

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud MAMMARI de TIZI-OUZOU**  
**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique**  
**Département d'Electrotechnique**



# MEMOIRE

**De fin d'étude**

**En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat**

**En Electrotechnique**

**Option : Machines Electriques**

***Thème :***

***Commande d'un Système de  
Pompage Photovoltaïque***

***Proposé et dirigé par :***

*Mr A. Diche*

*Mr K. Ghedamsi (Université de Bejaïa)*

***Etudié par :***

*M<sup>elle</sup> Kefsi Djamila*

*M<sup>elle</sup> Ouikene Fetta*

***Promotion : 2009- 2010***



**Remerciements**

# Remerciements

*Tout d'abord, nous tenons à remercier profondément le Dieu, le tout Puissant de nous avoir donné le courage, la patience, la volonté ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à Mr A. DICHE, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, ses directives et ses orientations concernant le travail proposé tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude.*

*Nos remerciements vont également à Mr K. GHEDAMSI (Université de Bejaïa), pour son aide précieuse à la réalisation de ce modeste travail.*

*Nous remercions les membres du jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.*

*Nous remercions profondément les étudiants du groupe Master 2 en ETH ainsi que les fonctionnaires de la bibliothèque des thèses.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*



**Dédicaces**



# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, mes sœurs*

*et mes frères*

*A mon ami Ferhat et sa famille*

*A mon binôme et sa famille*

*A la mémoire de ma grand mère*

*A ma très chère copine de chambre Lamia*

*A mes chères amies Thamazgha et Samira, Farida et Nadidor*

**Fetta**





# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*La mémoire de mon cher père et ma chère sœur, que DIEU les  
accueille en son vaste Paradis.*

*Ma très chère mère.*

*Ma sœur Ouiza.*

*Mes frères : Mahmoud et Marzouk,*

*Mon oncle Ramdane, sa femme Yamina et leur famille.*

*Mes amis (es).*

*Mes proches.*

*Mon binôme et sa famille.*

*Toute la communauté de l'Electrotechnique.*



*Djimy*



# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les éléments d'un système de captage photovoltaïque.....	4
I.2.1. Le panneau solaire.....	4
I.2.2. Le module photovoltaïque.....	4
➤ Caractéristiques d'un module.....	5
I.2.3. La cellule photovoltaïque.....	5
I.3. La Commande MPPT.....	7
I.3.1. Définition.....	7
I.3.2. Principe de la poursuite du point de puissance maximale.....	7
I.4. Les convertisseurs.....	7
I.4.1. Les convertisseurs DC/DC (Les hacheurs).....	7
a. Convertisseur Buck.....	8
b. Convertisseur Boost.....	8
c. Convertisseur Buck-Boost.....	9
I.5.2. Les convertisseurs DC/AC (Les onduleurs).....	9
I.5.2.1. Définition.....	9
I.5.2.2. Onduleur de tension.....	9
a. Commande d'un onduleur par MLI.....	10
b. Types de commande en MLI.....	10
➤ MLI sinus-triangle.....	11
I.6. Machine asynchrone.....	12
I.6.1. Définition.....	12

I.6.2. Constitution.....	12
➤ Stator.....	12
➤ Rotor.....	12
• Rotor bobiné.....	12
• Rotor à cage.....	12
I.6.3. Principe de fonctionnement.....	13
I.7. La pompe.....	13
I.7.1. Types de pompes.....	14
a. Les pompes volumétriques.....	14
b. Les pompes centrifuges.....	14
➤ Principe de fonctionnement.....	14
➤ Constitution.....	15
I.8. Conclusion.....	15
 <b>Chapitre II : Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque</b>	
II.1. Introduction.....	16
II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	16
II.3. Modélisation des convertisseurs.....	20
II.3.1. Modélisation du hacheur.....	20
➤ Modèle mathématique équivalent.....	20
II.3.2. Modélisation de l'onduleur.....	21
➤ Modèle de l'onduleur de tension.....	21
II.5. Modélisation de la machine asynchrone.....	26
II.5.1. Modèle de la machine asynchrone.....	26
a. Hypothèses simplificatrices.....	27

b. Conventions de signes.....	27
c. Mise en équation de la machine asynchrone.....	27
c.1. Equations électriques.....	28
• Phase statorique.....	28
• Phase rotorique.....	28
c.2. Equations magnétiques.....	28
c. 3. Equation mécanique.....	30
d. Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée.....	31
e. Equations de la machine asynchrone dans les axes d et q.....	32
e.1. Equations électriques.....	32
e.2. Equations magnétiques.....	33
e.3. Equation mécanique et couple électromagnétique.....	34
f. Choix de référentiel.....	34
➤ Référentiel immobile par rapport au champ tournant (lié au champ tournant).....	34
II.5.2. Commande vectorielle à flux rotorique orienté de la machine asynchrone.....	35
II.5.2.1. Orientation du flux rotorique.....	35
a. Orientation du flux rotorique.....	36
b. Loi des mailles au rotor.....	36
II.5.2.2. Estimation de $\Phi_{dr}$ .....	36
II.5.2.3. Estimation de $\omega_s$ et de $\theta_s$ .....	37
II.5.2.4. Loi des mailles pour $V_{ds}$ et $V_{qs}$ .....	38
a. loi des mailles pour $V_{ds}$ .....	38
b. loi des mailles pour $V_{qs}$ .....	39
c. Représentation des lois des mailles.....	39
II.5.2.5. Elaboration des lois de commande pour $V_{ds}$ et $V_{qs}$ .....	41

II.6. Modélisation de la pompe.....	43
➤ Caractéristique débit- vitesse.....	43
➤ Caractéristique couple – vitesse.....	43
➤ Caractéristique débit-hauteur.....	44
II.7. Conclusion.....	46

### **Chapitre III : Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque**

III.1. Introduction.....	47
III.2. Evaluation des besoins en eau.....	47
III.3. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.....	47
III.4. Détermination de l'énergie solaire disponible.....	49
III.5. Inclinaison du générateur photovoltaïque.....	49
III.6. Mois de dimensionnement.....	49
III.7. Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	50
III.8. Dimensionnement du moteur.....	51
III.9. Dimensionnement de la pompe.....	51
III.10. Dimensionnement des tuyauteries.....	52
III.11. Conclusion.....	53

### **Chapitre IV : Simulation du système de pompage photovoltaïque**

IV.1. Introduction.....	54
IV.2. Schéma du système global de simulation.....	55
IV.3. Résultats de simulation.....	56
IV.4. Interprétation des résultats.....	59
IV.5. Conclusion.....	60
Conclusion générale.....	61

# **Introduction Générale**

L'énergie est au centre de l'économie pour tous les pays et à la base de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire une demande toujours croissante. Les pays développés sont ainsi passés du bois au charbon, à des hydrocarbures plus avancés, à l'hydroélectricité puis, enfin, au nucléaire. Cependant, les réserves de combustibles fossiles et nucléaires sont limitées. De plus, l'utilisation des combustibles fossiles est responsable des pluies acides et du réchauffement de la planète, et l'exploitation de l'énergie nucléaire présente des risques d'accidents graves sans parler de ceux induits par la gestion des déchets résultants dont la dangerosité radioactive peut durer plusieurs milliers d'années [1].

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage [2].

La demande croissante d'eau dans les zones rurales et sites isolés a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme source d'énergie aux groupes moteur-pompes. En effet, la réalisation des systèmes de pompage autonomes constitue une solution pratique et économique aux problèmes de manque d'eau dans les régions désertiques.

Parmi les avantages importants de la conversion photovoltaïque, nous pouvons citer, la décentralisation de la production d'énergie pour de petites communautés très dispersées comme le prouve déjà, les pompes solaires dont le fonctionnement s'est révélé très acceptable et l'autonomie du système photovoltaïque, autonomie de lieu mais tout aussi importante est l'autonomie de fonctionnement.

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée. Car, il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Ajouter à cela, le rendement énergétique est meilleur quand il n'y a pas d'accumulateurs.

L'énergie fournie par le générateur photovoltaïque est une énergie chère malgré l'abaissement du coût du kilowatt-crête/heure. Il est donc nécessaire de faire fonctionner ces générateurs à leur puissance optimale. L'approche du problème consiste à intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique (hacheur) pour effectuer le transfert

optimal de puissance et améliorer les performances du système de pompage photovoltaïque. La commande du convertisseur se fait par la variation de son rapport cyclique  $\alpha$  [3].

Ce présent mémoire a porté sur la commande d'un système de pompage photovoltaïque, il est réparti en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré pour des généralités sur les sous-systèmes interconnectés constituant le système de pompage photovoltaïque, ils sont : le générateur photovoltaïque, l'hacheur adaptateur d'impédance (MPPT), l'onduleur de tension, le moteur asynchrone et la pompe centrifuge associée à une canalisation de refoulement.

La modélisation et la simulation des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque a fait l'objet du deuxième chapitre.

Le troisième chapitre concerne le dimensionnement du système.

Le dernier chapitre constitue la finalité de notre travail : la simulation du système complet.

Une conclusion générale clôture notre travail.



**Chapitre I**  
**Généralités sur le Système de Pompage**  
**Photovoltaïque**

### I.1. Introduction

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications les plus courantes de l'énergie solaire dans le monde. Des centaines d'unités de pompage photovoltaïque sont installées ou en voie de l'être en Afrique, plus spécialement dans la zone sahélienne, pour l'alimentation en eau potable des populations rurales, le cheptel, l'irrigation... etc.

Le pompage photovoltaïque est devenu de nos jours un enjeu majeur pour l'amélioration des conditions de vie et le développement socio-économique des communautés rurales [4].

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

La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée.

Dans ce dernier cas, l'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.

Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie.

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement [2].

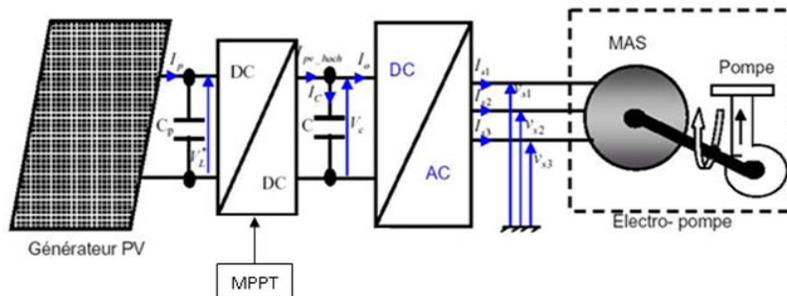


Figure (I.1) : Schéma d'un système de pompage photovoltaïque [5].

**I.2. Les éléments d'un système de captage photovoltaïque**

**I.2.1. Le panneau solaire**

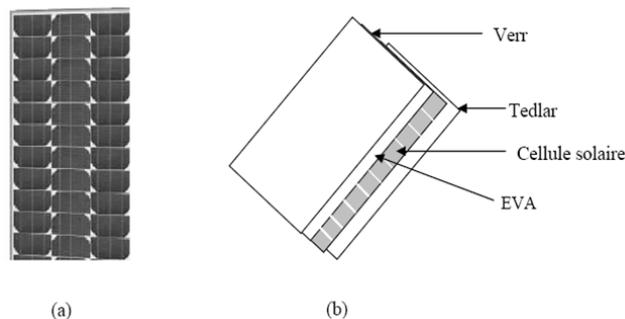
Le panneau solaire ou (générateur photovoltaïque) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le panneau solaire avec un angle d'inclinaison spécifique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



**Figure (I-2) : Panneau solaire [6].**

**I.2.2. Le module photovoltaïque**

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I-3-a). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) figure (I-3-b) et protégé sur la face avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la face arrière d'une ou plusieurs couches de polyéthylène.



**Figure (I-3) : Module photovoltaïque [6].**

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20%.

➤ **Caractéristiques d'un module**

- La puissance de crête,  $P_c$  : Puissance électrique maximale que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide,  $V_{co}$  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- Courant de court-circuit,  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- Point de fonctionnement optimum,  $(U_m, I_m)$  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m \cdot I_m$ .
- Rendement : Rapport entre la puissance électrique optimale et la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$ .

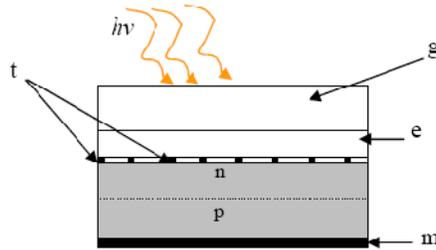
### **I.2.3. la cellule photovoltaïque**

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

Dans la figure (I-4) un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire. Elle se compose d'un abri de verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière-contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident.

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande gap ( $E_g$ ), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.



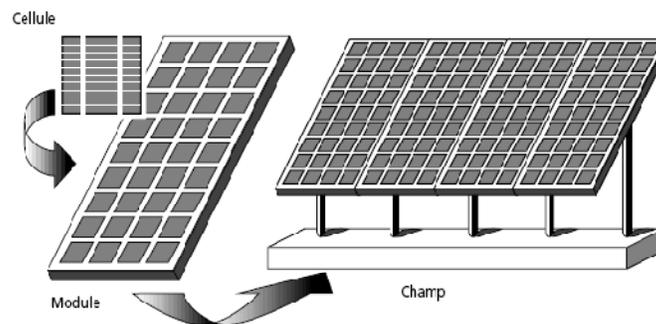
**Figure (I-4):** Présentation schématique d'une cellule solaire [6].

Dans une cellule PV, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction p-n, et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type-n et type-p à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif  $I$  traverse de n vers p.

La puissance électrique produit par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt.

Le rendement de conversion des cellules commercialisées atteint actuellement 15 à 19 % pour le silicium monocristallin, 12 à 16 % pour le silicium polycristallin, 7 à 9% pour le silicium amorphe.

Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules photovoltaïques.



**Figure (I-5):** Composantes d'un panneau photovoltaïque [2].

### I.3. La Commande MPPT

#### I.3.1. Définition

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracking est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore les générateurs éoliens [7].

#### I.3.2. Principe de la poursuite du point de puissance maximale

La technique de poursuite du point de puissance maximale délivrée par un générateur photovoltaïque est basée sur l'introduction d'un convertisseur continu/continu (hacheur) entre le générateur et la batterie de stockage ou entre le générateur et la charge directement.

L'utilisation d'un convertisseur autorise une application de grande puissance, d'où l'intérêt d'un système de poursuite du point de puissance maximale, qui s'articule autour d'un étage de commande dédié. Le principe de la commande est de faire varier la valeur du rapport cyclique en fonction du résultat de l'algorithme de commande, de manière à forcer le système à fonctionner au point de puissance maximale.

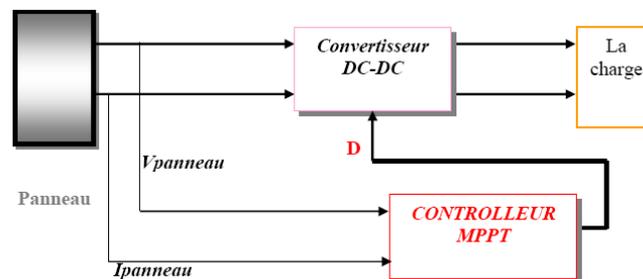


Figure (I-6): Schéma de principe de la commande MPPT [1].

### I.4. Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit en tension continue différente, soit en tension alternative [8].

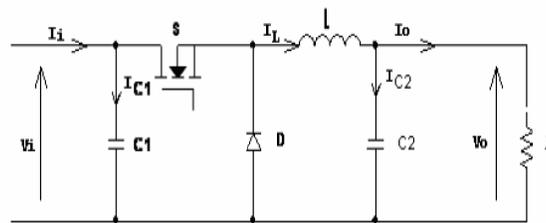
#### 1.4.1. Les convertisseurs DC/DC (Les hacheurs)

Dans cette partie nous présentons le principe des trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs 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 [1].

**a. Convertisseur Buck**

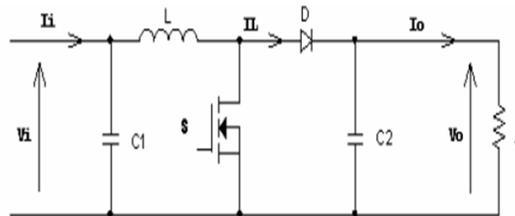
La figure (I-7) donne le circuit électrique d'un convertisseur Buck. Le transistor MOSFET travaille en régime de commutation avec une période . Dans le premier laps de temps le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance L se charge d'énergie avec augmentation du courant . Dans le deuxième laps de temps l'inductance L libère cette énergie à la charge Z avec une diminution de courant . Alors le circuit est décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent à chaque état du transistor S.



**Figure (I-7) :** Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Buck [1].

**b. Convertisseur Boost**

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élevateur de tension. Le schéma de la figure (I-8) représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps , 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 de la première période. Ensuite, le transistor S s'ouvre et l'inductance L s'opposant à la diminution de courant , génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D.



**Figure (I-8) :** Circuit électrique du convertisseur Boost [1].

**c. Convertisseur Buck-Boost**

Le convertisseur Buck-Boost combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il est utilisé comme un transformateur idéal qui pourrait s'appliquer à n'importe quelle tension d'entrée afin d'obtenir la tension de sortie désirée.

**I.5.2. Les convertisseurs DC/AC (Les onduleurs)****I.5.2.1. Définition**

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de l'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative. Comme un pont redresseur à thyristors, un onduleur est réversible, il permet le transfert de puissance de l'alternatif vers le continu. Mais le sens normal de transfert est du continu vers l'alternatif, comme c'est de l'alternatif vers le continu pour un redresseur [9].

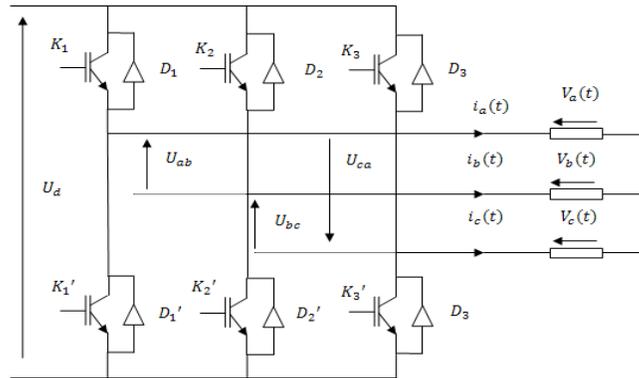
On distingue deux grands types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension, alimentés par une source de tension continue,
- Les onduleurs de courant, alimentés par une source de courant continu [10].

**I.5.2.2. Onduleur de tension**

Comme le montre la figure (I-9), l'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture ; ce sont des transistors de type IGBT auxquels sont placés des diodes en anti-parallèle. L'onduleur est alors constitué de trois bras, dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire [11]. Les séquences de commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commande en MLI « **M**odulation de **L**argeur d'**I**mpulsion »).

La structure de l'onduleur de tension est représentée en figure (I-9).



**Figure (I-9) :** Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé.

**a. Commande d'un onduleur par MLI**

Il s'agit d'un mode de commande particulier des onduleurs. Son principe est basé sur le découpage d'une tension  $v(t)$ , par action sur les commutateurs de l'onduleur, en plusieurs créneaux de largeurs différentes (**M**odulation de **L**argeur d'**I**mpulsions). L'opération a un double but :

- Modifier le contenu harmonique de la tension en conservant sa période, de façon à repousser ses harmoniques vers les rangs élevés, ainsi le filtrage de la tension se trouvera facilité ;
- Permettre le réglage de la valeur efficace du fondamental de la tension  $v(t)$ , c'est indispensable dans le cas où l'on veut faire fonctionner à flux constant un moteur à vitesse variable [12].

**b. Types de commande en MLI**

Un nombre important de stratégie de commande en MLI, suivant le choix des instants de commutations des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture, existe et repose sur un compromis entre :

- Un spectre d'harmoniques minimal,
- Une plage de variation maximale de l'amplitude de la sortie,
- Une facilité d'implantation et de mise au point,
- Un coût abordable,

- Une facilité de réglage d'amplitude et de la fréquence des ondes de sortie.

Il est possible de classer les modes de commande selon quatre catégories principales :

- Modulation en temps réel : les commutations de l'onduleur sont définies par les intersections, en temps réel, de deux ou trois signaux.
- Modélisation calculée : les instants de commutation sont préalablement calculés sur la base d'un critère d'optimisation puis mis en mémoire. La lecture de ces instants mémorisés à l'aide d'un microprocesseur assure la génération des signaux de commande des interrupteurs.
- Modulation par comparaison : le courant de sortie est comparé à une consigne sinusoïdale, et l'écart détermine les commutations de l'onduleur.
- Modulation vectorielle : c'est une variante de la modulation calculée, particulière au triphasé. Elle est généralement engendrée de manière numérique à l'aide d'un système à microprocesseur et consiste à faire varier l'état des interrupteurs de manière à avoir un système de tension dont les composantes de Clarke se rapprochent au mieux de celles du système que l'on veut obtenir à la sortie [12].

Dans la suite de cette étude, nous nous intéresserons à la commande MLI sinus-triangle (pour la simulation de l'onduleur).

#### ➤ **MLI sinus-triangle**

La MLI sinus-triangle se réalise par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence sinusoïdale) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante.

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la fréquence de la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées d'un angle égal à  $\frac{2\pi}{3}$  rad [13].

**I.6. Machine asynchrone****I.6.1. Définition**

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. La machine qui nous intéresse dans cette partie est plus précisément une machine à induction. Il existe en effet théoriquement d'autres types de machines asynchrones. Une machine à induction est une machine asynchrone dont le circuit magnétique est associé à deux, ou plus de deux, circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique [14].

**I.6.2. Constitution****➤ Stator**

Le stator comporte une carcasse en fonte ou en tôle d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles. Le stator d'une machine asynchrone triphasée porte un enroulement triphasé réparti dans des encoches du circuit magnétique. Il est généralement couplé en étoile.

**➤ Rotor**

Deux grandes catégories de machines asynchrones apparaissent suivant la structure de leur rotor qui peut être bobiné ou à cage. Pour ces deux variantes, le circuit magnétique du rotor est un assemblage de tôles ferromagnétiques muni d'encoches.

**• Rotor bobiné**

Dans ce cas, les encoches présentées à la périphérie du rotor contiennent un enroulement similaire à celui du stator. Le bobinage rotorique est toujours couplé en étoile et il est accessible de l'extérieur grâce à un système de bagues et de balais, ce qui permet soit de le court-circuiter, soit de le relier à un circuit permettant d'agir sur les caractéristiques de la machine dans certains fonctionnements.

**• Rotor à cage**

Dans ce cas, les encoches contiennent des barres reliées aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit. L'ensemble forme une cage d'écureuil.

**I.6.3. Principe de fonctionnement**

Si l'on remplace le rotor d'une machine synchrone par un cylindre conducteur mobile autour de son axe, on constate qu'il se met en rotation à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme. Il tourne dans un sens lorsque le stator est alimenté par un système de tensions triphasé équilibré direct, en sens inverse si on intervertit deux phases (système de tensions triphasé équilibré inverse).

Les courants de Foucault et la loi de Lenz permettent d'interpréter ce phénomène.

Le système des courants triphasé statorique donne naissance à un champ tournant à la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ .

Ce champ magnétique induit dans le cylindre rotorique des courants de Foucault dont l'effet, d'après la loi de Lenz, doit s'opposer à la rotation du champ d'origine statorique par rapport au rotor.

Le cylindre se met donc en rotation, sa vitesse tendant vers la vitesse de synchronisme sans jamais l'atteindre. En effet, s'il tourne à la vitesse de synchronisme il ne «voit» plus de variation de champ, donc il n'y a plus de courant induit.

Plus de courants induits, plus de couple... et le rotor a tendance à ralentir, donc il voit à nouveau un champ variable qui crée des courants induits, donc un couple moteur, etc.

Un équilibre dynamique s'établit et le rotor tourne à la vitesse  $\Omega < \Omega_s$ .

De la même façon, si on l'entraîne à une vitesse supérieure à  $\Omega_s$ , le stator tend à ramener sa vitesse à la vitesse de synchronisme, le rotor est donc freiné, c'est un fonctionnement en génératrice.

De telles machines, qui ne développent un couple que pour des vitesses différentes de la vitesse de synchronisme, sont dites machines asynchrones ou à induction [15].

**I.7. La pompe**

Une pompe est un appareil transformant une énergie mécanique (couple et vitesse de rotation de l'arbre), en énergie hydraulique (débit et pression). Elle est utilisée dans des forages et choisie selon la hauteur que devra fournir la pompe pour garantir le fonctionnement [16].

**I.7.1. Types de pompes**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement [2].

**a. Les pompes volumétriques**

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

**b. Les pompes centrifuges**

Les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe. Sur elles que se porte notre étude.

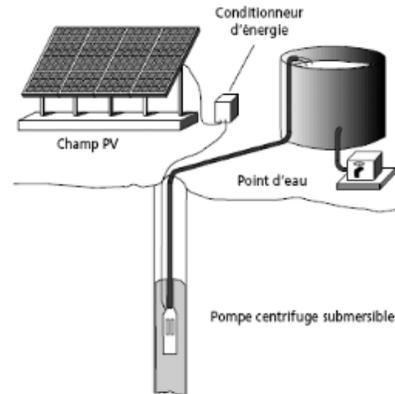
**➤ Principe de fonctionnement**

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussé vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (*HMT*) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur.

On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).

Ci-dessous est donnée l'illustration d'une pompe centrifuge.



**Figure (1-10):** Exemple d'installation avec une pompe centrifuge [2].

### ➤ Constitution

Une pompe centrifuge est constituée par :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe.
- Un distributeur dans l'axe de la roue.
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale.

### **I.8. Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les éléments constituant un système photovoltaïque permettant le pompage de l'eau avec de l'énergie solaire.



**Chapitre II**  
**Modélisation d'un Système de Pompage**  
**Photovoltaïque**

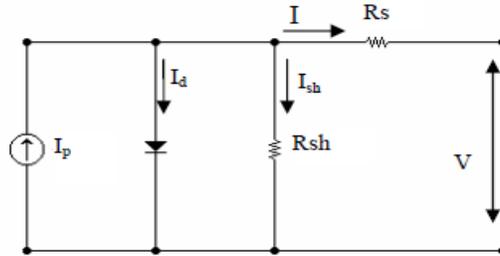
## II.1. Introduction

La modélisation est une étape fondamentale dans l'analyse d'un dispositif, elle consiste à décrire mathématiquement un processus technique d'un système à étudier.

## II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé dans la littérature, est représenté sur la figure (II-1).

Ce modèle sert à étudier les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du générateur photovoltaïque ainsi que son comportement en fonction des paramètres solaires à savoir l'éclairement dans le plan des panneaux ( $E_s$ ) et la température de jonction ( $T_j$ ) [17].



**Figure (II-1) :** Schéma équivalent du modèle à une diode [19].

Dans la figure (I-1), la résistance  $R_{sh}$  caractérise le courant de fuite au niveau de la jonction et la résistance  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion [18].

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff comme suivant:

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

avec:

$I$ : Le courant délivré par le module.

$I_d$ : Courant de diode.

$I_{sh}$ : Le courant shunt.

Le courant  $I_p$  dépend directement du rayonnement solaire  $E_s$  et de la température de la cellule  $T_j$ , il est donné par la relation suivante [19]:

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

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

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

où :

$T_a$  : Température ambiante.

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

Le courant de la diode est donné par :

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

avec :

$I_{sat}$  : Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température ; il est donné par l'expression suivante :

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

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

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

Le courant du module I est donné par :

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

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

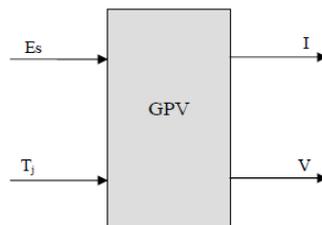
Le schéma bloc du générateur photovoltaïque est présenté sur la figure (II-2), avec :

- Les deux variables d'entrées sont :

$E_s$  ensoleillement dans le plan des panneaux ( $W/m^2$ ) et  $T_j$  température de jonction des cellules ( $^{\circ}C$ ).

- Les deux variables de sortie sont :

I courant fourni par le GPV (A) et V tension aux bornes du GPV (V).



**Figure (II-2) :** Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

Les résultats de simulation sont représentés par les courbes (II-3) et (II-4):

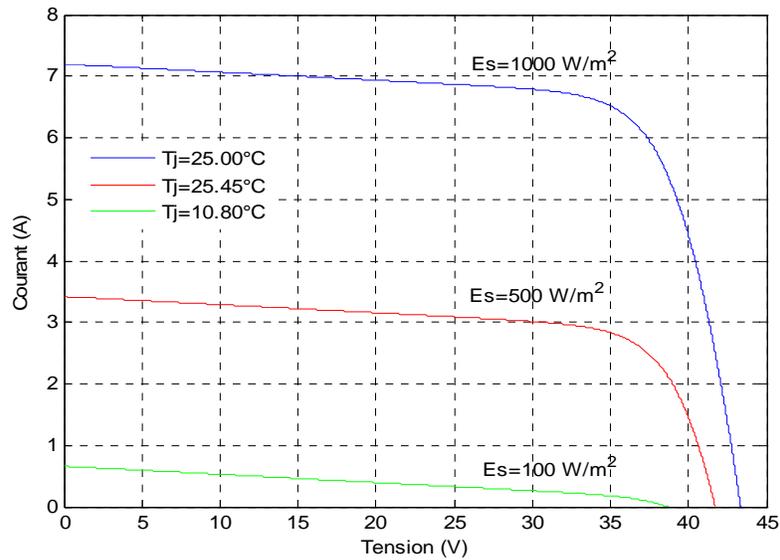


Figure (II-3) : L'influence de  $E_s$  et  $T_j$  sur la caractéristique (I-V).

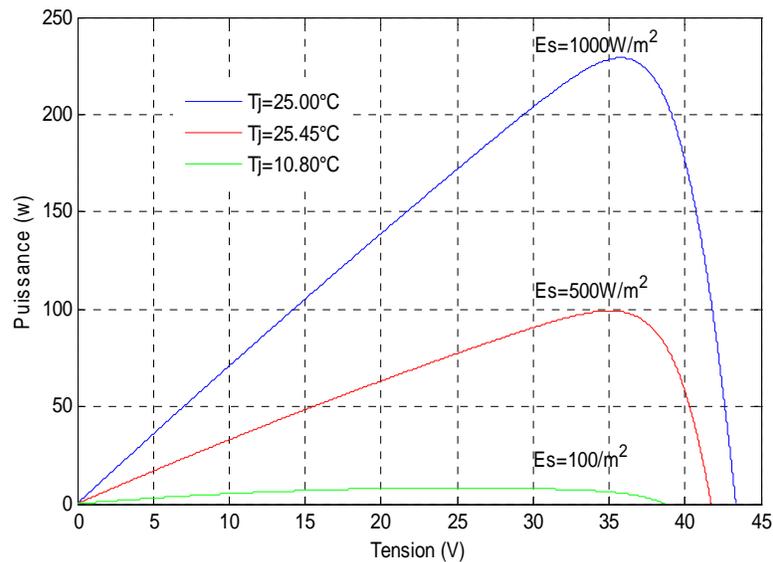


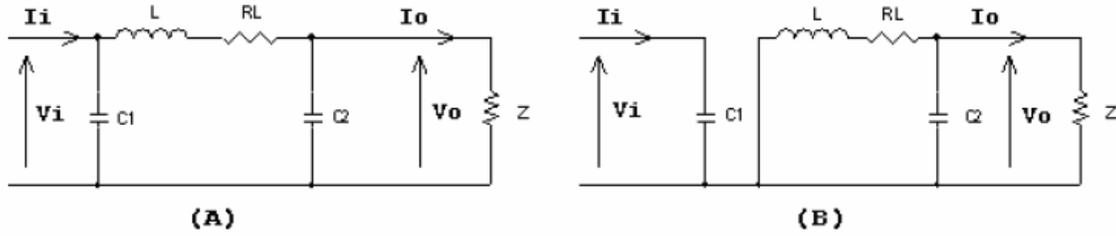
Figure (II-4) : L'influence de  $E_s$  et  $T_j$  sur la caractéristique (P-V).

II.3. Modélisation des convertisseurs

II.3.1. Modélisation du hacheur

➤ **Modèle mathématique équivalent**

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (S fermé, et S ouvert), ensuite donner son modèle approximé [1].



**Figure (II-5) :** Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : S fermé, (B) : S ouvert [1].

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits précédents, on obtient les systèmes d'équations suivantes :

Pour la première période  $\alpha T_s$  :

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o - R_L i_L \end{cases} \quad (II-9)$$

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

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - R_L i_L \end{cases} \quad (II-10)$$

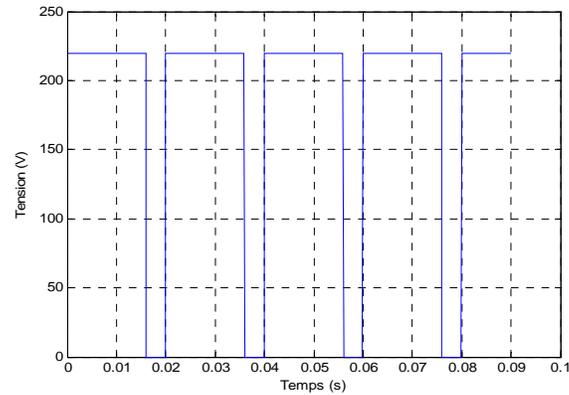


Figure (II-6) : La tension à la sortie du hacheur.

### II.3.2. Modélisation de l'onduleur

#### ➤ Modèle de l'onduleur de tension

Pour simplifier l'étude, on suppose que :

- 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 [12].
- Les interrupteurs sont totalement commandables.
- Pour éviter le court-circuit d'un bras et éviter l'ouverture d'une phase d'une charge inductive ( $F_1 = 1 - F'_1$ ).

En s'appuyant sur ces hypothèses, on aboutit au schéma simplifié de la figure (II-7).

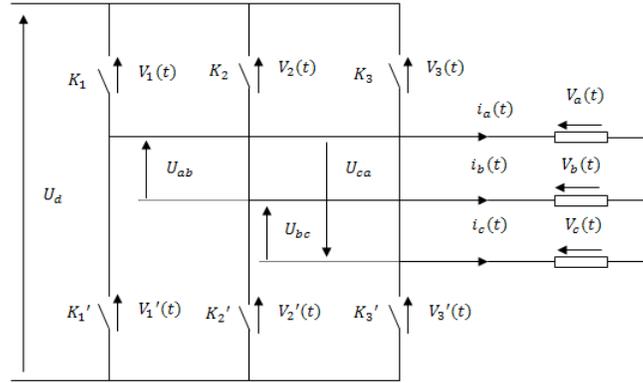


Figure (II-7) : Modèle simplifié de l'onduleur triphasé.

$v_a(t), v_b(t), v_c(t)$  : Les tensions simples délivrées par l'onduleur.

$U_{ab}(t), U_{bc}(t), U_{ca}(t)$  : Les tensions composées délivrées par l'onduleur.

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (II-11)$$

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

$$\begin{cases} v_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ v_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ v_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (II-12)$$

L'hypothèse d'un système de tension équilibré implique :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (II-13)$$

Les interrupteurs  $K_j, K_j'(j = 1,2,3)$  sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

On associe à chaque bras de l'onduleur une fonction logique de connexion  $F_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) correspondant aux signaux de commande des interrupteurs.

$F_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) est définie comme suit :

$$F_j = \begin{cases} 1 & \text{si } K_j \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } K_j \text{ ouvert} \end{cases} \quad (j = 1,2,3) \quad (\text{II-14})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_1 = 1 \Rightarrow V_1 = 0 \\ \text{si } F_1 = 0 \Rightarrow V_1 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_1 = -(F_1 - 1)U_f \quad (\text{II-15})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_2 = 1 \Rightarrow V_2 = 0 \\ \text{si } F_2 = 0 \Rightarrow V_2 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_2 = -(F_2 - 1)U_f \quad (\text{II-16})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_3 = 1 \Rightarrow V_3 = 0 \\ \text{si } F_3 = 0 \Rightarrow V_3 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_3 = -(F_3 - 1)U_f \quad (\text{II-17})$$

Exprimons les tensions composées en fonction des états logiques des interrupteurs :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_2 - V_1 \Rightarrow U_{ab} = (F_1 - F_2)U_f \\ U_{bc} = V_3 - V_2 \Rightarrow U_{bc} = (F_2 - F_3)U_f \\ U_{ca} = V_1 - V_3 \Rightarrow U_{ca} = (F_3 - F_1)U_f \end{cases} \quad (\text{II-18})$$

Ce qui donne la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = U_f \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-19})$$

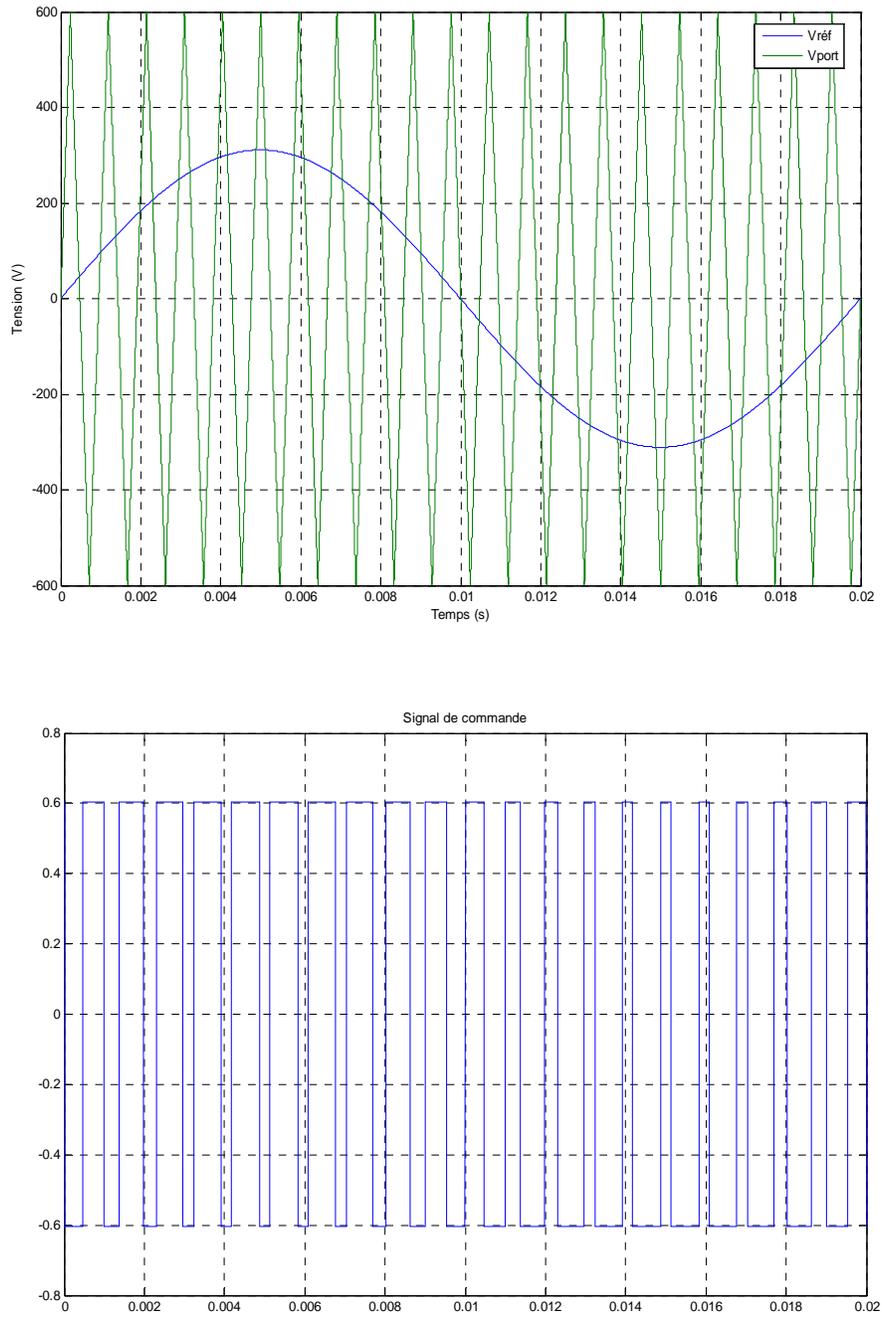
L'expression (II-12) sous forme matricielle s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

En remplaçant (II-19) dans (II-20), on aura le système matriciel (II-21) comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_f \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

La figure (II-8) présente la stratégie de commande à modulation de largeur d'impulsion.



**Figure (II-8) :** Schéma de principe de la commande MLI sinusoïdale

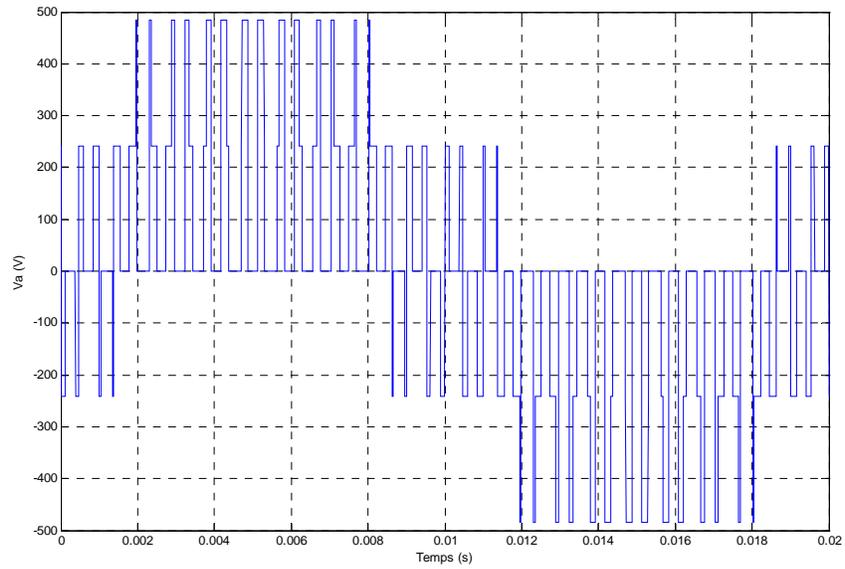


Figure (II-9) : La tension à la sortie de l'onduleur.

## II.5. Modélisation de la machine asynchrone

### II.5.1. Modèle de la machine asynchrone

La représentation schématique de la machine asynchrone dans l'espace électrique est donnée par la figure (II-10).

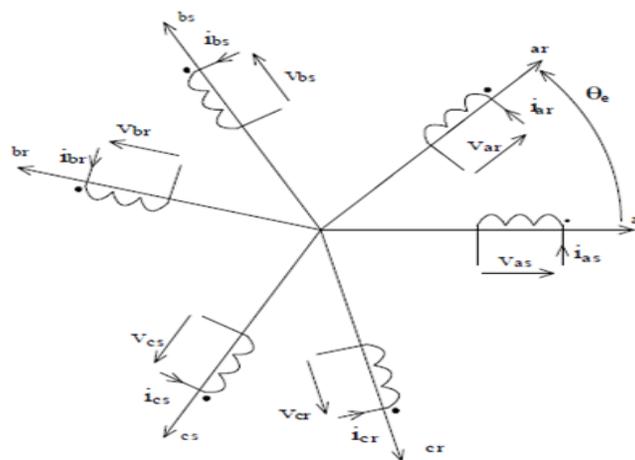


Figure (II-10) : Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasée.

**a. Hypothèses simplificatrices**

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

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteur, induit, amortisseurs) sont parcourus par des courants et en outre on suppose que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- La force magnétomotrice créée par chaque phase du stator et du rotor est à distribution spatiale (le long de l'entrefer) sinusoïdale (on ne considère que le premier harmonique), les inductances propres sont, par conséquent, constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales des angles que font les axes magnétiques ; l'effet dû à la présence d'encoches est négligé [20].

**b. Conventions de signes**

Les machines asynchrones sont surtout utilisées comme moteurs, on adoptera les conventions de signes suivantes :

- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.
- Le stator est considéré comme générateur, le rotor comme récepteur.
- Les angles et les vitesses de rotation sont comptés positivement dans le sens trigonométrique [20].

**c. Mise en équation de la machine asynchrone**

Le comportement de la machine peut être traduit par trois types de phénomènes régis par leurs équations respectives : équation électrique ; magnétique et mécanique [21].

### c.1. Equations électriques

Soient  $(V_{sabc})$ ,  $(i_{sabc})$  et  $(\Phi_{sabc})$ , respectivement, le vecteur tension, courant et flux des trois phases statoriques de la machine.

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-22})$$

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

On définit les tensions statoriques et rotoriques comme suit :

- **Phase statorique**

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

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

$R_s$  : Résistance de la phase du stator.

- **Phase rotorique**

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

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

$R_r$  : Résistance de la phase du rotor.

### c.2. Equations magnétiques

Les hypothèses citées précédemment, entraînent les relations suivantes entre les flux  $(\Phi)$  et les courants  $(i)$  des phases statorique et rotorique.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-25})$$

avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{as} & M_s \\ M_s & M_s & L_{as} \end{bmatrix} \quad (\text{II-26})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_r & M_r \\ M_r & L_{ar} & M_r \\ M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (\text{II-27})$$

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-28})$$

$$= M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos \alpha & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II-29})$$

Avec :  $\alpha = \omega t$

On aura finalement les équations magnétiques sous forme matricielle des phases statorique et rotorique comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & L_{as} & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_{as} & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_{ar} & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_{ar} & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-30})$$

avec :

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

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

$M_s$  : Inductance mutuelle d'une phase statorique.

$M_r$  : Inductance mutuelle d'une phase rotorique.

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

A partir des relations (II-23) ; (II-24) et (II-25) les équations électriques deviennent :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \} \quad (\text{II-31})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \} \quad (\text{II-32})$$

### c. 3. Equation mécanique

L'équation mécanique régissant la vitesse de rotation  $\omega$  de la machine est donnée par :

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f \cdot \omega \quad (\text{II-33})$$

avec :

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

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

$C_r$  : Couple résistant de la charge.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

Le couple électromagnétique est la dérivée partielle de la coénergie magnétique par rapport à la position. Sachant que les inductances propres sont de dérivées nulles, il ne reste que le terme relatif aux dérivées des inductances mutuelles. Son expression est donnée par :

$$C_{em} = \frac{1}{2} p [i_{sabc}]^t \frac{\partial}{\partial \theta} [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad (\text{II-34})$$

avec p est le nombre de paires de pôles.

La résolution des systèmes d'équations (II-31), (II-32) et (II-33) du modèle mathématique de la machine asynchrone triphasée est difficile même avec l'utilisation de l'outil numérique.

Pour faciliter le processus de résolution l'utilisation de la transformation de Park s'impose.

#### d. Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d, q. L'angle  $\theta_s$  intervient pour les grandeurs du stator et l'angle  $\theta_r$  pour les grandeurs du rotor.

La matrice de Park transforme un système de grandeurs triphasées équilibré en un système de grandeurs diphasées équivalent d'axe (d, q).

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

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II-35})$$

où : d, q, o sont respectivement des composantes directe, quadratique et homopolaire.

La matrice de Park de changement de base [P ( $\theta$ )] est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-36})$$

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

Le choix du coefficient  $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right)$  repose sur l'invariance de la puissance instantanée dans les deux systèmes de représentation. La transformation de Park est appliquée de manière identique aux tensions, aux courants et aux flux.

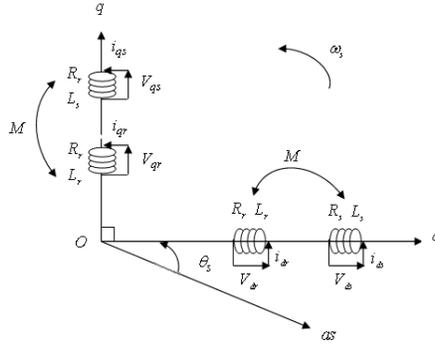
La matrice de passage inverse est donnée par :

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

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

**e. Equations de la machine asynchrone dans les axes d et q**

La représentation de la machine dans les axes d et q est donnée par la figure (II-11).



**Figure (II-11) : Modèle biphasé de Park de la machine asynchrone.**

**e.1. Equations électriques**

En appliquant la transformée de Park aux équations électriques (II-31) et (II-32) citées précédemment on aura :

$$V_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{qs} + R_s i_{ds} \quad (\text{II-38})$$

$$V_{qs} = \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{ds} + R_s i_{qs} \quad (\text{II-39})$$

$$V_{dr} = \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{qr} + R_r i_{dr} \quad (\text{II-40})$$

$$V_{qr} = \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{dr} + R_r i_{qr} \quad (\text{II-41})$$

**e.2. Equations magnétiques**

Les équations magnétiques deviennent :

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (\text{II-42})$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (\text{II-43})$$

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II-44})$$

$$\Phi_{qr} = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{II-45})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-46})$$

Avec :

$L_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r$  : Inductance cyclique rotorique.

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

Le modèle peut être complété par son équation mécanique donnant l'évolution de la vitesse en fonction du couple électromagnétique  $C_{em}$  et la charge de la machine représentée par son couple résistant  $C_r$  sur l'arbre.

### e.3. Equation mécanique et couple électromagnétique

L'équation mécanique reste inchangée dans le repère (d,q). Par contre, le couple électromagnétique est concerné par la transformation. En dérivant les inductances mutuelles et en appliquant la transformée de Park pour l'expression (II-34), on aura l'expression suivante :

$$C_{em} = p \frac{3}{2} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II-47})$$

### f. Choix de référentiel

Trois types de référentiel (référentiel lié au stator, lié au rotor et lié au champ tournant) sont intéressants en pratique. Le choix se fait en fonction du problème à étudier. Notre étude se base sur le référentiel lié au champ tournant.

#### ➤ Référentiel immobile par rapport au champ tournant (lié au champ tournant)

Ce référentiel est lié au champ tournant, ce choix est intéressant lors de l'étude des exemples où la fréquence d'alimentation est constante. Il est aussi utilisé dans l'alimentation à fréquence variable, lorsqu'on désire étudier sa fonction de transfert vis-à-vis des petites perturbations. Il se traduit par les conditions suivantes :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II-48})$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r = p\Omega \quad (\text{II-49})$$

Les équations électriques deviennent :

$$V_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} + R_s \cdot i_{ds} \quad (\text{II-50})$$

$$V_{qs} = \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II-51})$$

$$0 = \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} + R_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II-52})$$

$$0 = \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \psi_{dr} + R_r \cdot i_{qr} \quad (\text{II-53})$$

Les équations magnétiques et l'équation du couple électromagnétique restent inchangées dans ce référentiel. Donc ce référentiel est le seul qui ne traduit pas les simplifications dans la formulation des équations.

### II.5.2. Commande vectorielle à flux rotorique orienté de la machine asynchrone

La principale difficulté qu'on rencontre dans la commande de la machine asynchrone réside dans l'absence totale du découplage entre le flux et le couple. Ces deux grandeurs dépendent toutes du courant statorique. Pour ce faire, ce découplage entre le couple et le flux, la commande classique sert à contrôler : le couple par le glissement et le flux par le rapport tension/fréquence  $\frac{U}{f}$  (constant). Mais, et à cause du manque d'information sur le rapport  $\frac{U}{f}$ , ce type de commande a montré ses limites en matière de qualité de ses performances. En ce temps, le principe de découplage n'a pas été encore développé, l'apparition d'une nouvelle technique dite 'commande vectorielle' ou 'commande par flux orienté' a rendu la commande de la machine à courant continu [22].

#### II.5.2.1. Orientation du flux rotorique

Plusieurs stratégies sont envisageables. On va décrire ici une commande à flux rotorique orienté [23].

Reprenons l'expression du couple électromagnétique faisant intervenir les flux rotoriques

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II-54})$$

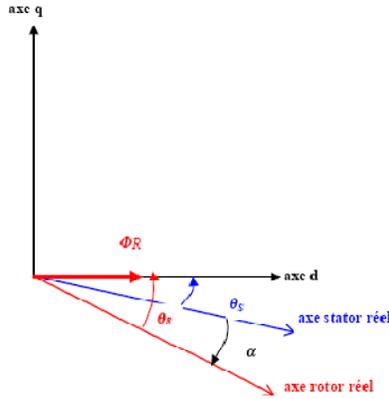
Avoir comme objectif d'orienter le flux signifie qu'on souhaite qu'il n'ait qu'une composante sur l'axe **d** par exemple.

On aura donc comme objectif d'annuler  $\Phi_{qr}$ . C'est bien sûr le rôle de la commande à concevoir.

Le couple se réduira alors à :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (\text{II-55})$$

La stratégie consistera donc à contrôler de façon indépendante le terme de flux et le terme de courant pour imposer un couple.



**Figure (II-12) :** Orientation du flux rotorique sur l'axe 'd' [23].

Cela suppose donc de maîtriser également l'angle  $\theta_s$ . L'angle  $a$  sera lui, donné par un capteur de position (codeur incrémental).

Rappelons les équations utilisables pour la commande :

#### a. Orientation du flux rotorique

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II-56})$$

$$0 = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{II-57})$$

#### b. Loi des mailles au rotor

$$0 = \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{qr} + R_r \cdot i_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \quad (\text{II-58})$$

$$0 = \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{dr} + R_r \cdot i_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \omega_r \cdot \Phi_{dr} \quad (\text{II-59})$$

car :  $\Phi_{qr} = 0$

#### II.5.2.2. Estimation de $\Phi_{dr}$

Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques, elles, ne le sont pas, il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statoriques.

$$\text{A partir de : } \Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II-60})$$

$$\text{et } 0 = \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II-61})$$

on obtient

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} - \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{dr} \quad (\text{II-62})$$

$$\text{Soit : } \Phi_{dr} + \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} \quad (\text{II-63})$$

L'équation (II-62) peut être réécrite en utilisant la notation de Laplace :  $s = \frac{d}{dt}$

$$\Phi_{dr} \left( 1 + \frac{L_r}{R_r} s \right) = M \cdot i_{ds} \quad (\text{II-64})$$

où encore en posant:

$$\frac{L_r}{R_r} = \tau_r, \quad \Phi_{dr}(1 + \tau_r s) = M \cdot i_{ds} \quad (\text{II-65})$$

$$\Phi_{dr-est} = \frac{M}{(1 + \tau_r s)} i_{ds} \quad (\text{II-66})$$

Le flux  $\Phi_{dr}$  peut être estimé ( $\Phi_{dr-est}$ ) à partir du courant  $i_{ds}$  grandeur statorique accessible à partir de la mesure des courants réels statoriques sous réserve de la réalisation de la transformation de Park.

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (\text{II-67})$$

### II.5.2.3. Estimation de $\omega_s$ et de $\theta_s$

L'estimation du flux sera réalisable sous réserve que l'on puisse faire la transformation de Park, ce qui suppose la connaissance de l'angle  $\theta_s$ .

$$\text{A partir de : } 0 = \omega_r \cdot \Phi_{dr} + R_r \cdot i_{qr} \quad \text{et de} \quad 0 = L_r \cdot i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{II-68})$$

$$\text{on tire : } \omega_r = -\frac{R_r i_{qr}}{\Phi_{dr}} \quad (\text{II-69})$$

$$\omega_{r-est} = \frac{M}{\Phi_{dr-est}} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{qs}, \quad \theta_{r-est} = \int \frac{M}{\Phi_{dr-est}} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{qs} dt + \theta_{r0} \quad \text{et} \quad \theta_{s-est} = \theta_{r-est} + \alpha \quad (\text{II-70})$$

$\theta_s$  sera donc estimé ( $\theta_{s-est}$ ) à partir de la mesure de  $\alpha$  (codeur incrémental), et du courant  $i_{qs}$  grandeur statorique accessible à partir de la mesure des courants réels statoriques.

**II.5.2.4. Loi des mailles pour  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$**

**a. loi des mailles pour  $V_{ds}$**

Reprenons la loi des mailles statoriques :

$$V_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} + R_s \cdot i_{ds} \quad (\text{II-71})$$

Nous allons exprimer cette tension en fonction des deux grandeurs utiles à la maîtrise du couple :

$$\Phi_{dr} i_{ds} = \frac{(1+\tau_r s)}{M} \quad (\text{II-72})$$

et

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (\text{II-73})$$

A partir de  $\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr}$  (II-74)

on tire  $i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\Phi_{dr} - M \cdot i_{ds})$  (II-75)

soit :

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} - M \cdot i_{ds}) = \left( L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \quad (\text{II-76})$$

$$\Phi_{ds} = L_s \left( 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \right) i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \quad (\text{II-77})$$

$$\Phi_{ds} = \sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \quad (\text{II-78})$$

Où :  $\sigma$  est le coefficient de dispersion de BLONDEL.

De la même façon, il faut exprimer  $\Phi_{qs}$  :

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (\text{II-79})$$

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} = 0 \quad (\text{II-80})$$

avec l'orientation du flux ce qui donne :

$$i_{qr} = -\frac{M}{L_r} i_{qs} \quad (\text{II-81})$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} - \frac{M^2}{L_r} \cdot i_{qs} = \sigma L_s i_{qs} \quad (\text{II-82})$$

Il est donc possible maintenant d'écrire :

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \left( \sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \right) - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{qs} \quad (\text{II-83})$$

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \sigma \cdot L_s \cdot i_{ds} \cdot s + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{dr} \cdot s - \omega_s \sigma L_s i_{qs} \quad (\text{II-84})$$

$$V_{ds} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{dr} \cdot s - \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r \cdot s)}{M} \cdot \Phi_{dr} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{dr} \cdot s - \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II-85})$$

$$V_{ds} = \left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right] \Phi_{dr} - \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II-86})$$

Cette relation exprime la loi des mailles interne à la machine sur l'axe  $d$  en fonction des deux grandeurs que nous avons choisi pour exprimer le couple. On y remarque le couplage entre l'axe  $d$  et l'axe  $q$ .

**b. loi des mailles pour  $V_{qs}$**

Reprenons la loi des mailles statoriques :

$$V_{qs} = \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II-87})$$

que l'on peut exprimer comme suit compte tenu des expressions du paragraphe précédent :

$$V_{qs} = \frac{d}{dt} (\sigma L_s \cdot i_{qs}) + \omega_s \cdot \Phi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II-88})$$

avec :

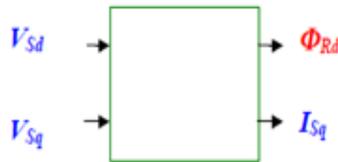
$$\Phi_{ds} = \sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{dr} = \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr} \quad (\text{II-89})$$

$$V_{qs} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) \cdot i_{qs} + \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr} \quad (\text{II-90})$$

Cette relation exprime la loi des mailles sur l'axe  $q$  en fonction des deux grandeurs que nous avons choisi pour exprimer le couple. On y remarque le couplage entre l'axe  $d$  et l'axe  $q$ .

**c. Représentation des lois de mailles**

La machine reçoit une alimentation en tension ( $V_{ds}$  et  $V_{qs}$ ) et donne à la sortie les grandeurs  $\Phi_{dr}$  et  $i_{qs}$  choisies pour la régulation du couple.



**Figure (II-13) :** Schéma de la machine asynchrone dans la base de Park [23].

En réécrivant les lois des mailles pour  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$ , on peut établir un schéma fonctionnel interne à la machine.

Pour  $V_{ds}$  on a :

$$V_{ds} = \left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right] \Phi_{dr} - \sigma L_s \cdot \omega_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II-91})$$

ce qui donne :

$$\Phi_{dr} = \frac{V_{ds} + \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs}}{\left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} = \frac{1}{\left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} (V_{ds} + \sigma L_s \cdot \omega_s \cdot i_{qs}) \quad (\text{II-92})$$

$$\Phi_{dr} = A \cdot (V_{ds} + B \cdot i_{qs}) \quad (\text{II-93})$$

$$A = \frac{1}{\left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} \quad (\text{II-94})$$

$$B = \sigma L_s \cdot \omega_s \quad (\text{II-95})$$

Pour  $V_{qs}$  on a :

$$V_{qs} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) i_{qs} + \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr} \quad (\text{II-96})$$

ce qui donne

$$i_{qs} = \frac{V_{qs} - \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr}}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} \left[ V_{qs} - \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr} \right] \quad (\text{II-97})$$

$$i_{qs} = C \cdot [V_{qs} - D \cdot \Phi_{dr}] \quad (\text{II-98})$$

avec :

$$C = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} \quad (\text{II-99})$$

$$D = \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \quad (\text{II-100})$$

Le schéma ci-dessous résume les deux équations précédentes donnant  $\Phi_{dr}$  et  $i_{qs}$  :

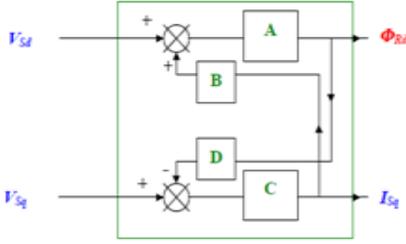


Figure (II-14) : Schéma du couplage [23].

### II.5.2.5. Elaboration des lois de commande pour $V_{ds}$ et $V_{qs}$

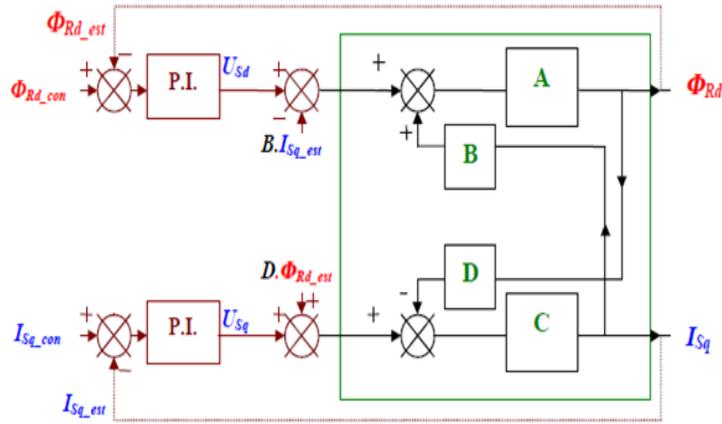


Figure (II-15) : Schéma de commande des grandeurs de réglage du couple [23].

Les mesures de  $\Phi_{dr}$  et  $i_{ds}$  (appelées  $\Phi_{dr-est}$  et  $i_{ds-est}$ ) sont comparées aux consignes. Un correcteur **PI** (Proportionnel et Intégral) sur chaque entrée permet la correction de l'erreur.

On aura donc :

$$\Phi_{dr} = A.(U_{ds} - B.i_{qs-est} + B.i_{qs}) = A.U_{ds} \tag{II-101}$$

$$i_{qs} = C.(U_{qs} + D.\Phi_{dr-est} - D.\Phi_{dr}) = C.U_{qs} \tag{II-102}$$

Les résultats de simulation de la commande vectorielle sont représentés sur les figures suivantes :

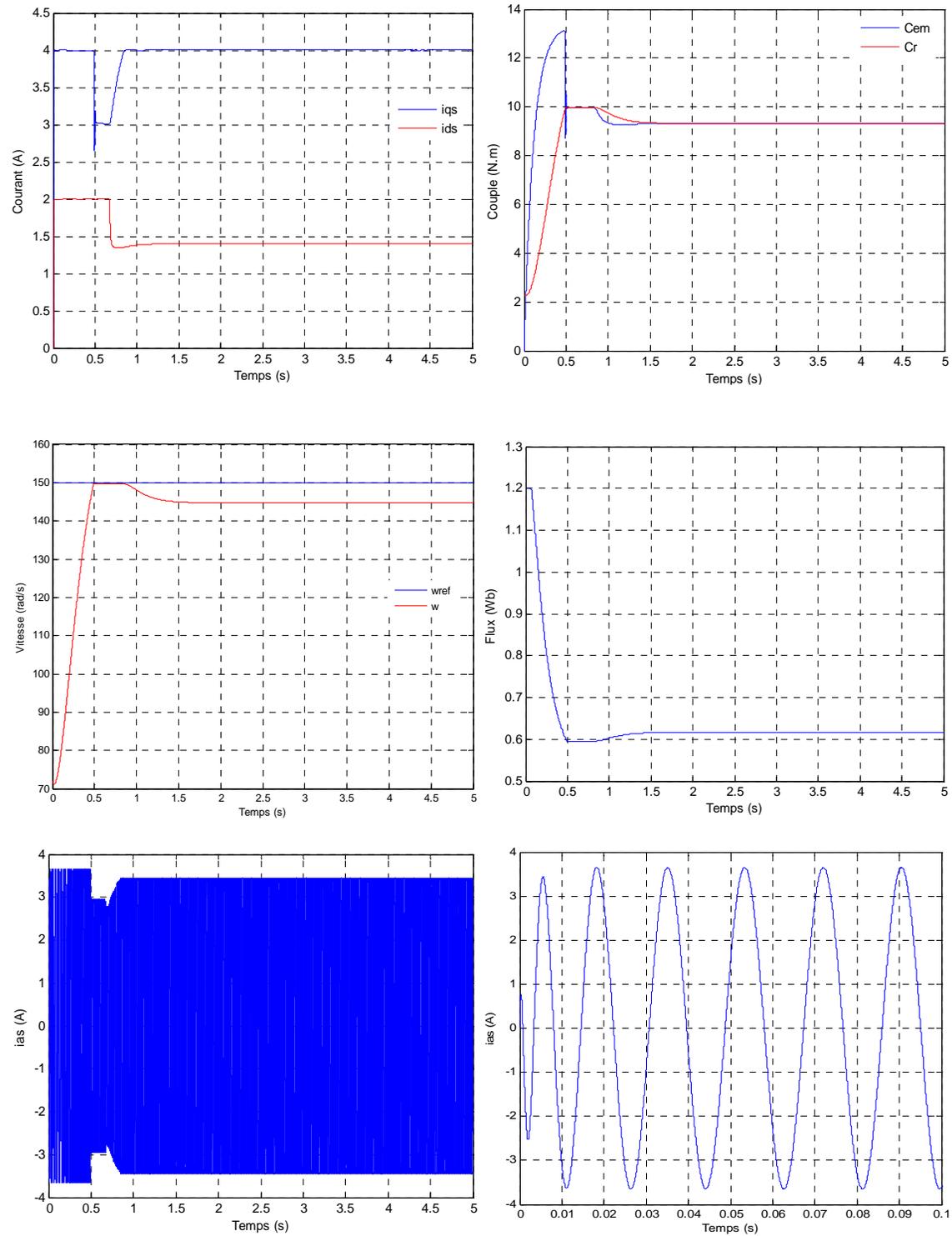


Figure (II-16) : Les résultats de la commande vectorielle du moteur asynchrone.

## II.6. Modélisation de la pompe

Les courbes principales qui caractérisent une pompe centrifuge et qui expriment ses performances sont, pour une vitesse de rotation donnée.

### ➤ Caractéristique débit- vitesse

Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une  $H_m$  donnée pour obtenir un débit [24].

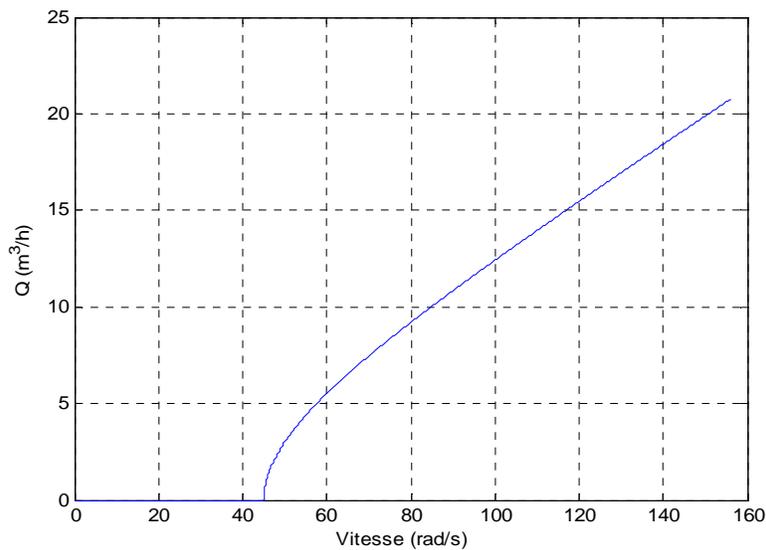


Figure (II-17) : La caractéristique débit- vitesse d'une pompe centrifuge.

### ➤ Caractéristique couple - vitesse:

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

Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une  $H_m$  donnée pour obtenir un débit de départ non nul [2].

Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$  :

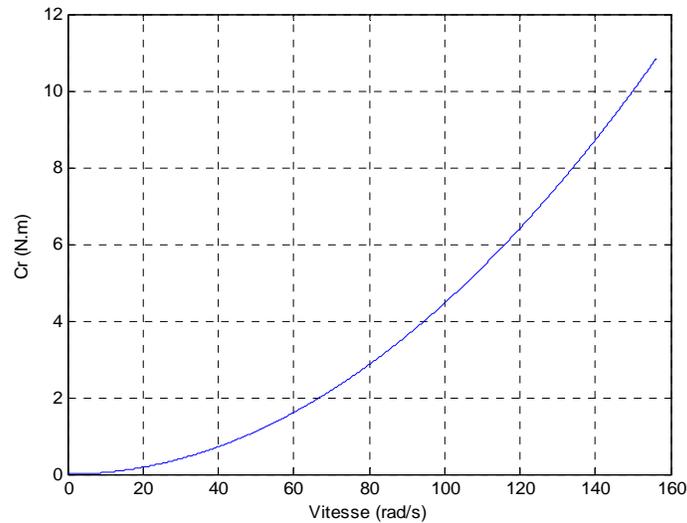
$$C_r = k_r \omega^2 + C_s \quad (\text{II-103})$$

Avec :

$k_r$  : coefficient de proportionnalité [ $Nm/(rd.s^{-1})^2$ ]

$C_s$  : couple statique, très petit [ $Nm$ ].

$\omega$  : vitesse de rotation [ $rd.s^{-1}$ ].



**Figure (II-18) :** Caractéristique couple - vitesse d'une pompe centrifuge.

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

$$P_{mec} = k_p \omega^3 \quad (\text{II-104})$$

#### ➤ Caractéristique débit-hauteur :

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction du débit.

Les constructeurs sont en mesure de fournir au client la courbe  $Q(H_m)$  correspondante aux diamètres, maximal et minimal possibles de la roue [25].

Si la charge du moteur est une pompe émergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale  $H_m$  en fonction du débit  $Q$ . En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de « PELEIDER-PETERMAN »

$$H_m = C_1 w^2 - C_2 w Q - C_3 Q^2 \quad (\text{II-105})$$

Avec :

$C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$ : des constantes propres de la pompe données par le constructeur.

$w$ : la vitesse de rotation [ $rd.s^{-1}$ ].

$H_m$ : la hauteur manométrique [ $m$ ].

$Q$ : débit [ $m^3/s$ ].

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

$$H_1 = C_1 w^2 \quad (\text{II-106})$$

Le banc d'essai étudié est constitué d'un puits, la conduite de refoulement est déterminée par des conditions économiques, son diamètre et sa longueur.

Alors la caractéristique  $H_m(Q)$  peut être tracée et la caractéristique résistante  $Q(H_m)$  de la canalisation est ensuite déterminée. Cette dernière se met sous la forme suivante:

$$H_c = H_g + \Delta H \quad (\text{II-107})$$

Avec :

$H_g$  : hauteur géométrique, égale à la différence des hauteurs entre les niveaux libres du liquide côté d'aspiration et côté de refoulement.

$\Delta H$  : désigne la somme de toutes les pertes de charges dues au frottement du fluide contre les parois et divers changements de sections.

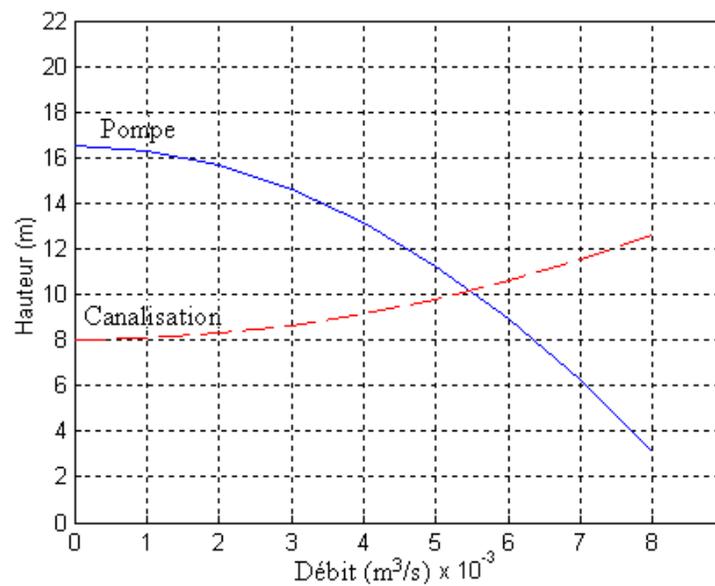
$$\Delta H = k_h Q^2 \quad (\text{II-108})$$

Avec :

$k_h$  : constante donnée de la pompe.

La courbe  $H_m(Q)$  comme indiquée sur la figure (II-19) est une parabole. Le point de rencontre de la courbe  $H_m(Q)$  avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul, on l'appelle point à vanne fermée ou encore point de barbotage [25].

Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes.



**Figure (II-19) :** Caractéristiques de la pompe  $H_m(Q)$  et de la canalisation [24].

## II.7. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons étudié la modélisation des différents éléments de la chaîne de pompage telle que : le GPV, les convertisseurs, la machine asynchrone et la pompe à eau.



**Chapitre III**  
**Dimensionnement d'un Système de Pompage**  
**Photovoltaïque**

### III.1. Introduction

Bien qu'il soit assez complexe de prédire le rendement précis d'une pompe solaire pour des conditions de fonctionnement variables, nous présentons ici une méthode simplifiée qui permettra de dimensionner le système de pompage photovoltaïque avec un degré de précision acceptable [2]. Les facteurs les plus importants de cette approche devront être estimés soigneusement afin d'obtenir un dimensionnement satisfaisant. Ce sont les besoins en eau, l'énergie hydraulique nécessaire, l'énergie solaire disponible et choix des composants [26].

### III.2. Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie.

Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail par jour [27].

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale.

La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalière et l'autonomie requise du système.

### III.3. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Une fois 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 nécessaire à partir de la relation :

$$E_h = g \rho_a V_a h / 3600 \quad \text{(III-1)}$$

où

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

$h$ : hauteur totale ( $m$ ).

$V_a$  : volume d'eau ( $m^3/jour$ ).

$\rho_a$ : densité de l'eau ( $1000 \text{ kg}/m^3$ ).

$g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m}/s^2$ ).

Durant le processus de pompage, le niveau d'eau à l'intérieur du puits tend à baisser, jusqu'à ce que la vitesse avec laquelle la régénération du puits arrive à équilibrer la quantité pour que l'on puisse pomper l'eau de nouveau. L'abaissement du niveau d'eau dans le puits dépend d'un certain nombre de facteurs, comme le type et la perméabilité du sol et l'épaisseur de l'aquifère. La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique :

$$h = h_s + h_d \quad (\text{III-2})$$

Dans le cas de puits qui présente des variations importantes du niveau d'eau en fonction du débit, on peut ajouter un terme correctif et cette équation devient :

$$h = h_s + h_d + \left( \frac{h_d + h_s}{Q_p} \right) Q_A \quad (\text{III-3})$$

où

$h_s$ : niveau statique ( $m$ ).

$h_d$  : niveau dynamique ( $m$ ).

$Q_A$ : débit apparent ( $m^3/h$ ).

$Q_p$  : débit d'essai ( $m^3/h$ ).

La hauteur statique  $h_s$  est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau.

La hauteur dynamique  $h_d$  représente les pertes d'eau dans la tuyauterie. La formule de Darcy-Weisbach [26] permet le calcul de la hauteur dynamique :

$$h_d = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{III-4})$$

où

$f$  : coefficient de friction des parois de la tuyauterie.

$V$ : vitesse moyenne du fluide ( $m / s^2$ ).

$L$  : longueur de la tuyauterie ( $m$ ).

$D$  : diamètre de la tuyauterie ( $m$ ).

$g$ : accélération de la pesanteur ( $m / s^2$ ).

Dans le cas où le système de tuyauterie aurait un autre type d'accessoires (vannes, coudes, té, jonctions, ...), nous pouvons calculer les pertes de charge dans chaque élément additionnel comme :

$$h_d = K_{ac} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III-5})$$

où

$K_{ac}$ : est un coefficient dépendant du type d'accessoire.

Une autre méthode pour tenir compte des accessoires du circuit est d'ajouter à la longueur réelle de la tuyauterie (seulement pour effet de calcul) des longueurs de tubes de même diamètre que le conducteur en étude, capables de causer les mêmes pertes de charge occasionnées par les pièces qu'elles substituent. De cette façon, n'importe quel accessoire peut être substitué par une longueur fictive [26]. En général, on recommande que la hauteur dynamique ne dépasse pas 10 % de la hauteur totale de pompage.

#### **III.4. Détermination de l'énergie solaire disponible**

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

#### **III.5. Inclinaison du générateur photovoltaïque**

L'inclinaison  $\beta$  des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.

#### **III.6. Mois de dimensionnement**

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, c'est-à-dire celui dont le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire soit minimum.

Comme idée de principe, à chaque inclinaison  $\beta$ , correspond un mois le plus défavorable. Le mois de dimensionnement à l'inclinaison optimale sera précisément celui qui présente le plus petit rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique. L'irradiation solaire  $E_m(\beta)$  et l'énergie hydraulique nécessaire  $E_h$  correspondantes à ce mois serviront pour le choix des composants du système.

### III.7. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standards de mesure, CSM, (éclairage  $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$  et température de cellule  $T_{jref} = 25 \text{ °C}$ ) [28] est :

$$P_p = \eta_g A E_s \quad (\text{III-6})$$

où

$P_p$  : puissance de sortie sous CSM (W).

$\eta_g$  : rendement du générateur à la température de référence (25°C).

$A$  : surface active du générateur ( $\text{m}^2$ ).

$E_s$  : éclairage dans les CSM ( $1000 \text{ W/m}^2$ ).

L'énergie électrique journalière  $E_e$  est donnée par :

$$E_e = \eta_{PV} A E_m(\beta) \quad (\text{III-7})$$

où

$\eta_{PV}$  : rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation.

$E_m(\beta)$  : irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison  $\beta$  ( $\text{kWh} / \text{m}^2 / \text{jour}$ ).

Le rendement  $\eta_{PV}$  peut être calculé à l'aide de l'expression :

$$\eta_{PV} = F_m [1 - \gamma(T_j - T_{jref})] \eta_g \quad (\text{III-8})$$

où

$F_m$  : facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximum.

$\gamma$  : coefficient de température des cellules.  $\gamma$  prend des valeurs entre 0,004 et 0,005 / °C pour des modules au silicium mono et polycristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

$T_j$  : température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

L'énergie électrique nécessaire est liée avec l'énergie hydraulique par l'expression :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MB}} \quad (\text{III-9})$$

où

$E_h$  : énergie hydraulique moyenne mensuelle (*kWh*).

$\eta_{MB}$  : rendement du sous-système moteur-pompe.

En substituant les équations (III-7), (III-8) et (III-9) dans (III-6), nous obtenons pour la puissance crête du générateur :

$$P_P = \frac{E_s}{F_m[1-\gamma(T_j-T_{jref})]E_m(\beta)} \frac{E_h}{\eta_{MB}} \quad (\text{III-10})$$

### III.8. Dimensionnement du moteur

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque.

### III.9. Dimensionnement de la pompe

Le débit crête  $Q$  ( $m^3/h$ ) est calculé par la relation :

$$Q = \frac{3.6 P_h}{g h} \quad (\text{III-11})$$

où

$P_h$  : puissance hydraulique nécessaire (*W*).

$g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81 m/s^2$ ).

$h$  : hauteur manométrique totale (*m*).

La puissance hydraulique crête ( $P_h$ ) nécessaire en fonction de la puissance électrique crête fournie par le générateur photovoltaïque ( $P_e$ ) est donnée par :

$$P_h = P_e \eta_{MB} \quad (\text{III-12})$$

où

$\eta_{MB}$  : rendement crête du sous-système moteur-pompe.

### III.10. Dimensionnement des tuyauteries

Le diamètre des tuyauteries peut être estimé en utilisant des tableaux ou des graphes qui expriment les pertes par frottements en fonction du débit pour chaque diamètre de la tuyauterie.

En pratique, il se présente le problème de fixer la hauteur dynamique  $h_d$  pour des considérations économiques. En effet, si nous augmentons le diamètre  $D$  de la tuyauterie,  $h_d$  diminue. Economiquement parlant, une augmentation de  $D$  suppose une augmentation des dépenses d'installation, mais en même temps une diminution des pertes d'énergie.

Le diamètre le plus économique sera celui qui réduit au minimum la somme des coûts de la tuyauterie et de l'énergie perdue par frottements [26]. Il est possible d'obtenir analytiquement les diamètres des tuyauteries de pompage qui s'approximent à ceux qui minimisent les coûts des installations par la formule de Bresse :

$$D = K \sqrt{Q} \quad (\text{III-13})$$

$D$  : diamètre de la tuyauterie (m).

$K$  : coefficient qui varie de 0.75 à 1.4.

$Q$  : débit crête de la pompe ( $m^3/s$ ).

L'équation de continuité est :

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (\text{III-14})$$

Choisir la valeur  $K$  équivaut à fixer la vitesse moyenne du fluide ( $v$ ). Enfin en substituant dans l'équation de continuité la valeur de  $Q$  prise de la formule de Bresse, nous avons :

$$v = \frac{4}{\pi K^2} \quad (\text{III-15})$$

Quelle que soit la formule employée, les diamètres obtenus diffèrent fréquemment des diamètres commerciaux. Il suffit de prendre la valeur du diamètre commercial le plus proche et d'ajouter les calculs en conséquence.

**III.11. Conclusion**

Ce chapitre présente la méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous a permis de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau d'une consommation bien déterminée. Elle est basée essentiellement sur l'évaluation des besoins d'eau, le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire, la détermination de l'énergie solaire disponible et le choix des composants.



**Chapitre IV**  
**Simulation du Système de Pompage Photovoltaïque**

**IV.1. Introduction**

La modélisation et la simulation jouent un rôle très important dans l'analyse et la conception des systèmes, et depuis quelques années le développement des calculateurs a rendu la simulation du fonctionnement et le comportement d'un système quelconque possible. Ceci a permis un gain de temps énorme dans la vérification et la mise en épreuve d'une conception d'une part, l'évaluation des performances et les limites d'une réalisation d'autre part.

Le logiciel utilisé est MATLAB/SIMULINK parce qu'il permet la représentation facile, par des blocs accomplissant chacun une fonction prédéterminée, des systèmes dynamiques.

MATLAB est un logiciel de calcul numérique, de visualisation et de programmation très raffinée et conviviale, développé par la société (Mathworks). Mais aussi, un environnement des applications à part entière, il permet à l'utilisateur d'élaborer ses propres fonctions de véritables programmes, ainsi que, des interfaces graphiques très performantes.

IV.2. Schéma du système global de simulation

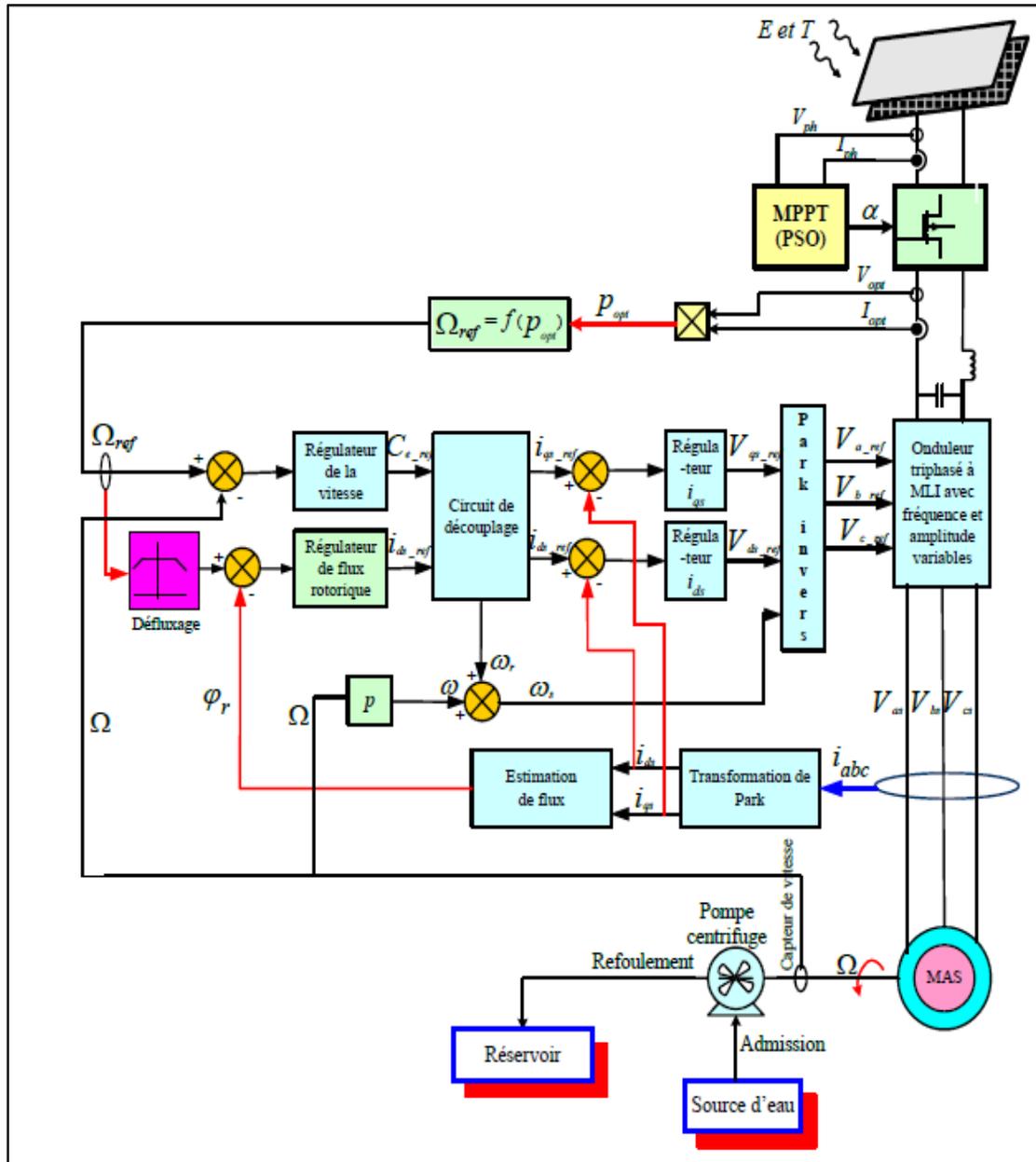


Figure (IV-1): Bloc de simulation du système complet.

IV.3. Résultats de simulation

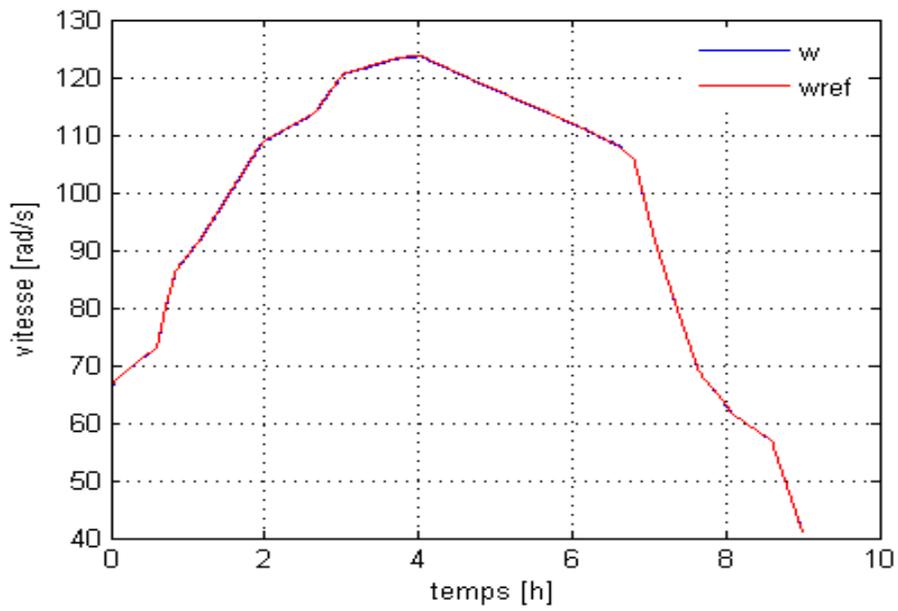


Figure (IV-2) : L'évolution de la vitesse de rotation et de la vitesse de référence en fonction du temps.

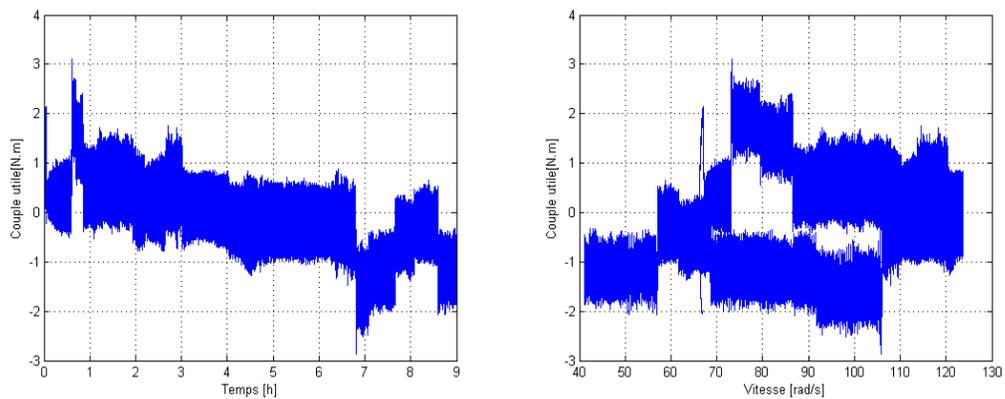


Figure (IV-3) : L'évolution du couple utile en fonction du temps et en fonction de la vitesse.

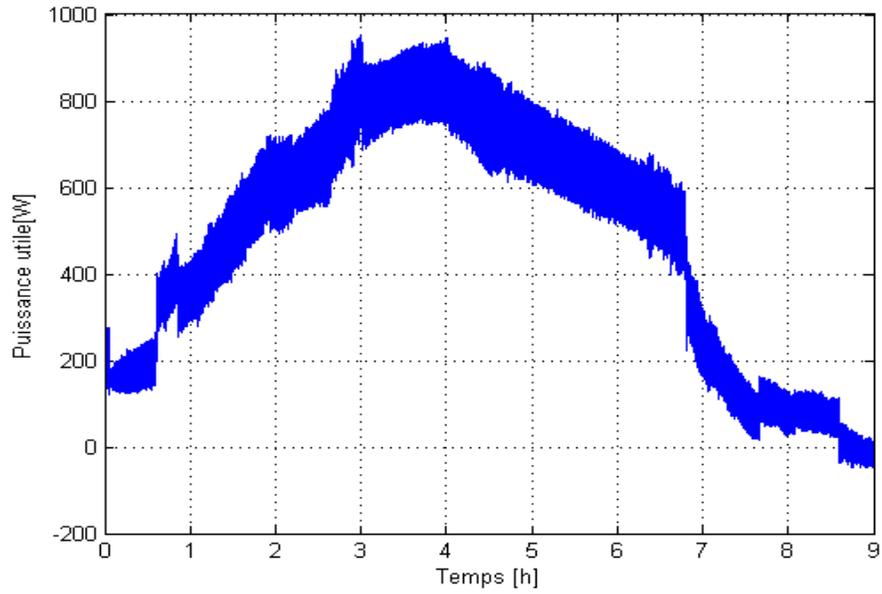


Figure (IV-4) : L'évolution de la puissance utile en fonction du temps.

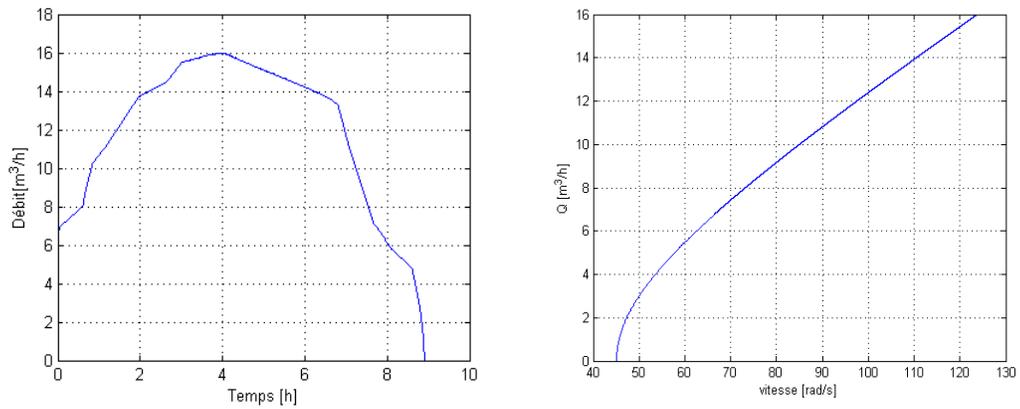
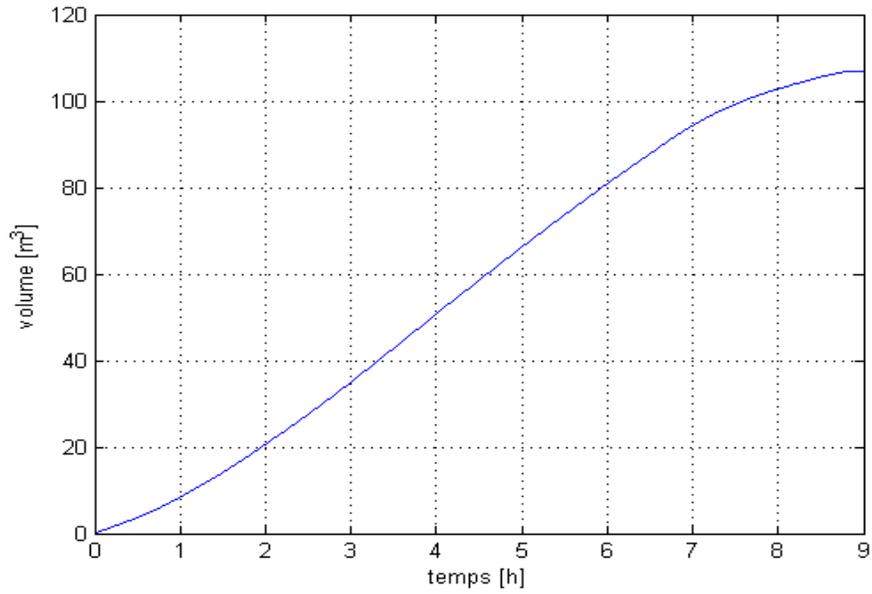
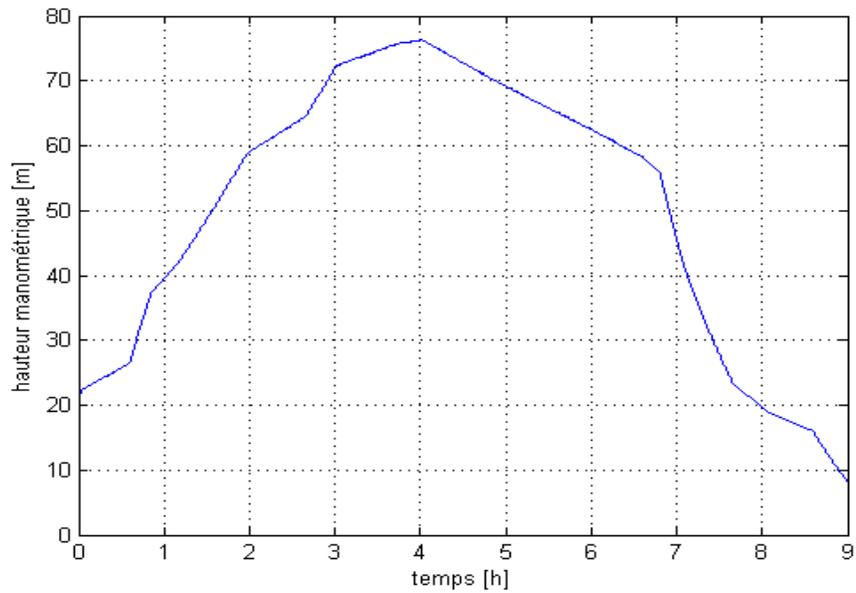


Figure (IV-5) : L'évolution du débit en fonction du temps et en fonction de la vitesse.



**Figure (IV-6) :** L'évolution du volume d'eau en fonction du temps.



**Figure (IV-7) :** L'évolution de la hauteur manométrique en fonction du temps.

#### IV.4. Interprétation des résultats

La figure (IV-2) représente la variation des deux vitesses (vitesse de rotation du moteur asynchrone et vitesse de référence) en fonction du temps.

La caractéristique de la vitesse suit l'allure de l'éclairement pendant le jour, elle augmente progressivement jusqu'à atteindre son seuil à quatre heures de fonctionnement (mi jour), puis, elle diminue pour s'annuler à neuf heures.

On constate que les deux vitesses se coincident ce qui explique une bonne régulation pour une meilleure précision.

La figure (IV-4) représente l'analyse temporelle de la puissance utile.

L'évolution de la puissance utile est proportionnelle à la vitesse, elle augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale (920W) à quatre heures de fonctionnement (mi jour), puis, elle décroît pour s'annuler à neuf heures.

La figure (IV-5) représente l'évolution du débit en fonction du temps, on voit que l'allure démarre par un débit initial de valeur  $6.8 \text{ m}^3/h$  pour atteindre une valeur maximale de  $16 \text{ m}^3/h$  à un temps de quatre heures, puis, elle diminue pour s'annuler à un temps de neuf heures.

L'allure du débit en fonction de la vitesse augmente lentement pour des valeurs de vitesse d'ordre  $50 \text{ rad/s}$ . A partir d'une vitesse  $55 \text{ rad/s}$ , la courbe évolue d'une manière linéaire.

La courbe du volume augmente progressivement en fonction du temps (figure IV-6).

La figure (IV-7) représente l'évolution de la hauteur manométrique en fonction du temps, on voit que l'allure suit la caractéristique de la vitesse. Elle démarre par une hauteur de valeur  $22 \text{ m}$  à  $t = 0h$  pour atteindre une valeur maximale de  $76 \text{ m}$  à un temps de quatre heures, puis, elle diminue pour s'annuler à un temps de neuf heures.

#### **IV.5. Conclusion**

Les résultats des simulations qui sont présentés précédemment montrent l'avantage de la commande en puissance d'un système de pompage photovoltaïque.

La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque dépend de l'éclairement au niveau de la surface du panneau solaire et de la vitesse de rotation du moteur asynchrone qui entraîne la pompe à une vitesse désirée.

# Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est l'étude d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil, tel que le stockage s'effectue indirectement sous forme d'eau dans un réservoir. La pompe centrifuge est entraînée par un moteur asynchrone à travers un onduleur de tension triphasé commandé en MLI sinus-triangle. La technique de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique est utilisée afin de réaliser les régulations de vitesse et du courant statorique. Pour améliorer le rendement énergétique de ce système, nous avons adopté la technique d'ajustement de courbe, afin de maximiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque (GPV).

Le système étudié est commandé en puissance (puissance illimitée) c'est-à-dire la puissance optimale est proportionnelle à la vitesse de rotation (avantage de la commande en puissance) et cette dernière est proportionnelle au couple résistant d'où on obtient un couple résistant variable en fonction de la vitesse (celle-ci aussi variable).

Enfin, ce mémoire nous a permis de mieux comprendre le pompage photovoltaïque, nous espérons que ce travail sera d'une grande aide dans notre vie professionnelle.



# **Bibliographie**

[1] : **SALAH MOHAMED AIT-CHEIKH** : « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique Décembre 2007.

[2] : **Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy**: « Le Pompage Photovoltaïque ». Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens.  
Sous la direction d'**Eric Schiller**.

[3] : **M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia** : « Le Pompage Photovoltaïque ». Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P.62, Route de l'Observatoire Bouzaréah 16340, Alger. Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002) 69-73.

[4] : **COMPAORE I, DAKYO B, GREAH, COULIBALY Y** : « Une méthode simplifiée pour la conception des unités de pompage photovoltaïque à couplage direct ».

[5] : **G. Boukettaya, R. Andoulsi et A. Ouali** : « Commande vectorielle avec observateur de vitesse d'une pompe asynchrone couplée à un générateur photovoltaïque ». Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse (2008) 75 – 85.

[6] : **Belhadj Mohammed** : « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome». Mémoire de Magister Option : Microélectronique –Photovoltaïque Centre Universitaire De Bechar Institut des Sciences Exactes 2008.

[7] : [www. Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com).

[8] : **Anne Labouret, Michel Villos** : « Energie solaire photovoltaïque ». 3<sup>ème</sup> Edition DUNOD, 2007.

[9] : **Jean Bonal, Guy Séguier** : « Entraînements électriques à vitesse variable». Volume 2 1998.

[10] : **Guy SEGUIER, Francis LABRIQUE** : « Les convertisseurs de l'électronique de puissance ». Volume 4. La conversion continu - alternatif. 1989.

[11] : **Aït Kaci D, Boubouzal N** : « Etude et simulation d'un aérogénérateur ». Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, UMMTO 2009.

[12] : **Jacques Laroche** : « Electronique de puissance ; convertisseurs » ; Edition DUNOD, 2005.

[13] : **GUY GRELLET. GUY CLERC** : « ACTIONNEURS ELECTRIQUES. Principes / Modèles / Commandes ». EDITIONS EYROLLES, 2000.

[14] : **Pierre Mayé** : « Aide-mémoire Electrotechnique », Edition DUNOD, Paris 2006.

[15] : **Dominique Barielle, Jean-Pierre Daunis** : « Electrotechnique : Transformateurs et machines tournantes », DUNOD, Paris 2006.

[16] : **ALIMARINA B, AOUA Z** : « Etude et conception d'une armoire de commande à démarreur électronique progressif-application à un groupe électropompe d'une station de pompage d'eau potable ». Mémoire DEUA en Electrotechnique, UMMTO 2006.

[17] : **Dr. Farid Fodil Pacha, Rapport technique**, Stagiaire: Yahya Mawlawi Superviseur: Prof. Johan Gyselinc, **Stage installation et émulation des panneaux photovoltaïques** 30/Mars/2009.

[18] : **Ionel VECHIU** : « Modélisation et Analyse de L'Intégration des énergies renouvelables Dans les Réseaux Autonomes ». Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Havre (Basque de san Sebastian), 2005.

[19] : **O.AMRANI, D.REKIOUA** : « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques ». Université de Bejaïa.

[20] : **Philippe Barret** : « Régimes transitoires des machines électriques », Edition EYROLLES, 1987.

[21] : **IREKTI.T, BEKKOU.KH** : « Modélisation et simulation de la machine asynchrone pentaphasée associée à un onduleur de tension ». Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2007.

[22] : **N. BENYAHIA, K. SRAIRI, S. M. MIMOUNE** : « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique ». Courrier du Savoir – N°06, Juin 2005, pp.147-150.

[23] : **Patrick BRUNET** : « Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrone ». PDF.

[24]: **BOUDEN Abdelmalek** : « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque». Mémoire de Magister en Electronique, Option : Instrumentation- Composants Electroniques et Systèmes -, 2008.

[25] : **A. Saadi** : « Etude Comparative Entre Les Techniques D’optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque ». Mémoire De Magister en Electrotechnique, Université Mohammed Khider, Biskra, 2001.

[26]: **A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi** : « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque ». Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26.

[27]: **M.G. Thomas**: « Water Pumping- The Solar Alternative, Photovoltaic Design Assistance ».Center, Sandia National Laboratories, NM 8718 5, Albuquerque, 1987.

[28]: « Handbook on Solar Water Pumping, Intermediate Technology Power & Partners », 1984.



Les paramètres des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque étudié sont les suivants :

➤ **Le générateur photovoltaïque**

Charge électrique d'un électron :  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$

Energie de gap: énergie nécessaire pour un électron pour s'arracher :  $E_g = 1,12 \cdot q \text{ eV}$

Constante de Boltzmann :  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$

Résistance série d'une cellule PV :  $R_s = 0.614 \Omega$

Résistance shunt d'une cellule PV :  $R_{sh} = 151.16 \Omega$

Nombre de cellules PV dans un module :  $n_c = 72$

Nombre de modules en parallèle :  $n_p = 7$

Nombre de modules en série :  $n_s = 2$

Coefficients donnés par le constructeur :

$$P_1: 0.0036$$

$$P_2: 0.0001$$

$$P_3: -0.0005$$

$$P_4: 70.874$$

➤ **L'onduleur MLI**

Tension d'alimentation de l'onduleur délivrée par le hacheur élévateur :  $E = 600 \text{ V}$

➤ **La machine asynchrone**

Puissance nominale :  $P_n = 1.5 \text{ kW}$

Vitesse de rotation nominale:  $w_n = 1420 \text{ tr/mn}$

Courant nominal :  $I_n = 3 \text{ A}$

Inductance mutuelle :  $M = 0.44 \text{ H}$

Inductance rotorique :  $L_r = 0.4662 \text{ H}$

Inductance statorique :  $L_s = 0.4662 \text{ H}$

Résistance rotorique :  $R_r = 4.2 \Omega$

Résistance statorique :  $R_s = 5.75 \Omega$

Nombre de paires de pôles:  $p = 2$

Flux de référence :  $\Phi_{ref} = 1.2 \text{ Wb}$

Moment d'inertie :  $J = 0.03 \text{ kg.m}^2$

➤ **La pompe centrifuge**

Constantes propres de la pompe:

$$C_1 = 4.9234 \cdot 10^{-3} \text{ m}/(\text{rad}/\text{s})^2$$

$$C_2 = 1.5826 \cdot 10^{-5} \text{ m}/(\text{rad}/\text{s})^2$$

$$C_3 = -18144 \text{ m}/(\text{rad}/\text{s})^2$$

Hauteur géométrique :  $H_g = 10 \text{ m}$

Diamètre :  $d = 0.06 \text{ m}$

Accélération de la pesanteur:  $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$

Densité d'eau :  $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

Longueur :  $l = 7.4 \text{ m}$