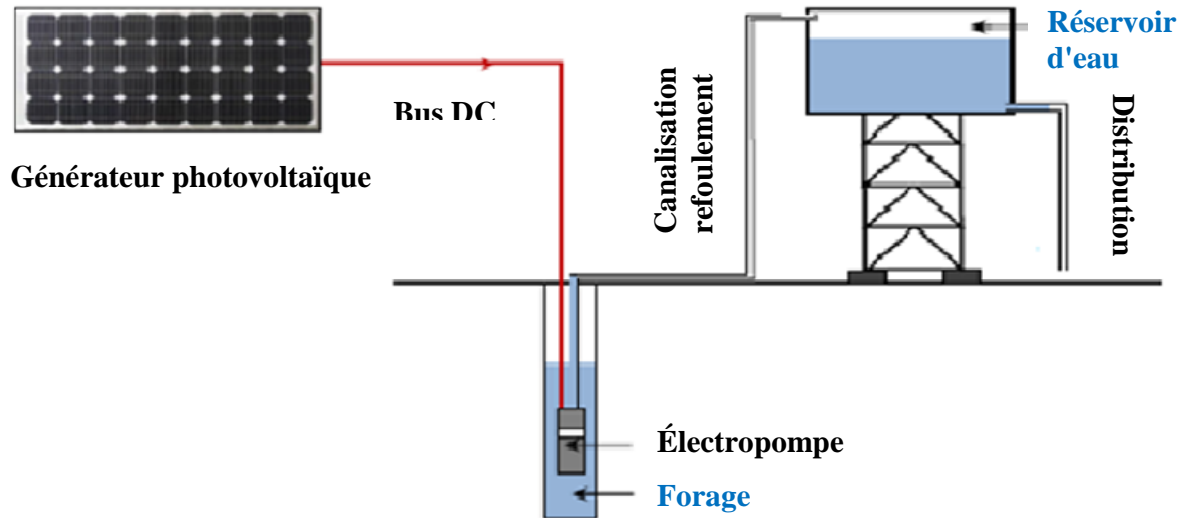


Figure I.1 : Schéma du principe de pompage au fil du soleil.

### I.2.2 Systèmes de pompage avec stockage électrochimique (batteries) :

La deuxième technique consiste à utiliser un stockage d'énergie (figure I.2). Ces batteries stockent l'énergie produite par les cellules photovoltaïques lors des périodes d'ensoleillement afin de pouvoir restituer cette énergie pour pomper l'eau en temps voulu.

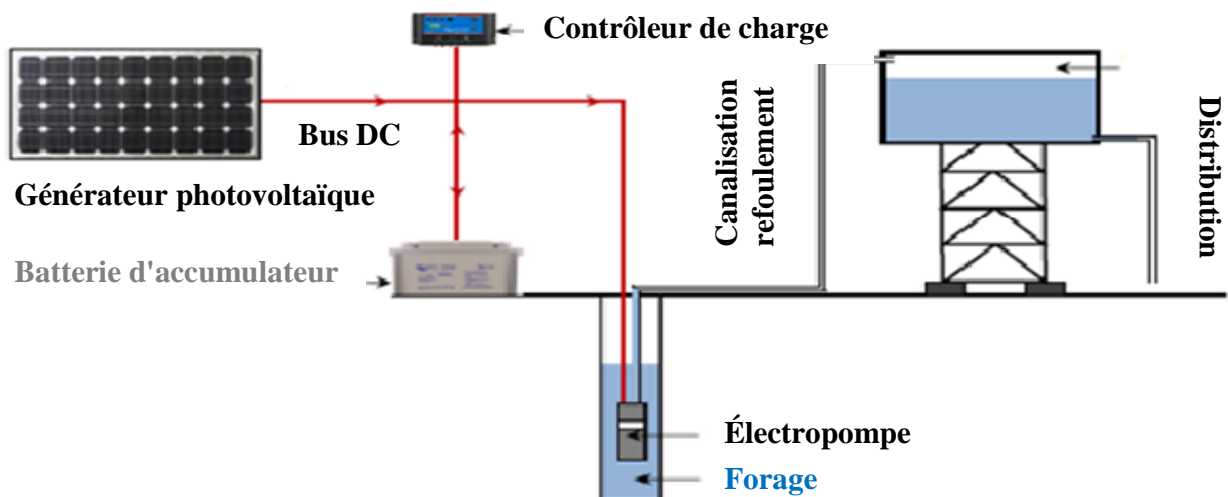


Figure I.2 : Schéma du principe de pompage avec stockage d'énergie.

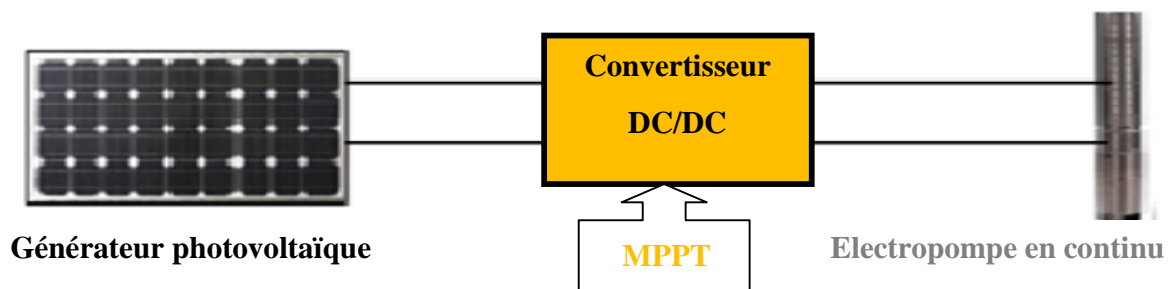
**I.2.3 Avantages et inconvénients des systèmes de pompage photovoltaïque :**

Les avantages et inconvénients des deux techniques de pompage photovoltaïque sont résumés dans le tableau I.1.

Méthodes de pompage	Avantages	Inconvénients
<b>Pompage au fil du soleil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Economie du coût des batteries et par conséquence leur maintenance</li> <li>- Système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux</li> <li>- Meilleur rendement énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte d'énergie au début et à la fin de la journée</li> <li>- Le débit de la pompe n'est pas constant et le rabattement du forage peut-être trop élevé durant certaines périodes de la journée.</li> </ul>
<b>Pompage avec batterie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Débit de la pompe régulier et à pression fixe.</li> <li>- Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé d'entretien et maintenance des batteries</li> <li>- Changement des batteries tous les 5 à 7 ans</li> <li>- Les batteries introduisent un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30% de la production d'énergie.</li> <li>- Coût élevé du système photovoltaïque.</li> </ul>

**Tableau I.1. Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries [6].**

Dans le cas où le moteur est à courant alternatif, un convertisseur électronique appelé onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant du générateur photovoltaïque en courant alternatif.



**Figure I.3 : Diagramme du pompage PV par électropompe DC.**

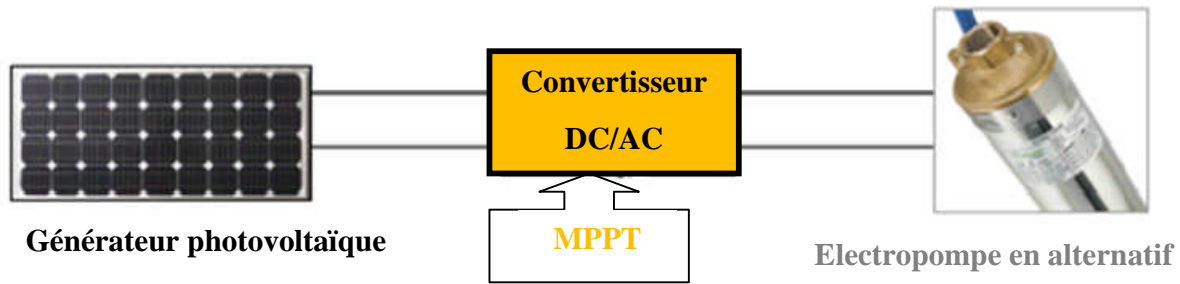


Figure I.4 : Diagramme du pompage PV par électropompe AC.

### I.3 Principaux composants d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil :

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable ; ses performances dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température ambiante, obstacles géographiques), du rendement des modules mais aussi des caractéristiques des autres équipements (onduleur, motopompe,...) Un système de pompage photovoltaïque est un système complexe qui se compose: le GPV, le système de conversion, le moteur d'entraînement, la pompe et les batteries de stockage. Le schéma général d'un système de pompage photovoltaïque étudié dans cette mémoire est le suivant :

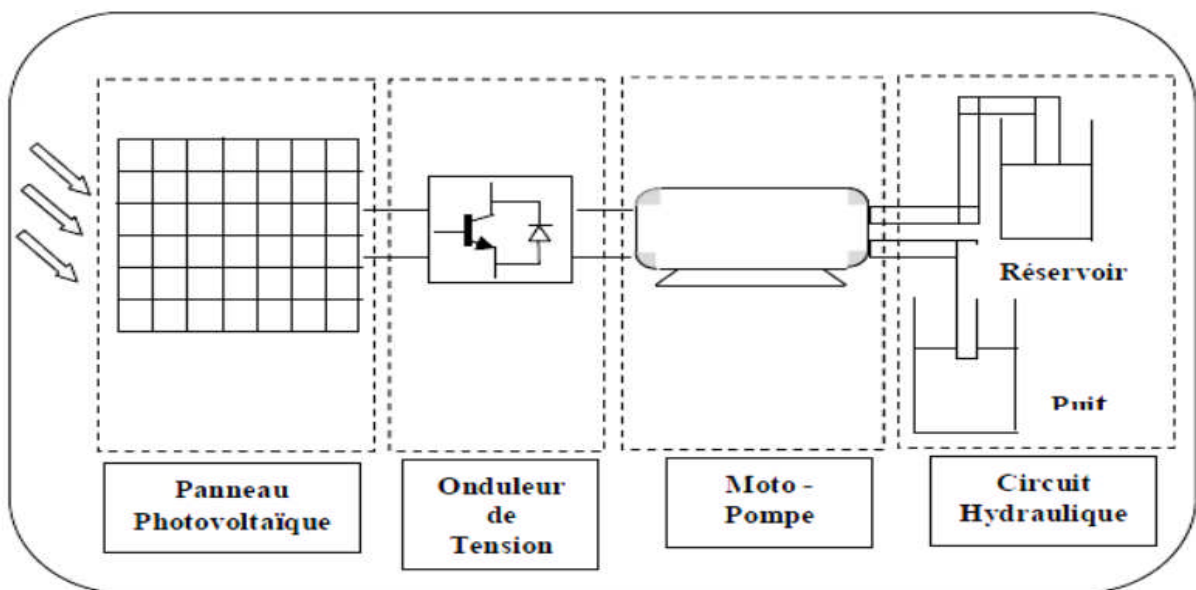


Figure I. 5 : Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque

**I.3.1 Aperçu sur la source de système de pompage photovoltaïque au fil du soleil :**

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en développement. L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à condition d'être bien dimensionner. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèle qui reflète la réalité et ils se doivent d'être précis [7].

**I.3. 1.1 l'énergie solaire en L'Algérie :**

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables.

L'énergie solaire, peut être convertie en chaleur ou en électricité. On distingue deux moyens principaux de convertir l'énergie solaire :

- ❖ L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- ❖ L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

Les réalisations algériennes dans le domaine des énergies renouvelables sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc d'énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des stades très avancés.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant cinq décennies d'indépendance, malgré la position géographique stratégique du pays qui dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et peut atteindre les 3900

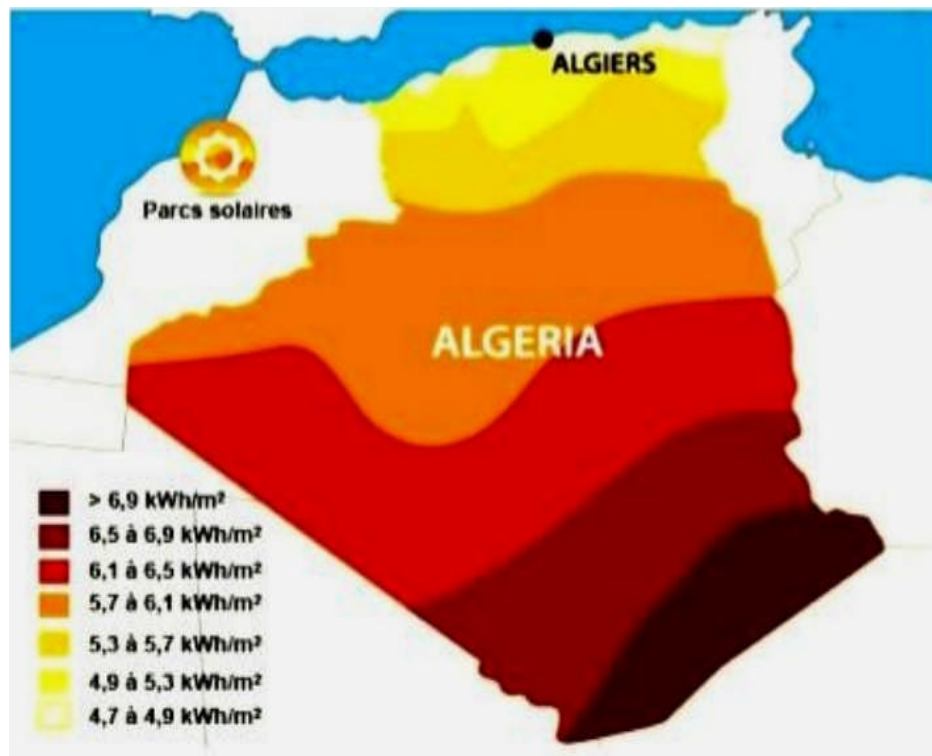
heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{kWh/m}^2/\text{an}$  au Nord et  $2263\text{kWh/m}^2/\text{an}$  au Sud [8].

Le tableau suivant donne le potentiel solaire algérien en chiffres et selon la localisation [10].

	Régions côtières	Haut plateaux	Sahara
Superficies %	4	10	86
Durée moyenne ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ( $\text{kWh/m}^2/\text{an}$ )	1700	1900	2650

**Tableau 1.2: Potentiel solaire en Algérie.**

Avec un gisement solaire qui dépasse les 5 milliards de GWh, notre pays a mis également en œuvre des initiatives afin de promouvoir l'électricité solaire, notamment dans le cadre de l'électrification décentralisée [9]. La cartographie ci-après présente le rayonnement solaire.



**Figure I.6: Zones climatiques de l'Algérie.**

**I.3.1.2 Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale :**

Le générateur photovoltaïque peut être constitué d'un ou plusieurs modules photovoltaïques appelé champ photovoltaïque destiné à produire de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. En effet, le champ photovoltaïque est une association en série et parallèle de modules photovoltaïques selon la puissance et la tension d'utilisation. Sa caractéristique (I-V) est similaire à celle d'un module et les cellules sont protégées par des diodes série (anti-retour) et des diodes parallèle (by-pass). Il constitue la surface de captage de l'énergie solaire et de production d'électricité.

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui convertissent les irradiations provenant du soleil en électricité à courant continu. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium mono ou poly cristallin, amorphe, tellure de Cadmium (CdTe), et d'Arséniure de Gallium (GaAs) [6].

**I.3. 1.2.1 Rendement relatif d'un panneau solaire :**

Le rendement absolu d'un module photovoltaïque, pendant une période donnée, est le rapport entre l'énergie électrique produite par le module et l'énergie solaire reçue. Les rendements annuels moyens (absolus) des modules peuvent varier de 5% à 18%.

Mais pour connaître l'efficacité énergétique réelle de son installation, nous devons déterminerons rendement relatif [5].

Le rendement relatif d'un module pour une période donnée est alors le rapport entre la Puissance énergétique mesurée ( $P = U \times I$ ) pendant la période et la puissance crête donnée par le constructeur.

La puissance crête représente la puissance maximum fournie par une cellule lorsque l'éclairement  $G = 1000W/m^2$ , la température  $T = 25^\circ C$  et une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1,5. L'unité de cette puissance est le Watt crête, note  $W_C$ . Cependant, cette puissance est rarement atteinte car l'éclairement est souvent inférieur à  $1000W/m^2$  et la température des panneaux en plein soleil dépasse largement les  $25^\circ C$ .

Soit Rendement relatif [12] est égale :

$$\eta_r = \frac{U \times I}{P_{crete}}$$

### I.3. 1.3 Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque :

#### Avantages :

Les systèmes photovoltaïques ayant plusieurs avantages :

- ✓ Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables ;
- ✓ Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes ;
- ✓ Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant ;
- ✓ Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système ;
- ✓ Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace ;
- ✓ Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre ;
- ✓ Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux ;
- ✓ Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ✓ Ils ont une longue durée de vie.
- ✓ Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés [45].

#### Inconvénients :

La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.

- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 % ;
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.

- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage ( $< 30$  V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif [45].

### **I.3.2 Aperçu sur la machine utilisée dans le système de pompage photovoltaïque au fil du soleil :**

La pompe nécessite une énergie mécanique en entrée. Cette énergie mécanique est fournie dans la plupart des cas par un moteur électrique (électropompe), qui peut être à courant continu ou alternatif, et d'autre cas par un moteur thermique (Motopompe) Diesel ou essence [14].

Dans ce mémoire on a utilisé un moteur asynchrone à double alimentation qui est de plus en plus utilisé dans diverses applications grâce au développement de l'électronique de puissance et des matériaux magnétiques. Ce qui a permis à la machine asynchrone à double alimentation d'avoir un bon rendement par rapport à la machine synchrone où à courant continu.

#### **I.3. 2.1 Description de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation :**

Seul le mode du fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un convertisseur sera traité dans cette thèse.

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine [19].

### I.3. 2.2 Les différentes configurations de la machine asynchrone à double alimentation :

Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisis. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées pour fonctionnement en moteur et en fonctionnement génératrice.

La large plage de variation de la vitesse qu'offre cette machine lui a assurée une place de choix dans différentes applications que ce soit en moteur (laminage, traction ferroviaire, propulsion maritime...) ou en génératrice (éolienne, centrales hydrauliques...) [44].

#### ❖ Fonctionnement en moteur :

Pour le cas de l'application moteur de la "MADA" il existe plusieurs configurations du fonctionnement :

#### ➤ Première configuration : Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur :

Cette classe est dite "MADA" simple. Les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à son propre onduleur. La figure I. 7 représente un schéma de principe de cette catégorie de "MADA" [22].

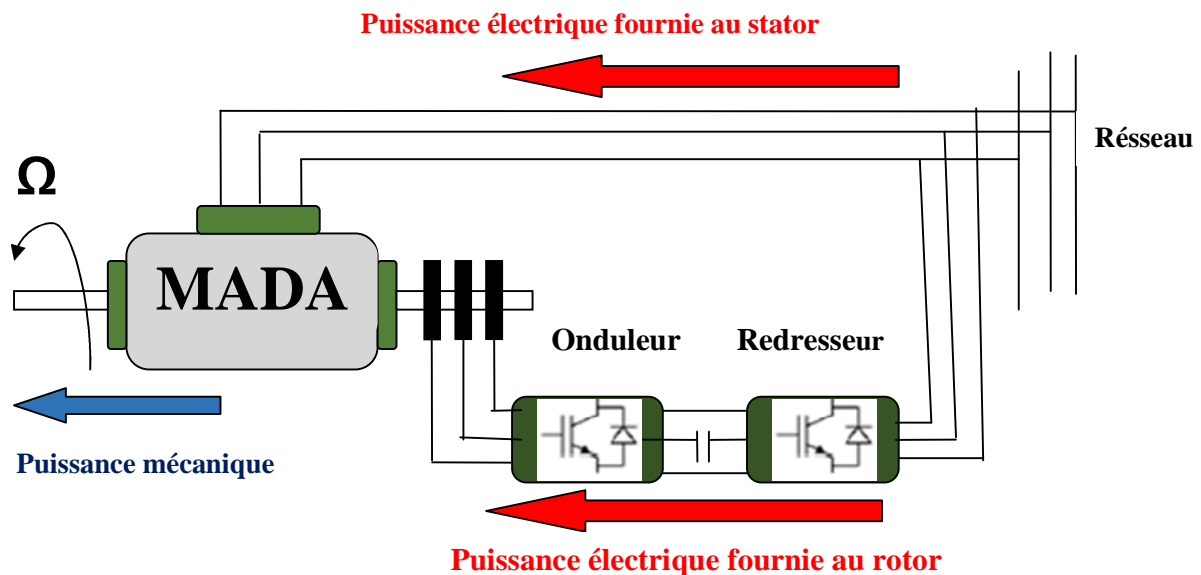


Figure I.7 : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur.

Ce mode d'alimentation n'est pas adapté au fonctionnement à faibles fréquences rotoriques mais le fait de relier le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur permet de dimensionner le convertisseur coté rotor à 30% de la puissance mécanique maximale [21].

➤ **Deuxième configuration : Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un Cyclo convertisseur :**

Dans cette configuration les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à un cyclo convertisseur. La figure I. 8 représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA [22].

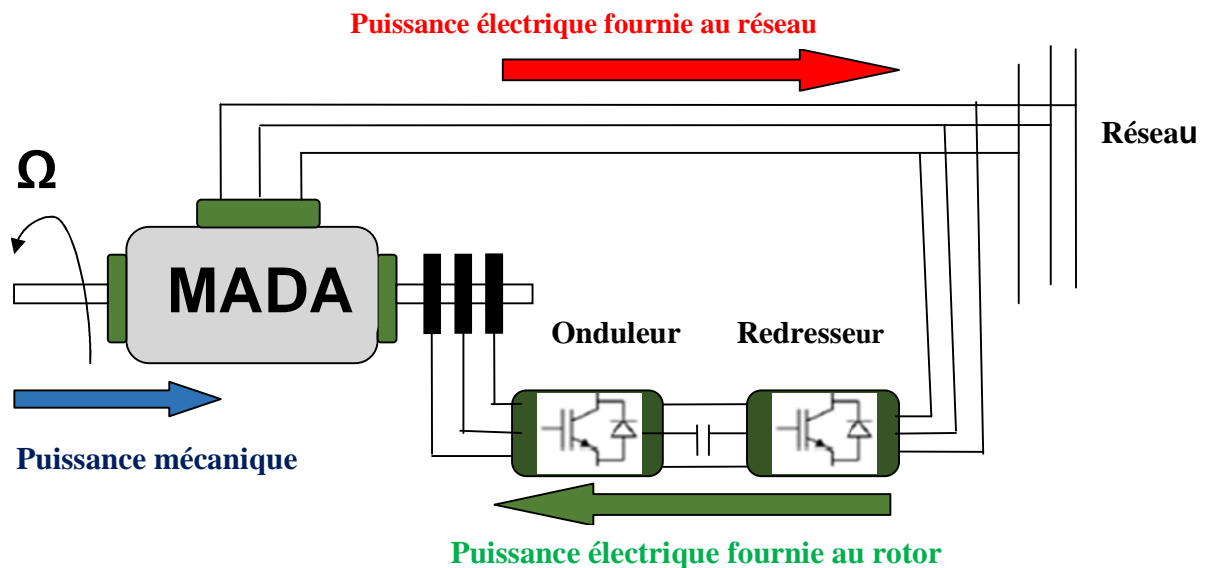


Figure I.8: Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cyclo convertisseur.

➤ **Troisième configuration: Stator alimenté par onduleur, rotor alimenté par un onduleur :**

Cette configuration consiste en une "MADA" dont les deux côtés, stator et rotor, sont alimentés par des onduleurs de tension. Elle peut prendre deux formes équivalentes :

- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun, ce dernier est donc une source d'alimentation commune aux deux côtés,
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs (figure I. 9), c'est le réseau qui est la source du couplage électrique existant entre les deux côtés [22].

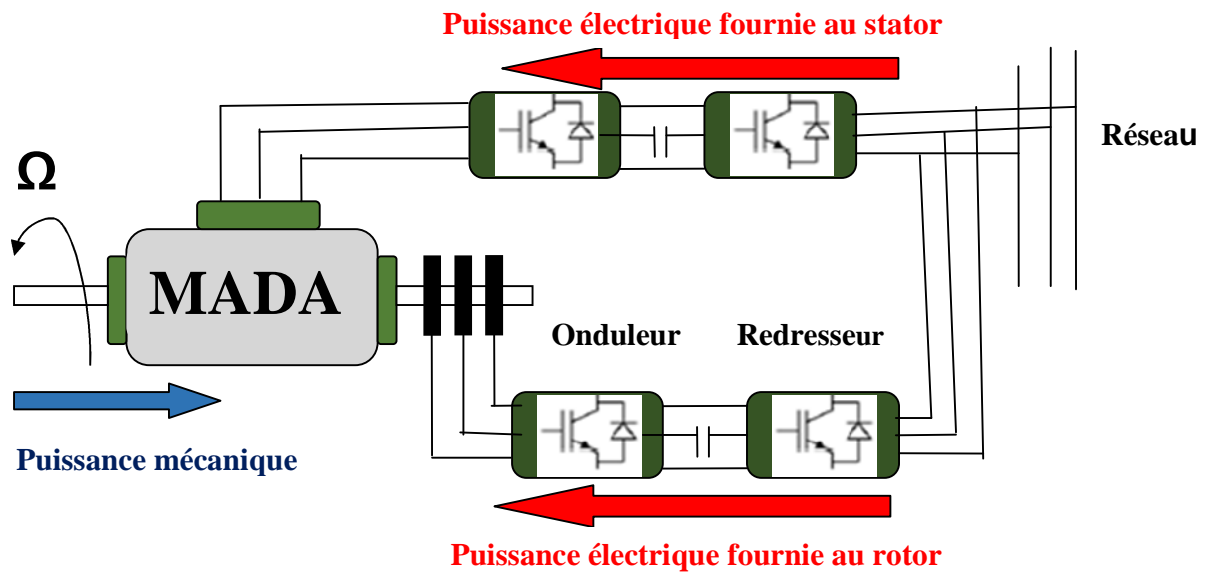


Figure I.9 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux onduleurs.

### I.3. 2.3 Les applications des machines asynchrones à double alimentation :

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ses nombreux avantages. En effet, la "MADA" est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens.

De plus, le fonctionnement en générateur présente la "MADA" comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que [22]:

- ✓ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions;
- ✓ Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable;
- ✓ Éoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable;
- ✓ Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La "MADA" peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que [21]:

- ✓ La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines;

- ✓ La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime;
- ✓ Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

Le second axe est consacré à une autre configuration des entraînements électriques avec la MADA qui est destinée à des applications industrielles tel le laminage, les enrouleurs dérouleurs, le pompage, la traction ferroviaire, la propulsion maritime ou encore toute application demandant une large plage de fonctionnement à puissance constante.

Contrairement au cas précédent peu de travaux se sont intéressés à ce type de configuration avec un fonctionnement moteur [22].

**I.3. 2.4 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation :**

Nous introduisons succinctement dans le tableau (I.3) les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

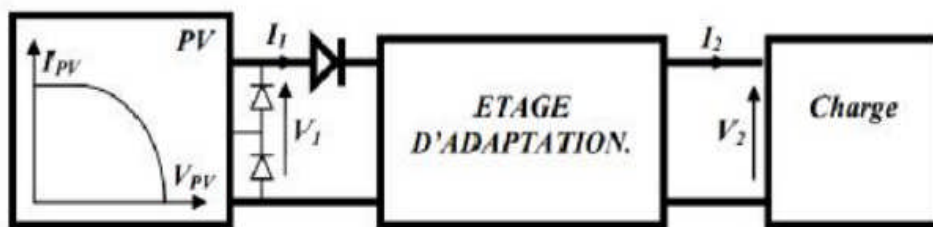
**Tableau I.3 : les avantages et inconvénients de la MADA [44]**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La possibilité de modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse;</li> <li>- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique, et par conséquent pour bien contrôler le transfert des puissances active et réactive;</li> <li>- Le convertisseur coté rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la MADA, ce qui divise pratiquement leur prix par 3 par rapport à des convertisseurs dimensionnés pour la puissance nominale, les pertes dans les interrupteurs à semiconducteurs sont faibles dans ce cas, le rendement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente grâce à la présence du système bagues-balais;</li> <li>- Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais de la MADA, comparativement aux autres machines telles que : la machine synchrone à aimants permanents;</li> <li>- L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs (redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) et par conséquent le prix.</li> </ul>

<p>du système de conversion est ainsi amélioré;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale;</li> <li>- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation;</li> <li>- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances, elle est envisagée pour des puissances élevées (&gt; 1MW) où elle s'avère être une concurrente de la machine asynchrone à cage;</li> <li>- La MADA est une "machine généralisée", effectivement c'est une machine pouvant "assurer" tous les fonctionnements des autres machines.</li> </ul>	
--	--

**I.3.3 Aperçu sur les convertisseurs utilisés dans le système de pompage photovoltaïque au fil du soleil :**

Afin d'extraire à chaque instant la puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit dans la figure (I.10). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert de la puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.[15]



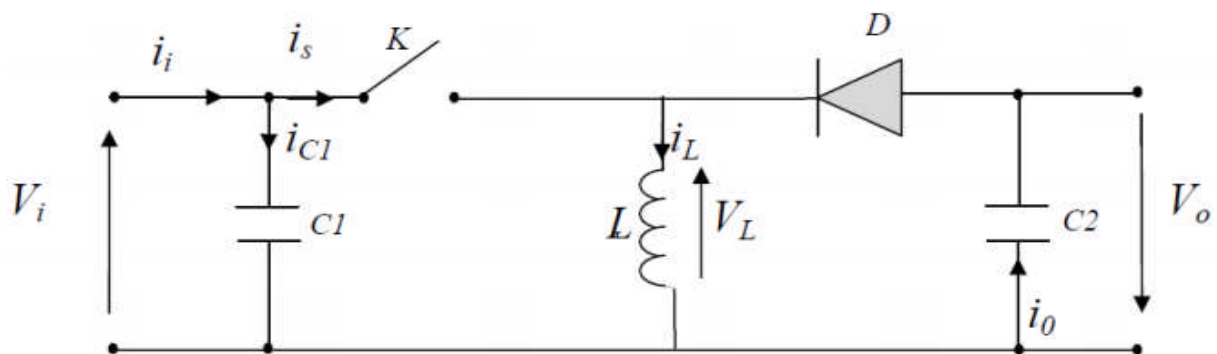
**Figure I. 10 :** Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

### I.3.3.1 Les convertisseur DC/DC (hacheur) :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.[16]

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge (pompe alimentée par moteur à courant continu), la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commande par son rapport cyclique, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible [6].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries. Dans une alimentation à découpage (Figure I.11), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué. Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue.



**Figure I.11:** Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [15]:

- ❖ convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle).

- ❖ convertisseur dévolteur (ou série).
- ❖ convertisseur dévolteur- survolteur (hacheur série –parallèle).

### **I.3.3.2 Les convertisseur DC/AC (Onduleur) :**

Le convertisseur DC/AC assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe électropompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits. Le rendement de l'onduleur est généralement élevé pour valoriser au mieux l'énergie produite par le générateur. Il est de l'ordre de 95 % au point de fonctionnement nominal [45].

Le convertisseur DC/AC sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable à la charge qui demande en général une tension AC constante. Les trois configurations de base sont [15] :

- ❖ Onduleur monophasé
- ❖ Onduleur triphasé
- ❖ Onduleur de Tension à MLI

### **I.3.4 Aperçu sur les pompes utilisées dans le système de pompage photovoltaïque au fil du soleil :**

L'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend des nombreux facteurs rencontrés dans l'étude des écoulements [46]:

- ✓ Les propriétés du fluide : masse volumique, viscosité, compressibilité.
- ✓ Les caractéristiques de l'installation : longueur, diamètre, rugosité, singularités ...
- ✓ Les caractéristiques de l'écoulement : vitesse, débit, hauteur d'élévation, pression ...

Devant la grande diversité de situations possibles, on trouve un grand nombre de pompes que l'on peut classer en deux grands groupes :

#### **I.3.4.1 La pompe centrifuge :**

Les pompes centrifuges où le mouvement du fluide est généré par la force centrifuge. Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmis eau fluide est fournie par

la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse. Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- La puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.[17]

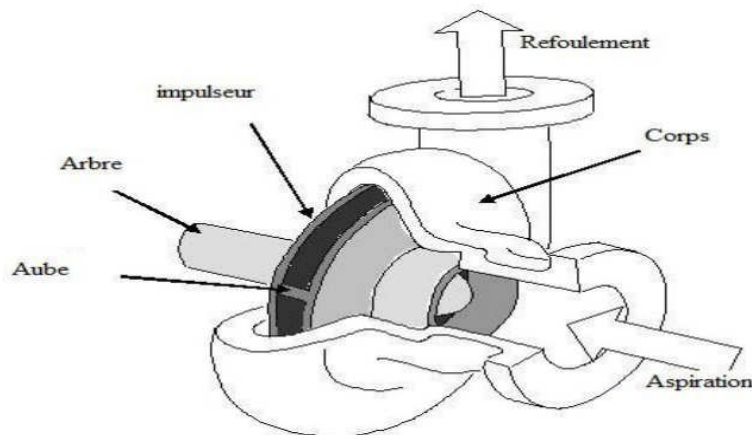


Figure I.12: Pompe centrifuge.

#### I.3.4.2 La pompe volumétrique :

Les pompes volumétriques dont l'écoulement résulte d'une variation de volume de l'espace occupée par le liquide [1]. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.) Leurs principaux atouts sont les suivants :

- ✓ Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m<sup>3</sup>/h) et aux grandes hauteurs.
- ✓ Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

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

surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.[17]



Figure I.13 : Pompe volumétrique.[18]

I.3.4.3 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique :

Pompe volumétrique	Pompes centrifuge
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible débit et une grande hauteur manométrique totale.</li> <li>-Le débit et la puissance absorbée sont proportionnels à la vitesse.</li> <li>-Le couple est en fonction de la HMT.</li> <li>-Le couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Grand débit</li> <li>-Le débit est proportionnel à la vitesse lors qu'elle atteint une certaine valeur</li> <li>-La puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse</li> <li>-Le Couple est en fonction du carré de la vitesse.</li> <li>-La pression est proportionnelle à la vitesse</li> <li>-Couple de démarrage est quasiment nul, ce qui est intéressant dans l'application du système photovoltaïque car la pompe peut tourner à un faible ensoleillement et le moteur peut avoir une vitesse de rotation rapide, à peu constant.</li> </ul>

Tableau I. 4: Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique [6]

**I.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents systèmes de pompage photovoltaïque utilisé avec au sans fil de soleil, Puis une description a été détaillée sur l'ensemble des éléments constituant du système choisi pour notre étude tel que le GPV, hacheur, onduleur et motopompe. Ensuite, le choix s'est porté sur la machine asynchrone double alimentation où une étude détaillée (description de fonctionnement, les différentes configurations, les applications, et les avantages et les inconvénients) a été présentée.

Après avoir présenté la structure des deux convertisseurs utilisés dans notre système, l'une est connectée à la machine et l'autre est connectée à la source photovoltaïque. Enfin nous avons présenté les différents types des pompes utilisées dans les systèmes de pompage photovoltaïque pour choisir la plus efficace dans notre système en fonction de sa vitesse de rotation et leur couple. La suite de ce travail est principalement consacrée à la modélisation et la commande de cette structure.

# **CHAPITRE II :**

**MODELISATION DE LA CHAINE DU SYSTEME  
DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.**

## II.1 Introduction :

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque [1].

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un hacheur, et un groupe motopompe. Le système de pompage photovoltaïque étudié fonctionne au fil du soleil. Dans ce chapitre on présente la modélisation individuelle de chaque élément de l'architecture du système de pompage photovoltaïque composé d'une machine asynchrone double alimentations, entraînée à une pompe centrifuge et pilotée par le stator aux moyens d'un convertisseur de puissance bidirectionnelle fonctionnant en MLI appelé l'onduleur.

## II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque :

La partie production d'énergie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité. Un panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins de 1 V. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou un panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque [2].

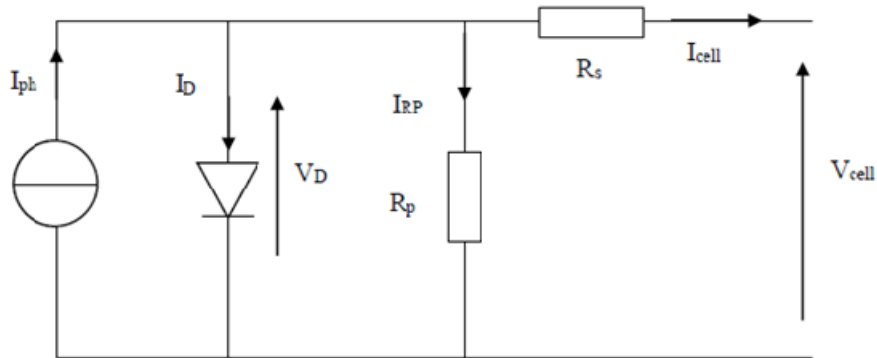
Dans notre étude on se base sur l'élément de base du système photovoltaïque qui est la cellule solaire.

### II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

#### II.2.1.2 Modèle à une diode :(Cellule réelle)

La caractéristique I- V du générateur PV est basé sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans par Figure II.1. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des

résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [47].



**Figure II.1 :** Modèle électrique équivalent à la cellule solaire.

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série  $R_s$  représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt  $R_p$  représente le courant de fuite. Une diode  $D$  en parallèle qui modélise la jonction PN. Ce circuit peut être utilisée aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [48].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \tag{II.1}$$

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} \tag{II.2}$$

$$I_D = I_s \left( e^{V_D/V_{th}} - 1 \right) \tag{II.3}$$

$$V_D = I_{cell} + R_s I_{cell} \tag{II.4}$$

Alors :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \tag{II.5}$$

Avec :

$I_s$  : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s = K_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{KT}} \quad \text{II.6}$$

$V_{th}$  : tension thermique à la température T :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad \text{II.7}$$

q : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)

K : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/k)

$K_1$  : constante ( $1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$ )

T : température effective de la cellule en Kelvin

$V_g$  : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

Généralement la résistance ( $R_p$ ) est plus élevée et son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas, donc on peut négliger le courant  $I_{Rp}$ [49][50], Le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s (e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} - 1) \quad \text{II.8}$$

Et la tension à ses bornes est donnée par :

$$V_{cell} = -R_s I_{cell} + V_{th} \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{cell} + I_s}{I_s} \right) \quad \text{II.9}$$

Pour une modélisation plus précise de la cellule photovoltaïque, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être prises en compte. En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant :

Tableau II.1 Conditions de test.

conditions de test standard	conditions nominales
Eclairement $G_0=1000\text{W}/\text{m}^2$	Eclairement $G_{\text{nom}}=1000\text{W}/\text{m}^2$
Température de la cellule $T_0=25^\circ\text{C}$	Température ambiante $T_{\text{a,nom}}=25^\circ\text{C}$

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont :

- Le courant de court-circuit  $I_{\text{sc},0}$ .
- La tension de circuit ouvert  $V_{\text{oc},0}$ .
- La puissance maximale  $P_{\text{max},0}$ .

Sous les conditions nominales, la température de la cellule TNOCT (NOCT : Nominal Operating Cellule Température) est mentionnée sur le catalogue du fabricant.

Le photo-courant  $I_{\text{ph}}$  est directement proportionnel à l'éclairement. Si  $I_{\text{sc},0}$  est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo-courant généré pour n'importe quelle autre valeur de  $G$ , est donné par :

$$I_{\text{ph}} \Big|_{T_0} = \frac{I_{\text{sc},0}}{G_0} \cdot G = G_1 \cdot G \quad \text{II.10}$$

Le photo-courant dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{\text{ph}} = I_{\text{ph}} \Big|_{T_0} \cdot (1 + k_0 (T - T_0)) \quad \text{II.11}$$

D'où :

$$k_0 = \frac{I_{\text{sc}} \Big|_{T_2} - I_{\text{sc},0}}{T_2 - T_0} \quad \text{II.12}$$

Avec  $k_0$  est le coefficient de température de  $I_{\text{ph}}$  (habituellement donné par le fabricant sur le datasheet en pourcentage de changement par degré Celsius), et  $T_2 = 75^\circ\text{C}$

La température de fonctionnement de la cellule  $T^{\text{C}}$  dépend de l'éclairement  $G$  et de la température ambiante  $T_{\text{a}}$ , selon l'équation empirique suivante :

$$T^{\text{C}} = T_{\text{a}} + C_2 G \quad \text{II.13}$$

Avec :

$$C_2 = \frac{T_{NOCT} - T_{a,nom}}{G_{nom}} \quad \text{II.14}$$

Si la température TNOCT n'est pas connue, la constante  $C_2$  est approximée par  $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ . (en pratique  $C_2$  varie entre  $0.01$  et  $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ )

La tension de circuit ouvert dépend de la température selon l'expression :

$$V_{oc} = V_{oc,0} + C_3 (T^c - T_0) \quad \text{II.15}$$

Où  $C_3 = -2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$

Le courant de saturation  $I_s$  de la diode pour la température  $T_0$ , est donné par :

$$I_{s;0} = \frac{I_{sc,0}}{(e^{V_{oc,0}/V_{th,0}} - 1)} \quad \text{II.16}$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_s = I_{s,0} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{\frac{qV_g}{nk} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad \text{II.17}$$

La résistance série  $R_s$  a un impact sur la pente de la courbe caractéristique près de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ . La valeur de  $R_s$  est alors donnée en évaluant la pente  $dV/dI$  de la courbe  $I/V$  pour  $V = V_{oc}$ . L'expression de  $R_s$  est donnée en dérivant  $I$  et en réarrangeant en fonction de  $R_s$  :

$$I = I_{ph} - I_s (e^{(V+R_s I)/V_{th}} - 1) \quad \text{II.18}$$

$$dI = 0 - \frac{I_s}{V_{th}} (dV + R_s dI) \cdot e^{(V+R_s I)/V_{th}} \quad \text{II.19}$$

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{oc,0}} - \frac{1}{X_V} \quad \text{II.20}$$

$$X_V = \frac{I_{s,0}}{V_{th,0}} - e^{\frac{V_{OC,0}}{V_{th,0}}} \quad \text{II.21}$$

La résistance série peut aussi être calculée en utilisant l'expression :

$$R_s = R_s|_{T_0} (1 + k_3 (T - T_0)) \quad \text{II.22}$$

Avec  $k_3$  coefficient de température de la résistance série.

## II.2.2 Modèle d'un GPV

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que : la puissance, le courant de court-circuit  $I_{CC}$  ou la tension en circuit ouvert  $V_{OC}$ .

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s (e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} - 1) \quad \text{II.23}$$

Cette expression ne peut être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV, car quelques paramètres,  $I_{ph}$  et  $I_s$  en particulier, ne peuvent être établies à partir des informations habituellement disponibles. Ces dernières sont restreintes aux valeurs de  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  et  $P_{max}$  qui sont toujours incluses dans le catalogue du fabricant.

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium [48] :

- Le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux.
- $e^{(V + IR_s)/V_{th}} \gg 1$  Pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation (II.24) devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_s e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} \quad \text{II.24}$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} \right) \quad \text{II.25}$$

D'où :

$$I_s = I_{sc} e^{\frac{V_{oc}}{V_{th}}} \quad \text{II.26}$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sc} \left( 1 - e^{(V - V_{oc} + R_s I) / V_{th}} \right) \quad \text{II.27}$$

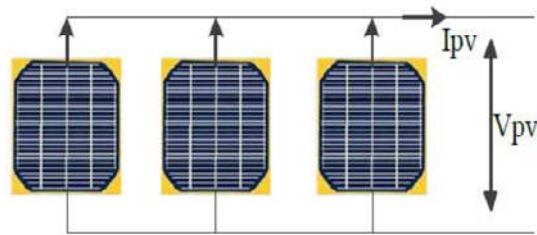
Cette expression est très pratique, car ces paramètres sont facilement déterminés, ce qui permet l'application directe de cette dernière.

Nous avons vu que plusieurs cellules photovoltaïques sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux photovoltaïques. Ces derniers contiennent  $N_p$  branches en parallèle, chacune avec  $N_s$  cellules connectées en série. En considérant que les cellules sont semblables et sont soumises aux mêmes conditions, donc le courant  $I^P$ , généré par le module photovoltaïque sera exprimé par:

$$I^P = N_p I_{sc} \left( 1 - e^{\left( V^P - N_s V_{oc} + \frac{N_s}{N_p} R_s I^P \right) / V_{th} N_s} \right) \quad \text{II.28}$$

### II.2.2.1 Association des cellules photovoltaïques en parallèle :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Figure II.2 montre la caractéristique résultante ( $I_{CS}$ ,  $V_{CS}$ ) obtenue en associant en série  $N_s$  cellules identiques ( $I_C$ ,  $V_C$ ) [24].



**Figure II.2 :** Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

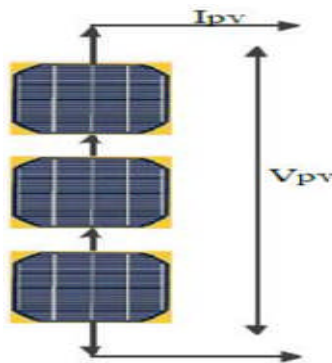
$$I_{cp} = N_p * I_c$$

II.29

$$\text{Et : } V_{cp} = V_c ; I_{cs} = I_c$$

### II.2.2.2 Association des cellules photovoltaïque :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Figure II.3 montre la caractéristique résultante ( $I_{cs}$ ,  $V_{cs}$ ) obtenue en associant en série  $N_s$  cellules identiques ( $I_c$ ,  $V_c$ ) [24].



**Figure II.3 :** Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

$$\text{Et : } V_{cs} = N_s * V_c$$

II.30

## II.3 MODELISATION DE La machine asynchrone double alimentation :

La machine asynchrone double alimentation est un système non linéaire très complexe [20]. La machine MADA est représentée sur la figure (II.4) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle  $\theta$  repère le décalage de l'axe de la phase rotorique ( $OAR$ ) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique ( $OAS$ ) [25].

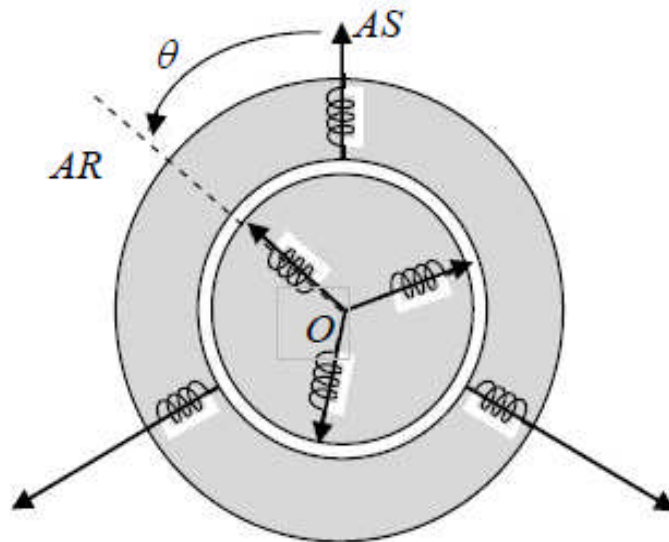


Figure II.4: Représentation schématique du modèle d'une MADA.

### II.3.1 Hypothèses simplificatrices :

Il est très difficile de modéliser la MADA vu sa structure et sa géométrie complexes, d'où la nécessité d'adopter certaines hypothèses qui permettent d'obtenir un modèle simple et le plus proche possible de la réalité. Ces hypothèses sont les suivantes [11] :

- La géométrie de la machine est symétrique, et l'épaisseur de l'entrefer est uniforme.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants. Les pertes par hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- La densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau et l'effet des encoches sont négligeables.
- Les résistances et les coefficients d'inductances propres sont constants et les enroulements ne dépendent pas de la température. Les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale.

### II.3.2 Equations mathématiques de la MADA dans le repère (abc) :

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la machine asynchrone à double alimentation est une machine classique dont le rotor est accessible et identique au stator. Par conséquent, elle a le même modèle que celui de la machine asynchrone à cage, à l'exception des tensions rotoriques qui ne sont pas nulles [20][11] :

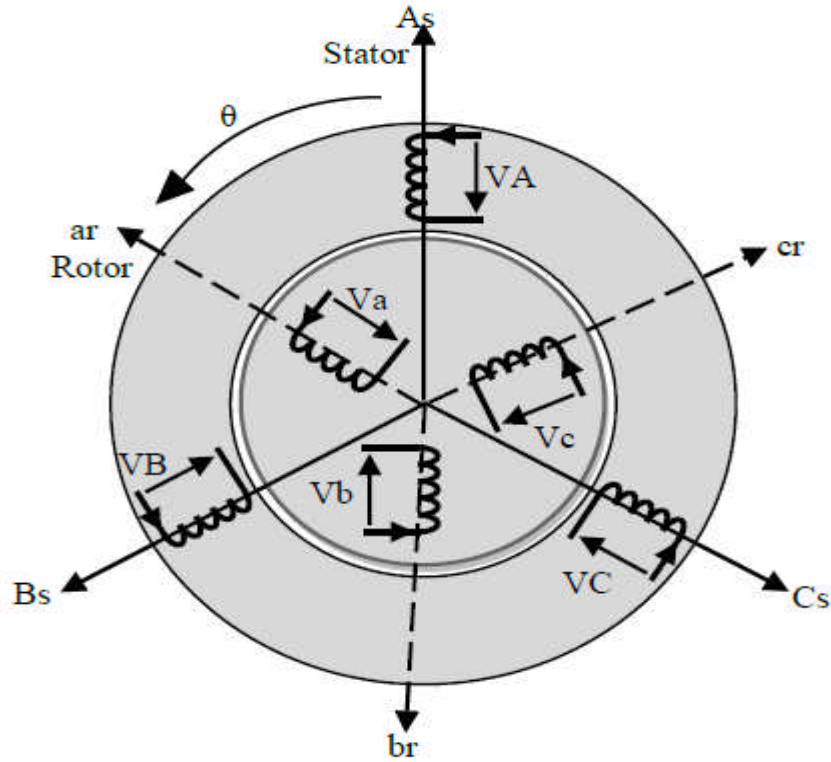


Figure II.5 : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

II.3.2.1 Equations électriques :

Les équations des tensions électriques qui régissent la MADA sont [25] :

$$\begin{cases} [Vs] = [Rs] \cdot [Is] + \frac{d}{dt} [\varphi s] \\ [Vr] = [Rr] \cdot [Ir] + \frac{d}{dt} [\varphi r] \end{cases} \tag{II.31}$$

Avec :

$$[Vs] = [Vas \ Vbs \ Vcs] ; [Is] = [Ias \ Ibs \ Ics] ; [\varphi s] = [\varphi as \ \varphi bs \ \varphi cs] ;$$

$$[Rs] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix}$$

$$[Vr] = [Var \ Vbr \ Vcr] ; [Ir] = [Iar \ Ibr \ Icr] ; [\varphi r] = [\varphi ar \ \varphi br \ \varphi cr] ; [Rr] = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix}$$

Où  $R_s$  et  $R_r$  sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

$V_s, V_r$ - les tensions simples statoriques et rotoriques.

$I_s, I_r$ - les courants de phase statoriques et rotoriques.

$\varphi_s, \varphi_r$ - les flux respectivement statoriques et rotoriques.

### II.3.2.2 Equations magnétiques :

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA sont [20] :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}].[I_s] + [M_{sr}].[I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}].[I_r] + [M_{rs}].[I_s] \end{cases} \quad \text{II.32}$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où  $L_{ss}$ ,  $L_{rr}$  sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

$M_s$ ,  $M_r$  - les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$  - la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor qui est donnée par la formule (II.33):

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{II.33}$$

$M_{max}$  est l'inductance mutuelle maximum entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (II.32) dans (II.31), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s].[I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}].[I_s] + [M_{sr}].[I_r]] \\ [V_r] = [R_r].[I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}].[I_r] + [M_{rs}].[I_s]] \end{cases} \quad \text{II.34}$$

### II.3.2.3 Equations mécaniques :

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_r . \Omega + J . \frac{d\Omega}{d\theta} \quad \text{II.35}$$

Avec :

- $C_{em}$  - le couple électromagnétique de la machine ;
- $C_r$  - le couple résistant ;
- $f_r$  - le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;
- $\Omega$  - la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;
- $J$  - l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p . [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}].[I_r]] \quad \text{II.36}$$

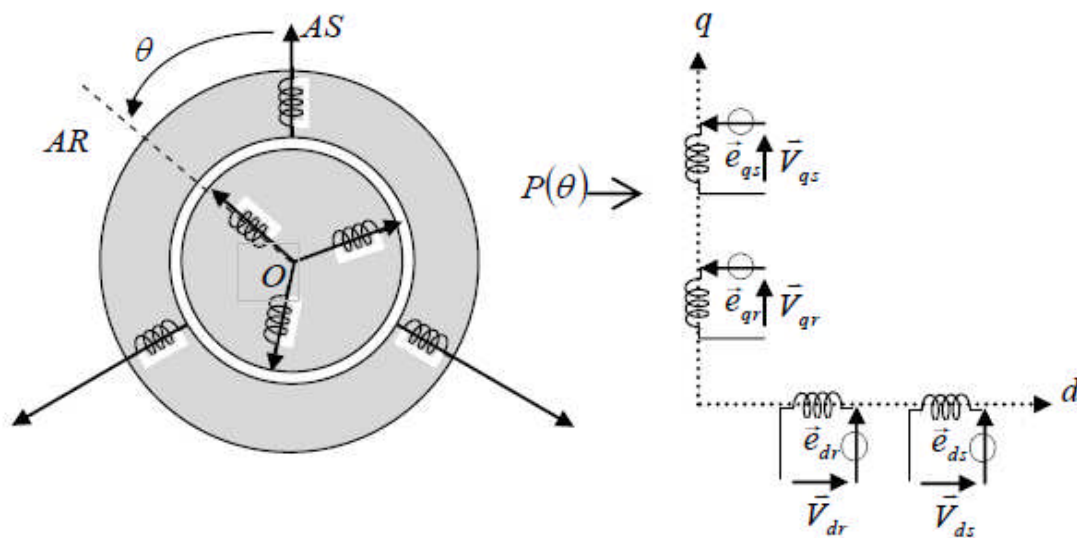
Où  $p$  - le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les équations différentielles (II.31), (II.35) et (II.36) représentent le modèle de la MADA dans le repère  $(a, b, c)$ .

### II.3.3 Transformation de Park:

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé ( $d, q$ ) donné par la transformation de Park est alors utilisé [11].

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature, figure (II.6) [25].



**Figure II.6:** Représentation de la MADA dans le repère de Park.

La matrice de transformation de Park  $P(\theta)$  est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.37}$$

$[P(\theta)]$  permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé.

$\theta$ - l'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park.

et pour la transformation inverse on utilise la matrice  $[P(\theta)]^{-1}$  :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{II.38}$$

### II.3.4 Equations mathématiques de la MADA dans le repère (dq) :

L'équation de la transformation de Park pour passer d'un système triphasé à un système biphasé et vice versa est donnée comme suit :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)]. [x_{abc}] \Rightarrow [x_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} . [x_{dq0}] \quad \text{II.39}$$

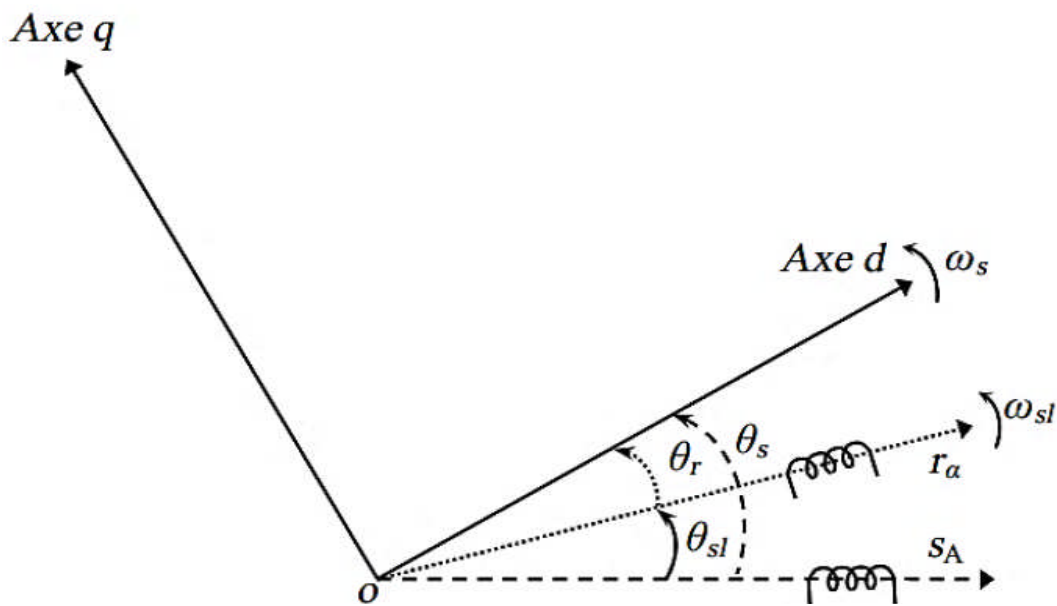


Figure II.7 : Repère statorique et rotorique et repère de Park.

La transformation de Park appliquée aux équations statoriques nous donne :

$$[V_{s\ dq0}] = [P(\theta_s)]. [V_{s\ abc}] \Rightarrow [V_{s\ abc}] = [P(\theta_s)]^{-1} . [V_{s\ dq0}]$$

$$[I_{s\ dq0}] = [P(\theta_s)]. [I_{s\ abc}] \Rightarrow [I_{s\ abc}] = [P(\theta_s)]^{-1} . [I_{s\ dq0}]$$

$$[\varphi_{s\ dq0}] = [P(\theta_s)]. [\varphi_{s\ abc}] \Rightarrow [\varphi_{s\ abc}] = [P(\theta_s)]^{-1} . [\varphi_{s\ dq0}]$$

La transformation de Park appliquée aux équations rotoriques nous donne :

$$[V_{r\ dq0}] = [P(\theta_r)]. [V_{r\ abc}] \Rightarrow [V_{r\ abc}] = [P(\theta_r)]^{-1} . [V_{r\ dq0}]$$

$$[I_{r\ dq0}] = [P(\theta_r)]. [I_{r\ abc}] \Rightarrow [I_{r\ abc}] = [P(\theta_r)]^{-1} . [I_{r\ dq0}]$$

$$[\varphi_{r\ dq0}] = [P(\theta_r)]. [\varphi_{r\ abc}] \Rightarrow [\varphi_{r\ abc}] = [P(\theta_r)]^{-1} . [\varphi_{r\ dq0}]$$

**II.3.4.1 Equations électriques :**

En appliquant la transformation de Park , on obtient

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1}[V_s dq0] = [R_s] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_s dq0] + \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_s dq0]] \\ [P(\theta_r)]^{-1}[V_r dq0] = [R_r] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_r dq0] + \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_r dq0]] \end{cases} \quad \text{II.40}$$

$$\begin{cases} [V_s dq0] = [R_s] \cdot [I_s dq0] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_s dq0]] + \frac{d}{dt} [\varphi_s dq0] \\ [V_r dq0] = [R_r] \cdot [I_r dq0] + [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_r dq0]] + \frac{d}{dt} [\varphi_r dq0] \end{cases} \quad \text{II.41}$$

Avec :

$$[P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}] = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1}] = \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Par conséquent, on peut écrire[20] :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad \text{II.42}$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.43}$$

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$  et  $V_{rq}$  : sont respectivement les tensions directe et en quadrature statoriques et rotoriques ;

$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}$  et  $I_{rq}$  : sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques ;

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$  : sont respectivement les flux statoriques et rotoriques directs et en quadratures du système;

$\omega_s, \omega_r$  : sont les pulsations statorique et rotorique;

$\theta_s, \theta_r$ : sont les angles électriques que forment les axes du stator et du rotor avec l'axe direct du référentiel biphasé de Park.

**II.3.4.2 Equations magnétiques :**

De la même manière, les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_s dq0] = [L_{ss}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} [I_s dq0] + [M_{sr}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_r dq0] \\ [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_r dq0] = [L_{rr}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_r dq0] + [M_{rs}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_s dq0] \end{cases} \quad \text{II.44}$$

Donc, on peut écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad \text{II.45}$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad \text{II.46}$$

Avec :

- $L_r, L_s$  : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine ;
- $M$  : l'inductance mutuelle.

### II.3.4.3 Equation du couple électromagnétique :

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p M L_s (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad \text{II.47}$$

Avec :  $p$  - le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances active et réactive statoriques sont :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad \text{II.48}$$

### II.3.5 Choix de repère de référence de Park :

Le choix d'un repère de référence dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité des composantes du système étudié. Il existe trois repères biphasés de références [11] :

- le repère fixe au stator appelé référentiel stationnaire où :  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$  ;  $\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$

Ce repère de référence est le mieux adapté pour les grandeurs instantanées. Il est utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation de la machine.

- le repère fixe au rotor appelé référentiel tournant où :  $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$  ;  $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega$ . Ce repère de référence est adapté pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

- le repère fixe au champ tournant appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone où :  $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt} = \omega_s = \omega + \omega_r$ . Dans ce repère, les composantes relatives de la machine sont constantes, ce qui justifie sa large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones.

Vu les avantages que représente ce dernier repère de référence, il sera retenu dans notre étude.

### II.3.6 Modèle d'état de la MADA :

Le système d'équations de tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle comme suit [20] :

$$[X] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad \text{II.49}$$

Avec :  $[X] = [\varphi_{sd} \varphi_{sq} I_{rd} I_{rq}]^t$  ;  $[U] = [V_{sd} V_{sq} V_{rd} V_{rq}]^t$  ;

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & \omega_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -\omega_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(\omega_s - \omega_r) & -\delta & \omega_r \\ \beta(\omega_s - \omega_r) & \alpha & -\omega_r & -\delta \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

$\alpha$  ,  $\beta$  et  $\delta$  sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r} ; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r} ; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right) ;$$

Pour faciliter la simulation, on décompose la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s . [A_2] + w_r . [A_3] \quad \text{II.50}$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{M}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{M}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix} ; \quad [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

## II.4 Modélisation et commande des convertisseurs utilisés :

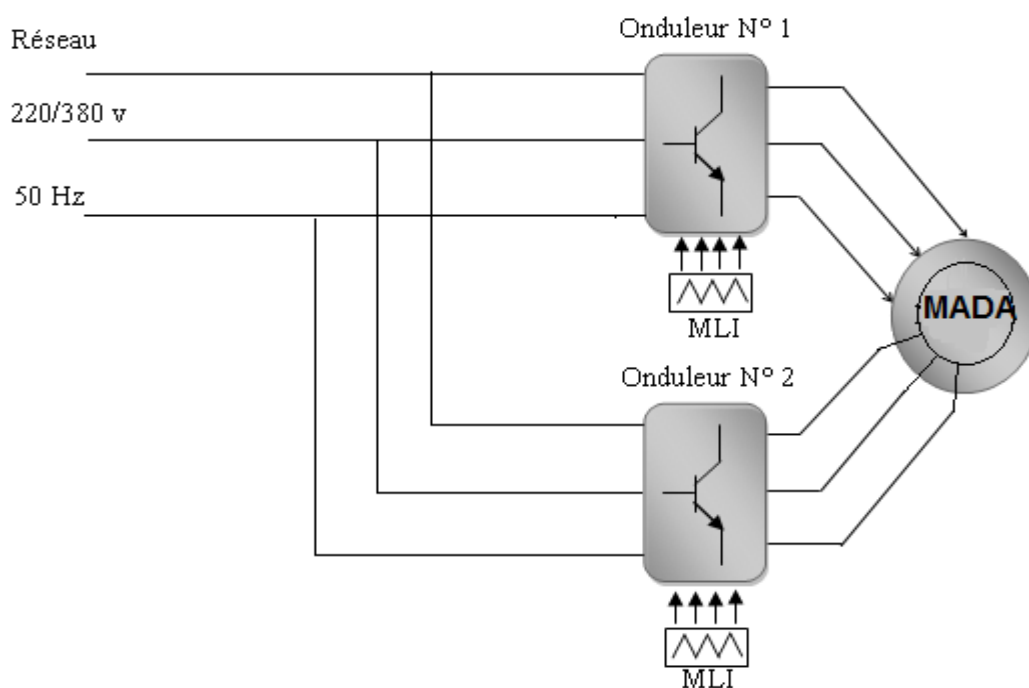
Un convertisseur statique de puissance, est un élément important dans le système d'entraînement. Son circuit de commande permet de transformer le signal de contrôle à l'entrée en un signal de puissance pour la machine. Les récents développements dans les modèles de composants, la conception assistée par ordinateur (CAO) et les semi-conducteurs ont contribué largement à la modélisation des convertisseurs statiques. Les harmoniques à la sortie du convertisseur causent l'échauffement de la machine et des pulsations de couple. Par contre, les harmoniques à l'entrée provoquent des perturbations sur le réseau [26].

Avec la disponibilité des transistors de puissance à coût moindre et le développement des algorithmes MLI ainsi que les algorithmes SVM, il est devenu possible d'améliorer la forme d'onde du courant du moteur et par conséquent minimiser des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les pulsations du couple [26].

### II.4.1 Modélisation et technique de commande du convertisseur côté machine

#### II.4.1.1 Modélisation du convertisseur côté machine :

L'alimentation de la machine est assurée par l'ensemble : réseau électrique, deux onduleurs de tension Figure(II.8).



**Figure II.8 :** Schéma synoptique de la MADA et de son alimentation.

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes à amplitude et fréquence variables à partir d'un réseau standard : 220/380v, 50Hz [26].

Le montage de l'onduleur à deux niveaux est constitué de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche (Figure (II.9)). Les couples d'interrupteurs ( $K_{11}, K_{21}$ ), ( $K_{12}, K_{22}$ ), ( $K_{13}, K_{23}$ ) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statoriques de la machine, et pour éviter de court-circuiter la source [27]. Les diodes  $D_{ij}$  ( $ij=1, 2, 3$ ) sont des diodes à roue libre assurant la protection des thyristors [13].

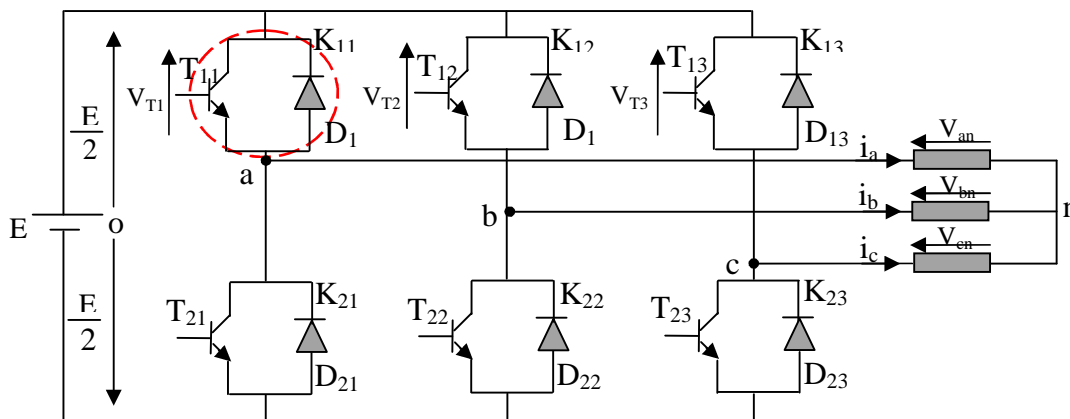


Figure II.9 : Onduleur de tension triphasé à deux

En mode commandé, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension [27]. Un demi-bras de l'onduleur est représenté par la figure (II.10) :

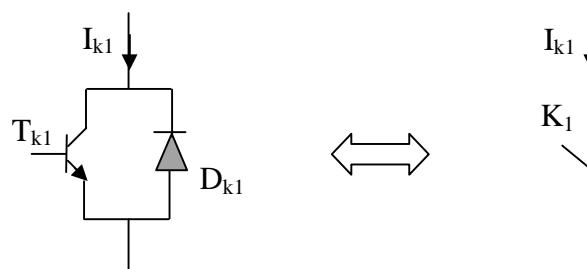


Figure II.10: Représentation d'un IGBT.

Pour simplifier l'étude et réduire la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que [28] [23] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.

- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.
- Les tensions composées (tensions de ligne) sont données par:

$$- \begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad \text{II.51}$$

- Où :  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$  sont des tensions simples (tensions de phases).

$$- U_{ca} - U_{ab} = V_{cn} - 2V_{an} + V_{bn} \quad \text{II.52}$$

- Et comme le système est tréphasé équilibré, on a:

$$- V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{II.53}$$

- Ce qui implique que :

$$- V_{an} = -(V_{bn} + V_{cn}) \quad \text{II.54}$$

- On remplace (II.54) dans (II.52) on aura :

$$- U_{ca} - U_{ab} = -3V_{an} \quad \text{II.55}$$

- Donc :

$$- V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{ab}) \quad \text{II.56}$$

- La tension aux bornes des transistors s'écrit comme suit :

$$- V_{T1} = \begin{cases} 0 & \text{si } K_{11} = 1 \text{ (fermé)} \\ E & \text{si } K_{11} = 0 \text{ (ouvert)} \end{cases} \quad \text{II.57}$$

$$- V_{T2} = \begin{cases} 0 & \text{si } K_{12} = 1 \text{ (fermé)} \\ E & \text{si } K_{12} = 0 \text{ (ouvert)} \end{cases} \quad \text{II.58}$$

$$- V_{T3} = \begin{cases} 0 & \text{si } K_{13} = 1 \text{ (fermé)} \\ E & \text{si } K_{13} = 0 \text{ (ouvert)} \end{cases} \quad \text{II.59}$$

- On peut écrire donc :

$$- V_{T1} = E(1 - K_{11}) \quad \text{II.60}$$

$$- V_{T2} = E(1 - K_{12}) \quad \text{II.61}$$

$$- V_{T3} = E(1 - K_{13}) \quad \text{II.62}$$

- On a :

$$- U_{ab} = V_{T2} - V_{T1} \quad \text{II.63}$$

$$- U_{ca} = V_{T1} - V_{T3} \quad \text{II.64}$$

- On remplace  $V_{T1}$  et  $V_{T2}$  par leurs valeurs, on aura :

$$- U_{ab} = E(K_{11} - K_{12}) \quad \text{II.65}$$

$$- U_{ca} = E(K_{13} - K_{11}) \quad \text{II.66}$$

- On remplace (II.65) et (II.66) dans l'équation (II.56), on obtient :

$$- V_{an} = \frac{E}{3} [2K_{11} - K_{12} - K_{13}] \quad \text{II.67}$$

- De même, on aura :

$$- V_{bn} = \frac{E}{3} [-K_{11} + 2K_{12} - K_{13}] \quad \text{II.68}$$

$$- V_{cn} = \frac{E}{3} [-K_{11} - K_{12} + 2K_{13}] \quad \text{II.69}$$

- Donc on a le système d'équation suivant:

$$- \begin{cases} V_{an} = \frac{E}{3} [2K_{11} - K_{12} - K_{13}] \\ V_{bn} = \frac{E}{3} [-K_{11} + 2K_{12} - K_{13}] \\ V_{cn} = \frac{E}{3} [-K_{11} - K_{12} + 2K_{13}] \end{cases} \quad \text{II.70}$$

- L'équation (II.70) peut être réécrite se forme matricielle comme suit:

$$- \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{12} \\ K_{13} \end{bmatrix} \quad \text{II.71}$$

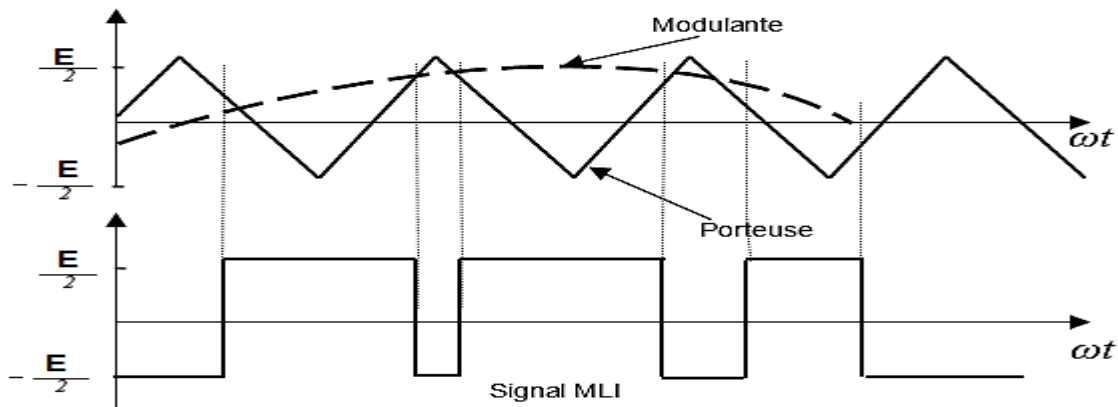
#### II.4.1.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion :

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation).

La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : la naturelle, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis.

Dans notre travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux (voir la figure (II.11))



**Figure II.11** : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.

- Le premier c'est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur l'indice d'amplitude  $V_{\text{mod}}$  :

$$V_{\text{mod}} = \frac{V_m}{V_p}$$

$V_p$ : Valeur de crête de la porteuse.

$V_m$ : Valeur maximale de la tension de référence.

Ainsi on peut agir sur l'indice de modulation  $m$  :

$$m = \frac{f_p}{f_m}$$

$f_p$  : fréquence de la porteuse.

$f_m$  : fréquence de la modulante.

$E$  : la tension continue

#### II.4.2 Modélisation du convertisseur côté PV (hacheur) :

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur

consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable [29].

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [29]:

- ✓ Convertisseur survolteur hacheur survolteur (ou parallèle) ;
- ✓ Convertisseur dévolteur (ou série) ;
- ✓ Convertisseur dévolteur- survolteur hacheur série - parallèle.

#### II.4.2.1 Représentation d'un hacheur survolteur :

Un convertisseur élévateur dit Boost permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée. C'est pour cela qu'il est dit élévateur de tension [30]. La figure II.21 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

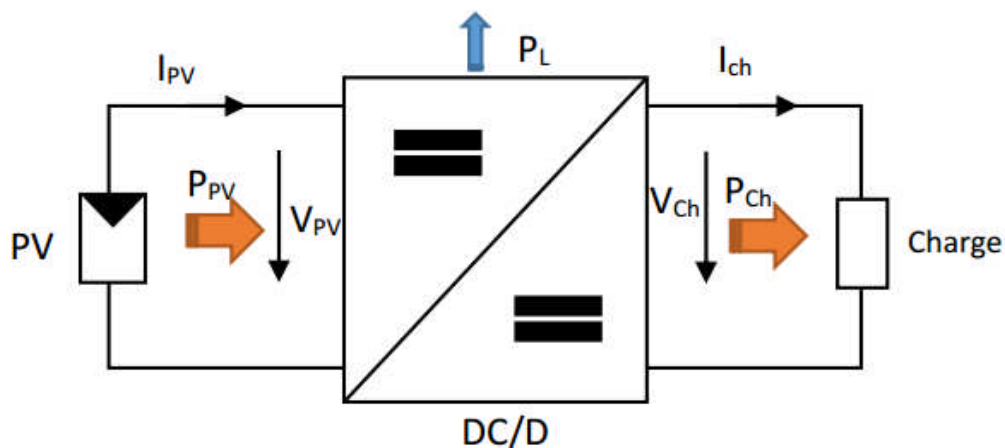


Figure II.12 : Schéma d'un convertisseurs DC-DC.

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [29]. Il y a

différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur.

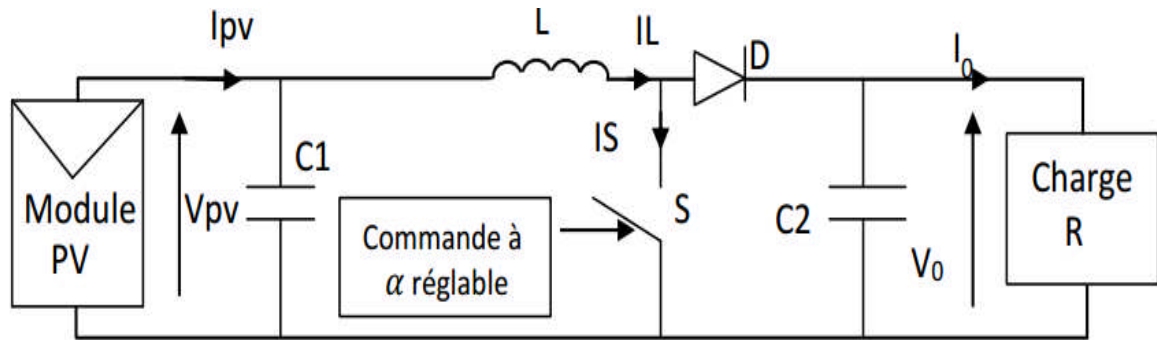
**Tableau II.3 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC**

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/Elévateur	1	1	Qui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/Elévateur	1	1	Qui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/Elévateur	2	2	Qui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/Elévateur	2	2	Qui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/Elévateur	4	4	Qui	Forte

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [29].

#### II.4.2.2 Modélisation d'un hacheur survolteur :

Considérons l'exemple de la figure II.13 correspondants à un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV [51]:



**Figure II.13 :** Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge

Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor ( $S$ ) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor ( $S$ ) s'ouvre et l'inductance ( $L$ ) s'opposant à la diminution de courant ( $IL$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge ( $R$ ) à travers la diode ( $D$ ) [52].

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle  $\alpha Ts$ :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad \text{II.72}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad \text{II.73}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L - I_L \quad \text{II.74}$$

Pour le deuxième intervalle  $(1 - \alpha) Ts$  :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad \text{II.75}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad \text{II.76}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L - V_0 \quad \text{II.77}$$

le convertisseur Boost pour un intervalle du temps  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$  respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques  $C1$ ,  $V_L$  est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ( $e^{\xi} \approx 1 + \xi$  si  $\xi \ll 1$ ) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique  $x$  sur les deux intervalles du temps  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$ :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt}_{(\alpha T_s)} \alpha T_s + \frac{dx}{dt}_{((1-\alpha) T_s)} \quad \text{II.78}$$

Où  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  est la valeur moyenne de la dérivée de  $x$  sur un intervalle  $T_s$ . Cette relation est valide si :

$$\frac{dx}{dt}_{(\alpha T_s)} \text{ et } \frac{dx}{dt}_{((1-\alpha) T_s)} \text{ sont constants sur les intervalles } \alpha T_s \text{ et } (1-\alpha) T_s \text{ respectivement}$$

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure II.14.

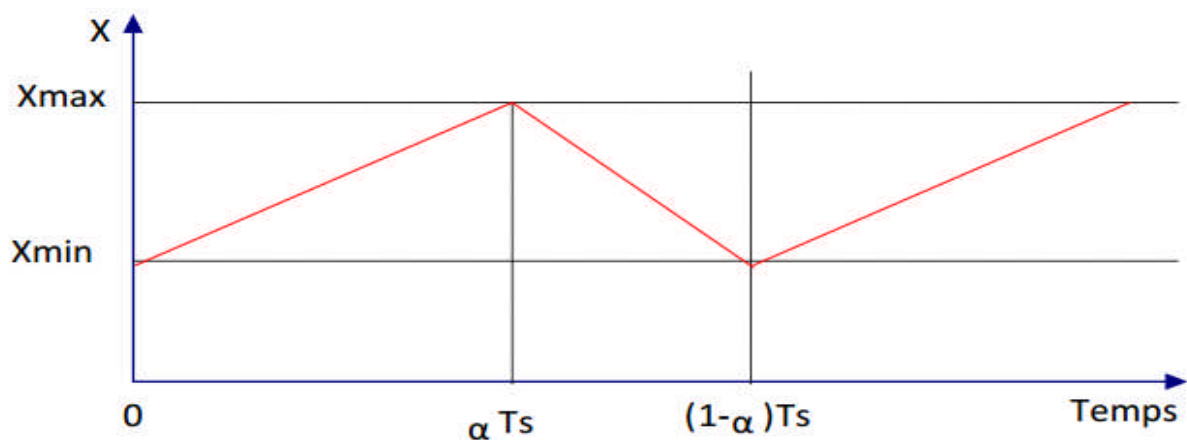


Figure II.14 : Allure des variables dynamiques II.

En appliquant la relation (II-78) sur les systèmes d'équations (II-72 a II-77) obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \alpha T_S = (I_{PV} - I_L) \alpha T_S + (1 - \alpha) T_S (I_{PV} - I_L) \quad \text{II.79}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_S = -\alpha T_S I_0 + (1 - \alpha) T_S (I_L - I_0) \quad \text{II.80}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_S = (V_{PV} - R_L I_L) \alpha T_S + (1 - \alpha) T_S (V_{PV} - R_L I_L - V_0) \quad \text{II.81}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost

$$I_{c1} = I_{PV} - C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \quad \text{II.82}$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad \text{II.83}$$

$$V_{PV} = +(1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad \text{II.84}$$

## II.5 Modélisation de la pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [31] :

$$f(H, Q, \omega)$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en générale c'est la vitesse qui est constante. La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d \quad \text{II.85}$$

H : Hauteur totale du pompage.

$H_s$  : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau.

$H_d$  : est la somme des pertes linéaires et singulières, ces pertes sont :

### II.5.1 La Hauteur Manométrique HMT :

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction de débit [32,3] .

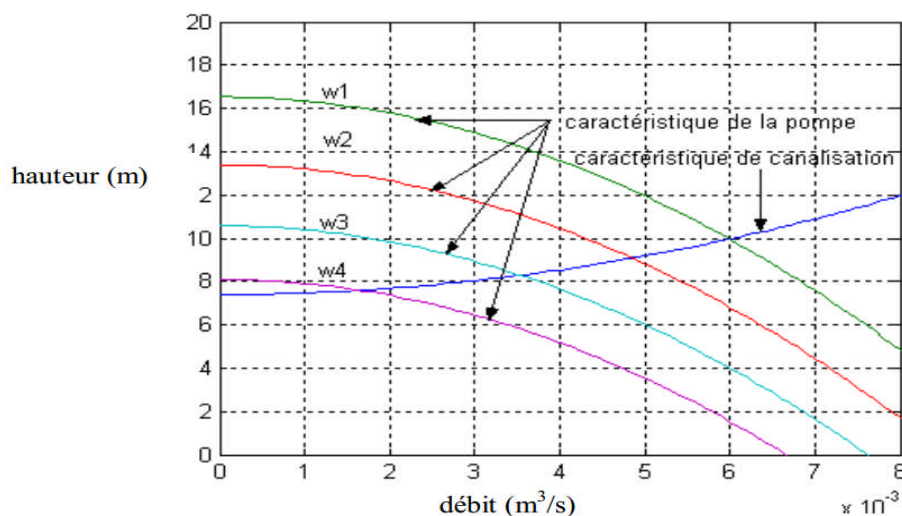
La charge du moteur est une pompe immergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale HMT en fonction du débit Q. En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN ".[3]

$$HMT = K_0 \cdot \omega^2 - K_1 \cdot \omega \cdot Q - K_2 \cdot Q^2 \quad \text{II.86}$$

Avec :

$K_0, K_1, K_2$  : Des constantes propre de la pompe donnée par le constructeur.

La courbe HMT(Q) est une parabole. Le point de rencontre de la courbe HMT(Q) avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul. C'est le point à vanne fermée ou encore point de barbotage. [33]. Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes :



**Figure II.15:** Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.

### II.5.2 Calcul de puissance :

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

$$P_H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (w) \quad \text{II.87}$$

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

$$P_H = 9.81 \cdot \rho \cdot Q \cdot H / \eta_p \quad (w) \quad \text{II.88}$$

Ou  $\eta_p$  : Le rendement de la pompe.

$P_m$ : Puissance mécanique du moteur.

$\rho$  : La masse volumique de l'eau (=1000Kg au  $m^3$ ).

### II.5.3 Calcul du rendement :

Pour les groupes électropompes (pompe + moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement globale.

$$\eta_{mp} = \frac{P_H}{P_a} \quad \text{II.89}$$

## II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque, Cette chaîne qui est constituée d'une machine asynchrone double alimentation entraînée une pompe centrifuge et pilotée par le stator via un onduleur deux niveaux. Cet onduleur alimenté par une source photovoltaïque à travers un hacheur survolteur. Ce système a été utilisé dans le chapitre suivant pour l'élaboration de plusieurs techniques de commandes pour assurer un contrôle précis et continu tout en garantissant une stabilité, une rapidité de poursuite avec une erreur statique nul. Cela a permis d'obtenir un rendement élevé du système.

# **CHAPITRE III :**

**COMMANDE ET OPTIMISATION DU SYSTEME  
DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.**

**III.1 Introduction :**

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil, une étude dimensionnelle et une application d'une commande (pour l'amélioration des performances statique et dynamique) est nécessaire pour avoir un débit d'eau correspond à l'ensoleillement avec un consigne de hauteur déterminera par l'utilisateur.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque pour appliquer quelques algorithmes de commandes sur ce système qui permettront de garder instantanément un bon rendement de fonctionnement, qui nous permettra de définir les éléments de notre système, Ensuite, les méthodes correctes de dimensionnement de la pompe centrifuge et la source photovoltaïque du système, dans tous les cas il est nécessaire de connaître le besoin en eau, le gisement d'énergie solaire du lieu concerne. Ceci permet de faire le bon choix des modules photovoltaïques et la pompe centrifuge.

On termine ce chapitre par des résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée sur la machine asynchrone double alimentation (MADA) à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

**III.2 Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque :**

Selon le choix de la puissance de la pompe et pour avoir la quantité d'eau pompée pour un éclaircissement et une température donnée, on peut dimensionner notre système de pompage suivent ces derniers paramètres pour atteindre le bon fonctionnement et le bon rendement.

**III.2.1 Les critères de choix :**

Pour atteindre cet objectif on va passer par les étapes suivantes :

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

**III.2.1.1 Evaluation des besoins en eau :**

L'estimation des besoins en eau c'est la première étape à suivre lors d'un dimensionnement d'une installation du pompage photovoltaïque. Dans le cas de l'irrigation,

les besoins d'eau dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question) [34].

### III.2.1.2 Valeur de l'énergie hydraulique nécessaire :

Une fois ont définies les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation [35] :

$$E_h = \frac{g \rho V H_g}{3600} \quad \text{III.1}$$

Où :

$E_h$  : énergie hydraulique (Wh/jour) ;

$H_g$  : hauteur totale (m) ;

$V$  : volume d'eau (m<sup>3</sup>/jour) ;

$\rho$  : densité de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>) ;

$g$  : accélération de la pesanteur (9,81m/s<sup>2</sup>) ;

Le produit  $g \cdot \rho$  s'appelle la constante hydraulique  $C_h$  [kg. h. s/m<sup>2</sup>]

$$C_H = \frac{g \rho}{3600} = 2.725 \quad \text{III.2}$$

### III.2.2 Dimensionnement de la pompe centrifuge :

Dans notre cas le débit journalier sera de 10.08 m<sup>3</sup>/jour et la HMT est estimée à 30 m. La pompe choisie a un rendement de 55%, et l'efficacité du moteur, d'environ 80% au point de fonctionnement nominal. Le rendement total du groupe motopompe ( $R_p$ ) sera donc de 40%. D'après l'équation (III.3) de l'énergie électrique requise par la pompe on aura [32] :

$$E_{ele} = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{R_p} \quad \text{III.3}$$

$E_{ele}$  : Habituellement exprimé en KWh.

Q : Débit journalier (m<sup>3</sup>/ jour).

HMT : Hauteur manométrique.

R<sub>p</sub> : En général le rendement des groupes motopompes est de 40%, selon le type de pompe et de moteur [32].

$$E_{ele} = \frac{2.725 \cdot 10.08 \cdot 30}{0.40} = 2060.1 \text{wh/jour}$$

$$E_{ele} = 2060.1 \text{wh/jour}$$

### III.2.3 Dimensionnement du champ photovoltaïque :

Pour avoir le mois où l'ensoleillement (G) est défavorable pour une inclinaison de 36,43°, pour le plus faible ensoleillement de 0,7 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 30 % attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur [43], dans ce cas la puissance crête (P<sub>c</sub>) de champ photovoltaïque se calculera comme suite :

$$P_c = \frac{E_{ele}}{E_n (1 - \text{pertes})} \quad \text{III.4}$$

$$P_c = \frac{2060.1}{0.7(1-0.3)} = 4204.28 \text{W}$$

Pour des panneaux de : 60W, V<sub>opt</sub>=17,20V, I<sub>opt</sub>=3,49A

$$N_{pv} \geq ENT \left[ \frac{P_c}{P_{pv,u}} \right] \quad \text{III.5}$$

$$N_{pv} \geq ENT \left[ \frac{4204.28}{60} \right] = 70$$

Pour 70 panneaux photovoltaïque, la puissance totale sera égale :

$$P_{pv,tout} = 70 \cdot 60 = 4200 \text{W}$$

On branche les panneaux en série. Parce que (Les caractéristiques du moteur asynchrone utiliser est de P<sub>n</sub>=4000 W avec un rendement de 40%).

La tension à la sortie de générateur photovoltaïque totale sera :

$$V_{pv,tot} = 15 \cdot 17,20 = 258 \text{V}$$

### III.3 Commandes d'un système de pompage photovoltaïque :

#### III.3.1 Commandes de générateur photovoltaïque :

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important.

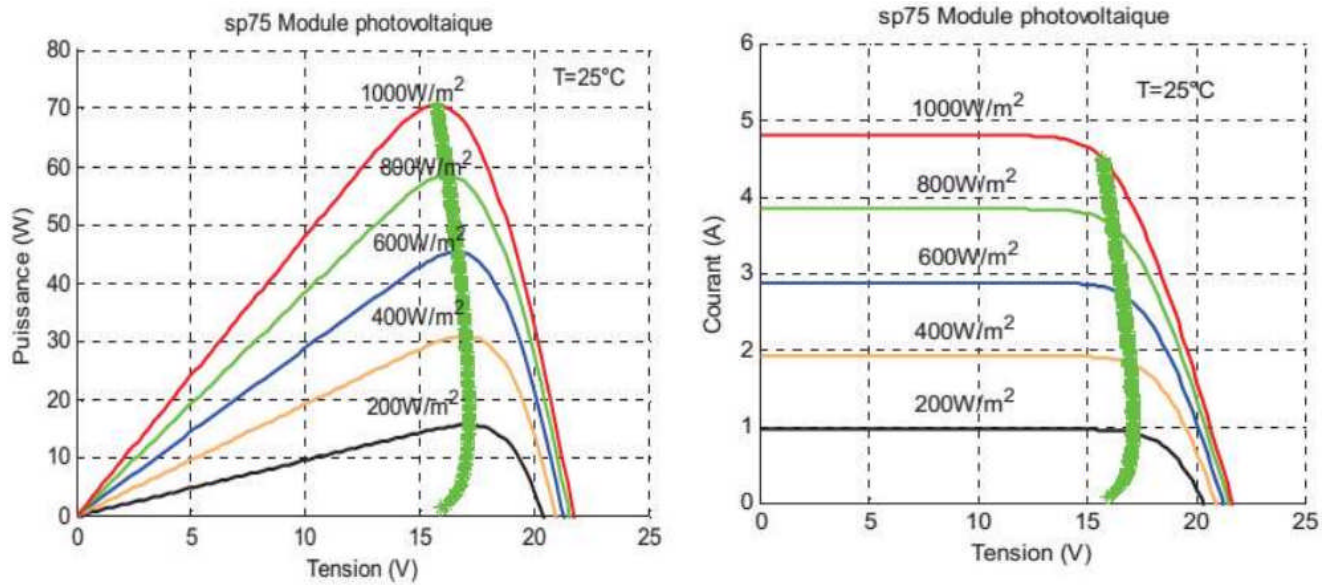
Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature (Recherche du Point de Puissance Maximum) ou bien (*Maximum Power Point Tracking*) en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. [36,37].

#### III.3.1.1 La technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) :

##### III.3.1.1.1 Principe de la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) :

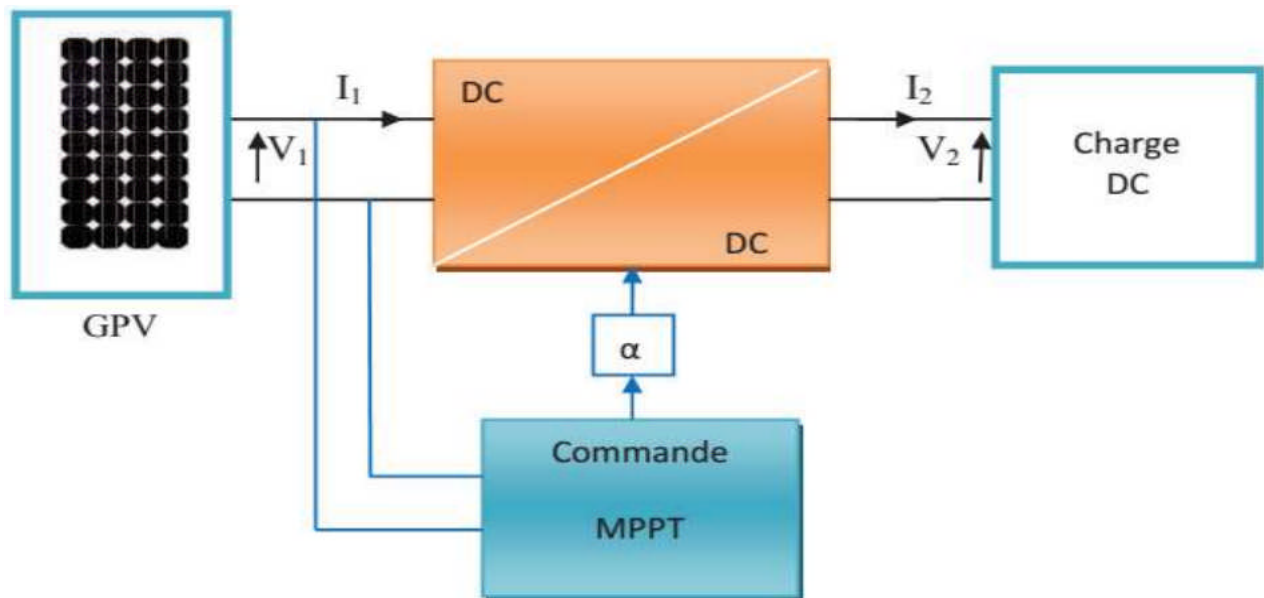
Un MPPT est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [38].

La Figure (III.1) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension.



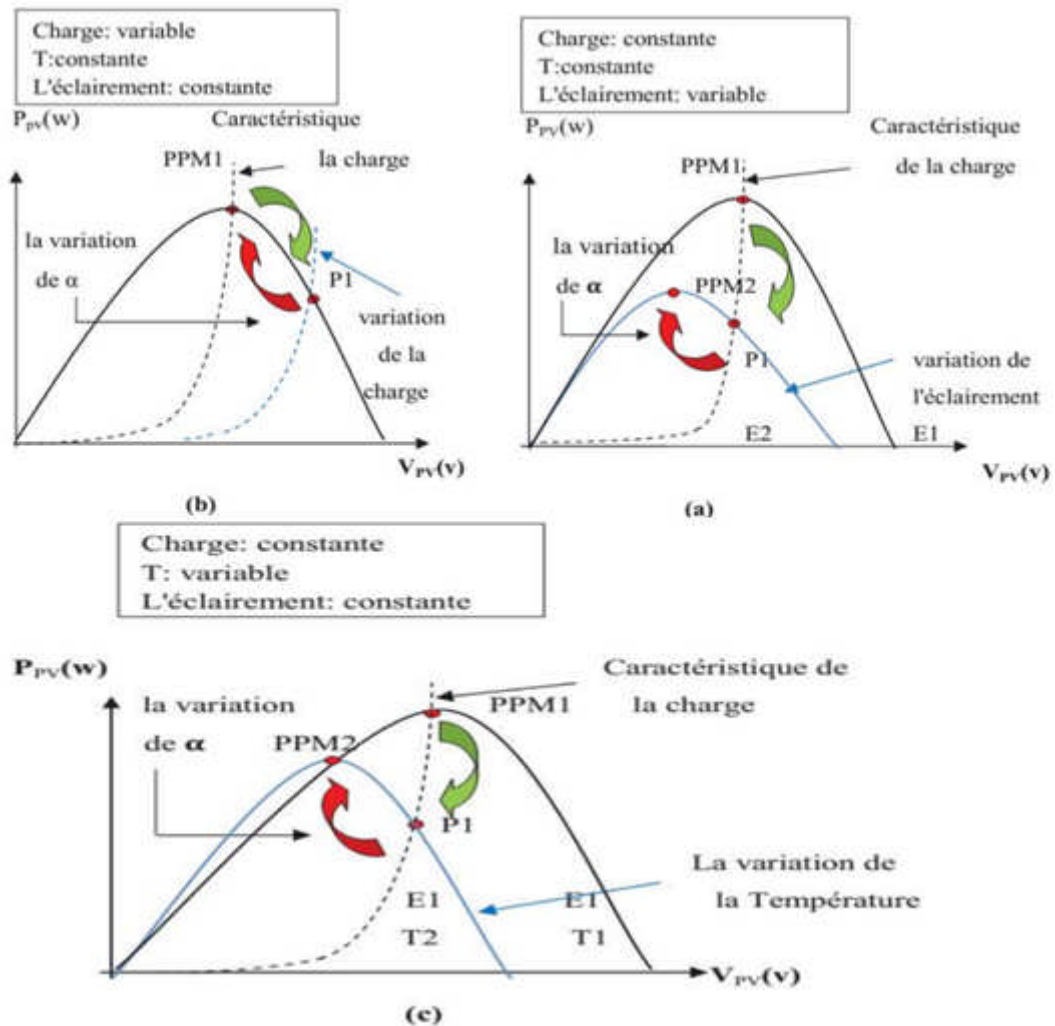
**Figure III.1:** La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [38].



**Figure III.2 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

La figure (III.3) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.



**Figure III.3:** Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge, (c) suite à une variation de température.

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lier aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande [36].

### III.3.1.2 Les algorithmes de commandes appliqués :

#### III.3.3.2.1 La commande "Perturbation et Observation" (P&O) :

La méthode P&O est sans doute la plus naturelle qui vient à l'esprit pour faire une recherche du point maximal de puissance PPM. En effet, dans le cas d'une application photovoltaïque, il s'agit concrètement d'un algorithme qui [39] :

- ✓ Pour une tension  $U(k)$  fixée va mesurer la puissance correspondante  $P(k)$  délivrée par le générateur.
- ✓ Après un certain temps, l'algorithme impose une tension  $U(k+1) = U(k) + \Delta U$  et mesure également la puissance correspondante  $P(k+1)$ ,

- ✓ Si  $P(k+1)$  est supérieure à  $P(k)$  : l'algorithme cherche à imposer une tension plus grande

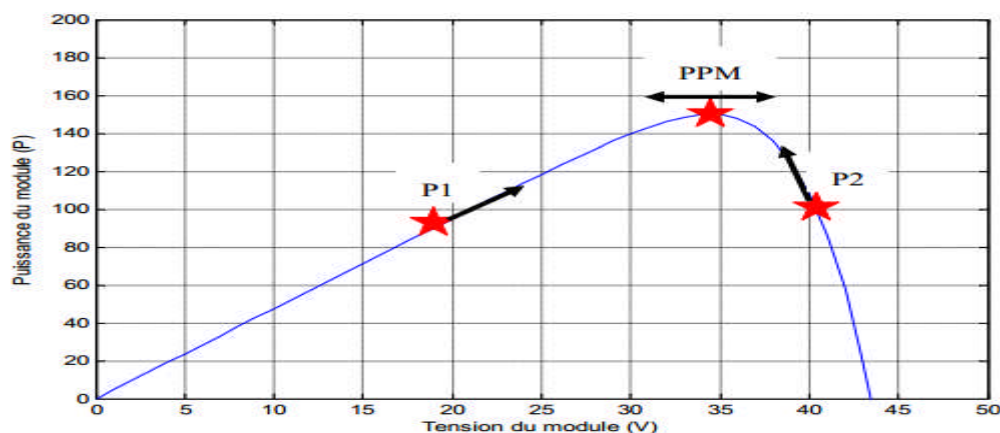
$U(k+2) = U(k+1) + \Delta U$ . Si non l'algorithme cherchera au contraire à abaisser la tension

$U(k+2) = U(k+1) - \Delta U$

La trajectoire de la variation de ces points est représentée sur la figure III.4

De cette manière, le système adapte en permanence la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin de se rapprocher du point de puissance maximum, mais sans jamais l'atteindre précisément. D'autres algorithmes différents existent aussi et des solutions entièrement analogiques parfois assez simples à mettre en œuvre.

Les étapes de la recherche (du point optimal) sont illustrées dans le diagramme de la figure III.4 .



**Figure III.4:** Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau solaire.

$$V_s = n(D).V_e$$

III.6

$V_e$  : La tension d'entrée.

$V_s$  : La tension de sortie.

D: Le rapport cyclique du convertisseur .

L'impédance vue par le générateur PV est  $R_e$ .

$$R_e = R_{ch} \frac{(1 - D)^2}{D^2}$$

III.7

Si D augmente  $R_e$  diminue, la tension diminue aussi, Si D diminue  $R_e$  augmente, la tension augmente aussi,

**Légende :**

$V(k)$  : tension en sortie du panneau à l'itération k

$I(k)$  : intensité en sortie du panneau à l'itération k

$P(k)$  : puissance en sortie du panneau à l'itération k

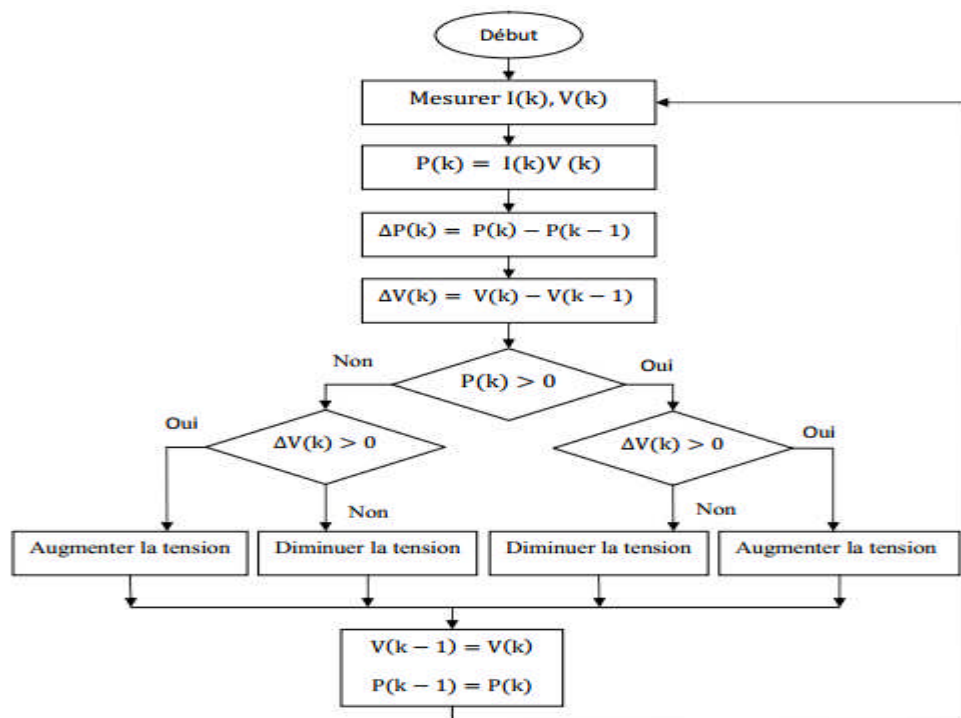
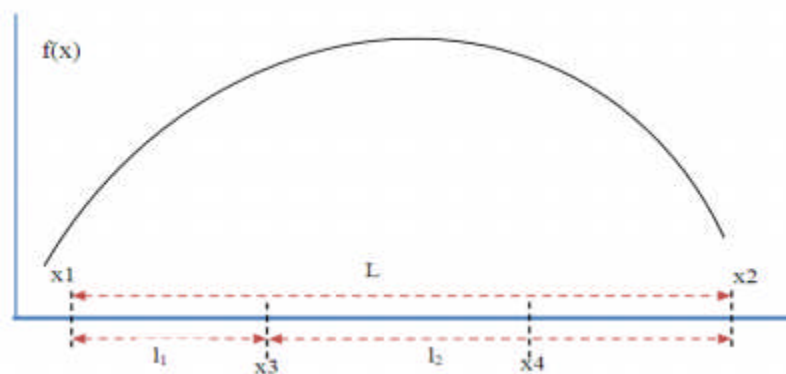


Figure III.5: Organigramme de l'algorithme perturbation et observation [38].

### III.3.3.2.2 La technique de commande "Golden section search" (GSS) :

L'américain **Jack Carl Kiefer** a découvert la nouvelle technique d'optimisation connue sous le nom de Golden Section Search ou Golden Ratio Method ou Golden Mean Method en 1953, puis a développé la méthode de Fibonacci. Cette technique peut être utilisée pour résoudre de nombreux problèmes en particulier pour les fonctions unimodales qui n'ont que le point optimum (minimum ou maximum sur l'intervalle  $[x_1, x_2]$ ) [40]. Les avantages de cette méthode sont l'absence d'exigence à la fois du nombre d'itérations et de la dérivée de fonction [40]. La méthode GSS est similaire à la bisection en ce sens qu'elle définit un intervalle avec un seul maximum à l'intérieur, puis elle divise le segment en trois sections en ajoutant deux points internes entre eux, l'ensemble de la technique est décrit dans l'organigramme illustré à la figure III.6[40].



**Figure III.6** : Schéma explicatif du GSS.

Puis il évalue la fonction aux deux points  $x_3$  et  $x_4$  de telle sorte que :

Si  $f(x_3) > f(x_4)$ , le maximum est compris entre  $x_1$  et  $x_3$  alors la nouvelle plage est  $x_1 = x_1$ ,  $x_2 = x_4$ .

Si  $f(x_3) < f(x_4)$ , le maximum est compris entre  $x_3$  et  $x_2$  alors la nouvelle plage est  $x_1 = x_3$ ,  $x_2 = x_2$ .

Nous avons un nouvel intervalle en trois sections et répétons, et nous sommes suffisamment proches du maximum pour arrêter avec nous d'utiliser la tolérance d'intervalle plus petit  $[x_3, x_4]$  tel que :

$$err = \frac{1}{2}(x_3 + x_4) \quad \text{III.8}$$

La place de deux points internes est déterminée par :  $L = l_1 + l_2$  III.9

$$\text{Et : } r = \frac{L}{l_2} = \frac{l_2}{l_1} \quad \text{III.10}$$

En remplaçant (III.9) dans (III.10), nous avons :  $r^2 + r - 1 = 0$  III.11

Résolution (III.10) pour r :

$$r_1 = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = 0.61803 \quad r_2 = -\frac{\sqrt{5} - 1}{2} = -0.61803$$

On a :

r : est le nombre d'or.

Le résultat conduit donc aux équations suivantes de x3 et x4 :

$$x_3 = x_1 + r(x_2 - x_1) \quad \text{III.12}$$

$$x_4 = x_2 + r(x_2 - x_1) \quad \text{III.13}$$

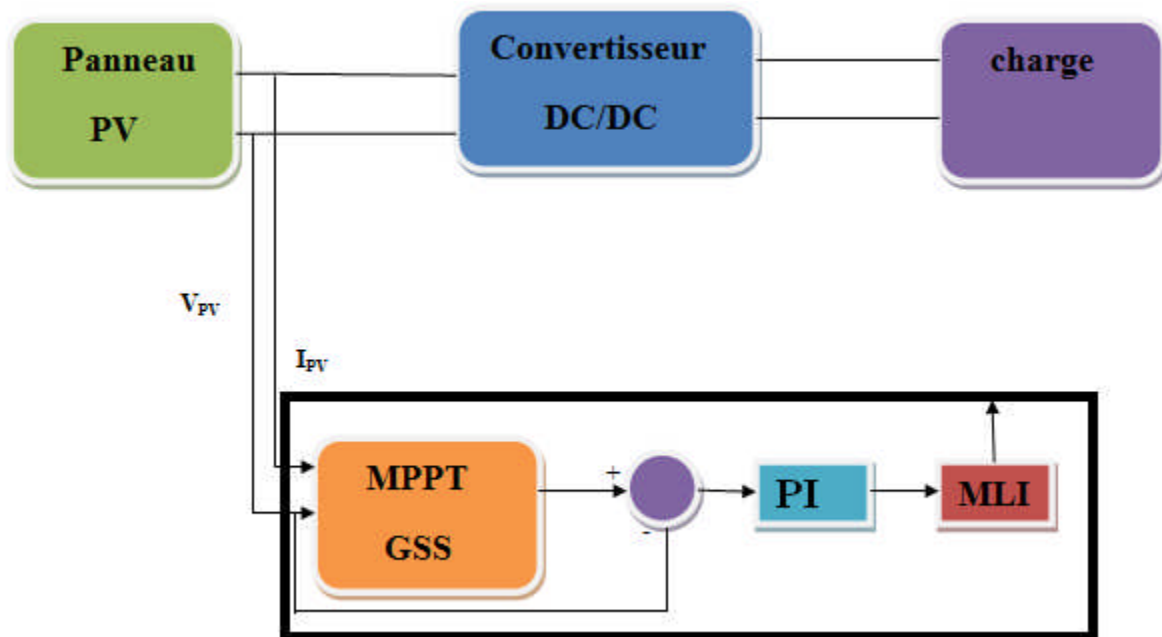


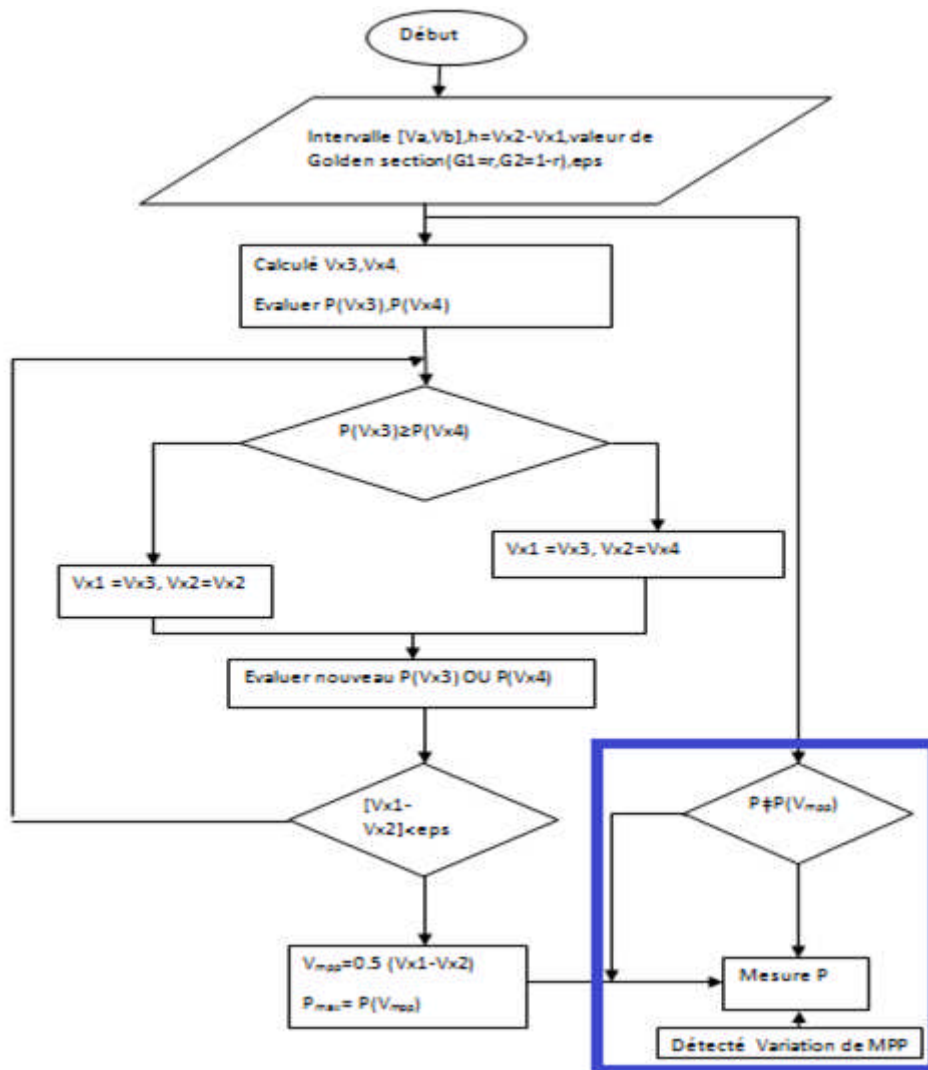
Figure III.7 : Modèle du MPPT proposé.

Afin d'appliquer le GSS dans la méthode MPPT dans les systèmes PV, la fonction de  $f(x)$  et la variable  $x$  doivent être choisies avec soin. La figure III.7.

On voit que le changement de puissance par rapport à la tension s'approche de zéro au point de puissance maximale. Évidemment, la puissance à la tension de court-circuit (0V) et la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) sont nulles, donc la puissance maximale ne doit pas se produire dans ces deux points même si les changements de puissance à ces deux points sont également nuls, ce qui est causé par les petites puissances autour de ces deux points. Le MPPT est essentiel pour trouver la racine dans la fonction  $P$  en régulant la tension du module solaire ou des panneaux solaires, où la variable  $x$  est la tension du module solaire ou du panneau solaire et peut s'écrire :

$$f(x) = P(V_{Array}), \text{ et on a } x_1=0 ; x_2=V_{oc} \quad \text{III.14}$$

Pour réguler la tension  $V_{Array}$ , des convertisseurs sont nécessaires comme interface entre le panneau solaire et la charge. L'organigramme suivant résume l'ensemble de l'algorithme proposé :



**Figure III.8:** Organigramme de l'algorithme GSS MPPT proposé.

### III.3.2 Commandes de la machine utilisée dans le système de pompage (Commande vectoriel) :

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser des meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [41].

Dans ce type de commande, le flux et le couple sont deux variables qui sont découplées et commandées indépendamment.

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux méthodes principales [41] :

- Méthode directe développée par Blaschke.
- Méthode indirecte développée par Hasse.

Plusieurs techniques, ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [19]

Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant. Suivant l'orientation du repère ( $d-q$ ) :
- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux de l'entrefer.

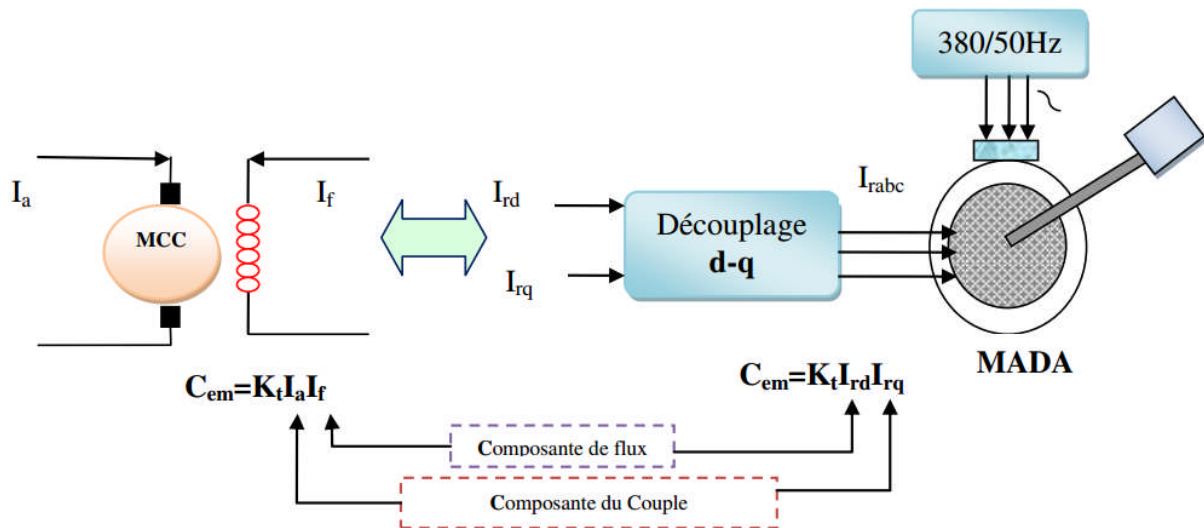
Dans notre travail, nous nous intéressons à une commande vectorielle directe en tension avec orientation du flux statorique suivant le repère ( $d-q$ ).

### III.3.2.1 Principe de la commande vectoriel :

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée au couple (le courant d'induit) [22]. Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple.

Contrairement à la machine asynchrone à cage, où nous avons accès à la mesure des courants au stator seulement, la machine asynchrone à bagues doublement alimentée possède l'avantage de nous offrir la possibilité d'une mesure des courants de deux côtés et par conséquent de pouvoir les contrôler donnant une meilleure flexibilité à la commande de cette dernière [21].

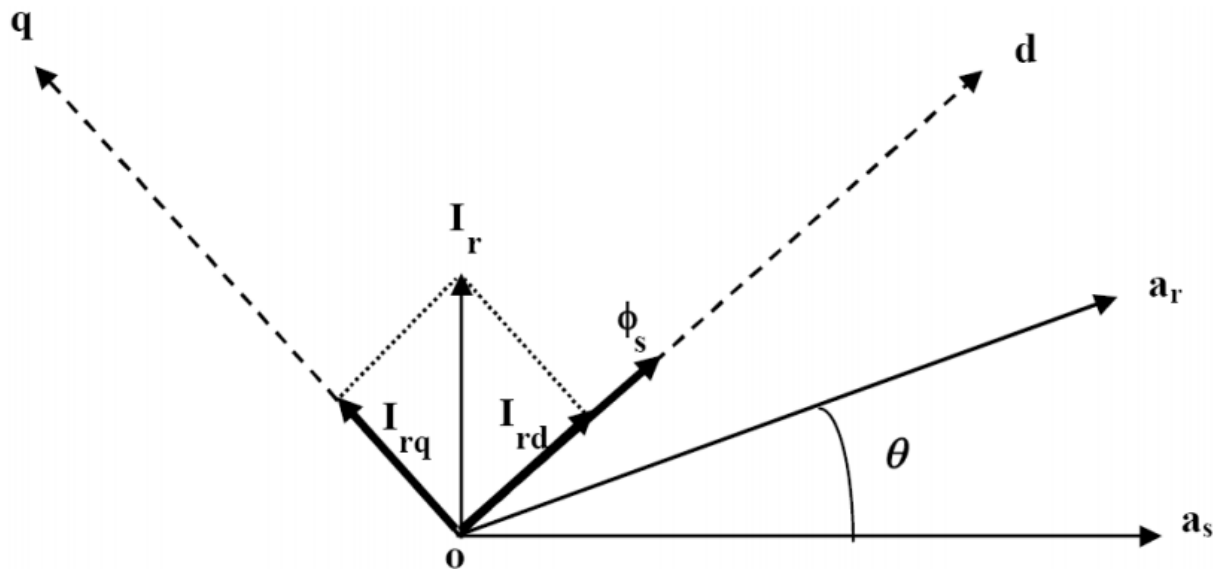
L'objectif pour une commande du MADA est de réaliser l'opération précédente à l'aide des variables de commande similaire comme le montre la figure III.9.



**Figure III.9 :** Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la machine à courant continu MCC.

**III.3.2.2 Application de la commande vectoriel a la MADA :**

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par une autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe ( $d$ - $q$ ) et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux [42].



**Figure III.10:** Illustration de l'orientation du flux statorique.

Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel ( $d$ - $q$ ) lié au champ tournant avec une orientation du

flux statorique (l'axe  $d$  aligné avec la direction du flux statorique) comme le montre la figure III.10.

$$\text{On obtient : } \phi_{sq} = 0 \Leftrightarrow \phi_{sd} = \phi_s \quad \text{III.15}$$

On remplace l'équation (III.15) dans l'équation ((II.45) (II. 46)) on trouve :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} - \omega_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \phi_{sq} = 0 \Rightarrow I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \\ I_{sd} = 0 \\ I_{rd} = \frac{\phi_s^*}{M} \end{cases} \quad \text{III.16}$$

Compte tenu des hypothèses de travail retenues, cela nous incite à prendre le courant statorique dans l'axe  $d$  nul,  $I_{sd}=0$ . Le courant et la tension dans cet axe sont alors en phase  $V_s=V_{sq}$  et  $I_s=I_{sq}$ .

Dans ce cas, nous obtenons un facteur de puissance unitaire au stator, donc la puissance réactive statorique est nulle  $Q_s=0$  [42].

Ces simplifications conduisent à l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = P \cdot \phi_{sn} \cdot I_{sq} = K \cdot I_{sq} \text{ tel que } K = P \cdot \phi_{sn} \quad \text{III.17}$$

Cette expression est semblable à celle d'une machine à courant continu où un découplage entre le flux  $\bar{\Phi}$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  est naturel. Et on a l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_s} (\phi_{sq} I_{rd} - \phi_{sd} I_{rq}) \quad \text{III.18}$$

En remplaçant l'équation (III.15) dans (III.18) on trouve :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_s} (-\phi_{sd} I_{rq}) = -\frac{pM}{L_s} \phi_s \cdot I_{rq} \quad \text{III.19}$$

Alors :

$$I_{rq} = -\frac{L_s}{pM} \frac{C_e^*}{\phi_s^*} \quad \text{III.20}$$

De l' équation (II.41) on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \left( \frac{R_s M}{L_s} I_{rq} + V_{sq} \right) / \phi_s^* \quad \text{III.21}$$

D' après les équations des flux statorique on aura :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \Rightarrow I_{sd} = \frac{1}{L_s} (\phi_{sd} - M \cdot I_{rd}) \\ \phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \Rightarrow I_{sq} = \frac{1}{L_s} (\phi_{sq} - M \cdot I_{rq}) \end{cases} \quad \text{III.22}$$

On remplace l' équation (III.22) dans (II.42) on trouve :

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{sd} = V_s + \frac{M}{T_s} \cdot I_{rd} - \frac{1}{T_s} \phi_{sd} \\ \dot{\phi}_{sq} = 0 = V_s + \frac{M}{T_s} \cdot I_{rq} - \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad \text{III.23}$$

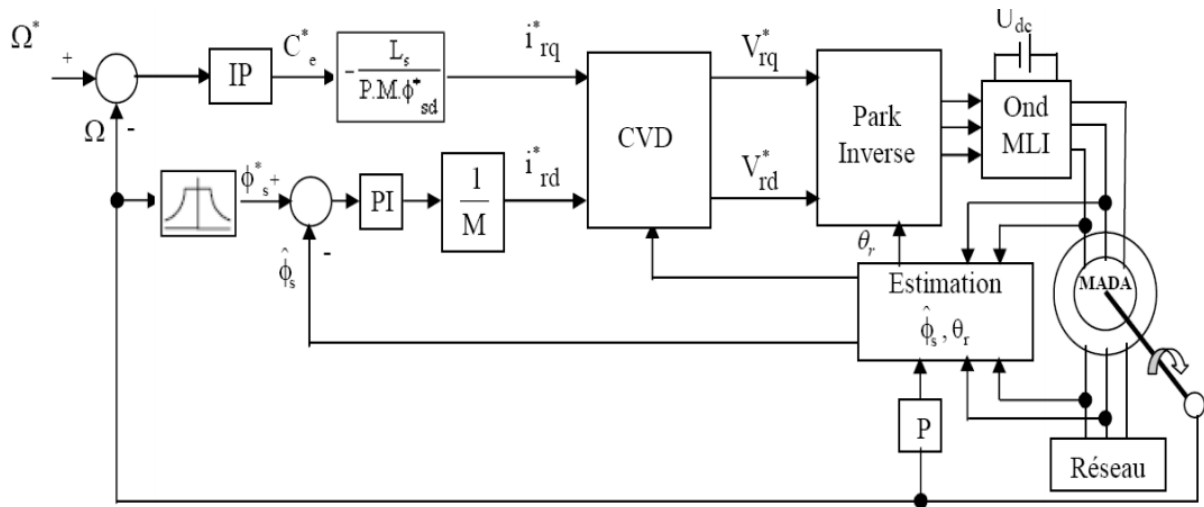
En exprimant le flux rotorique en fonction de flux statorique  $\phi_{sd}$  et le courant rotorique  $I_{rd}$ : En remplaçant l' équation (III.22) dans l' équation (II.46) et l' équation (II.39) dans l' équation (II.46), on trouve donc les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{rd} = \sigma L_r \cdot I_{rd} + \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \\ \dot{\phi}_{rq} = \sigma L_r \cdot I_{rq} + \frac{M}{L_s} \phi_{sq} \end{cases} \quad \text{III.24}$$

En introduisant les équations (III.23), (III.24) et (II.32) dans l' équation (III.42) on trouve :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \cdot \frac{dI_{rd}}{dt} + \frac{M}{L_s} V_{sd} - (\omega_s - \omega) \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = \left( R_r + \frac{M^2}{L_s T_s} \right) I_{rq} + \sigma L_r \cdot \frac{dI_{rq}}{dt} + \frac{M}{L_s} V_{sq} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sd} + (\omega_s - \omega) L_r I_{rd} \end{cases} \quad \text{III.25}$$

Le schéma de principe de la commande vectorielle directe (CVD) à flux statorique orienté sur l'axe  $d$  est montré par la figure ci-dessous. (III.11)



**Figure III.11** : Schéma de principe de la commande vectorielle directe à flux statorique orienté du MADA.

### III.3.2.3 Découplage par compensation :

D'après les équations (III.27), on peut remarquer que les équations de tension incluent deux termes de couplage entre l'axe  $d$  et l'axe  $q$ .

Nous devons présenter un système de découplage, en présentant les termes de compensation :

$$\begin{cases} E_d = \sigma L_r (\omega_s - \omega) I_{rq} \\ E_q = \frac{M}{L_s} \omega_s \phi_{sd} - \sigma L_r (\omega_s - \omega) I_{rd} \end{cases} \quad \text{III.26}$$

Puis, on définit deux nouvelles variables intermédiaires de découplage par deux expressions qui sont :

$$\begin{cases} V_{rd1} = V_{rd} + E_d - \frac{M}{L_s} V_{sd} \\ V_{rq1} = V_{rq} + E_q - \frac{M}{L_s} V_{sq} \end{cases} \quad \text{III.27}$$

### III.3.2.4 Synthèse des différents régulateurs :

La référence du courant direct  $I_{dref}$  est fixée, et la sortie du régulateur de vitesse  $I_{qref}$  constitue la consigne de couple  $C^*_{em}$ . Les références des courants  $I_{dref}$  et  $I_{qref}$  sont comparées séparément avec les courants réels de la machine  $I_d$  et  $I_q$ .

Les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références  $V^*_d$ ,  $V^*_q$ .

Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant  $I_{qref}$ . Par contre  $I_{dref}$ , le courant est imposé nul.

Chaque axe découplé peut être représenté par un bloc de correction  $C_i(s)$  avec  $(i=d, q)$ .

La figure (III.12) représente le schéma global de la commande vectorielle d'une machine asynchrone double alimentation avec compensation dans le repère (d, q).

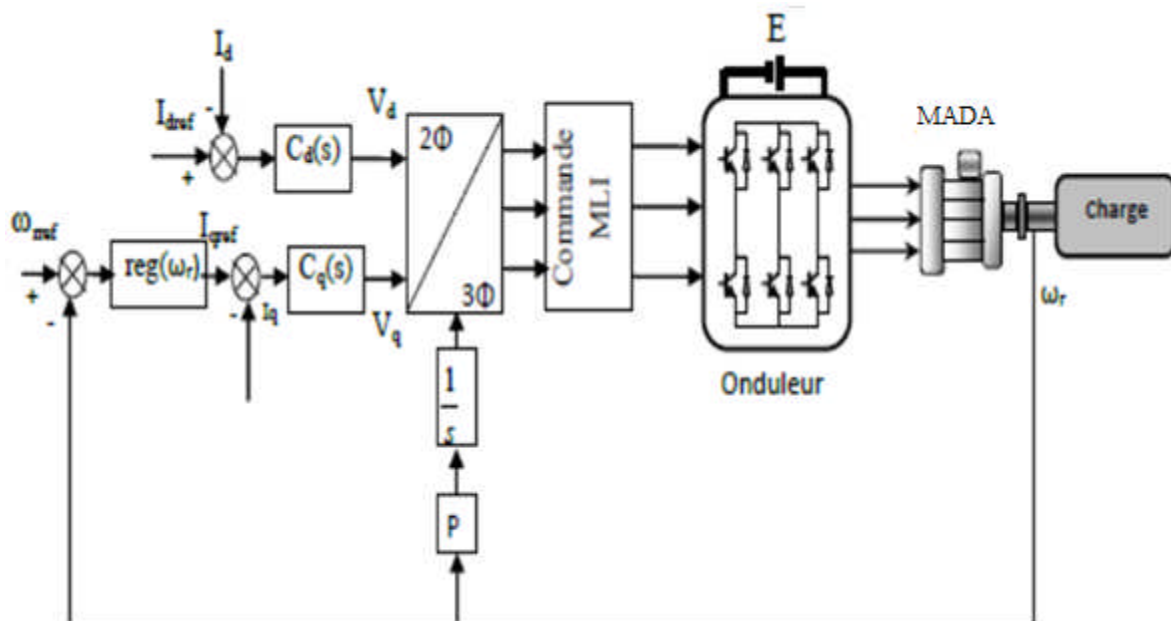


Figure III.12: Schéma bloc de la commande vectorielle avec compensation des f.é.m.

### III.3.2.5 Calcul des régulateurs :

#### III.3.2.5.1 Régulateur du courant :

##### ❖ Régulateur du courant $I_{rd}$ :

Il prend en entrée le courant  $I_{rd}^*$  de référence et sa mesure. Il agit sur la tension de référence  $V^*_{rd}$ . Réguler ce courant à une valeur constante, c'est garantir un flux statorique constant. Le schéma bloc de la régulation du courant  $I_{rd}^*$  est représenté par la Figure III.13.

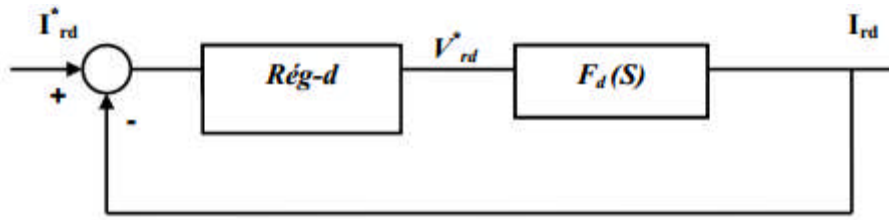


Figure III.13 : Schéma de régulation du courant  $I_{rd}^*$ .

La fonction de transfert de régulateur est donnée par l'équation suivante :

$$Rég_d = K_d + \frac{1 + \sigma T_r S}{S} \tag{III.28}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit donc :

$$F.T.B.O = K_d \frac{1 + \sigma T_r S}{S} F_d(S) = \frac{K_d^*}{S} = K \tag{III.29}$$

Avec :

$$F_d(S) = \frac{1}{1 + \sigma T_r S} \tag{III.30}$$

La F.T.B.F est donne :

$$F.T.B.F = \frac{K}{1 + K} = \frac{\frac{K_d^*}{S}}{1 + \frac{K_d^*}{S}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_d^*} S} = \frac{1}{1 + \tau_1 S} \tag{III.31}$$

On choisit :

$$\tau_1 = \sigma T_r = \frac{1}{K_d^*} = \frac{R_r}{K_d} \Rightarrow K_d = \frac{R_r}{\sigma T_r}$$

❖ Régulateur du courant  $I_{rq}$

Le schéma bloc de la régulation du courant  $I_{rq}^*$  est représenté par la Figure III.14.

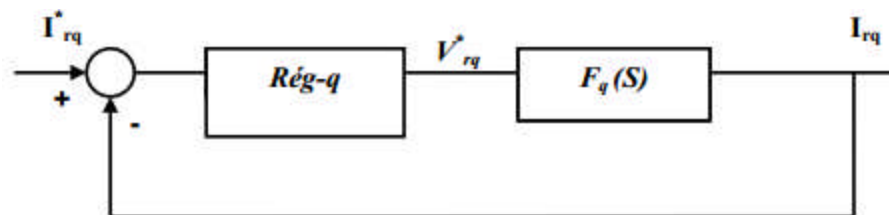


Figure III.14 : Schéma de régulation du courant  $I_{rq}^*$ .

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit donc :

$$F.T.B.O = K_q \frac{1 + \tau_2 S}{S} F_q(S) = \frac{K_q^*}{S} = T \quad \text{III.32}$$

$$\text{Avec : } F_q(S) = \frac{1}{1 + \tau_2 S} ; N = R_r + \frac{M^2}{L_s T_s} ; \tau_2 = \frac{\sigma L_r T_s}{R_r L_s T_s + M^2}$$

La F.T.B.F est donne :

$$F.T.B.F = \frac{T}{1 + T} \frac{K_q^*}{K_q^* + S} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_q^*} S} = \frac{1}{1 + \tau S} \quad \text{III.33}$$

$$\text{Avec : } \tau_2 = \frac{1}{K_q^*} \quad \text{III.34}$$

La fonction de transfert du régulateur est donnée par l'équation suivante :

$$Rég_q = \frac{N}{\sigma L_r} \frac{1 + \tau_2 S}{S} \quad \text{III.35}$$

### III.3.2.5.2 Régulation de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. La dynamique de la vitesse est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Rightarrow \Omega = \frac{C_e - C_r}{JS + f} \quad \text{III.36}$$

Le schéma fonctionnel simplifié du système de contrôle avec le régulateur PI est donné par la Figure III.15.

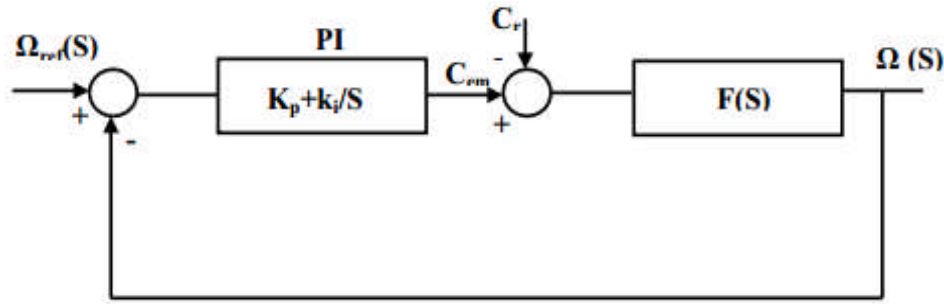


Figure III.15: Schéma fonctionnel de régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$\Omega(S) = \frac{K_i(1 + \tau S)}{S(JS + f)}(\Omega^* - \Omega) - \frac{1}{JS + f} C_r \quad \text{III.37}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\Omega(S) = \frac{K_i(\tau)S + 1}{JS^2 + (f + K_i v)S + K_i} \Omega^* - \frac{S}{JS^2 + (f + K_i v)S + K_i} C_r \quad \text{III.38}$$

Par identification avec l'équation caractéristique du second ordre fondamental, on trouve :

$$\begin{cases} \frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_n^2} \\ \frac{f + K_i \tau}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_n} \end{cases} \quad \text{III.39}$$

On a :  $K_p + \frac{K_i}{S} = \frac{1 + \tau S}{S} K_i, \tau = \frac{K_p}{K_i}. K_i = \frac{4\xi^2 J}{\tau} \text{ et } K_p = \tau K_i$

Pour un amortissement critique  $\xi=1$ , on trouve :  $K_i = \frac{4J}{\tau^2}$  III.40

On peut utiliser un filtre d'équation  $\frac{1}{1 + \tau S}$  pour éliminer les dépassements qui apparaissent dans la vitesse  $\omega_r$ .

III.3.2.5 Résultats de simulation numérique (MADA-Commande vectoriel) :

Nous avons réalisé plusieurs séries de simulation numérique pour mettre en évidence les propriétés, mais aussi les insuffisances, de la commande vectorielle. Celles-ci seront retenues dans les prochains chapitres, avec les mêmes conditions. Elle comporte :

- le bloc de la machine MADA.
- le bloc des régulateur PI.
- le bloc de découplage.
- le bloc de la transformé de PARK inverse générant les tensions de référence.

La figure (III.16) représente le schéma bloc développé de la commande vectorielle directe par orientation de flux statorique de la machine asynchrone double alimentée (MADA).

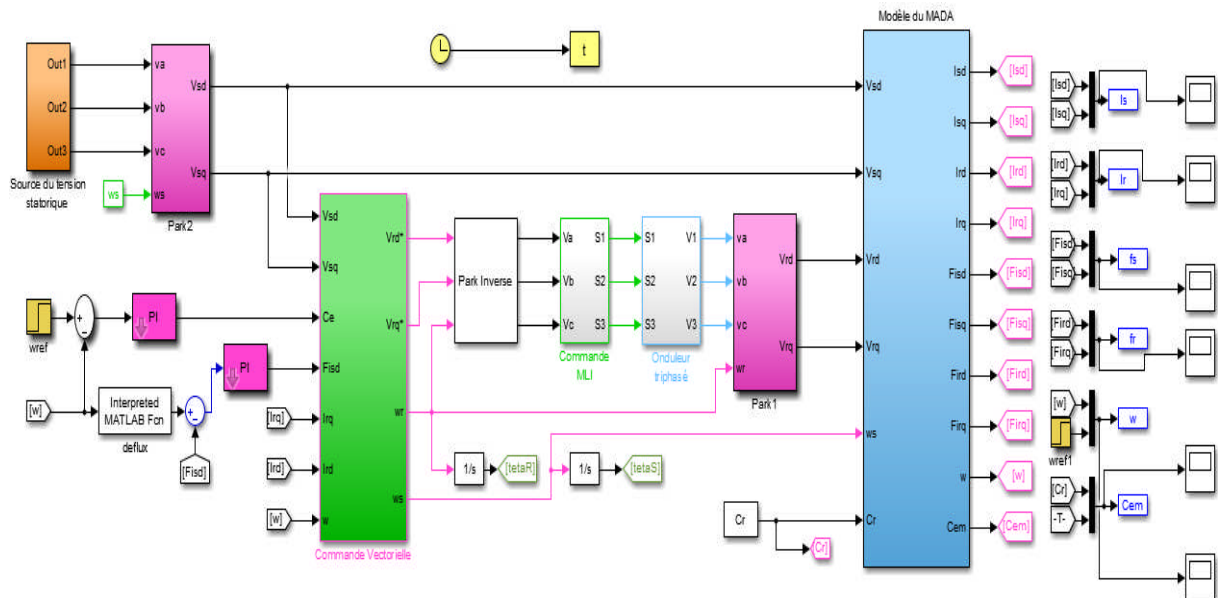


Figure III.16 : Le schéma bloc de simulation de la commande vectorielle.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre est consacré sur le système de pompage photovoltaïque et nous présentons principalement sur des points nécessaires à définir le Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque aussi on a présenté en suite la commande MPPT, qui permet la recherche de point précis de puissance maximale sous des variations des conditions environnementales. Dans notre travail on a choisi deux algorithmes; l'algorithme de Perturbation et observation "P&O", et l'algorithme de Golden section search (GSS). Pour la deuxième partie de ce chapitre, la présentation du principe de la théorie du contrôle par la commande vectorielle de (MADA) est présentée.

# **CHAPITRE IV :**

## **SIMULATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.**

## IV.1 Introduction :

L'objectif de ce dernier chapitre est de faire la simulation numérique sous MATLAB/SIMULINK de notre système de pompage photovoltaïque avec la commande MPPT de type GSS de l'hacheur survolteur basée sur la mesure de tension photovoltaïque pour assurer le fonctionnement du GPV à sa puissance maximale. Des résultats de simulations seront présentés et commentés dans des conditions de fonctionnement fixe et variable.

Des différentes simulations seront effectuées sur le système étudié qui est composée de 15 panneaux photovoltaïques en série et 5 panneaux en parallèles de puissance optimal 4500W, d'un hacheur survolteur, d'un onduleur de tension et d'un groupe motopompe (MADA, pompe centrifuge).

## IV.1 Simulation de la chaine de pompage PV avec la commande Golden Section Search :

Le schéma de notre système étudié est représenté sur la figure IV.1 ci-dessous. La vitesse de référence  $\Omega_n$  est calculée en fonction de la puissance photovoltaïque optimisée par l'algorithme MPPT «GSS», elle est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_n = \sqrt[3]{(P_{pv} * \Omega_n * \eta) / P_n}$$

$P_{PV}$  : Puissance photovoltaïque totale (W)

$\Omega_n$  : vitesse nominale du moteur synchrone (rad/s)

$\eta$  : Rendement du groupe motopompe

$P_n$ : Puissance nominale (W)

La figure IV.1 représente les éléments constitutions de la chaine de pompage photovoltaïque avec la commande golden section search GSS.

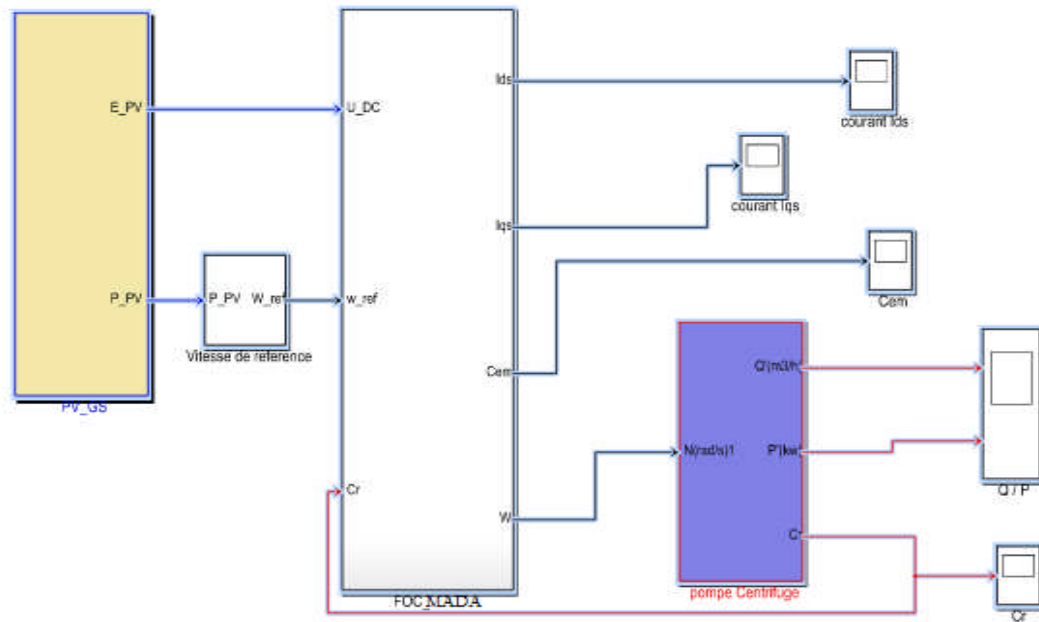


Figure IV.1: Schéma bloc de système de pompage photovoltaïque à base GSS.

IV.1.1 Résultats de simulation de la commande GSS :

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de notre système de pompage photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « GSS ». La simulation est réalisée par MATLAB/SIMULINK :

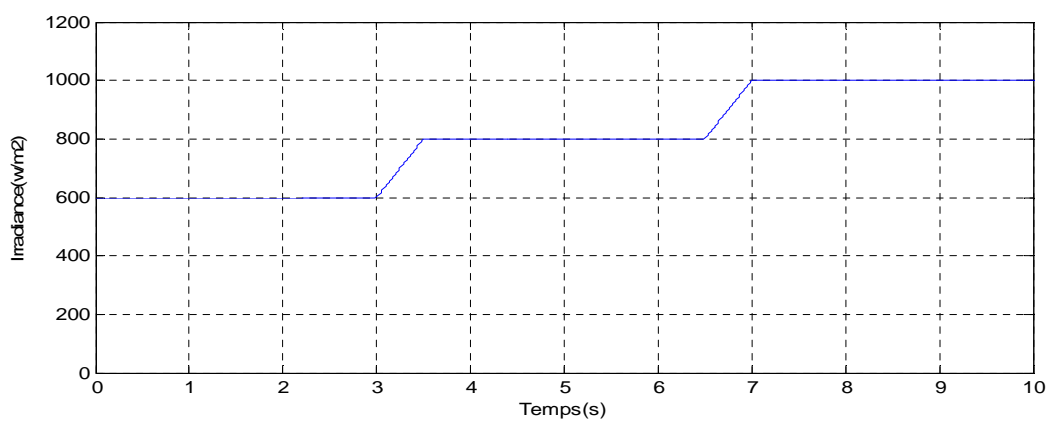


Figure IV.2 : Allure d'irradiation solaire.

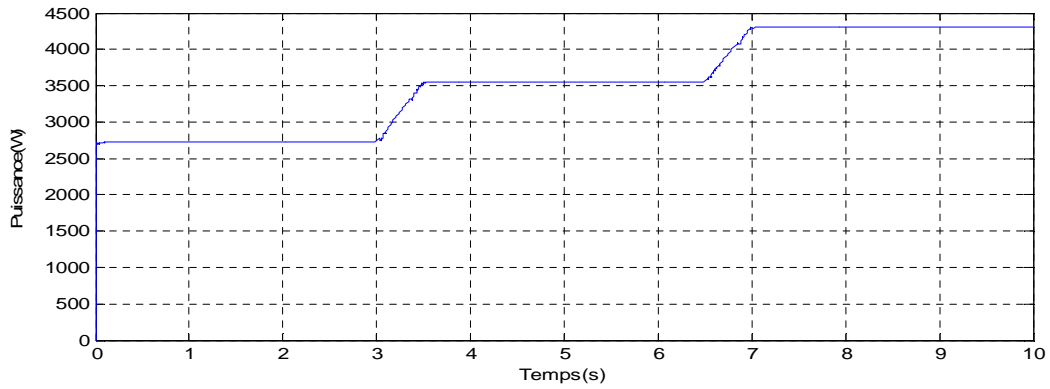


Figure IV.3 : Allure de Puissance PV

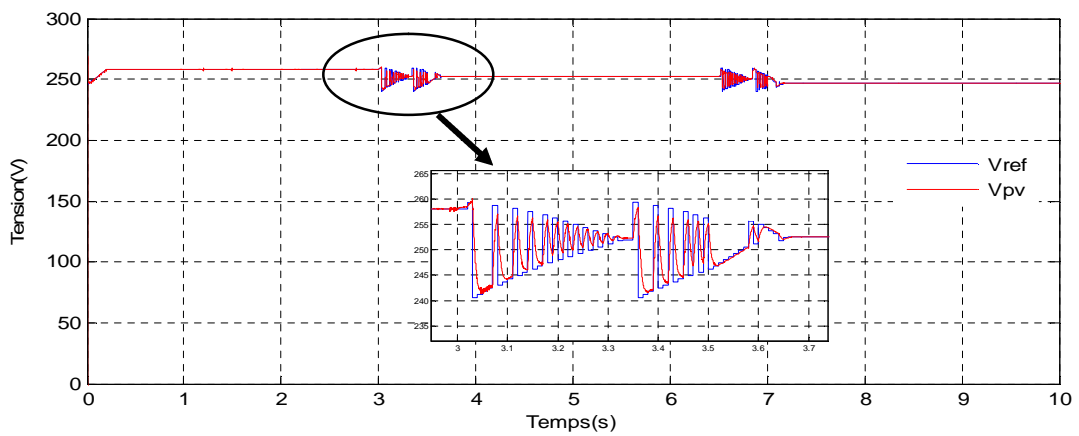


Figure IV.4 : Allure de Tension PV et tension de référence en utilisant GSS.

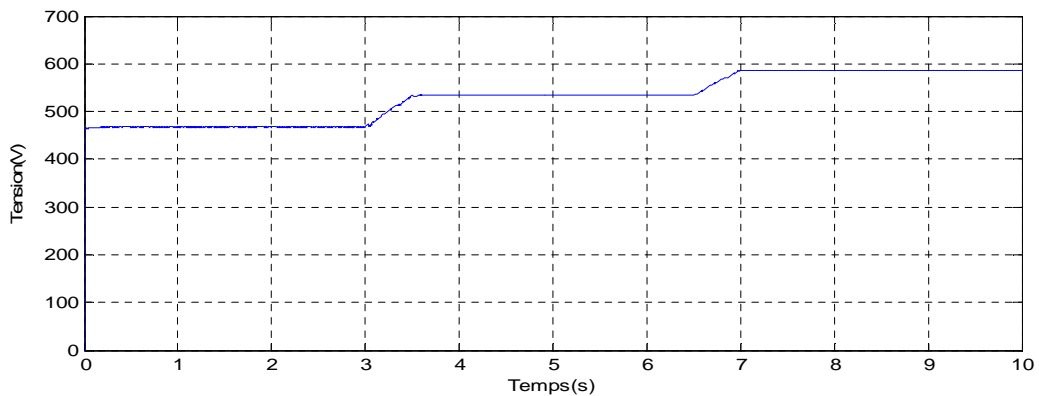


Figure IV.5: la tension à la sortie de l'hacheur.

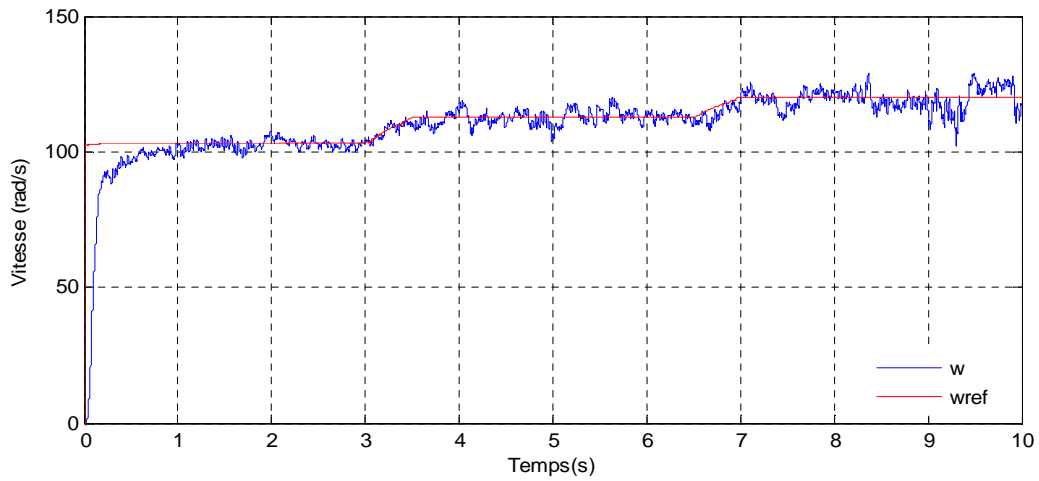


Figure IV.6 : la vitesse de l'arbre de MADA et sa vitesse de référence.

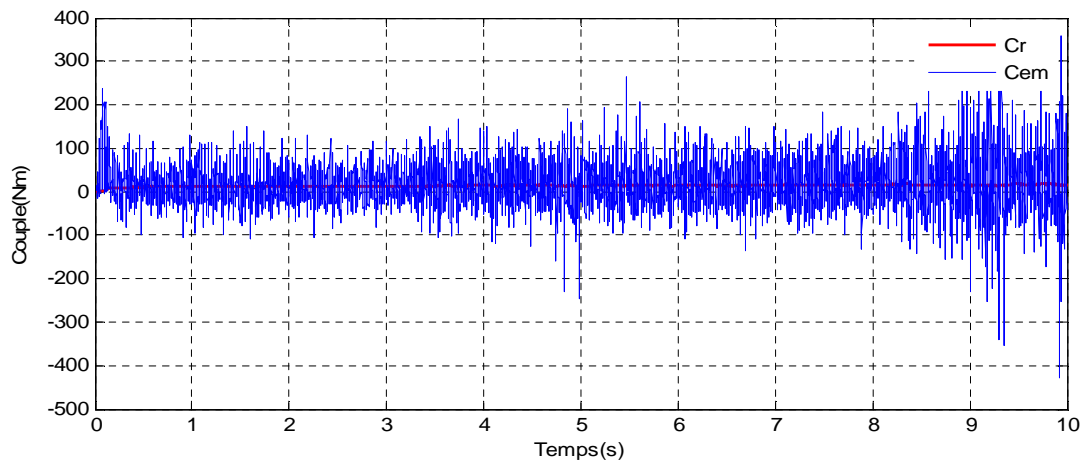


Figure IV.7 : le couple électromagnétique de MADA et sa couple résistant.

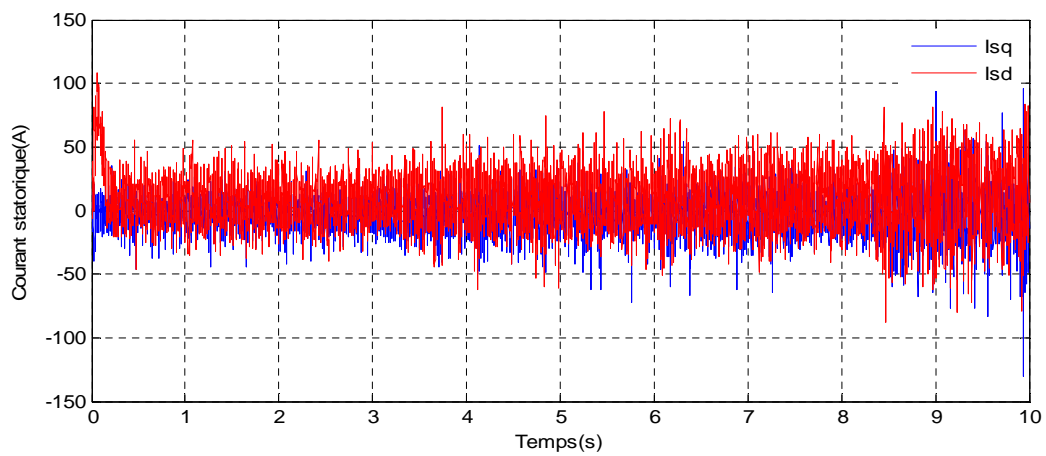


Figure IV.8 : les Courant statoriques de MADA.

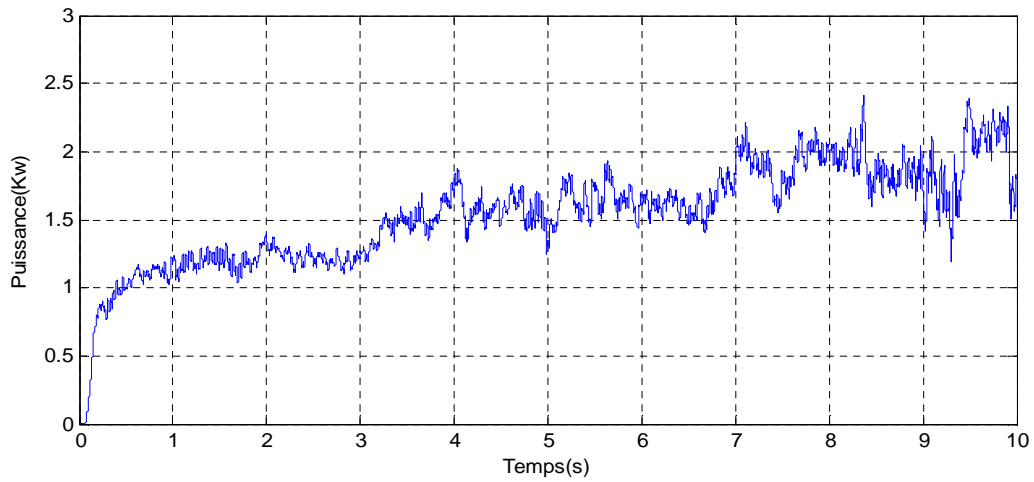


Figure IV.9: la puissance utile de la motopompe.

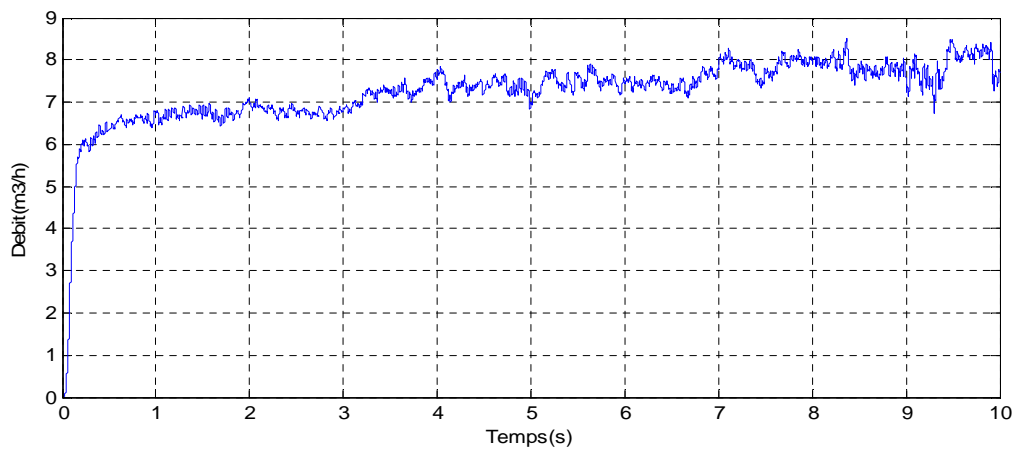


Figure IV.10 : Allure du débit de pompe centrifuge.

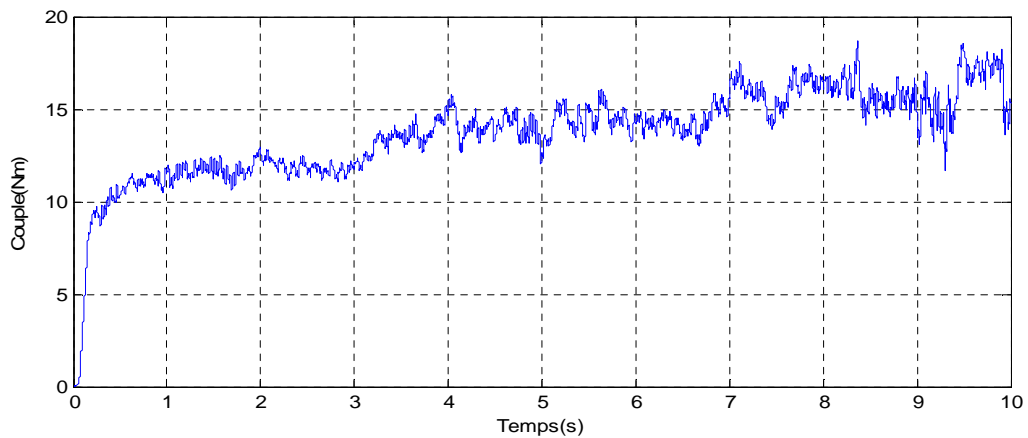


Figure IV.11 : Allure du Couple résistant de la motopompe.

**IV.1.2 Interprétation des résultats :**

Pour valider notre travail nous avons choisis de simuler notre système dans des conditions variables d'éclairement et de température. D'après ces figures on constate des variations aux niveaux de la tension photovoltaïque comme le montrent la figure IV.4 qui correspond à celle optimisée par la méthode « GSS » ce qui montre l'efficacité de la méthode MPPT utilisée.

La figure IV.6 représente l'allure de la vitesse de la MADA régulé par un régulateur PI, d'après ce résultat on constate que la vitesse mesurée atteint sa référence et suit l'évolution de cette dernière même dans des conditions variables.

D'après la figure IV.10 on constate que le débit suit la variation de la vitesse qui dépend de la puissance photovoltaïque.

**IV.2 Conclusion :**

Au cours de ce chapitre la commande de système de pompage photovoltaïque a été simulée par le logiciel MATLAB/Simulink. Nous avons utilisé une technique MPPT pour extraire la puissance maximale du GPV cette dernière est appelée Golden section search (GSS) associée à un convertisseur DC/DC élévateur de tension qui permet le fonctionnement du générateur photovoltaïque à son maximum de puissance qu'elle que soit les conditions météorologiques. Un régulateur PI est utilisé pour réguler la vitesse de la machine.

Enfin on peut conclure d'après les résultats obtenus l'efficacité d'une commande appliquée au système de pompage photovoltaïque.

# **CONCLUSION**

## **GENERALE**

# Conclusion Générale

Notre travail c'est porté sur la commande d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque, deux convertisseurs statiques et un groupe motopompe. Le premier de ces deux convertisseurs, est un Hacheur survolteur (Boost), est commandé par un algorithme MPPT pour obtenir le point de puissance maximale. Le deuxième est un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe motopompe (moteur asynchrone à double alimentation (MADA), pompe centrifuge). Aussi il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans des batteries, le moteur de notre pompe solaire fonctionnera au fil du soleil. En utilisant des algorithmes pour l'asservissement et la régulation de vitesse de la machine en fonction de changement climatique.

Un aperçu sur les caractéristiques des machines asynchrones à double alimentation ainsi que leurs avantages et inconvénients ont été passé en revue. Ensuite, une étude générale de modélisation de la MADA a été présentée, en se basant sur le modèle équivalent de Park en tenant compte des hypothèses simplificatrices.

La commande de la MADA utilisant des régulateurs PI classiques présente certains inconvénients liés aux performances et à la sensibilité aux variations paramétriques de la machine. Pour la régulation de vitesse de la machine et minimiser l'erreur entre la valeur de référence et la valeur mesurée où les résultats de simulation présentent de bonnes améliorations au niveau du contrôle du couple et de flux du MADA.

Pour fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, le convertisseur DC-DC associé doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. A cet effet, une nouvelle méthode MPPT basée sur le GSS est proposée et testée à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink. Le moteur asynchrone double alimentation est sélectionné pour entraîner la pompe centrifuge appliquant la commande vectorielle adopté pour contrôler la vitesse du moteur.

La technique proposée montre une vitesse de suivi rapide, elle ne présente aucune oscillation autour du MPP et elle peut fournir des performances de suivi précises et fiables du MPP lorsque des changements d'irradiance ou de température.

## Conclusion Générale

---

Finalement, les résultats des simulations ont montré que le système proposé permet d'améliorer l'efficacité du système de pompage.

Pour la continuité des recherches relatives à ce travail, nous proposons comme perspectives :

- L'implémentation des commandes présentées dans cette thèse dans le but de vérifier expérimentalement les résultats théoriques.
- La combinaison entre les différentes techniques associées à la commande vectorielle.
- Nous avons eu des résultats de simulations pour des changements climatiques et ces derniers confirment les performances souhaitées une bonne dynamique rapide.
- Etudier la machine en régime dégradé.

## Annexe

---

### Annexe

Paramètres de module solaire :

---

#### Caractéristique de module de 60W

❖ Puissance optimal	60w
❖ Courant de court-circuit	3,9A
❖ Tension a circuit ouvert	21,40V
❖ Tension optimale	17.20 V
❖ Température	25 C°

---

Paramètres de la machine Asynchrone Double alimentation (MADA) :

---

#### Caractéristique de la machine Asynchrone Double alimentation (MADA)

❖ Puissance nominale	$P_n = 4 \text{ kW}$
❖ Tension nominale	$V_n = 220/380 \text{ V}$
❖ Courant nominal	$I_n = 15/8.6 \text{ A}$
❖ Résistance du stator	$R_s = 1.2 \Omega$
❖ Résistance du rotor	$R_r = 1.8 \Omega$
❖ Inductance du stator	$L_s = 0.1554 \text{ H}$
❖ Vitesse nominale	$\omega_n = 1440 \text{ tr/min}$
❖ Inductance du rotor	$L_r = 0.1568 \text{ H}$
❖ Inductances mutuelle	$M = 0.15$
❖ Moment d'inertie	$J = 0.2 \text{ kg.m}^2$
❖ Coefficient de frottement	$f = 0.001 \text{ Nms/rd}$
❖ Fréquence nominale	$f = 50 \text{ Hz}$
❖ Nombre de paires de pôles	$p = 2$

---

## Annexe

---

Paramètres de la Pompe Centrifuge :

---

### *Caractéristique de la Pompe Centrifuge*

❖ <i>Vitesse</i>	<i>1450 tr/min</i>
❖ <i>Débit maximal, <math>Q_{max}</math></i>	<i>10.08 m<sup>3</sup>/h</i>
❖ <i>Relevage maximal, Hr</i>	<i>30 m</i>
❖ <i>Puissance moteur, P</i>	<i>4 kW</i>

---

## Bibliographie

---

### Bibliographie

- [1] A. Meflah, T. Allaoui, « Commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque au fil du soleil », Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 489 – 499, reçu le 03 Novembre 2011- accepté le 29 Septembre 2012.
- [2] N. DEBILI, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque », Thèse Magister UNIVERSITE CONSTANTINE I , Année 2014/2015.
- [3] M. Z. F.Z. Zerhoun, « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique », revue des énergies renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [4] A. Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [5] A. Hadj Arab , M. Benghanem et A. Gharbi , "Dimensionnement de Systemes de Pompage Photovoltaïque" .
- [6] Bessoltane Ismail et Hamit Issaka Doudoua "Etude technico-économique de système de pompage photovoltaïque, en comparaison aux autres productions d'eau, cas de la région de Mostaganem", MEMOIRE de MASTER, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019.
- [7] A. Betka « Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil », Thèse de Magister, Université de Biskra. 1997
- [8] A. FERRAI, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village » ; Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [9] Ministère de l'Énergie et des Mines « Guide des Energies Renouvelables », Edition 2007 Alger.
- [10] Nations Unies, commission économique pour l'Afrique, « le secteur des énergies renouvelables dans l'Afrique du nord » ; Septembre 2012 B.P. 2062 Rabat Riad, Maroc, Site web : <https://www.uneca.org>.
- [11] D. Kairous, « Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Thèse doctorate, l'Université d'Oran, Algeria 2013.
- [12] HAMDJ Abderrazzak, " Conception et dimensionnement d'un systeme Photovoltaïque pour habitation et pompage " , Memoire de master 2017 – 2018, Universite Mohamed Khider de Biskra.
- [13] Y. BENDAHA, Contribution à la commande avec et sans capteur mécanique d'un actionneur électrique, Thèse de Doctorat de l'université des sciences et de la technologie d'Oran, Algérie, Juillet 2013
-

## Bibliographie

---

- [14] Jean-Loup PRENSIER – Christophe DAUX, " La chaine d'énergie du pompage de l'eau", Edite le 17/05/2006
- [15] F.Labrique , G. Segulier, R. Baussiere«Les convertisseur de l'électronique de puissance, la conversion continu – alternatif », Tec. Doc. Paris 1995
- [16]K. EL-Melouani, «dimensionnement d'un hacheur survolteur» ; Application noté de polytech Clermont-Ferrand, France, 2010.
- [17]S.Makhloufi: « *Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes* » ; Thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [18][http://www.pompesetprocess.com/media/article/photo/lrg\\_2972\\_photo\\_url\\_2984.jpg](http://www.pompesetprocess.com/media/article/photo/lrg_2972_photo_url_2984.jpg) ? rand=416313161.
- [19] B. Youcef, « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation » , Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2014.
- [20] R. ROUABHI «Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée» Thèse de doctorat en Electrotechnique, L'UNIVERSITÉ BATNA 2, 01 / 12 / 2016
- [21] G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007
- [22] N. Akkari,« Commande adaptative de la machine asynchrone à double alimentation par des sources de tension», Thèse de magister de l'université de Batna, 2005.
- [23] B. BOUSSIALA, Commande vectorielle d'une machine asynchrone polyphasée alimentée par onduleur à trois niveaux. Application sur la machine héptaphasée, Mémoire de Magister de l'école nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2010.
- [24] Mohammed BELHADJ «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome».2008 Magister Universitaire De Bechar.
- [25] CH. BENNOUR, «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation», thèse de magister de l'université Mohamed Khider – Biskra, 19/11/2012.
- [26]S. BAZI, Contribution à la commande robuste d'une machine asynchrone par la technique PSO «Particle Swarm Optimisation», Mémoire de Magister de l'université de Batna, Algérie, mai 2009.
- [27]S.A. ARDJOUN, Commande en vitesse par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de Magister de l'université de Sidi Bel Abbes, Algérie, 2006.
-

## Bibliographie

---

- [28] T. ABDELAZIZ, Etude de différentes cascades de l'onduleur a sept niveaux à structure NPC. Application à la conduite d'une machine synchrone à aimants permanents, Thèse de Doctorat de l'école nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2004.
- [29] Boucheritte Wafa, « Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Option Énergies renouvelables, Université Mohamed Khider , Biskra, 2013.
- [30] K.Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des Énergies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 –462.
- [31] A. Sofiane, « Étude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sépic ». L'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.) années 2011.
- [32] L. Boudrahem et L. Djouadi « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Master, université de Bejaia 2012.
- [33] E.Koutoulik, K. Kazantzakis, Member, IEEE, and Nicholas C. Voulgaris « Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System», IEEE transactions on power electronics, 2001
- [34] R. Amrouche et S.Bedjou « Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master université de Bejaia 2016.
- [35] Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26, Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque, A. Hadj Arab 1, M. Benghanem 2 et A. Gharbi, 1 Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Bouzaréah, Alger.2 Faculté de Génie Electrique, U.S.T.H.B., B.P. 32, El-Alia, Bab-Ezzouar, Alger.
- [36] C. CABAL „Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008
- [37] Y. PANKOW 'Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. application au générateur photovoltaïque', thèse de doctorats de l'école nationale, 2004.
- [38] S.ABADA „ Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic“ Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.
- [39] MUKIND R . Patel, Wind and solar power systems, CRC Press, 1999.
- [40] S. DJERIOU, «Performanc eImprovement of Photovoltaic Pumping System», Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Université de M'Hamed BOUGARA – Boumerdes. 2018.
-

## Bibliographie

---

- [41] S. Drid, Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation théorie et expérimentation », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [42] H. Tamrabet, « Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone », Thèse de magister de l'université de Batna, 2006.
- [43] D.THOMAS, R. JIMMY, S.ERIC, S.BOCAR « Le pompage photovoltaïque 'manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens' ». Université d'Ottawa. Canada, 1998
- [44] BELOUNIS Ouassila, "Gestion optimale d'une MADA associée à une éolienne", thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2017.
- [45] A. BORNİ, « étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire » Thèse de Magister Université de Constantine années 2009.
- [45] LAFIA SEIDOU Imorou, " Etude et dimensionnement des systemes de pompage photovoltaïque dans les localites rurales du benin : cas de adjakpata ",Memoire pour l'obtention du diplome d'ingenieur 2ie avec le grade de master, Promotion [2015/2016] Institut International d'Ingenierie. BURKINA.
- [46] Amine BELAID, " Etude et conception d'une pompe Centrifuge ", memoire de Master 2017, Universite de Biskra.
- [47] S. Liu And R.A. Dougal, "dynamic multiphysics model for solar array", IEEE transactions on energy conversion, vol. 17, n°2, pp. 285 – 294, june 2002.
- [48] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm « etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des energies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [49] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [50] Rais Younes « modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque », mémoire de magister en génie électrique, école nationale polytechnique département d'électronique laboratoire des dispositifs de communication et de conversion photovoltaïque, 2012
- [51] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [52] M.Obeidi, « commande des hacheurs mppt par logique floue », mémoire de magister, école nationale polytechnique 2006.
-

## **Résumé :**

Cette thèse présente une application d'une nouvelle technique MPPT basée sur la méthode d'optimisation Golden-Section-Search dans les systèmes de pompage photovoltaïque au fil de soleil basant sur un moteur asynchrone à double alimentation (MADA) contrôlé par la commande vectorielle à base des régulateurs classique PI. Cette technique offre une réponse rapide et une absence de perturbation. Le transfert de puissance maximal du panneau photovoltaïque à la pompe centrifuge est assuré par une sélection optimale de la vitesse de fonctionnement du MADA sous changement d'irradiance et la température. Le logiciel Matlab / Simulink est utilisé pour simuler les performances de l'architecture proposée dans différentes conditions climatiques.

## **Mots clés**

Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), Générateur Photovoltaïque, MPPT, Convertisseur DC-DC, Golden section search GSS, pompe centrifuge.