



REPUBLIQUE ALGERIENNE
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER PROFESSIONNEL
EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

THEME

Etude d'un système de pompage
photovoltaïque

Proposé et Dirigé par :

M^r A. DICHE

M^r K .GHEDAMSI (université de Bejaïa)

Etudié par :

M^{elle} AZOUAGH Lynda

M^{elle} ZIDI Djamilia

M^{elle} DAHMANI Madiha

Promotion 2012/2013



REMERCIEMENT

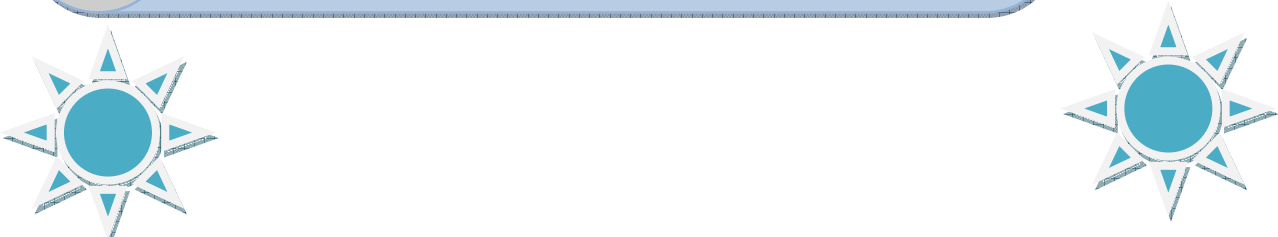
On exprime notre profonde remerciement à Monsieur A.DICHE, de nous avoir encadré et d'avoir dirigé ce travail avec dévouement.

Nos reconnaissances vont également à notre Co-promoteur Monsieur K.GHEDAMSI.

Nous remercions vivement les membres de jury qui nous feront honneur de juger notre travail.

Nous remercions nos sections d'étude LMD pro 2012 et LMD pro 2013.

Nous remercions aussi tout ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire.



Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque

Introduction.....	3
I. Présentation d'énergie renouvelable	3
I.1.L'effet photovoltaïque	3
I.1.1. Les différents type des cellules photovoltaïques	3
I.1.2.Les modules photovoltaïques.....	4
I.2. Les différents panneaux solaire.....	5
I.2.1.Le panneau solaire photovoltaïque.....	5
I.2.2. Panneau solaires thermique et thermodynamique	5
I.3. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque.....	6
I.3.1. Le générateur photovoltaïque.....	6
I.3.2 Différentes modelés d'une cellule photovoltaïque.	8
I.3.2.1.Modèle à une diode.....	8
I.3.2.2.Modèle à deux diodes.....	9
I.4. La commande MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING).....	10
I.5. Les convertisseurs.....	11
I.5.1. Hacheurs (DC/DC)	11
I.5.2. Les convertisseurs DC/AC (Les onduleurs).....	12
I.5.2.1. Définition.....	12
I.5.2.2. Onduleur de tension.....	12
I.5.2.3.Commande d'un onduleur par MLI.....	13
I.5.2.4. Types de commande en MLI.....	13
I.6. Machine asynchrone.....	14
I.6.1. Constitution et principe de fonctionnement	15
I.6.2. Constitution.....	15
I.6.3. Principe de fonctionnement.....	16
I.7. La pompe.....	17
I.7.1. Types de pompes.....	17
Conclusion.....	18

Sommaire

Chapitre II : Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque

Introduction.....	19
II .1.Modélisation des composants	19
II.1.1. Modèle du générateur photovoltaïque	19
II .1.1.1.Modèle a une diode (modèle complet)	19
II.1.1.2.Modèle de Bishop.....	21
II.1.2.Influence de l'éclairement.....	23
II.1.3. Influence de la température	24
II.2. Modélisation des convertisseurs	25
II.2.1. Modélisation du hacheur	25
II.2.2. Modélisation de l'onduleur.....	27
II.3. Modélisation de la machine asynchrone.....	31
II.3.1. Modèle de la machine asynchrone.....	31
II.3.2. Commande vectorielle à flux rotorique orienté de la machine asynchrone.....	37
II.3.2.1. Orientation du flux rotorique.....	37
II.3.2.2. Estimation de Φ_{dr}	38
II.3.2.3. Estimation de ω_s et de θ_s	39
II.3.2.4. Loi des mailles pour V_{ds} et V_{qs}	39
II.3.2.5. Elaboration des lois de commande pour V_{ds} et V_{qs}	42
II.5. Modélisation de la pompe.....	46
Conclusion.....	50

Chapitre III : Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Introduction.....	51
III.1. Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	51
III.2. Dimensionnement du moteur.....	52
III.3. Notions hydrauliques.....	52
III.4. Configuration de systèmes de pompage.....	53
III.4.1. Système de pompage adopté	54
III.4.2.Les principaux avantages de ce système.....	54
III.5. Dimensionnement de la pompe.....	54
III.6. Dimensionnement des tuyauteries.....	55

Sommaire

Conclusion.....	55
-----------------	----

Chapitre IV : Simulation du système de pompage photovoltaïque

Introduction.....	56
IV.1. Schéma du système global de simulation.....	56
IV.2. Résultats de simulation.....	57
IV.3. Interprétation des résultats.....	60
Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	67

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Depuis la découverte de système photovoltaïque, la récupération de l'énergie solaire est devenue l'un des applications les plus prometteuses, dans les pays développés ou l'utilisation de système photovoltaïque est l'instant le plus courant, il sert habituellement de complément d'énergie électrique à usage domestique en milieu urbain, et les panneaux solaires sont placés sur les toits d'habitation, profitant des conventions écologiques qui préconisent la consommation d'énergie propre ou renouvelables, son utilisation se généralise, et il est très fréquent de voir des compagnies d'électricité réaliser des installations d'appoint connectées au réseau. De plus en dépit du coût d'installation qui peut s'avérer conséquent, l'énergie solaire reste très compétitive par rapport aux formes d'énergie, et cela malgré le faible taux d'ensoleillement de ces pays développés qui ont majoritairement un climat tempéré [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 premier chapitre, donne une description générale des systèmes photovoltaïques et les éléments constituant le système de pompage photovoltaïque : le générateur photovoltaïque, les convertisseurs (les hacheurs, l'onduleur de tension), le moteur asynchrone et la pompe centrifuge.

Le deuxième chapitre, la modélisation et la simulation des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque.

Introduction générale

Le troisième chapitre, concerne le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque.

Le quatrième chapitre, concerne la simulation du système de pompage.

Une conclusion générale clôture notre travail.

CHAPITRE I

*généralités sur le système de
pompage photovoltaïque*

Introduction

La première génération des systèmes de pompage photovoltaïque, en particulier ceux pour les applications à hauteur basse et moyennes incorporent des moteurs à courant continu à aimant permanent. Ces dernières années, un moteur asynchrone alimenté par un convertisseur de fréquence variable est devenu le moteur standard pour des applications de pompage solaires. Cela est dû principalement à sa simplicité, robustesse et faible prix comparé au moteur à courant continu. [3]

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

Dans ce système, un réservoir de stockage est essentiel, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement. Ensuite, la distribution de l'eau se fait par gravité aux consommateurs [2].

I. Présentation d'énergie renouvelable solaire

I.1. Effet photovoltaïque

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristallin, ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium, Tellure de Cadmium.

I.1.1. Les différents types des cellules photovoltaïques:

- **Les cellules monocristallines**
 - ✓ La première génération de photopiles ;
 - ✓ Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire)
 - ✓ Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère
 - ✓ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur
- **Les cellules poly-cristallines**
 - ✓ Coût de production moins élevé
 - ✓ Procédé nécessitant moins d'énergie
 - ✓ Rendement 11-13% (18% en Labo)

- **Les cellules amorphes** (cellules de calculatrices par exemple)
 - ✓ Coût de production bien plus bas ;
 - ✓ Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo) ;
 - ✓ Durée de vie plus faible.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc. ... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).



Cellule de silicium monocristallin Cellule de silicium poly cristallin Cellule en silicium amorphe

Figures I.1 : Les différents types cellules photovoltaïques [4].

I.1.2. Les modules photovoltaïques

Le module est l'élément principal d'une installation photovoltaïque. Il est composé de plusieurs cellules qui sont reliées entre-elles par un circuit électrique.

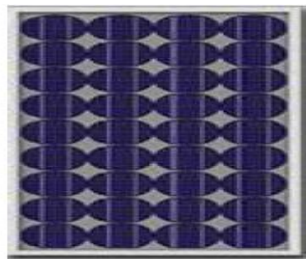


Figure. I.2 : Module photovoltaïque [5].

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les

connections 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.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

I.2. Les différents panneaux solaires

I.2.1. Le panneau solaire photovoltaïque

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.3 : panneau solaire [6]

I.2.2. Panneau solaire thermique et thermodynamique

a) domestique (thermique)

Le principe de ce système est d'utiliser un fluide caloporteur. Le fluide est chauffé dans des panneaux exposés au soleil.

Ce fluide transmet sa chaleur à l'eau à usage domestique dans des échangeurs [5].

b) Industriel (thermodynamique)

On désigne par une centrale thermodynamique l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée. L'eau chauffée par la

température est transformée en vapeur, envoyée dans une turbine. Un alternateur, lié à la turbine, produit alors de l'électricité [7].

I.3. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC/AC, un sous-système de pompage (moteur et pompe), la tuyauterie et accessoires et enfin un réservoir d'eau (voir figure I.4) [8]. Dans les systèmes de pompage photovoltaïque qui fonctionnent au fil du soleil, le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution la plus adoptée, par rapport au stockage électrochimique dans les batteries.

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

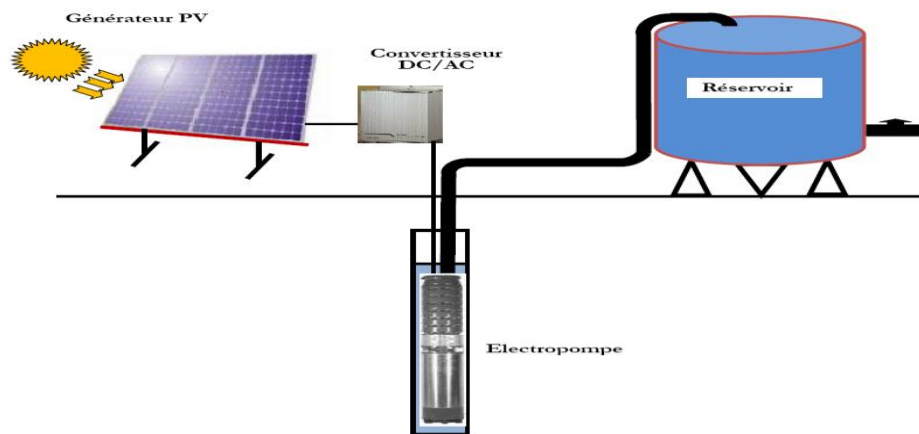


Figure I.4. Schéma d'un système de pompage photovoltaïque.

I.3.1. Le générateur photovoltaïque

➤ Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [9]. La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure I.5 ci-dessous.

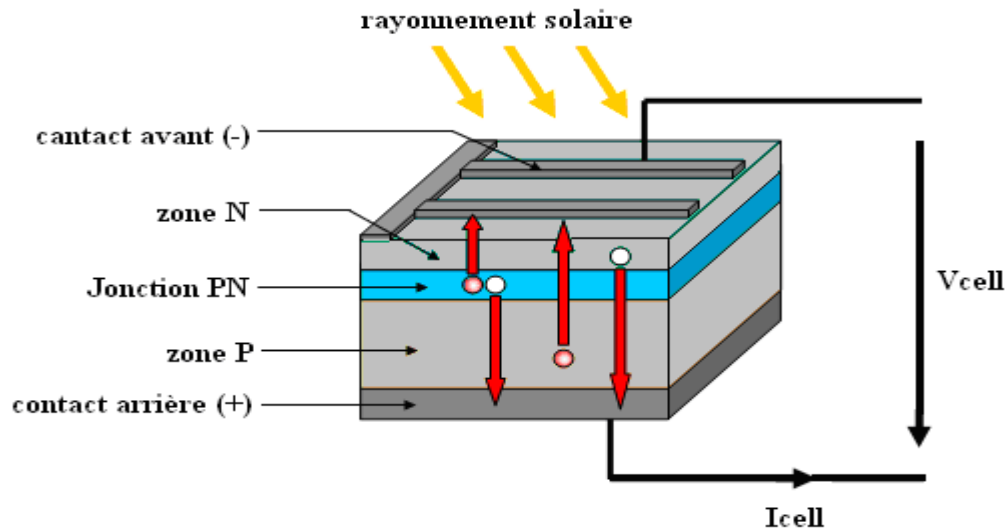


Figure I.5: structure d'une cellule photovoltaïque [9].

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

Celles-ci sont encapsulées dans une même structure pour former un module.

L'encapsulation ainsi réalisée va avoir deux principaux rôles [10] :

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

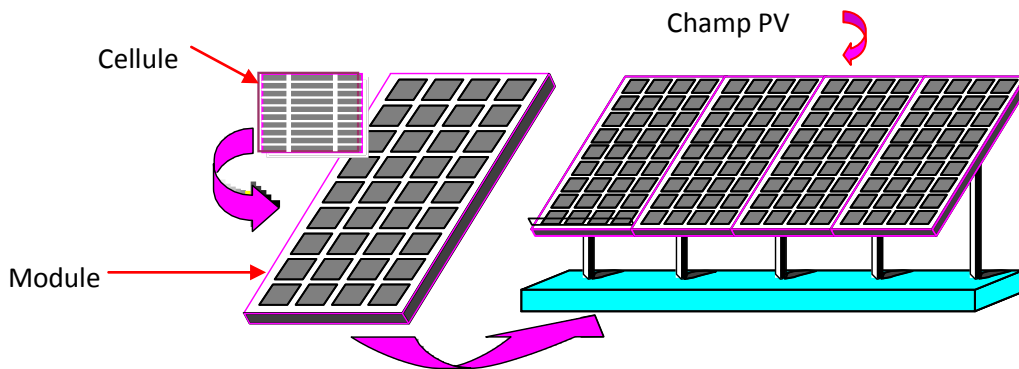


Figure I.6 : Composant d'un générateur photovoltaïque [2].

La tension délivrée par une cellule PV étant très faible, pour avoir des tensions compatibles avec les charges à alimenter, il faudra associer plusieurs cellules en série ou en parallèle. En outre, le générateur photovoltaïque est obtenu par l'interconnexion de modules en série et/ou en parallèle pour obtenir une puissance encore plus grande.

➤ **Caractéristiques d'un module []**

- La puissance de crête P_c : puissance électrique maximale que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$).
- La caractéristique I/V : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide V_{C0} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, 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 les cellules.

I.3.2. Différents modèles d'une cellule photovoltaïque

I.3.2.1. Modèle à une diode

Une cellule photovoltaïque est souvent présente comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode.

La figure ci-dessous, représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

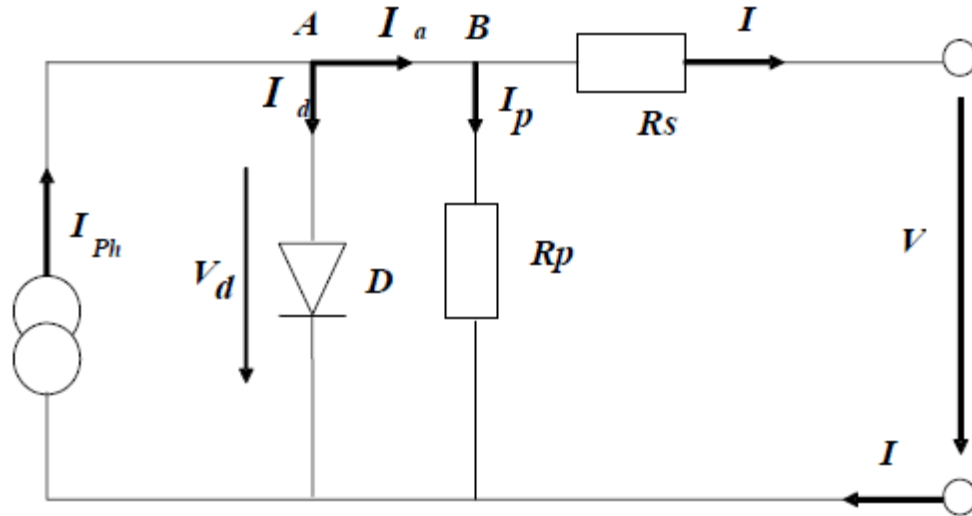


Figure I.7. Schéma équivalent d'une cellule solaire, modèle d'une diode [11].

✓ L'équation non linéaire

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + I R_s}{m V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

- I_{ph} : photo courant.
- I_d : courant de diode.
- I_s : courant inverse de saturation de la diode.
- m : facteur d'idéalité de la diode, $m = 1 \dots 5$.
- V_T : Tension thermique[V].
- K : constante de Boltzmann.
- T : température absolue, [T] = K (kelvin).
- e : charge d'un électron.
- R_p : résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire.
- R_s : Résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts Externes.

I.3.2.2.Modèle à deux diodes

Le modèle à deux diodes est composé de deux exponentiel, le première, tient compte du phénomène de diffusion tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison.

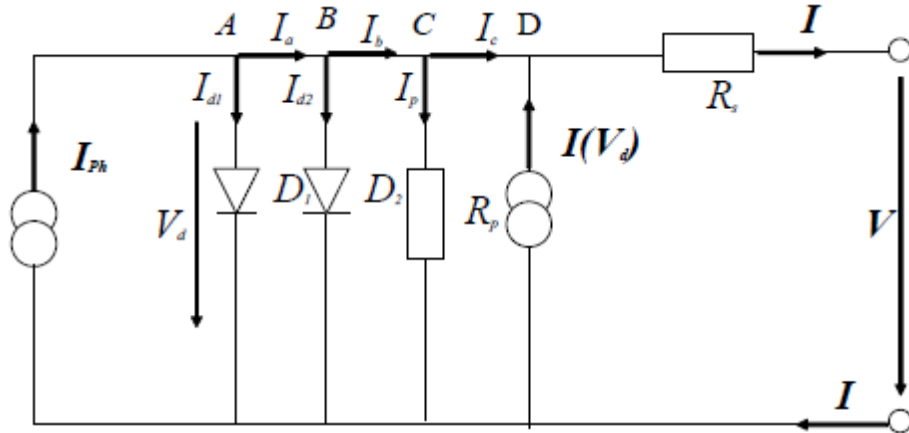


Figure I.8. Schéma équivalent d'une cellule solaire, modèle avec deux diodes [11].

✓ L'équation non linéaire

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m_1.V_T}} - 1 \right) - I_{S2} \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m_2.V_T}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} - a.(V+I.R_s) \left(1 + \frac{V+I.R_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \quad (I.2)$$

Avec:

- I_{S1} , I_{S2} : courant de saturation de la première et de la deuxième diode respectivement.
- m_1 , m_2 : facteur d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.
- V_{Br} : tension de rupture (-15 :-50).
- a : facteur de correction ($a=0$:1).
- n : indice de la rupture d'avalanche ($n=1$:10).

I.4. La commande MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING)

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance (MPPT, Maximum Power Point Tracking). Cela permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quelle que soit la température et l'ensoleillement. Ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension.

➤ 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 dédiée. 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.

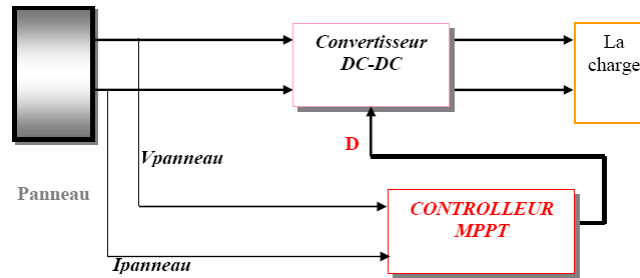


Figure .I.9. Schéma de principe de la commande MPPT [12].

I.5. Les convertisseurs

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

I.5.1. Hacheurs (DC/DC)

Le hacheur est un convertisseur statique continu-continu utilisant essentiellement des interrupteurs électroniques unidirectionnels, des éléments passifs (inductances, condensateurs et diodes).

a) Hacheur (série-abaisseur), type BUCK

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

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

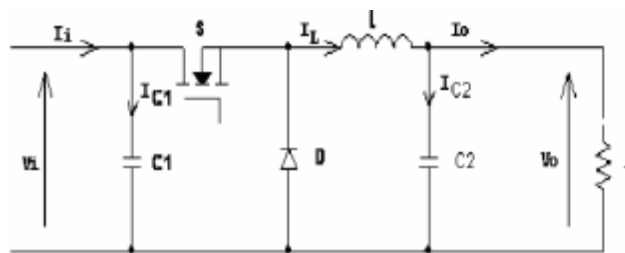


Figure .I.10. Hacheur type BUCK [12].

d) Hacheur (parallèle-élevateur), type BOOST

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

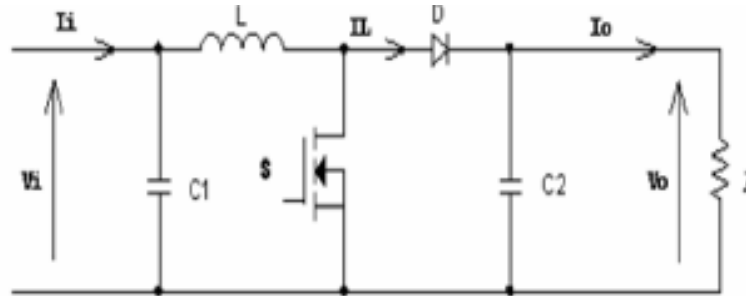


Figure .I .11.Hacheur type Boost [12].

b) 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.

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 [13].

I.5.2.2. Onduleur de tension

L'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture ; ce sont des transistors de types IGBT auxquels sont placés des diodes en anti-parallèle. L'onduleur est alors constitué de trois bras, dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire. Les séquences de

commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commande en MLI « Modulation de Largeur d'Impulsion »).

La structure de l'onduleur de tension est représentée en figure (I.12).

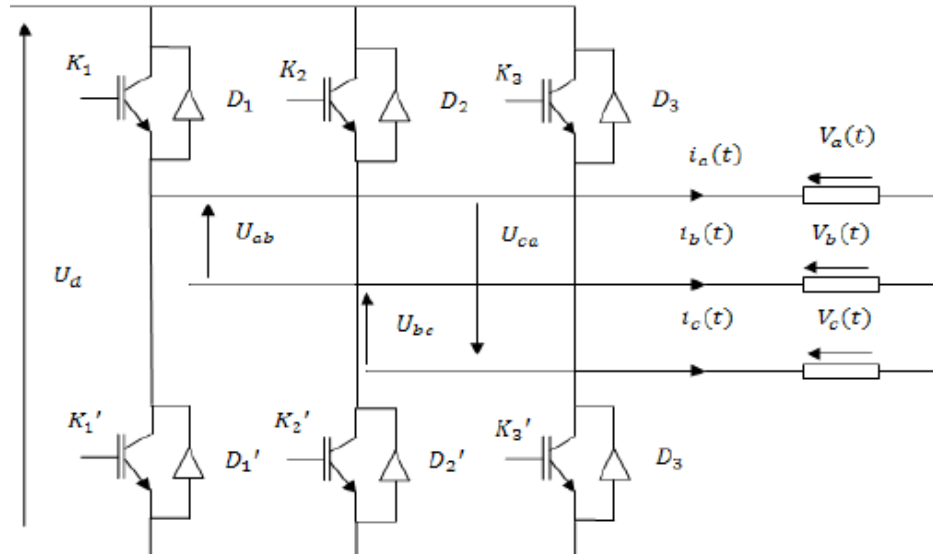


Figure I.12. Onduleur triphasé

I.5.2.3. 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 (Modulation de Largeurs d'impulsion). L'opération a un double but :

- Modifier le contenu harmonique de la tension en conservant sa période, de façon à repousser 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 [13].

I.5.2.4. Les types de commande en MLI

Un nombre important de stratégies de commande MLI, suivant les choix des instants de commutation des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture, existe et repose sur un compromis entre :

- Un spectre d'harmonique 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 : la commutation de l'onduleur est définie par les intersections, en temps réel, de deux ou trois signaux.
- Modulation 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 se rapprochent au mieux de celle du système que l'on veut obtenir à la sortie.

Dans la suite de ce travail, nous nous intéresserons à la commande MLI sinus-triangle (pour la simulation de l'onduleur) [14].

➤ **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 des 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 déphasés d'un angle égale à $\frac{2\pi}{3}$ rad.

I.6. Machine asynchrone

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent [15].

La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans l'industrie, dans le transport...etc.

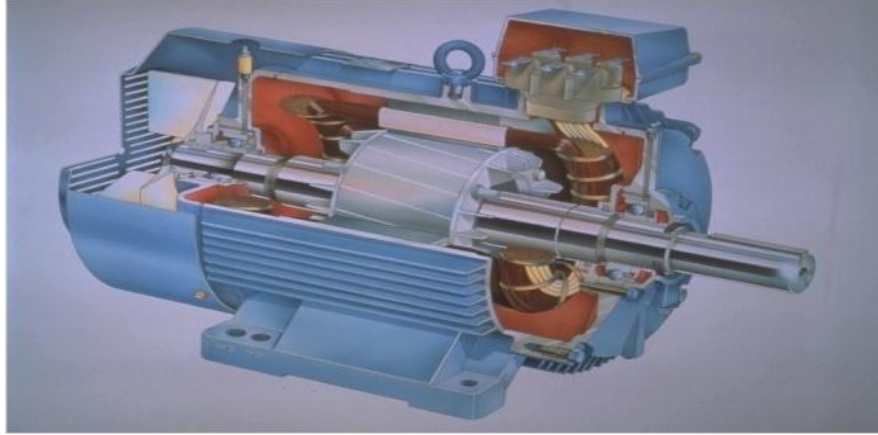


Figure I.13. Machine asynchrone triphasé

I.6.1. Constitution et principe de fonctionnement

La machine asynchrone est l'actionneur le plus utilisé en industrie. Son usage très répandu, est dû à sa robustesse et sa fiabilité.

I.6.2. Constitution

Elle est constituée d'une partie fixe (stator), et d'une partie mobile (rotor).

❖ Le stator

Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger les bobinages. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôles afin de limiter les courants de Foucault et par-là les pertes dues à ces derniers [16].



Figure I.14. Le stator d'une machine asynchrone triphasée.

❖ Le rotor

Il n'est lié à aucune source d'énergie électrique, le courant dans ses enroulements est uniquement induit par le champ tournant créé dans le stator. Il existe deux types de rotor ce qui fait l'existence de deux types de moteur.

✓ **Rotor à bague (bobiné)**

C'est un cylindre feuilleté, avec des encoches qui renferment un enroulement comportant obligatoirement le même nombre de pôles que celui du stator [15].

✓ **Rotor à cage d'écureuil**

Il est constitué de barres conductrices très souvent en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. On dit que le rotor est en court-circuit.



Figure I.15. Rotor en cage d'écureuil.

I.6.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

- D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux) [16].
- D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts.

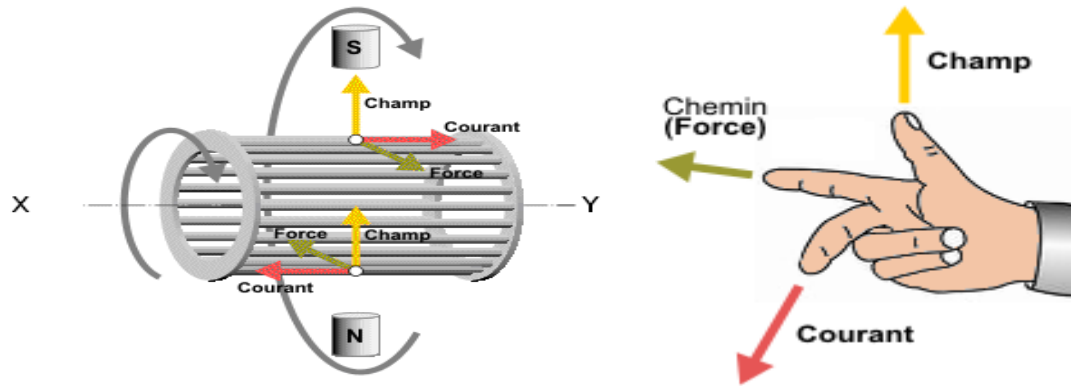


Figure I.16. Le chemin de champ tournant.

I.7. La pompe [17].

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 manométrique que devra fournir la pompe pour garantir le fonctionnement.

I.7.1. Types de pompes [2]

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications, 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 .

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.

➤ 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 poussée 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.

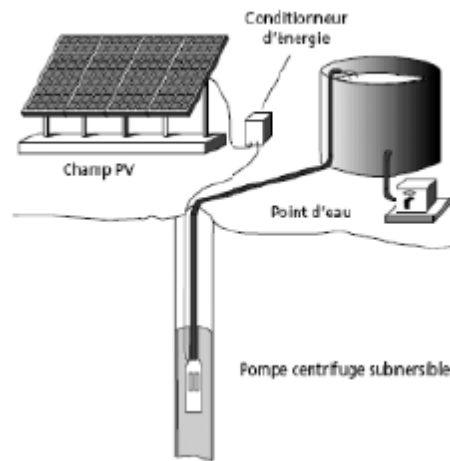


Figure I.17. Exemple d'installation avec une pompe centrifuge [2].

➤ 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.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présentés l'énergie renouvelable solaire et les différents éléments principaux de système de pompage photovoltaïque.

CHAPITRE II

*Modélisation d'un système de
pompage photovoltaïque*

Introduction

La modélisation d'un système physique conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité [11].

II. Modélisation des composants

II.1. Modèle du générateur photovoltaïque

II.1.1. Modèle à une diode (modèle complet)

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) [19].

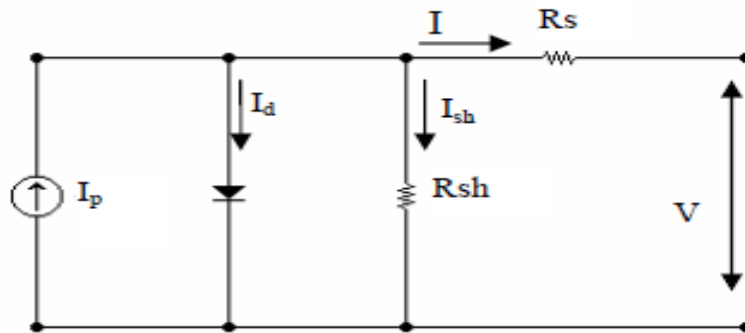


Figure II.1. Schéma équivalent du modèle à une diode [20].

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]:

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

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 :

P_1, P_2, P_3, P_4 : sont définies à l'annexe.

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 :

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

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

❖ Simulation de générateur PV

Le schéma de générateur photovoltaïque en environnement Matlab/Simulink est représenté

Par :

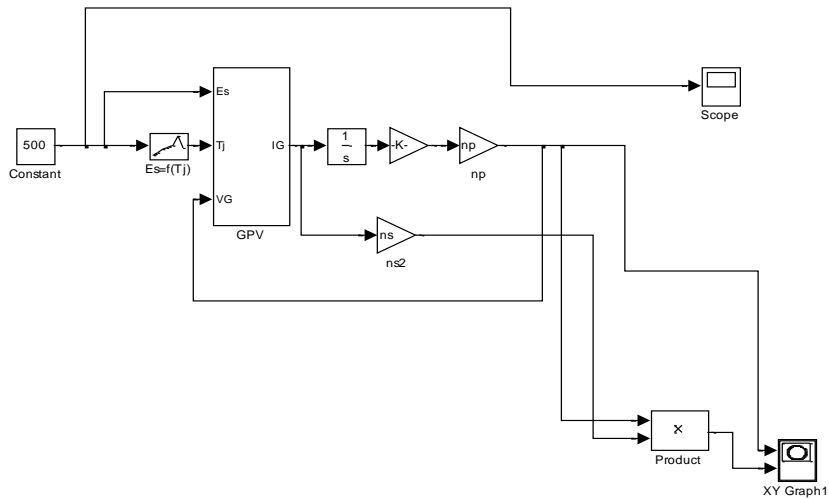


Figure. II.2.Schéma de générateur PV en MATLAB/SIMULINK.

Les résultats de simulation de générateur photovoltaïque sont représentés par la figure (II.3) ces figures représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension à $T=25^{\circ}\text{C}$

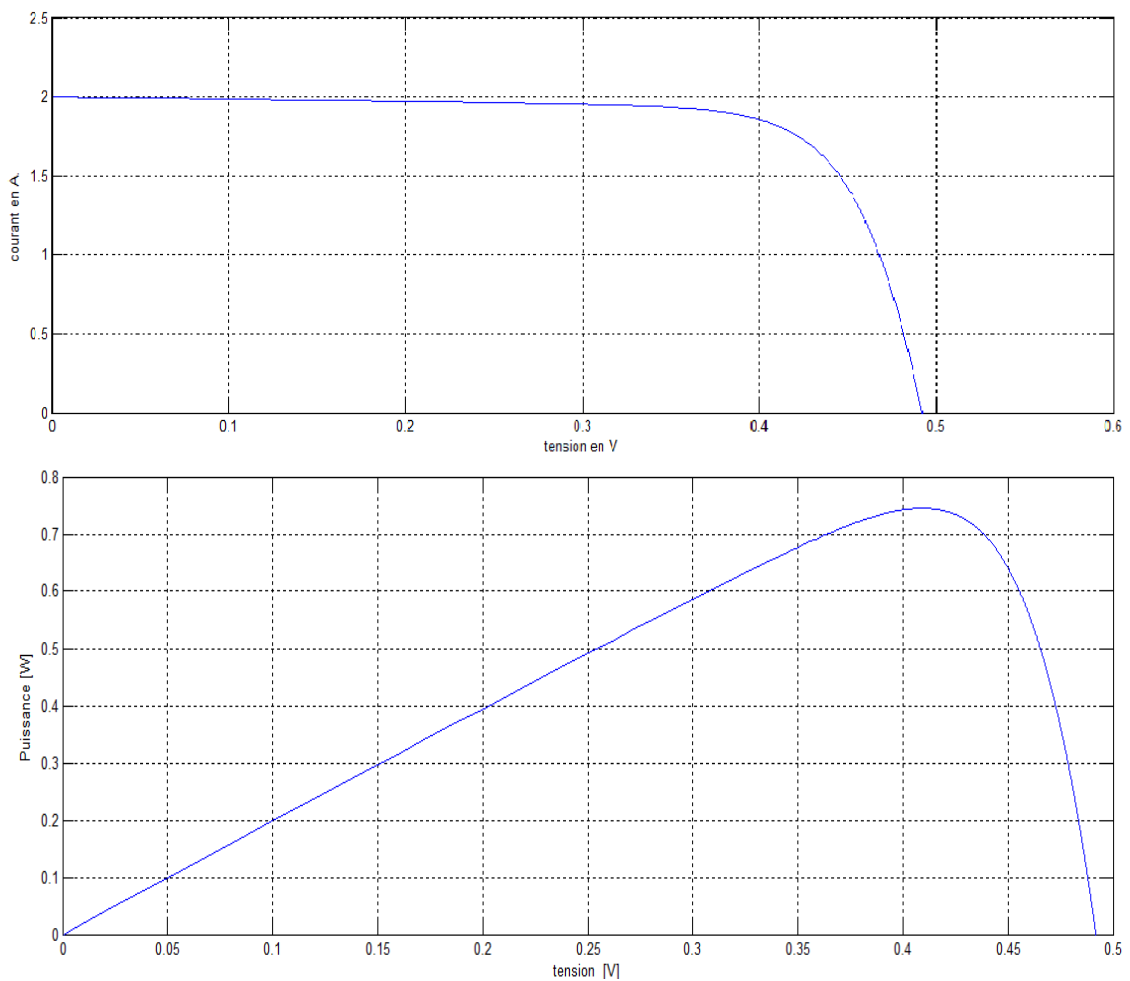


Figure II.3. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque, modèle à une diode.

II.1.2. Modèle de Bishop

Le schéma de circuit équivalent représenté le modèle de Bishop.

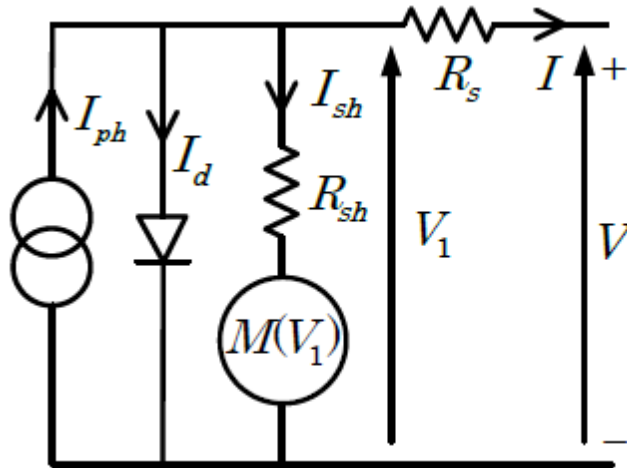
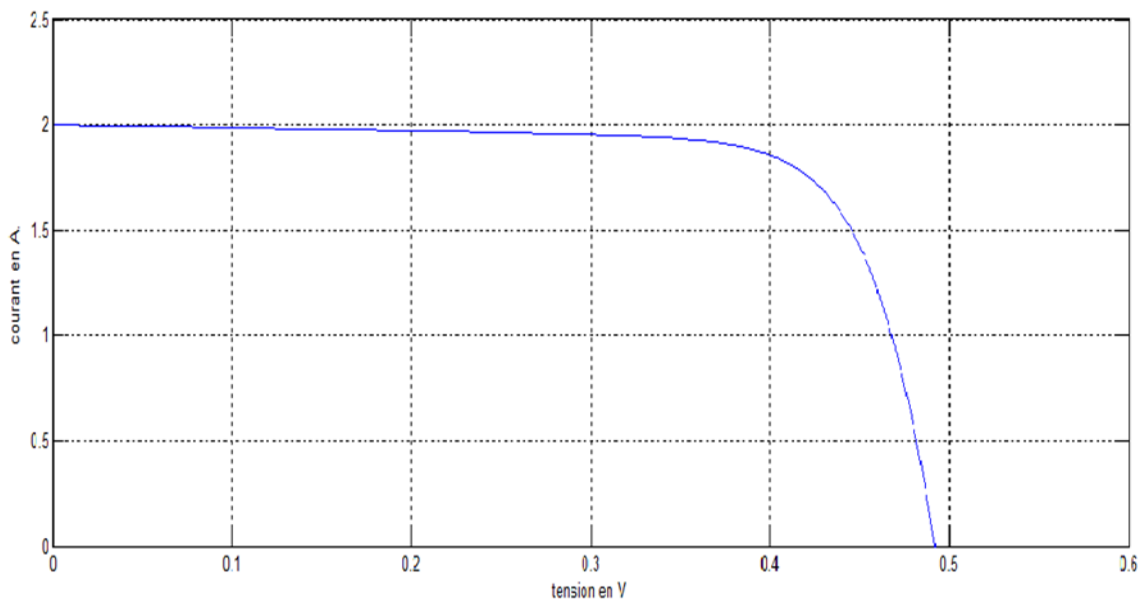


Figure. II.4. Modèle de Bishop [21].

L'effet d'avalanche de la cellule est pris en considération dans le modèle de Bishop en ajoutant au modèle à une diode un multiplicateur non linéaire $M(V_1)$ en série avec la résistance shunt comme on peut le voir dans la Figure (II.1) Ce multiplicateur correspond au dernier terme de l'équation (II.1) qui donne la relation entre le courant (I) et la tension (V) d'une cellule PV.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \left[1 + K \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_b} \right)^{-n} \right] \quad (\text{II.9})$$

La Figure (II.6) représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle Bishop.



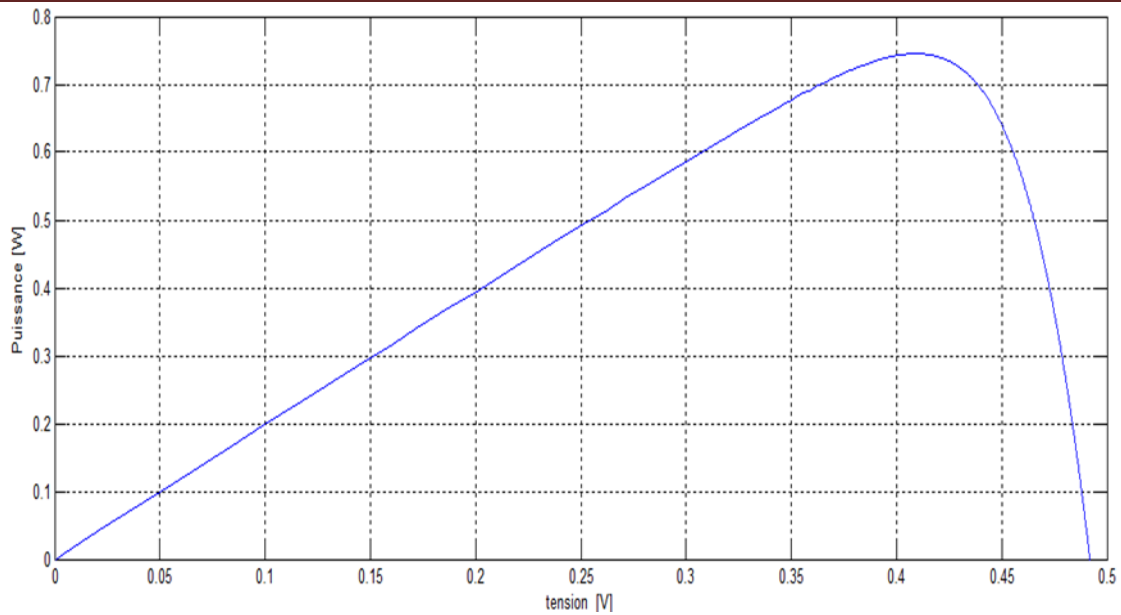


Figure II.5. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque, modèle Bishop.

➤ Résolution de la caractéristique courant-tension

La caractéristique I (V) est la courbe représentant le courant I débité par la cellule en fonction de la tension ces bornes. On note que l'équation caractéristique est non linéaire et implicite ce qui pose problème à trouver une solution analytique direct. Ce type d'équation ne peut être résolu qu'avec des méthodes numériques itératives. Dans ce travail, nous avons opté pour la méthode de Newton-Raphson dont la procédure se résume comme suit [22]:

La procédure se base sur l'équation suivante

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I)}{f'(I)} \quad (\text{II.10})$$

De l'équation caractéristique de la cellule PV (équation II.1.4), nous pouvons définir la fonction $f(I)$ tel que :

$$f(I) = I - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \left[1 + K \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_b} \right) \right] \quad (\text{II.11})$$

La dérivée de la fonction $f(I)$ est donnée par l'équation suivante :

$$f'(I) = -\frac{I_0}{V_s} \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_s}\right) - \frac{1}{R_{sh}} \left[1 + k \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_b} \right)^{-n} \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \left[1 + k \cdot n \cdot \left(\frac{1}{V_b} \right) \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_b} \right)^{-n-1} \right] \quad (\text{II.12})$$

II.1.2. Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement se traduit par un déplacement de la caractéristique $I = f(V)$ suivant l'axe des courants pour une température $t = 25^\circ\text{C}$.

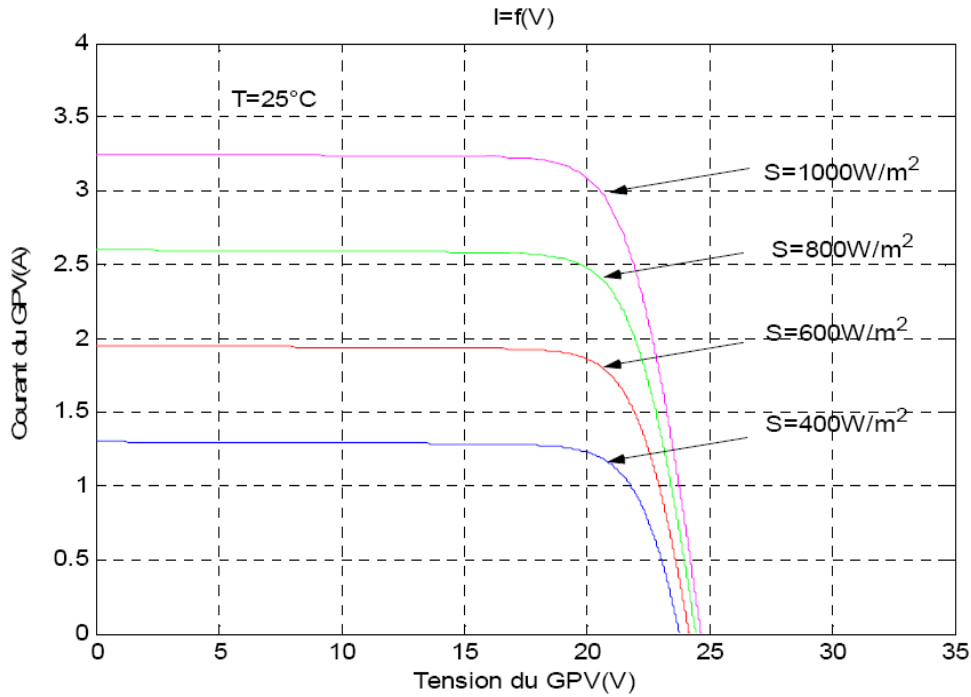


Figure II.6. Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I = f(V)$

II.1.3. Influence de la température

L'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ est représentée sur la Figure (II.7) pour un éclairement fixe $S = 1000 \text{ W/m}^2$.

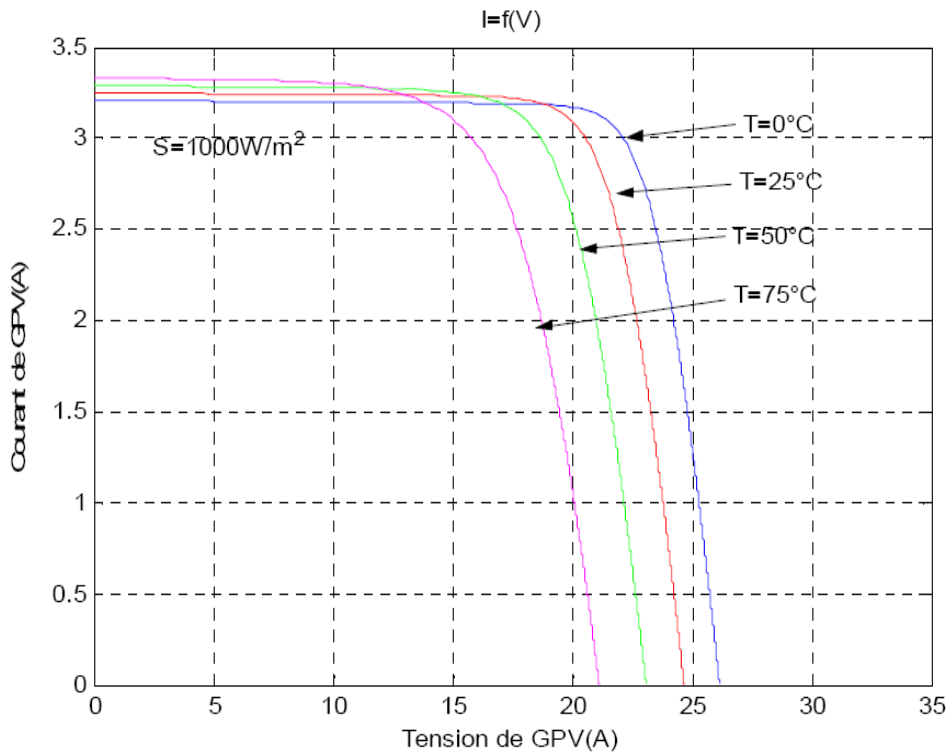


Figure II.7. Influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$

✓ **Interprétation des courbes**

Les figures (II.6 et II.7) Montrent l'influence de la température et le rayonnement sur le rendement du panneau photovoltaïque. En augmentant ou en diminuant la température, la tension du panneau photovoltaïque diminue, le même cas pour la diminution ou l'augmentation de rayonnement. Le courant débite par le panneau photovoltaïque est proportionnelle à l'ensoleillement tandis que la tension des panneaux inversement proportionnelle à la température.

II.2. Modélisation des convertisseurs

II.2.1. 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 [23].

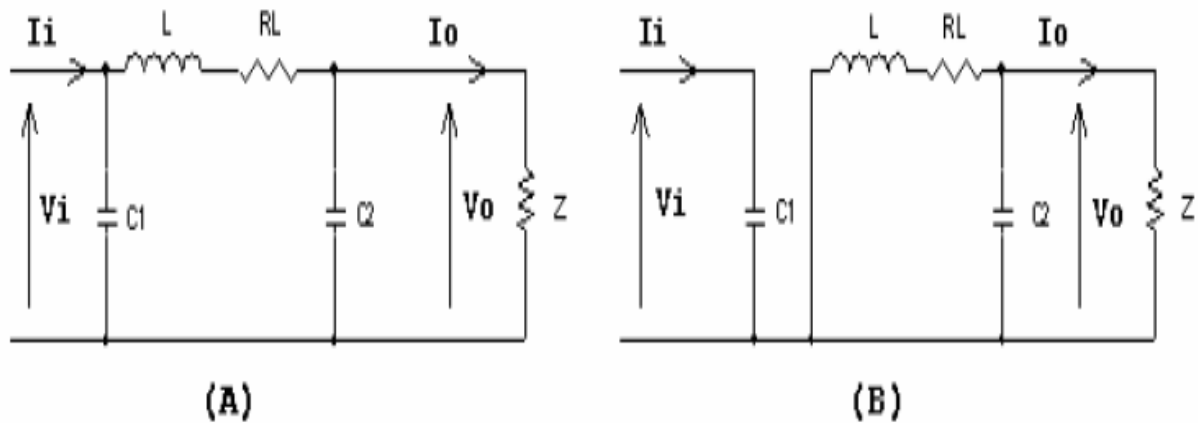


Figure. II.8. Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : S fermé, (B) : S ouvert

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

Pour la première période αT_s :

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_{\epsilon L} - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o - R_L i_L \end{cases} \quad (II-13)$$

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

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - R_L i_L \end{cases} \quad (II-14)$$

❖ Simulation de Hacheur Boost

Le schéma de hacheur Boost en environnement Matlab/Simulink est représenté par :

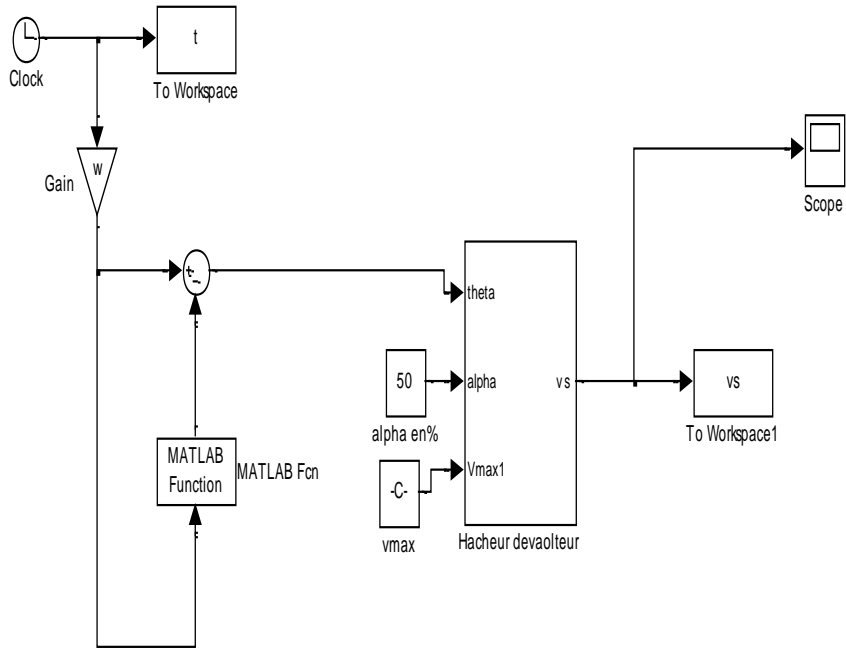


Figure II.9. Schéma d'un hacheur Boost en MATLAB/SIMULIK

Le résultat de simulation d'un hacheur est représenté par la figure (II.11)

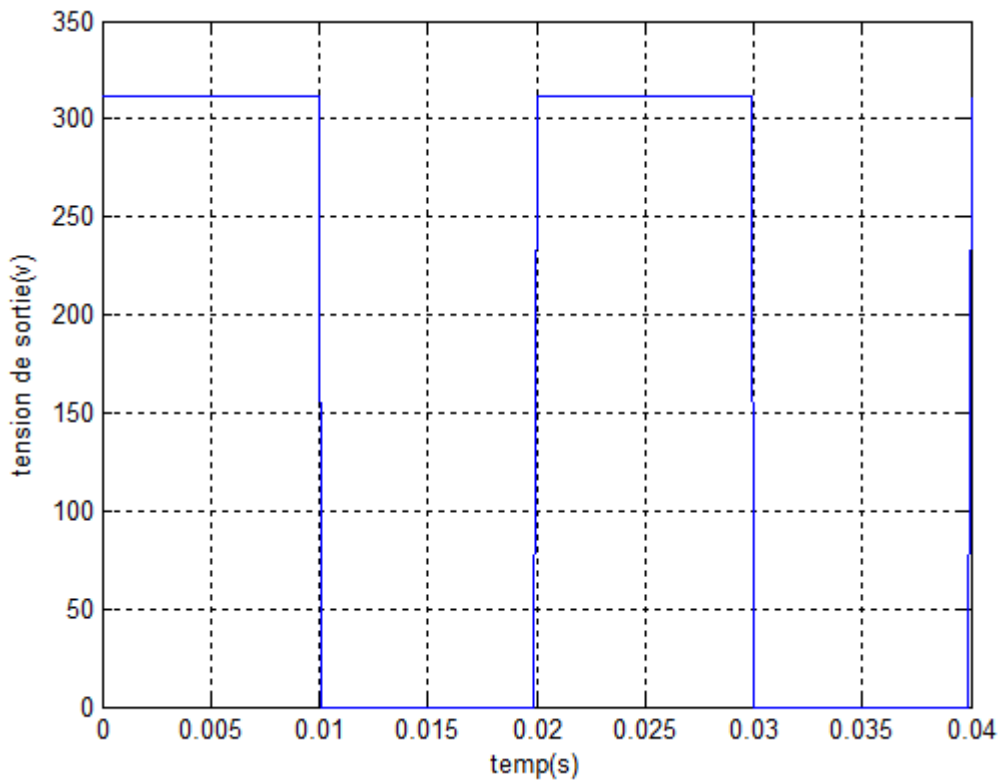


Figure II.10. Caractéristique v(t) d'un hacheur Boost.

II.2.2. 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 [24].
- 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.11).

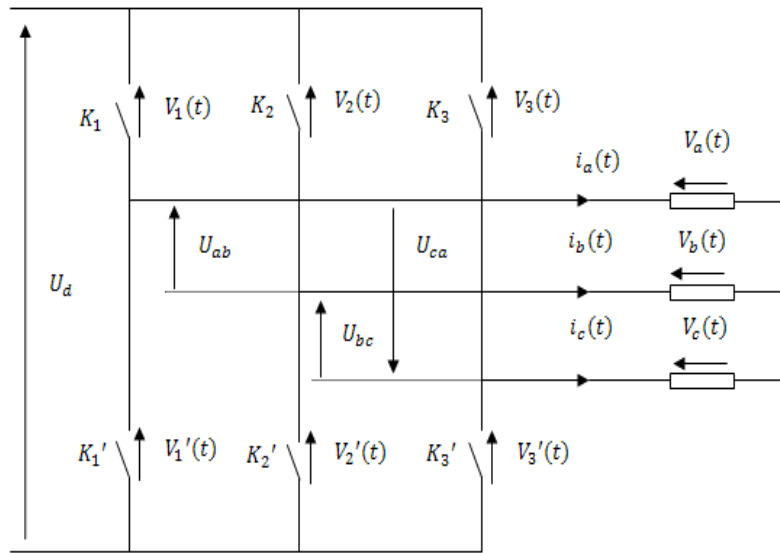


Figure II.11. Modèle simplifié de l'onduleur triphasé.

$(t), v_b(t), v_c(t)$: 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 :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

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

$$\begin{cases} v_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ v_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ v_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

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

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{II.16})$$

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 :

$$F_j = \begin{cases} 1 & \text{si } K_j \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } K_j \text{ ouvert} \end{cases} \quad (j = 1,2,3) \quad (\text{II.17})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_1 = 1 \Rightarrow V_1 = 0 \\ \text{si } F_1 = 0 \Rightarrow V_1 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_1 = -(F_1 - 1)U_f \quad (\text{II.18})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_2 = 1 \Rightarrow V_2 = 0 \\ \text{si } F_2 = 0 \Rightarrow V_2 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_2 = -(F_2 - 1)U_f \quad (\text{II.19})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_3 = 1 \Rightarrow V_3 = 0 \\ \text{si } F_3 = 0 \Rightarrow V_3 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_3 = -(F_3 - 1)U_f \quad (\text{II.20})$$

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_2 - V_1 \Rightarrow U_{ab} = (F_1 - F_2)U_f \\ U_{bc} = V_3 - V_2 \Rightarrow U_{bc} = (F_2 - F_3)U_f \\ U_{ca} = V_1 - V_3 \Rightarrow U_{ca} = (F_3 - F_1)U_f \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Ce qui donne la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = U_f \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

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

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_f \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

❖ Simulation de l'onduleur :

Le schéma d'un onduleur en environnement Matlab/Simulink est représenté par :

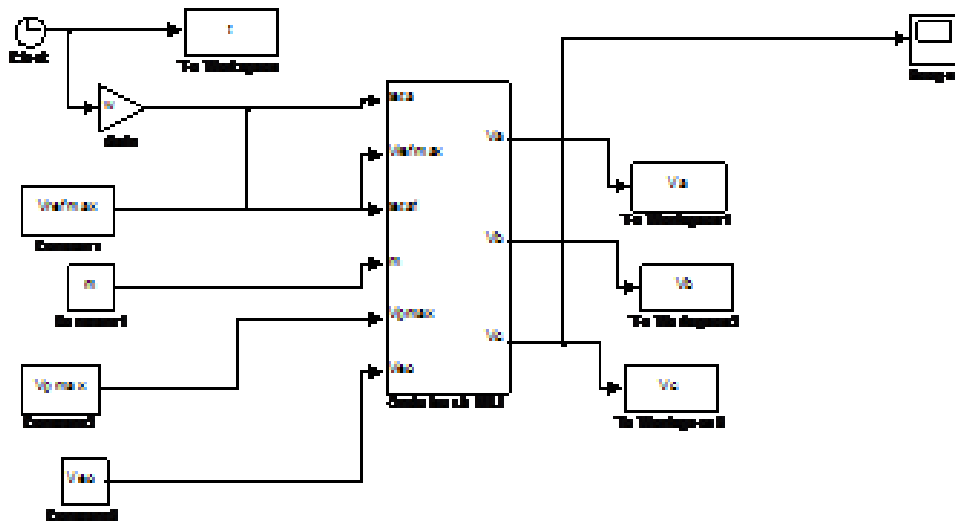


Figure. II.12.Schéma d'un onduleur en MATLAB/SIMULIK

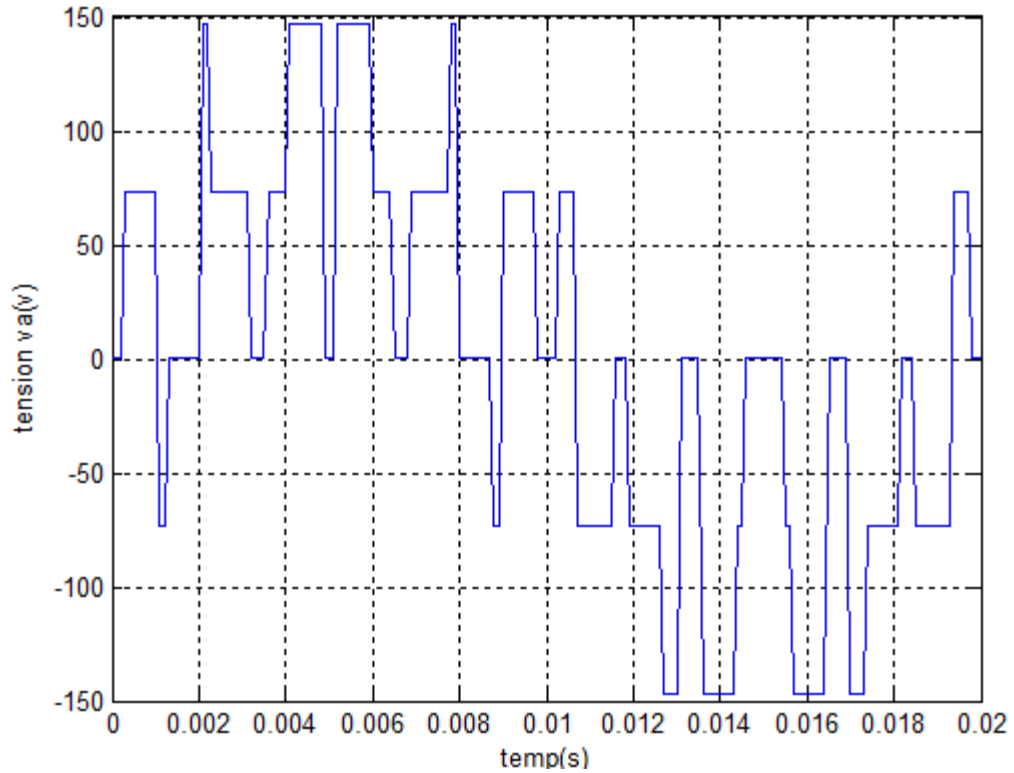


Figure .II.13.caractéristique Va (t)

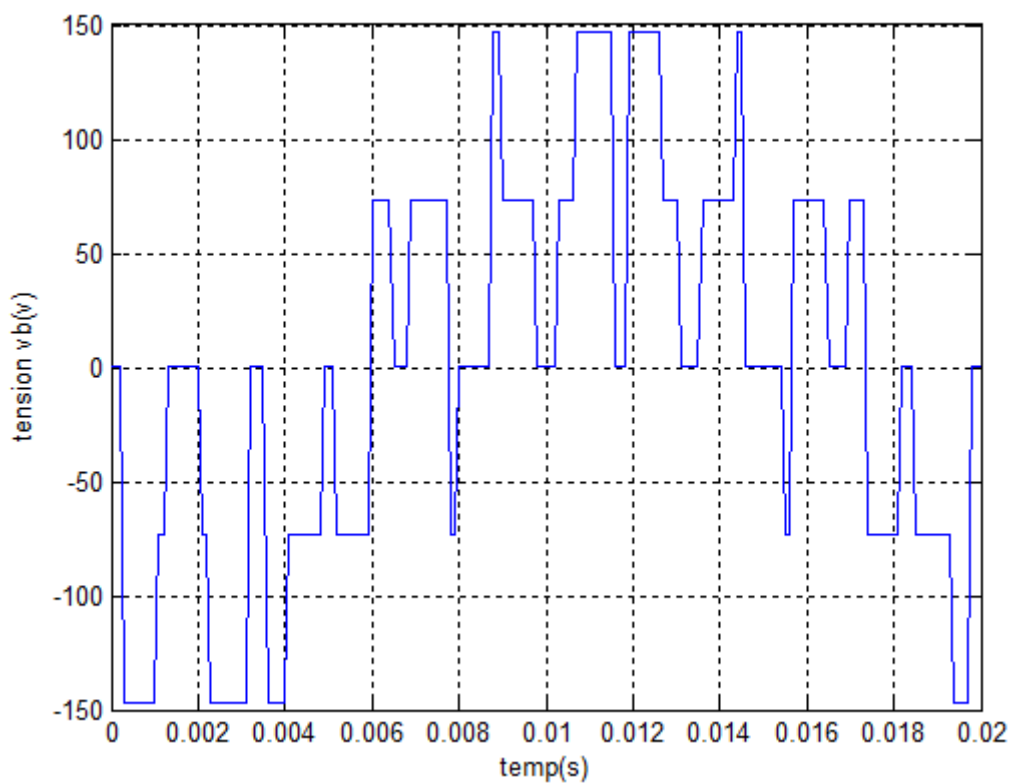


Figure .II.14.caractéristique $V_b(t)$

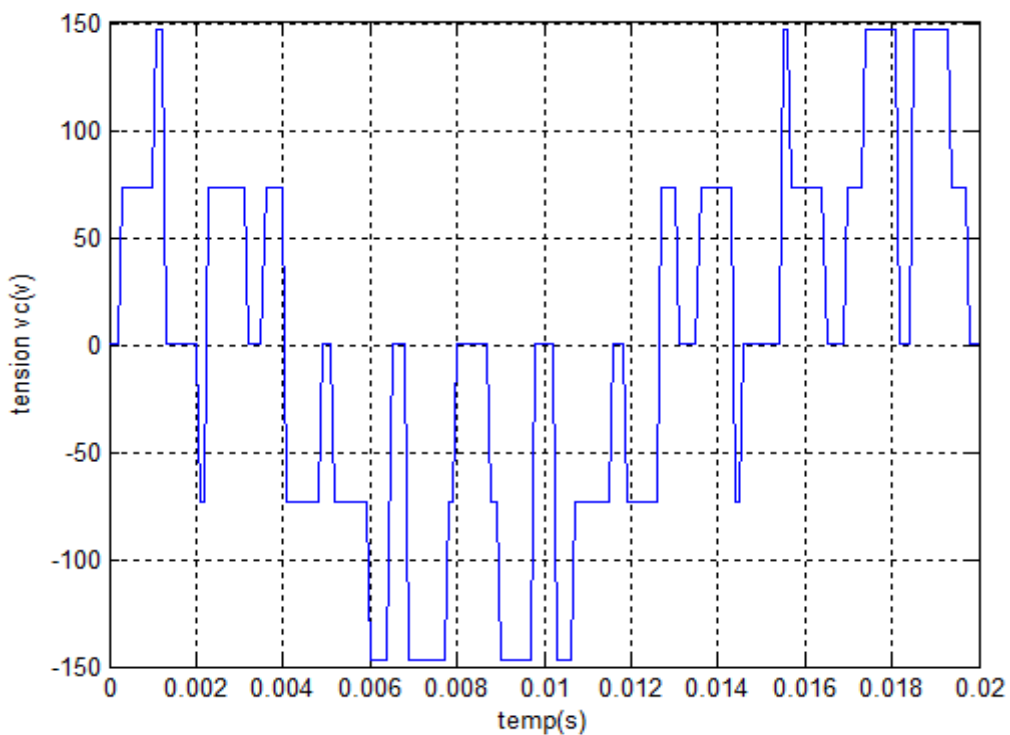


Figure .II.15.caractéristique $V_c(t)$

II.3. Modélisation de la machine asynchrone

II.3.1. Modèle de la machine asynchrone

La représentation schématique de la machine asynchrone dans l'espace électrique est donnée par la figure (II-16).

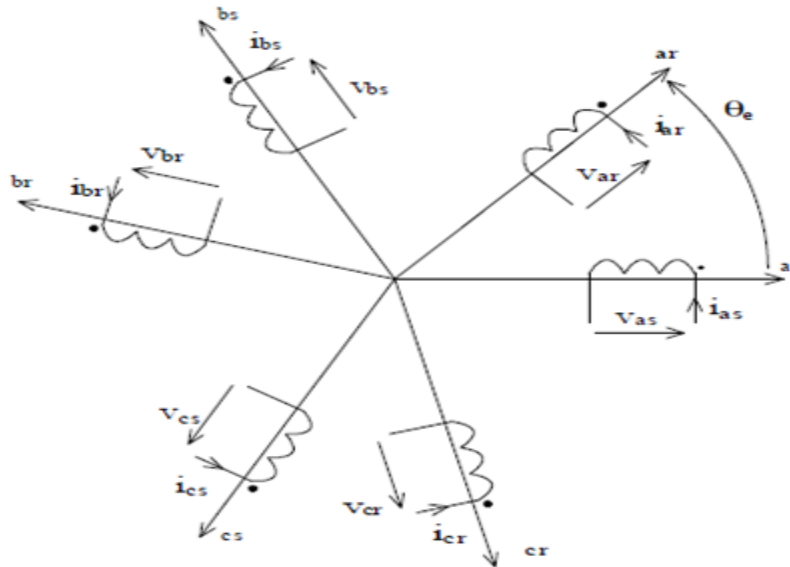


Figure II.16. Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasée.

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 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 [25].

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 [25].

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 [26].

c.1. Equations électriques

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

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

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 :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

R_s : Résistance de la phase du stator.

- **Phase rotorique**

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

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

R_r : Résistance de la phase du rotor.

c.2. Equations magnétiques

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} M_s M_s \\ M_s L_{as} M_s \\ M_s M_s L_{as} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_r & M_r \\ M_r & L_{ar} & M_r \\ M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} M_1 M_3 M_2 \\ M_2 M_1 M_3 \\ M_3 M_2 M_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

$$= M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos \alpha & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Avec : $\alpha = \omega t$

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & L_{as} & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_{as} & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_{ar} & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_{ar} & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

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.26) ; (II.27) et (II.28) les équations électriques deviennent :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \} \quad (\text{II.34})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \} \quad (\text{II.35})$$

c. 3. Equation mécanique

L'équation mécanique régissant la vitesse de rotation ω de la machine est donnée par $J \frac{d}{dt} \omega =$

$$C_{em} - C_r - f \cdot \omega \quad (\text{II.36})$$

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 :

$$C_{em} = \frac{1}{2} p [i_{sabc}]^t \frac{\partial}{\partial \theta} [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad (\text{II.37})$$

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 θ_s intervient pour les grandeurs du stator et l'angle θ_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 :

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II.38})$$

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 :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Où θ 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 :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta - \sin \theta \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) - \sin(\theta - 2\pi/3) \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) - \sin(\theta - 4\pi/3) \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

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

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.17).

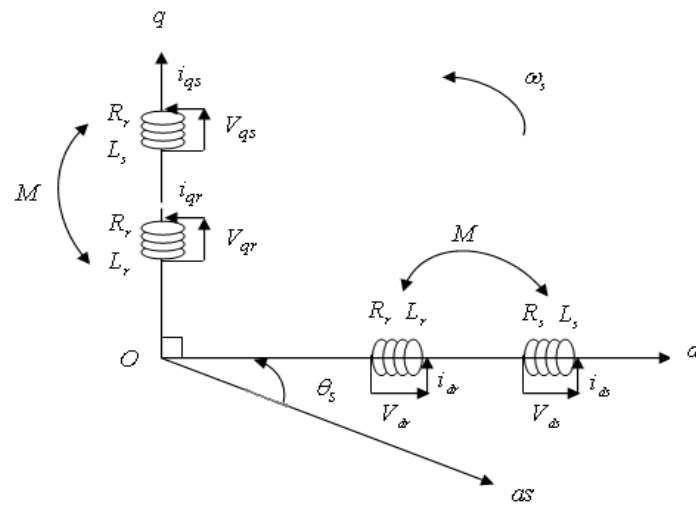


Figure II.17. Modèle biphasé de Park de la machine asynchrone.

e.1. Equations électriques

En appliquant la transformée de Park aux équations électriques (II.34) et (II.35) citées précédemment on aura :

$$V_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{qs} + R_s i_{ds} \quad (\text{II.40})$$

$$V_{qs} = \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{ds} + R_s i_{qs} \quad (\text{II.41})$$

$$= \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{qr} + R_r i_{dr} \quad (\text{II.42})$$

$$V_{qr} = \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{dr} + R_r i_{qr} \quad (\text{II.43})$$

e.2. Equations magnétiques

Les équations magnétiques deviennent

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

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

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II.46})$$

$$\Phi_{qr} = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{II.47})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

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.37), on aura l'expression suivante :

$$C_{em} = p \frac{3}{2} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.49})$$

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 :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.50})$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r = p\Omega \quad (\text{II.51})$$

Les équations électriques deviennent :

$$V_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} + R_s \cdot i_{ds} \quad (\text{II.52})$$

$$V_{qs} = \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II.53})$$

$$0 = \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} + R_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II.54})$$

$$0 = \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \psi_{dr} + R_r \cdot i_{qr} \quad (\text{II.55})$$

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.3.2. 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 [26].

II.3.2.1. Orientation du flux rotorique

Plusieurs stratégies sont envisageables. On va décrire ici une commande à flux rotorique orienté [27].

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

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.56})$$

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 Φ_{qr} . C'est bien sûr le rôle de la commande à concevoir.

Le couple se réduira alors à :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.57})$$

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

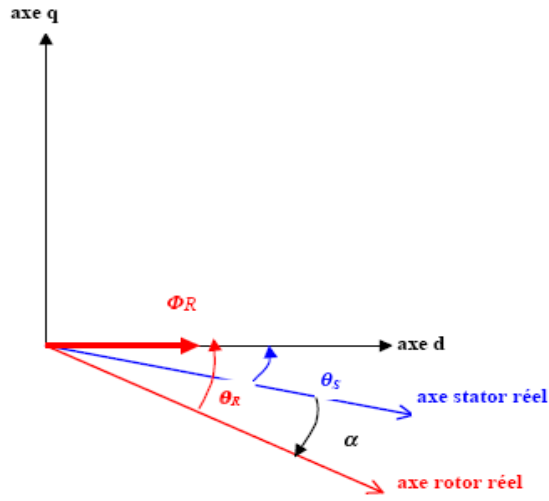


Figure II.19.Orientation du flux rotorique sur l'axe 'd' [27].

Cela suppose donc de maîtriser également l'angle θ_s . L'angle α sera lui, donné par un capteur de position (codeur incrémental).

Rappelons les équations utilisables pour la commande :

a. Orientation du flux rotorique

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II.58})$$

$$0 = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{II.59})$$

b. Loi des mailles au rotor

$$0 = \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{qr} + R_r \cdot i_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \quad (\text{II.60})$$

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

car :

$$\Phi_{qr} = 0$$

II.3.2.2. Estimation de Φ_{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.

$$\text{A partir de : } \Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II.62})$$

$$0 = \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II.63})$$

on obtient

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} - \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{dr} \quad (\text{II.64})$$

$$\text{Soit : } \Phi_{dr} + \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} \quad (\text{II.65})$$

L'équation (II-64) peut être réécrite en utilisant la notation de Laplace : $s = \frac{d}{dt}$

$$\Phi_{dr} \left(1 + \frac{L_r}{R_r} s\right) = M \cdot i_{ds} \quad (\text{II.66})$$

Ou encore en posant:

$$\frac{L_r}{R_r} = \tau_r, \quad \Phi_{dr}(1 + \tau_r s) = M \cdot i_{ds} \quad (\text{II.67})$$

$$\Phi_{dr-est} = \frac{M}{(1 + \tau_r s)} i_{ds} \quad (\text{II.68})$$

Le flux Φ_{dr} peut être estimé (Φ_{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.

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.69})$$

II.3.2.3. Estimation de ω_s et de θ_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 θ_s .

$$\text{A partir de : } 0 = \omega_r \cdot \Phi_{dr} + R_r \cdot i_{qr} \text{ et de } 0 = L_r \cdot i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{II.70})$$

$$\text{on tire : } \omega_r = -\frac{R_r i_{qr}}{\Phi_{dr}} \quad (\text{II.71})$$

$$\omega_{r-est} = \frac{M}{\Phi_{dr-est}} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{qs}, \quad \theta_{r-est} = \int \frac{M}{\Phi_{dr-est}} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{qs} dt + \theta_{ro} \text{ et } \theta_{s-est} = \theta_{r-est} + \alpha \quad (\text{II.72})$$

θ_s sera donc estimé (θ_{s-est}) à partir de la mesure de α (codeur incrémental), et du courant i_{qs} grandeur statorique accessible à partir de la mesure des courants réels statoriques.

II.3.2.4. Loi des mailles pour V_{ds} et V_{qs}

a. loi des mailles pour V_{ds}

Reprenons la loi des mailles statoriques :

$$V_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} + R_s \cdot i_{ds} \quad (\text{II.73})$$

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

$$\Phi_{dr} i_{ds} = \frac{(1 + \tau_r s)}{M} \quad (\text{II.74})$$

et

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (\text{II.75})$$

$$\text{A partir de } \Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II.76})$$

$$\text{on tire } i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\Phi_{dr} - M \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.77})$$

soit :

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} - M \cdot i_{ds}) = \left(L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \quad (\text{II.78})$$

$$\Phi_{ds} = L_s \left(1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s} \right) i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \quad (\text{II.79})$$

$$\Phi_{ds} = \sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \quad (\text{II.80})$$

Où : σ est le coefficient de dispersion de BLONDEL.

De la même façon, il faut exprimer Φ_{qs} :

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (\text{II.81})$$

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} = 0 \quad (\text{II.82})$$

Avec l'orientation du flux ce qui donne :

$$i_{qr} = -\frac{M}{L_r} i_{qs} \quad (\text{II.83})$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} - \frac{M^2}{L_r} \cdot i_{qs} = \sigma L_s i_{qs} \quad (\text{II.84})$$

Il est donc possible maintenant d'écrire :

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \left(\sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \right) - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{qs} \quad (\text{II.85})$$

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

$$V_{ds} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{dr} \cdot s - \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r \cdot s)}{M} \cdot \Phi_{dr} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{dr} \cdot s - \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II.87})$$

$$V_{ds} = \left[(R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r \cdot s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right] \Phi_{dr} - \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II.88})$$

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 :

$$V_{qs} = \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II.89})$$

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

$$V_{qs} = \frac{d}{dt} (\sigma L_s \cdot i_{qs}) + \omega_s \cdot \Phi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II.90})$$

Avec :

$$\Phi_{ds} = \sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{dr} = \left(\sigma L_s \frac{(1+\tau_r \cdot s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr} \quad (\text{II.91})$$

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

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 Φ_{dr} et i_{qs} choisies pour la régulation du couple.

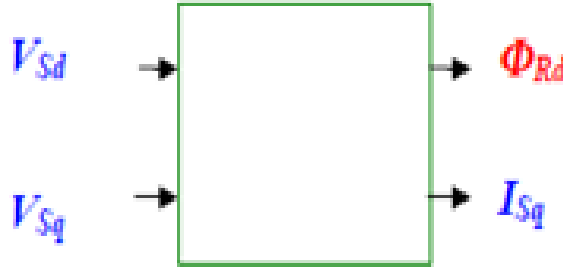


Figure .II.19 .Schéma de la machine asynchrone dans la base de Park [27].

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 :

$$V_{ds} = \left[(R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right] \Phi_{dr} - \sigma L_s \cdot \omega_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II.93})$$

ce qui donne :

$$\Phi_{dr} = \frac{V_{ds} + \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs}}{\left[(R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} = \frac{1}{\left[(R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} (V_{ds} + \sigma L_s \cdot \omega_s \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.94})$$

$$\Phi_{dr} = A \cdot (V_{ds} + B \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.95})$$

$$A = \frac{1}{\left[(R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} \quad (\text{II.96})$$

$$B = \sigma L_s \cdot \omega_s \quad (\text{II.97})$$

Pour V_{qs} on a :

$$V_{qs} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) i_{qs} + \omega_s \left(\sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr} \quad (\text{II.98})$$

ce qui donne

$$i_{qs} = \frac{V_{qs} - \omega_s \left(\sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr}}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} \left[V_{qs} - \omega_s \left(\sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \Phi_{dr} \right] \quad (\text{II.99})$$

$$i_{qs} = C \cdot [V_{qs} - D \cdot \Phi_{dr}] \quad (\text{II.100})$$

Avec :

$$C = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} \tag{II.101}$$

$$D = \omega_s \left(\sigma L_s \frac{(1 + \tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \tag{II.102}$$

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

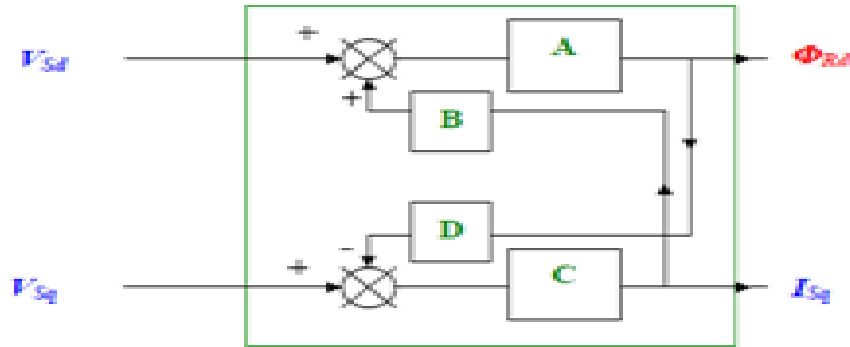


Figure II.20. Schéma du couplage [27].

II.3.2.5. Elaboration des lois de commande pour V_{ds} et V_{qs}

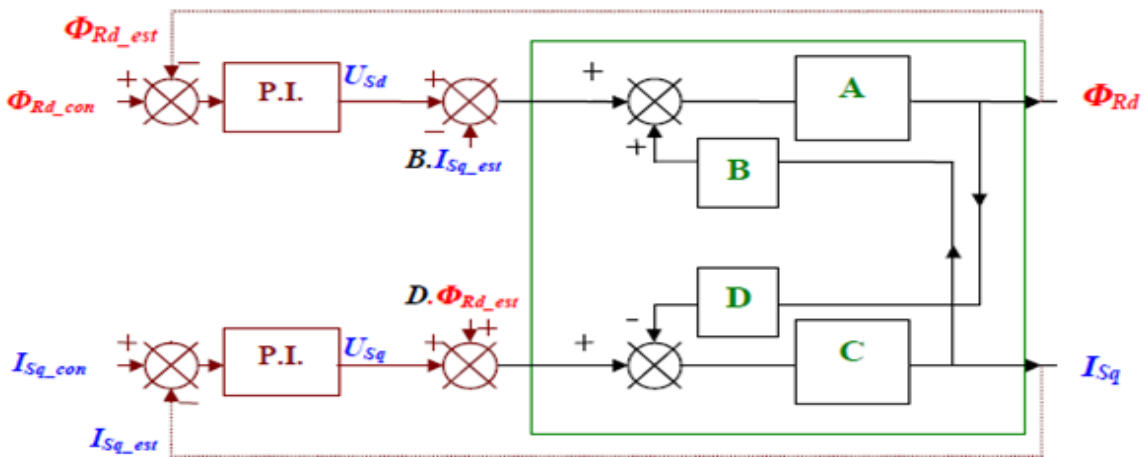


Figure II.21. Schéma de commande des grandeurs de réglage du couple [27].

Les mesures de Φ_{dr} et i_{ds} (appelées Φ_{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 :

$$\Phi_{dr} = A \cdot (U_{ds} - B \cdot i_{qs-est} + B \cdot i_{qs}) = A \cdot U_{ds} \tag{II.103}$$

$$i_{qs} = C \cdot (U_{qs} + D \cdot \Phi_{dr-est} - D \cdot \Phi_{dr}) = C \cdot U_{qs} \tag{II.104}$$

❖ Simulation de la machine asynchrone

La figure suivante représente le schéma bloc d'une machine asynchrone :

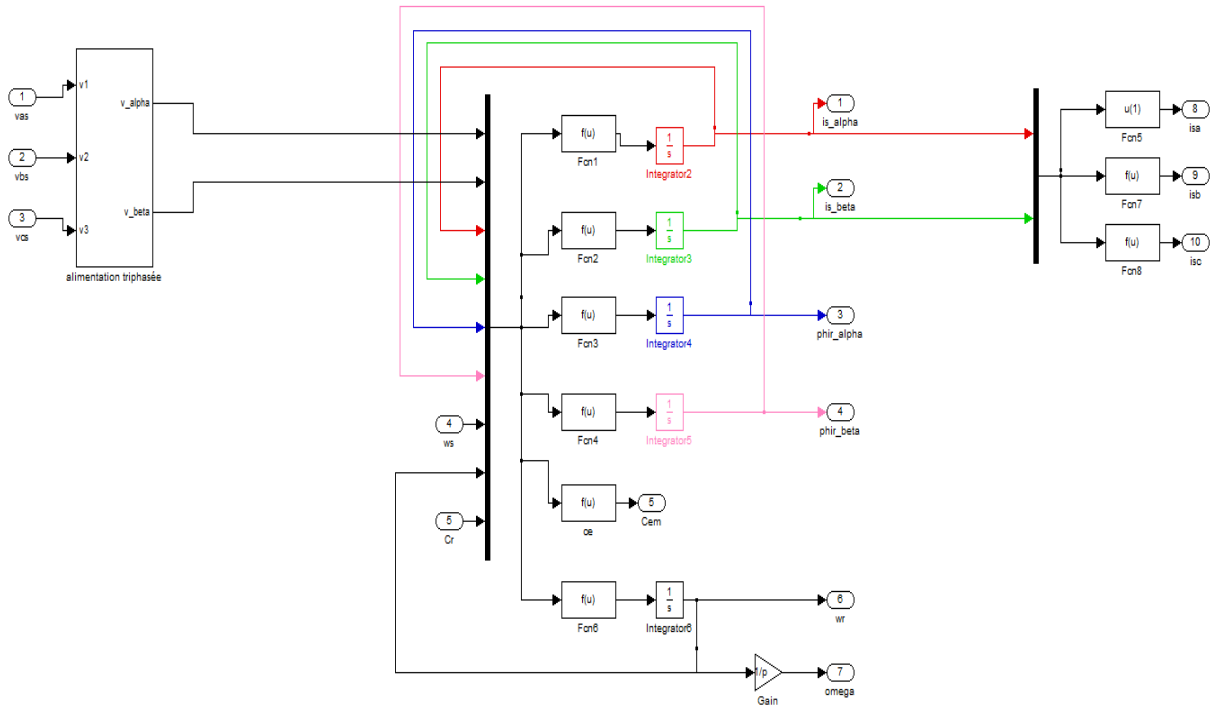
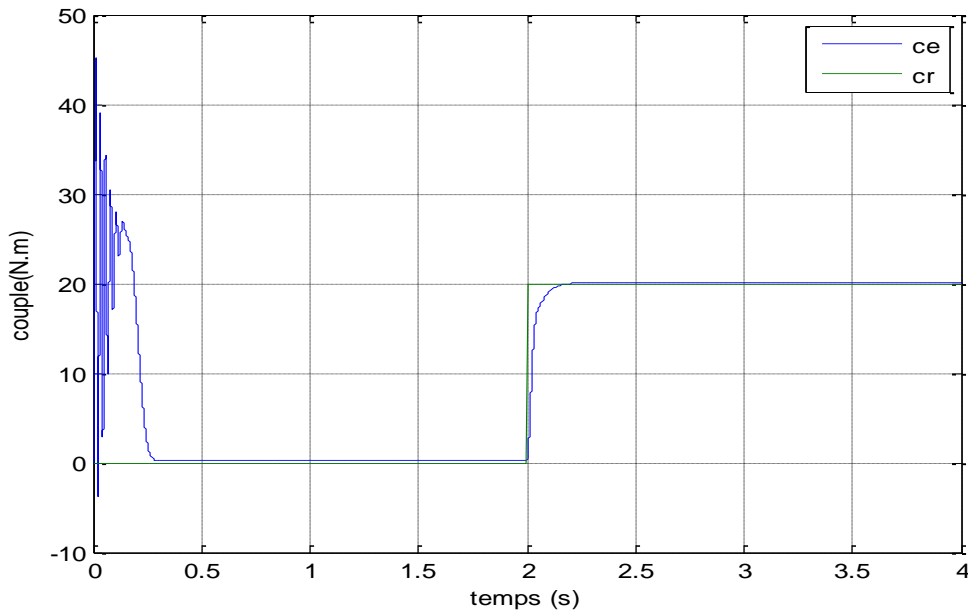
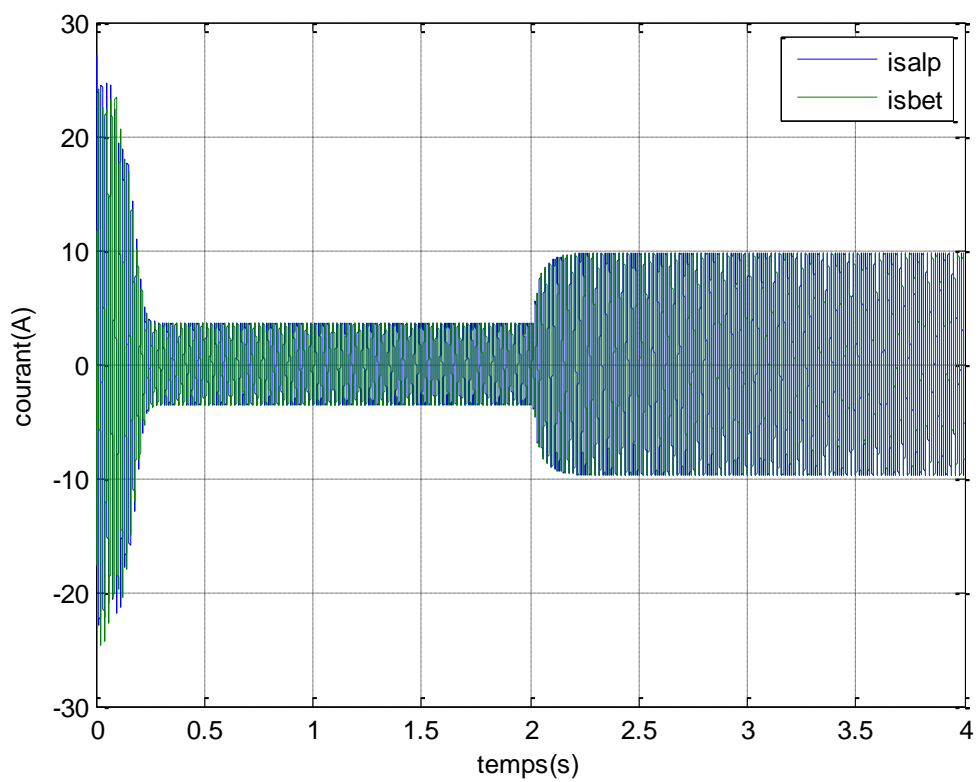
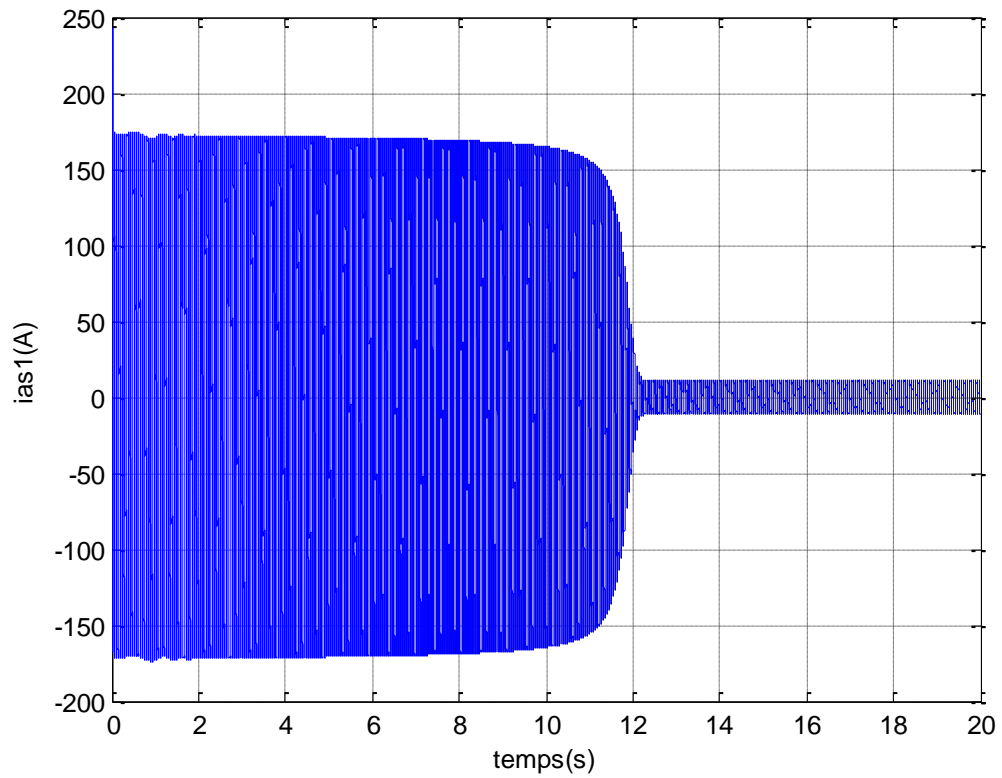


Figure II.22. Schéma de la machine asynchrone en MATLAB/SIMULNIK.

Les résultats de simulation de la machine asynchrone sont représentés dans les figures suivantes :





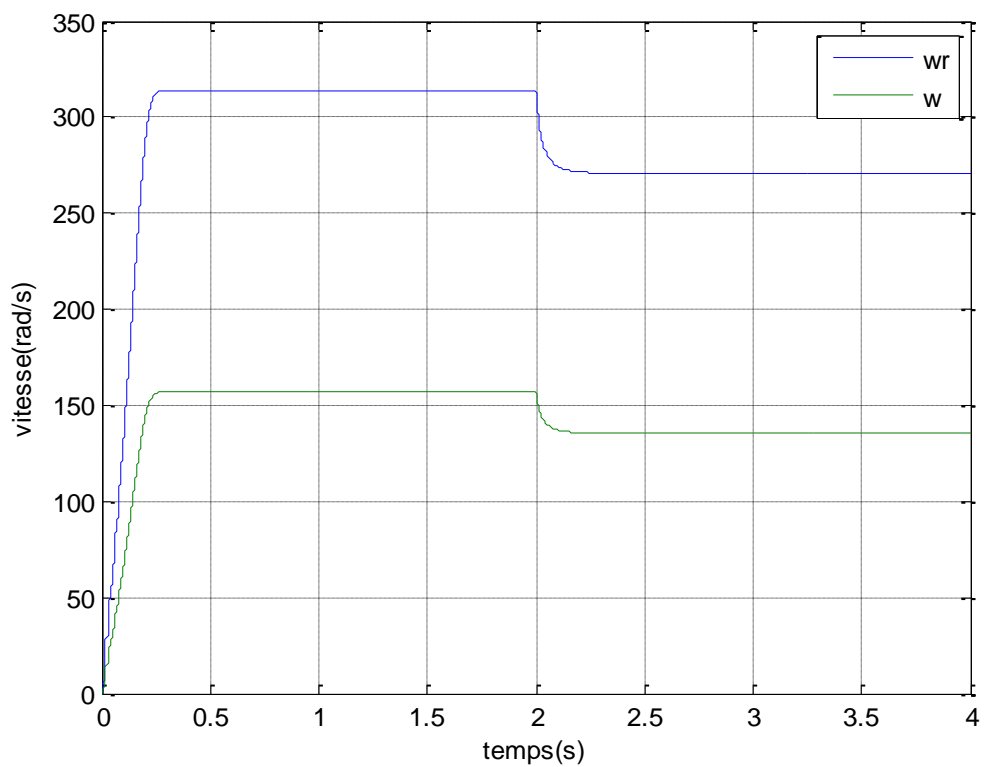
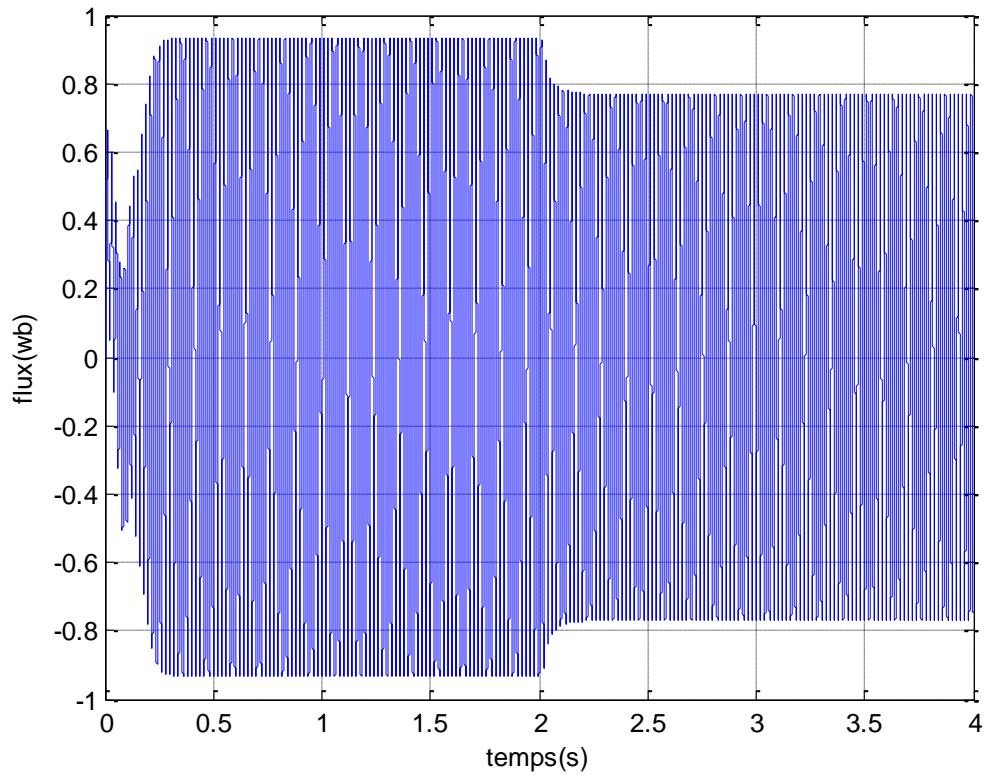


Figure II.23. : les résultats de la commande de la machine asynchrone.

II.5. 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 hauteur manométrique H_m donnée par barbotage pour obtenir un débit [28].

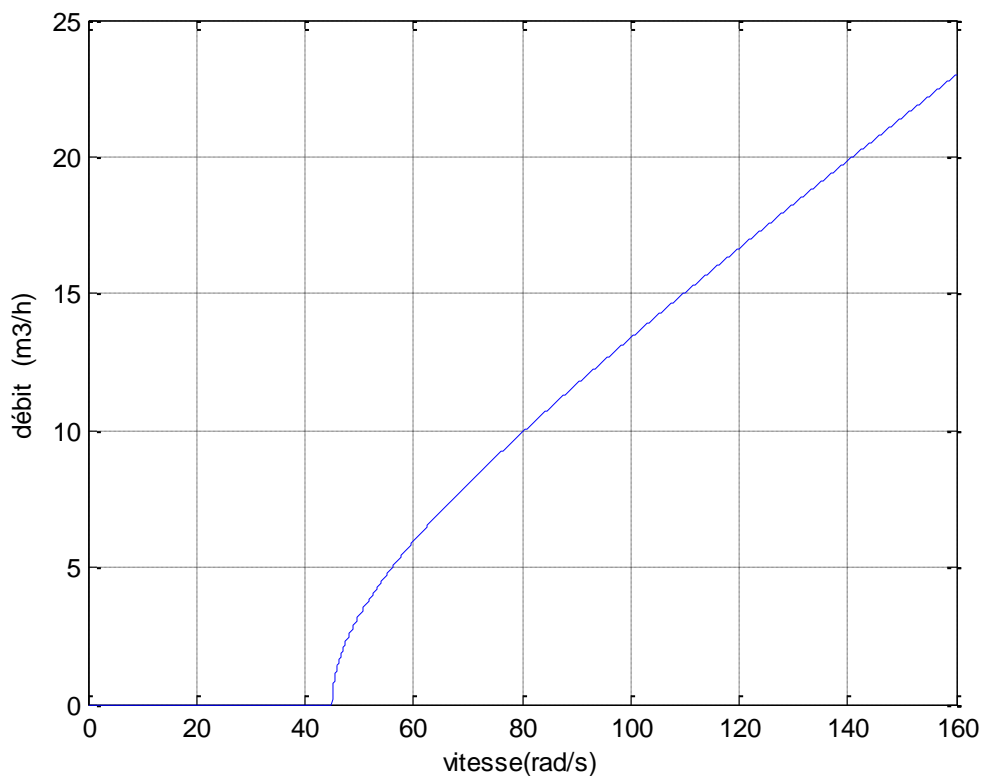


Figure II.24. la caractéristique débit-vitesse d'une pompe centrifuge.

➤ 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 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 suppose un couple résistant C_r :

$$C_r = k_r \omega^2 + C_s \quad (\text{II.105})$$

Avec :

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

C_s : Couple statique, très petit [Nm].

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

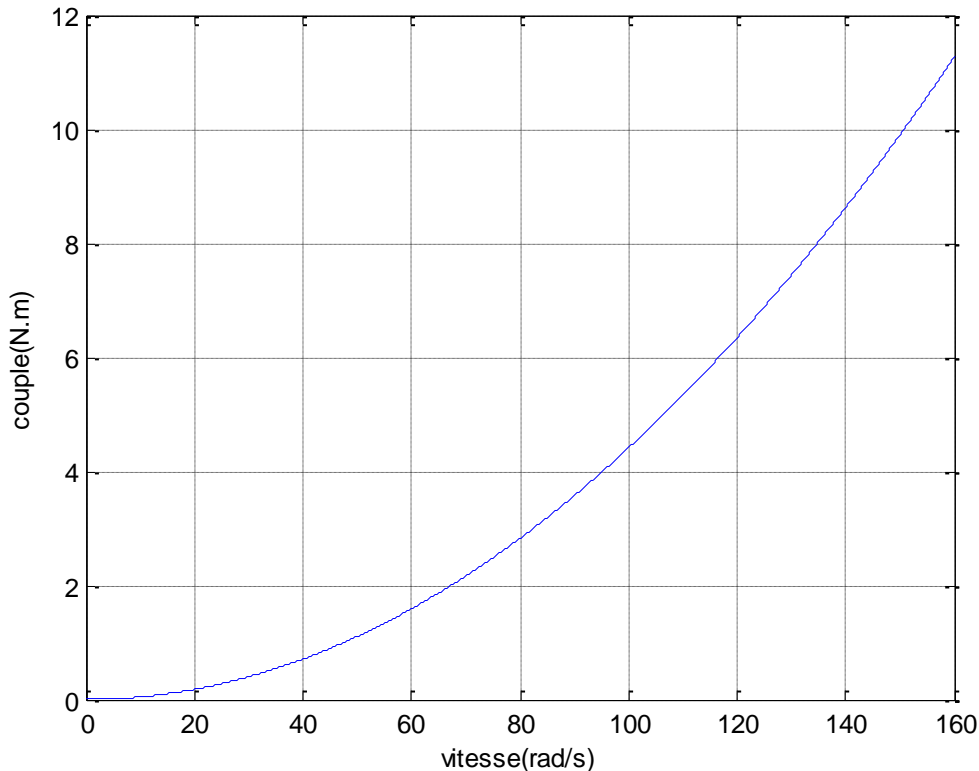


Figure II.25. Caractéristique couple-vitesse d'une pompe centrifuge.

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

$$P_{mec} = k_p \omega^3 \quad (\text{II.106})$$

➤ **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 [29].

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 »

$$H_m = C_1 \omega^2 - C_2 \omega Q - C_3 Q^2 \quad (\text{II.107})$$

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 :

$$H_1 = C_1 w^2 \quad (\text{II.108})$$

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:

$$H_c = H_g + \Delta H \quad (\text{II.109})$$

Avec :

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

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

$$\Delta H = k_h Q^2 \quad (\text{II.110})$$

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 [29].

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

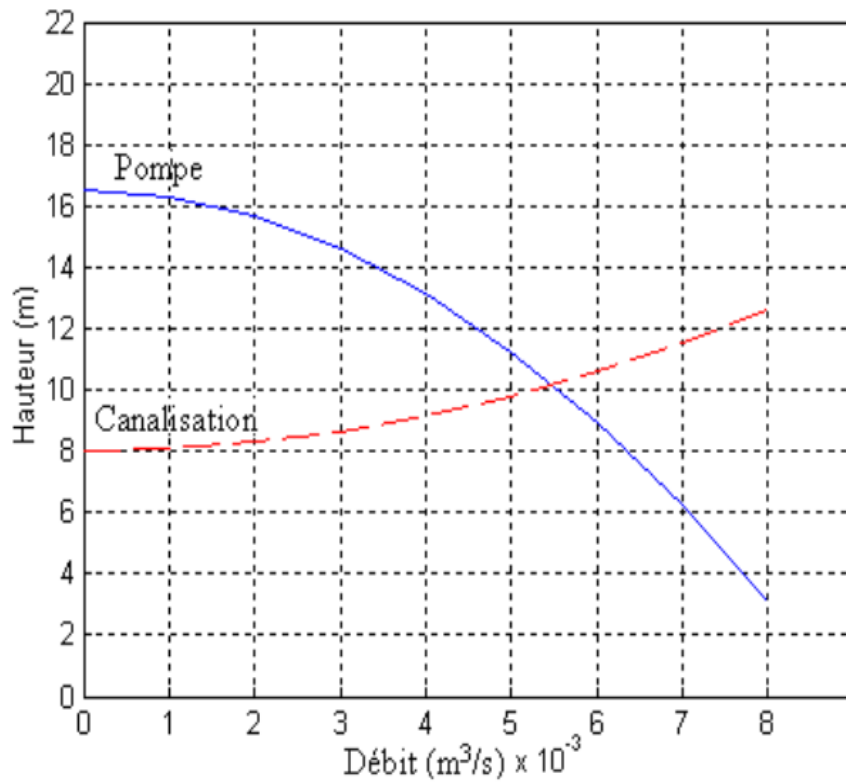


Figure II.26 .Caractéristiques de la pompe $H_m(Q)$ et de la canalisation

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation des différents éléments de système de pompage photovoltaïque : telque le générateur, les convertisseurs, la machine asynchrone et la pompe à eau.

CHAPITRE III

*Dimensionnement d'un système de
pompage photovoltaïque*

Introduction

Dans ce chapitre on va s'intéresser au dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque. Les facteurs les plus importants de cette approche devront être estimés soigneusement afin d'obtenir un dimensionnement satisfaisant.

III.1. Dimensionnement du champ photovoltaïque

- **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.

- **Inclinaison du générateur photovoltaïque**

L'inclinaison 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.

- **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, 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 et l'énergie hydraulique nécessaires correspondantes à ce mois serviront pour le choix des composants du système [30].

- **Evaluation de l'énergie moyenne journalière requise par la charge [31].**

La consommation moyenne nécessaire pour le fonctionnement des équipements en (Wh/j) est donnée par la formule suivante :

$$C_j = \sum P.h \quad (\text{III.1})$$

Avec

P : la puissance électrique consommée par la charge (en w).

h : la durée d'utilisation quotidienne moyenne (en h).

- **Estimation du nombre de module en séries**

Le nombre de module en série est :

$$N_s = \frac{U}{U_n} \quad (\text{III.2})$$

U : tension de l'installation en V.

U_n : tension nominale d'un module en V.

- **Estimation de nombre de branche en parallèle**

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad \text{(III.3)}$$

N_p : nombre de module en parallèle.

N : nombre de module.

- **Calcul de la puissance du générateur**

La puissance crête délivré par le générateur est :

$$P_c = N_s * N_p * P_{cm} \quad \text{(III.4)}$$

P_{cm} : puissance crête d'un module.

P_c : puissance d'un générateur.

- **Calcul de la surface du générateur**

La surface totale occuper par le champ sur le sol ou le toi est :

$$S = N * S_m \quad \text{(III.5)}$$

S_m : c'est la surface d'un module en m^2

N : Nombre de module

III.2. Dimensionnement du moteur

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

III.3. Notions hydrauliques

Les stations de pompage sont constituées d'une ou plusieurs pompes qui aspirent des volumes d'eau et les refoulent sous une certaine pression dans les canalisations du réseau. Les paramètres nécessaires pour dimensionner la pompe solaire sont le débit d'exploitation et la hauteur à laquelle la pompe devra refouler. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite [32].

- **Le débit Q**

Le débit fourni par une pompe est la quantité d'eau qu'elle refoule durant un intervalle de temps donné. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en m^3 par jour.

- **La hauteur manométrique totale HMT**

C'est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit [33]:

$$HMT = H_g + P_c \quad \text{(III.6)}$$

Avec :

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (voir Figure III.1). Elle est donnée par la formule suivante :

$$H_g = H + B + C \quad (\text{III.7})$$

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

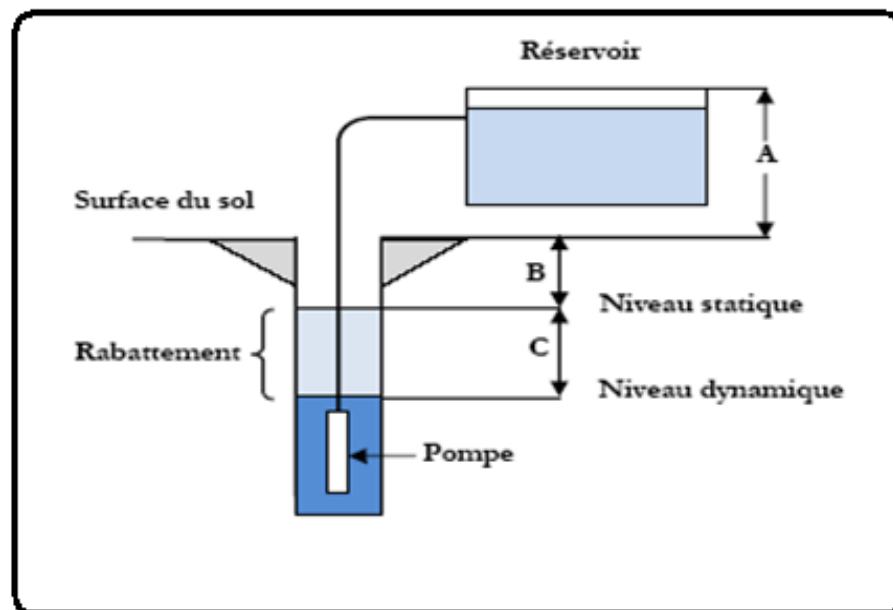


Figure III. Hauteur manométrique total [33].

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

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

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

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

III.4. Configuration de systèmes de pompage

Les configurations du groupe moteur-pompe les plus utilisées sont :

- Ensemble moteur-pompe immergé.
- Ensemble moteur-pompe flottant.
- Ensemble moteur-pompe en superficie.

Chaque configuration est utilisée selon le débit et la hauteur de pompage nécessaires. En général, les pompes immergées sont utilisées dans des puits profonds, de petits diamètres. Cependant, les pompes flottantes sont installées dans des puits, lacs ou puits de grands diamètres.

III.4.1. Système de pompage adopté

Dans les sites éloignés en zones arides et semi-arides où les besoins en eau sont importants que ce soit pour l'eau potable ou la petite irrigation, le manque d'eau pourrait être dramatique pour la population.

- Un groupe électropompe immergée
- Un générateur de modules photovoltaïques type Silicium poly-cristallin
- Un réservoir de stockage d'eau

III.4.2. Les principaux avantages de ce système :

- Pour des applications dans des climats chauds, le moteur est refroidi à l'eau et ne pose aucun problème de surchauffe.
- Un démarrage du groupe électropompe dès qu'un rayonnement incident critique est dépassé (ciel couvert ou nuageux, lever du soleil...), donc un temps de fonctionnement plus important.
- Un stockage de l'eau permettant à l'utilisateur de couvrir ces besoins en dehors des heures d'ensoleillement. Ceci est d'autant plus intéressant en particulier pour les régions du sud où l'irrigation pendant la journée est difficile (température élevée, risque d'évaporation dans le cas d'irrigation gravitaire,...).

III.5. Dimensionnement de la pompe

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

$$Q = \frac{3.6P_h}{gh} \quad \text{(III.8)}$$

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 :

$$P_h = P_e \eta_{MB} \quad (\text{III.9})$$

η_{MB} : Rendement crête du sous-système moteur-pompe.

III.6. 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. 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 :

$$D = K \sqrt{Q} \quad (\text{III.10})$$

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 :

$$Q = \frac{\Pi \cdot D^2}{4} V \quad (\text{III.11})$$

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 :

$$V = \frac{4}{\Pi \cdot K^2} \quad (\text{III.12})$$

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.

Conclusion

Le troisième 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.

CHAPITRE IV

*Simulation d'un système de
pompage photovoltaïque*

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 du 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 bloc 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

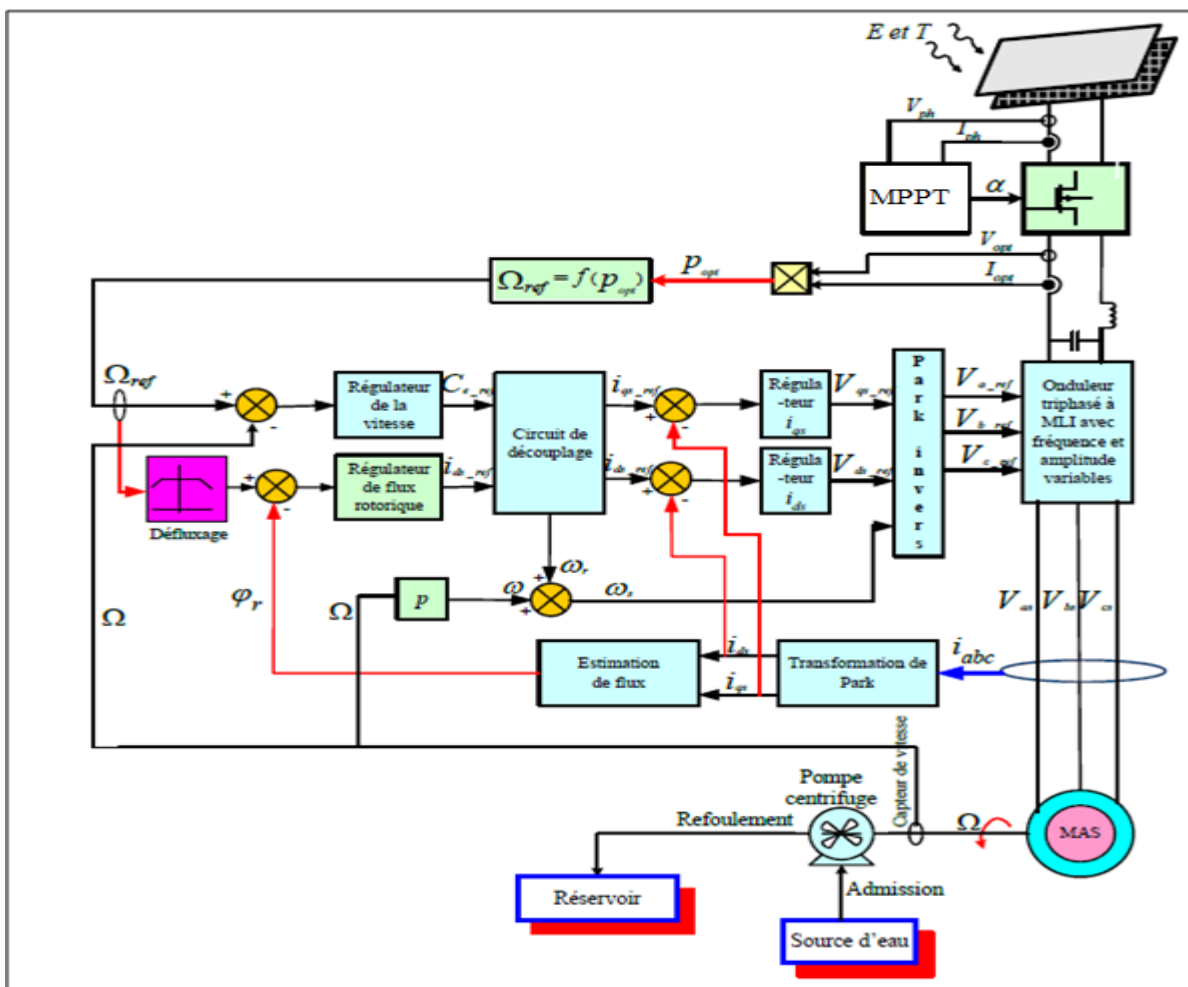


Figure (IV-1): Bloc de simulation du système complet.

IV.3. Résultats de simulation

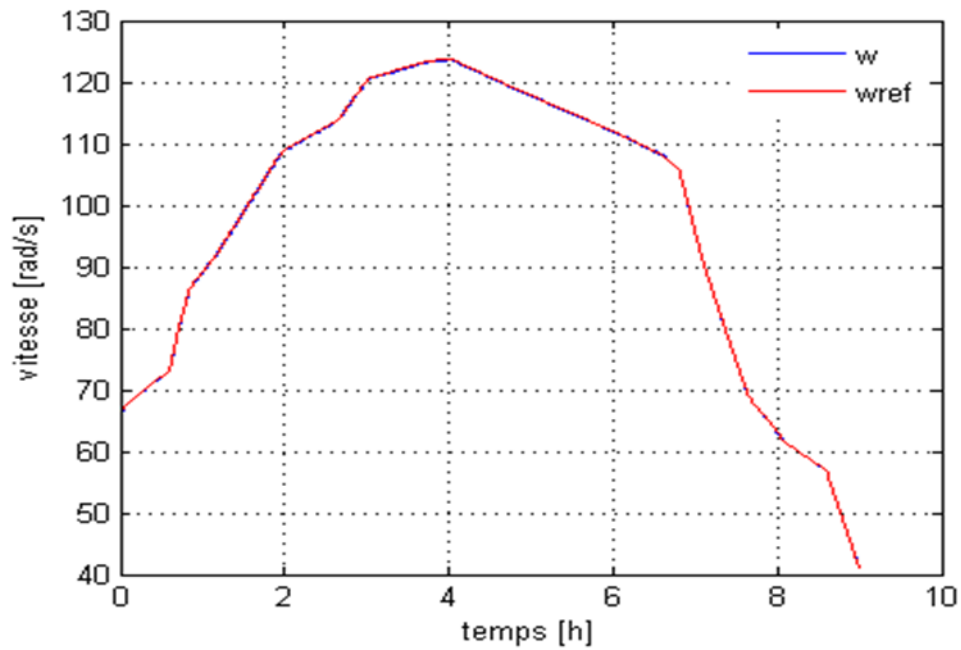
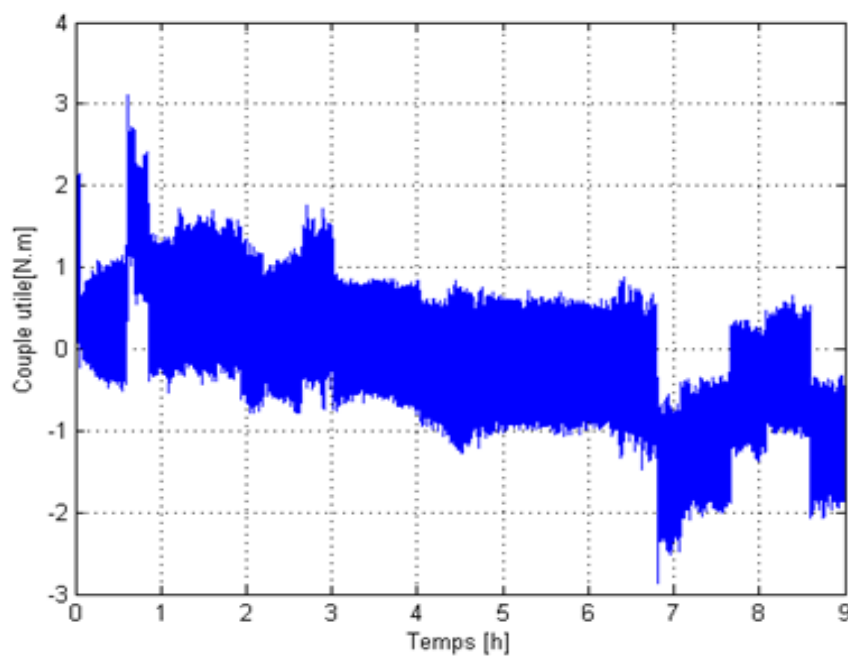


Figure (IV-2) : L'évolution de la vitesse de rotation et de la vitesse de référence en fonction du temps.



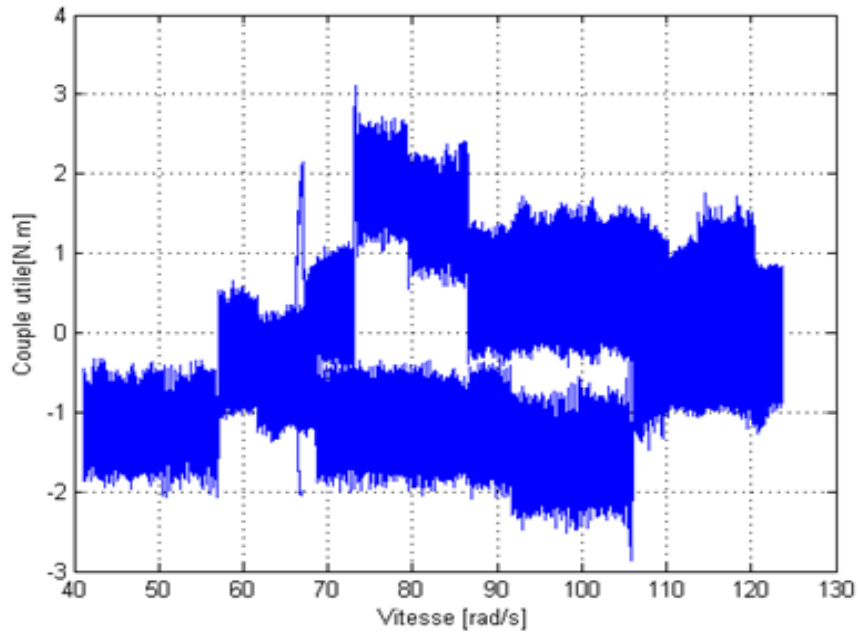


Figure (IV-3) : L'évolution du couple utile en fonction du temps et en fonction de la vitesse.

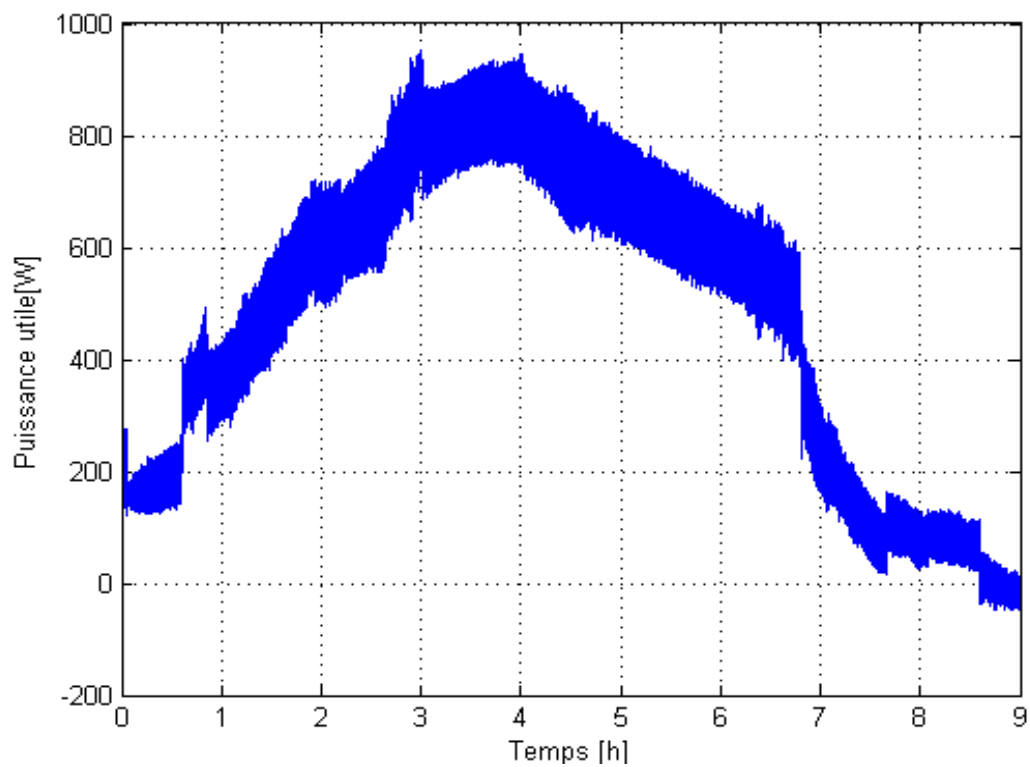


Figure (IV-4) : L'évolution de la puissance utile en fonction du temps.

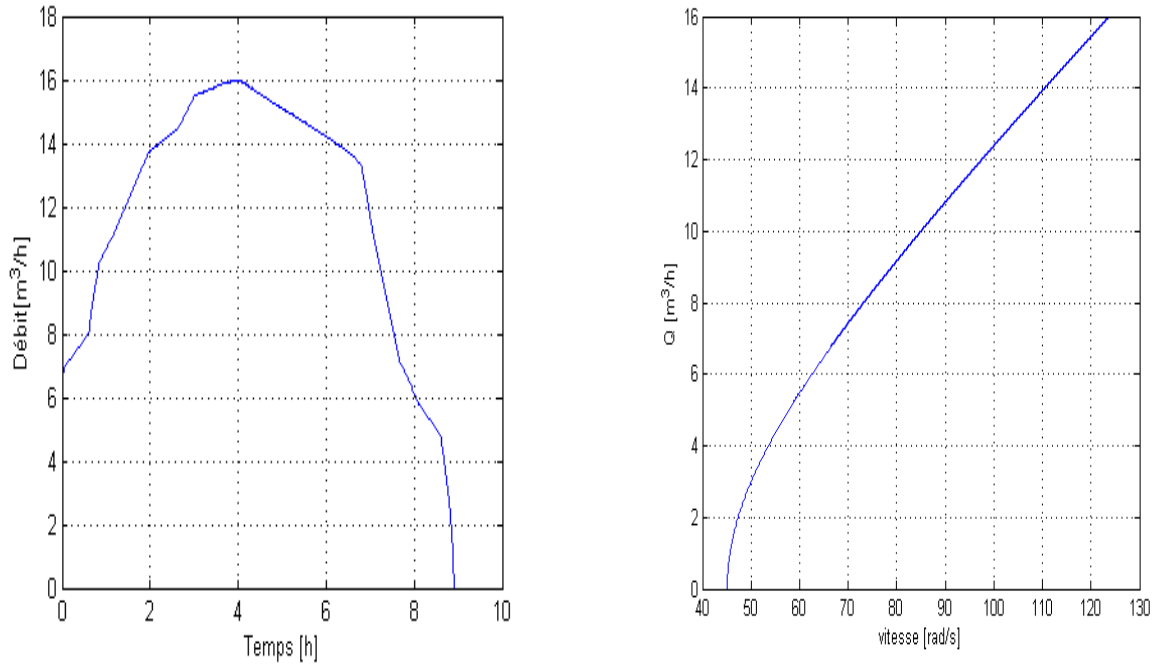


Figure (IV-5) : L'évolution du débit en fonction du temps et en fonction de la vitesse.

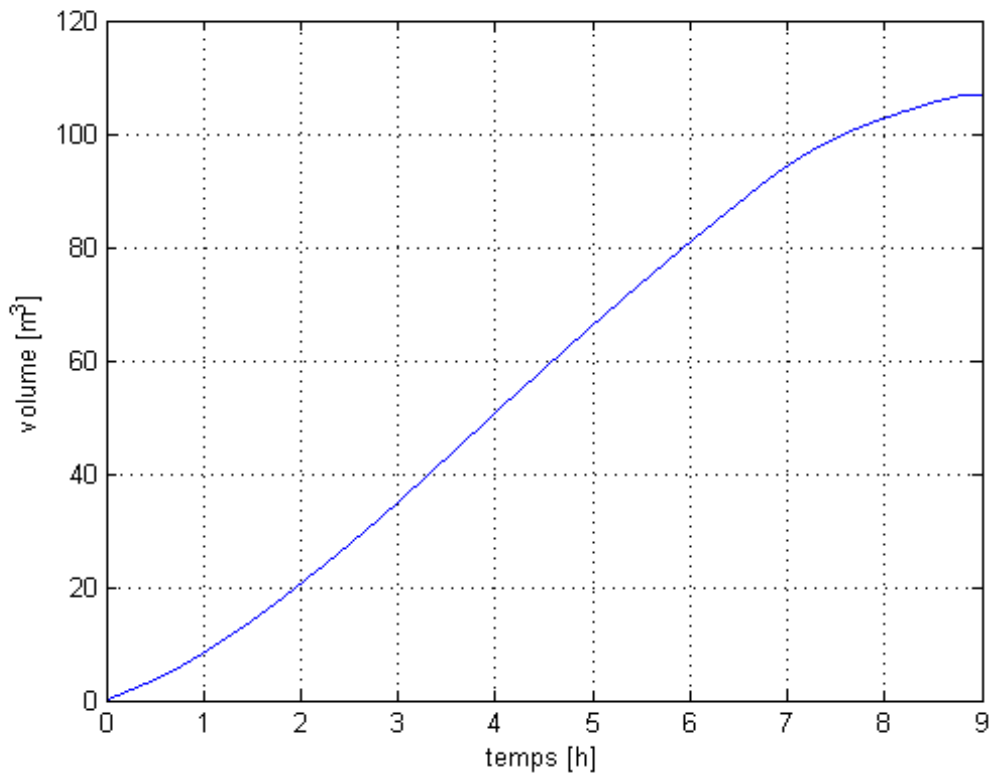


Figure (IV-6) : L'évolution du volume d'eau en fonction du temps.

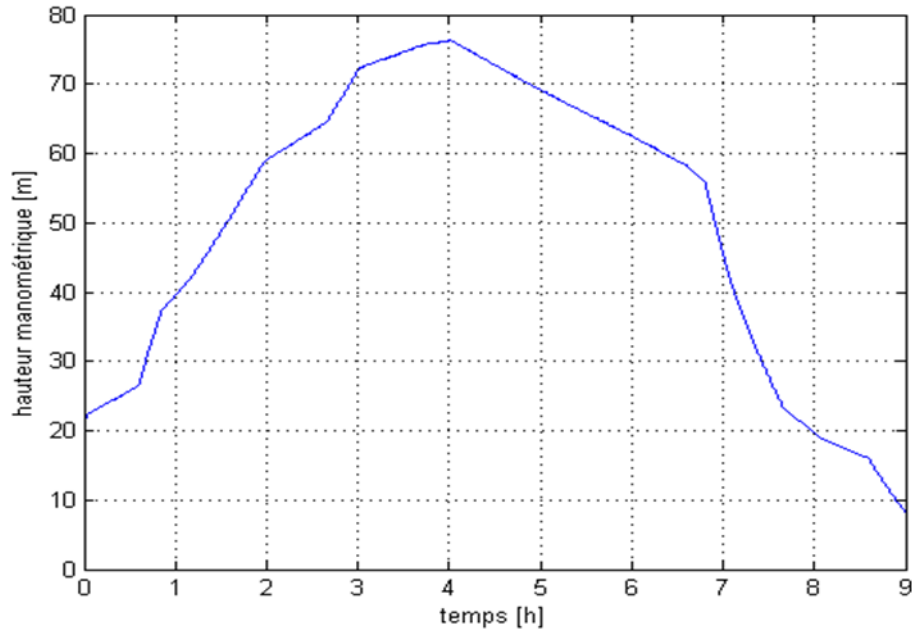


Figure (IV-7) : L'évolution de la hauteur manométrique en fonction du temps.

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 coïncident ce qui explique une bonne régulation pour une meilleur 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 m³/h pour atteindre une valeur maximale de 16 m³/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 rad/s. A partir d'une vitesse 55 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 m à $t = 0$ h pour atteindre une valeur maximale de 76m à un temps de quatre heures, puis, elle diminue pour s'annuler à un temps de neuf heures.

Conclusion

Le résultat des simulations qui présentés précédemment montrent l'avantage de la commande 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. Ainsi, que la quantité d'eau pompée dépend de l'éclairement.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

Le travail qu'on a à présenter sur l'étude d'une modalisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque. Adapté par une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Dans un premier temps, on a donnée des généralités sur les systèmes photovoltaïques, principe de l'effet PV, cellule PV, ainsi que le générateur photovoltaïque.

On a étudié, donne le deuxième temps, quelques types de convertisseurs (hacheur, onduleur).

En suite on a étudié la modélisation du système PV .pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation d'un générateur PV par la résolution de l'équation caractéristique non linière d'une cellule PV en utilisant la méthode de Newton-Raphson.

On a étudié l'adaptation par le convertisseur DC-DC survolteur et on trouve la relation relie les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur de convertisseur.

Puis, on a représenté la structure de la commande MPPT numérique « perturbation, et observation ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et la variation de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées a partir des conditions standard : l'éclairement 1000W/m^2

BIBLIOGRAPHIE

- [1] :KY.Thiemy, S .Maurice « système photovoltaïque dimensionnement pour un pompage irrigation goutte –à- goutte» mémoire de DEA 2007.
- [2] : Jimmy Royer, thomas Djiako, Erico SCHILLER, Bokar Sada : «le pompage photovoltaïque».manuel de cour à l'intension des ingénieurs et des techniciens.
- [3]: M.ROUF : « optimisation de l'ensemble onduleur ; moteur et pompe branche sur générateur photovoltaïque ».Electrotechnique thèse de doctorat, université de Constantine.
- [4]:T.FROUMHERZ, F.PADINGER ,D.GEBEYEHUR,C.BARBAREC ,J.C.Himmelen: «sanicifei comparison of photovoltaic devirces containg varions blends of polymer and fullere derivatives».
- [5]:WWW.WEAKEPDIRACOM.
- [6]:R.A.Messenger and J.V entre, photovoltaic Systems engineering, second edition, CRC Press LLC, 2004.
- [7] : J-C. Sabonadiere: Nouvelles technologie de l'énergie ; les énergies renouvelable 2006.
- [8] : O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat, de l'école normale supérieure de CACHAN, décembre 2002.
- [9] : A.C. Pastor: « Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electroniques », Ecole Doctorale : GEET, Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS), Toulouse, 29 septembre 2006.
- [10] : A. Hadj Arab: « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque de faible puissance », HCR, Thèse de Magister, 1989.
- [11] :Dj. Bellalia: «contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application au système photovoltaïque» : Mémoire de magistère université de Batna.
- [12]:W.Achim, Design issues of photovoltaic systems and their grid integration», (Decembrer2003)
- [13] : A. Labouret, M. Villos : « Energie solaire photovoltaïque ». 3^{ème} Edition DUNOD, 2007.
- [14] :K. djamila, O.fetta «Commande d'un Système de pompage Photovoltaïque» Mémoire d'Ingénieur d'Etat, UMMTO, 2009.

[15] :J.Bonal :« Entrainement électrique à vitesse variable : les variateurs électroniques de vitesse». Paris 1977.

[16] :T.Wildi, G.Symbile : Electrotechnique 3^{ème} édition, Edition de Boeck, 2000.

[17] : B. Alimarina, Z. Aoua : « 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.

[18] : W. Bensaci : «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT» Université Kasdi Merbah Ouargla 2012.

[19] : F. Fodil Pacha: « Installation et Emulation des Panneaux Photovoltaïques », Rapport technique, 2009.

[20] : O. Amrani:«Etude et identification des différentes modèles électriques photovoltaïques» Université de Bejaïa.

[21] : Long Bun : «Détection et localisation de défaut pour un système PV » 2006.

[22] : Akihiro«Design and simulation of photovoltaic water pumping system» faculty of California polytechnic state university, Sanluisobispom September 2005.

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

[24] : J. Laroche : « Electronique de puissance ; convertisseurs » ; Edition DUNOD, 2005.

[25]: Ph. Barret : « Régimes transitoires des machines électriques », Edition EYROLLES, 1987.

[26] : T. Irekti, Kh. Bekkou : « Modélisation et simulation de la machine asynchrone pentaphasée associée à un onduleur de tension ». Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2007.

[27] : N. Benyahia, K. Srairi, S. M. Mimoune : « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique ». Courrier du Savoir – N°06, Juin 2005.

[28]: A. Bouden : « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque». Mémoire de Magister en Electronique, Option : Instrumentation- Composants Electroniques et Systèmes 2008.

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

[30]: Chahrazatte ait .Kahina :«Dimensionnement et installation d'un systèmephotovoltaïque application à la FGEI »Mémoire d'ingénieure d'état en électronique université de T.O.2008-2009.

[31]: A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi : « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque » 2005.

Annexe

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 : $J = 0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

➤ **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 : $l = 7.4 \text{ m}$

RESUME

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.

MOTS CLES :

PV : photovoltaïque

GPV : Générateur photovoltaïque

MPPT : maximum power point trackink

DC : courant continu

AC : courant alternatif

MLI : Modulation de Largeurs d'imputions

MAS : machine asynchrone