

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En :** (électrotechnique)

**Spécialité :** (Commandes électriques)

**Par :** Dahmani Abdallah et Kaadi Abderafik

### **Sujet**

**Etude et commande d'un système de pompage photovoltaïque**

Soutenu publiquement, le. 28 / 09 / 2022, Devant le jury composé de :

|                            |       |                       |             |
|----------------------------|-------|-----------------------|-------------|
| Mr. YACOUBI Boumediene     | M.A.A | Université de Tlemcen | Président   |
| Mr. LOUCIF Mourad          | M.C.B | Université de Tlemcen | Examinateur |
| Mr. LAZREG Mohamed Haithem | M.C.B | Université de Tlemcen | Encadreur   |

Année universitaire : 2021 /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# **Remerciement**

*Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu le plus Puissant qui a bien voulu nous donner la force et le courage Pour effectuer Ce présent travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos parents pour leurs Encouragements, leur soutien et pour les sacrifices*

*Qu'ils ont enduré.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur " Mr. LAZREG Mohamed Haïthem " pour son sérieux, sa compétence et ses orientations.*

*En guise de reconnaissance, nous tenons à remercier, très sincèrement, le Docteur Mr. MECHERNENE Abdelkader, responsable de la formation Master Electrotechnique de l'université Abou Bekr*

*Belkaid-Tlemcen, nous eu l'honneur et la chance de bénéficier de ses connaissances et compétences, de ses précieux conseils et de son suivi tout au long de notre parcours académique.*

*Nous tenons à remercier les membres du jury Mr. YACOUBI Boumediene et Mr. LOUCIF Mourad pour leur présence, pour leur lecture attentive de ce mémoire, ainsi que pour les remarques qu'ils nous adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer notre travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département Génie Electrique qui ont contribué à notre formation.*

*Aussi nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et toute la promotion d'électrotechnique industrielle (2022) Qui par leur amitié et leur bonne humeur, ont créé une ambiance de travail parfaite.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui ont su me comprendre et m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle très chers parents. A mes frères et sœurs et toute la famille : « Dahmani » sans exception.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours soutenu, et tous mes amis de la Promotion Génie électrique 2022.*

*Sans omettre mon binôme Kaadi Abderafik avec qui j'ai élaboré mon projet de fin d'étude.*

*En fin à tous ceux qui m'apprécient à ma juste valeur.*

*Dahmani Abdallah*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui ont su me comprendre et m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle très chers parents. A mes frères et sœurs et toute la famille : « Kaadi » sans exception. A tous mes amis qui m'ont toujours soutenu, et tous mes amis de la Promotion Génie électrique 2022. Sans omettre mon binôme Dahmani Abdallah avec qui j'ai élaboré mon projet de fin d'étude. En fin à tous ceux qui m'apprécient à ma juste valeur.*

*Kaadi Abderafik*

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Introduction générale .....  | 1  |
| <b>Chapitre I : Etat de l'art des systèmes de pompage photovoltaïque</b>                           |    |
| I.1 Introduction.....  | 4  |
| I.2 Système photovoltaïque .....   | 4  |
| I.2.1 Energie solaire en Algérie.....  | 6  |
| I.2.2 Conversion photovoltaïque : .....  | 7  |
| I.2.2.1 Effet photovoltaïque .....   | 8  |
| I.2.2.2 Principe de la conversion photovoltaïque : .....   | 8  |
| I.2.2.3 Cellule photovoltaïque .....   | 9  |
| I.2.2.4 Association des cellules PV .....  | 10 |
| I.2.3 Convertisseur DC/DC (Hacheur).....   | 12 |
| I.2.4 Convertisseur DC/AC (onduleur) .....   | 13 |
| I.2.5 Technique de commande MPPT .....   | 14 |
| I.3 Système de pompage d'eau.....  | 16 |
| I.3.1 Ressources en eaux de l'Algérie .....  | 17 |
| I.3.2 Définition générale du système de pompage d'eau .....  | 17 |
| I.3.2.1 Différents types des pompes .....  | 17 |
| I.3.3 Domaine d'application pompage d'eau .....  | 18 |
| I.4 Moteur d'entraînement .....  | 18 |
| I.4.1 Moteur à courant continu .....   | 19 |
| I.4.2 Moteur à courant alternatif .....  | 19 |
| I.4.2.1 Les moteurs synchrones .....   | 19 |
| I.4.2.2 Les moteurs asynchrones .....  | 20 |
| I.5 Conclusion .....   | 20 |
| <b>Chapitre II : Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par le réseau</b> |    |
| II.1 Introduction .....  | 22 |
| II.2 Modélisation de la machine asynchrone.....  | 22 |
| II.2.1 principe de fonctionnement.....   | 23 |
| II.2.2 équations de la machine dans le repère (abc) et dans le repère (dq).....                    | 24 |
| • Equations électrique.....  | 24 |
| • Equations Magnétiques.....   | 25 |
| • Equations Mécaniques.....  | 26 |

|  |    |
|--|----|
| Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park .....   | 27 |
| Transformation de PARK.....  | 27 |
| • Equations des Tensions.....  | 28 |
| • Equations du Flux .....  | 28 |
| • Équation mécanique.....  | 29 |
| • Choix du Référentiel .....   | 29 |
| II.2.3 représentation d'état .....   | 29 |
| II.3 Modélisation de la commande vectorielle.....  | 31 |
| II.3.1 principe de fonctionnement .....  | 31 |
| Découplage par compensation.....   | 32 |
| II.4 Modélisation de l'alimentation .....  | 34 |
| II.4.1 Réseau triphasé.....  | 34 |
| II.4.2 Redresseur.....   | 34 |
| II.4.3 Filtre.....   | 36 |
| II.4.4 Onduleur à deux niveaux + MLI_ST .....  | 37 |
| II.5 Modélisation de la pompe centrifuge .....   | 38 |
| II.5.1 La Hauteur Manométrique HMT.....  | 39 |
| II.5.2 Puissance Hydraulique.....  | 39 |
| II.6 Simulation de la commande vectorielle de l'ensemble moteur/pompe.....   | 40 |
| II.6.1 Résultat de simulation.....   | 40 |
| Simulation de Moteur.....  | 40 |
| Interprétation de simulation .....   | 43 |
| Simulation de la pompe.....  | 44 |
| Interprétation de simulation.....  | 45 |
| II.7 conclusion.....   | 46 |
| <br><b>Chapitre III : Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe<br/>alimenté par un générateur photovoltaïque</b><br> |    |
| III.1 Introduction.....  | 48 |
| III.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....   | 48 |
| III.2.1 Modèle à une diode : (Cellule réelle).....   | 48 |
| III.2.2 Paramètre d'une cellule photovoltaïque.....  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| III.2.2.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....                                     | 50 |
| III.2.2.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).....                                 | 50 |
| III.2.2.3 Puissance maximale.....   | 51 |
| III.2.2.4 Rendement énergétique.....  | 51 |
| III.2.2.5 Facteur de forme.....   | 51 |
| III.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....                                | 52 |
| III.3.1 Caractéristique tension-courant d'un GPV.....                                 | 54 |
| III.3.2 Caractéristique puissance-courant d'un GPV.....                               | 54 |
| III.3.3 Effet de l'éclairement et de la température.....                              | 55 |
| III.3.3.1 Effet de l'éclairement.....   | 55 |
| III.3.3.2 Effet de la température.....  | 55 |
| III.3.4 Modélisation du hacheur Boost.....  | 56 |
| Fonctionnement.....   | 56 |
| III.4 Optimisation de système de pompage photovoltaïque.....                          | 58 |
| III.4.1 Principe de recherche du point de puissance maximale (MPPT).....              | 58 |
| III.4.2 Les Algorithmes du point de puissance maximale.....                           | 59 |
| III.4.2.1 Principe des commandes HILL Climbing.....                                   | 59 |
| III.4.2.2 Méthode de l'incrémentation de conductance.....                             | 61 |
| III.4.2.3 Principe des commandes « Perturb and Observe » (P&O).....                   | 63 |
| III.5 Dimensionnement de l'installation de pompage photovoltaïque.....                | 65 |
| III.5.1 Méthode de la moyenne annuelle.....   | 65 |
| III.5.2 Dimensionnement de la pompe centrifuge.....                                   | 66 |
| III.5.3 Dimensionnement du module photovoltaïque.....                                 | 66 |
| III.5.4 Puissance crête du générateur photovoltaïque.....                             | 67 |
| III.5.5 Nombre de module photovoltaïque.....  | 67 |
| III.6 Simulation de la commande vectorielle du système de pompage photovoltaïque..... | 68 |
| III.6.1 Résultat de Simulation du système photovoltaïque.....                         | 68 |
| Interprétation de résultat.....   | 70 |
| III.6.2 Résultat de simulation de Moteur.....   | 71 |
| Interprétation de résultat.....   | 73 |
| III.6.3 Résultat du simulation de la pompe.....                                       | 73 |
| Interprétation de résultat.....   | 76 |



|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| III.7 Conclusion.....            | 76 |
| Conclusion générale.....         | 78 |
| Références bibliographiques..... | 79 |
| Annexe.....                      | 82 |

## Liste des figures

### *Chapitre01*

|  |    |
|--|----|
| Figure I 1 Les systèmes photovoltaïques autonomes .....  | 5  |
| Figure I 2 Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau .....   | 6  |
| Figure I 3 Quotidien de l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal aux mois de<br>Décembre et Juillet..... | 7  |
| Figure I 4 Etat de l'art des systèmes de pompage photovoltaïque .....  | 9  |
| Figure I 5 Association de $N_s$ cellules en série .....  | 11 |
| Figure I 6 Association de $N_p$ cellules en parallèle .....  | 12 |
| Figure I 7 Caractéristique résultante d'un groupement hybride des cellules ( $n_p + n_s$ ).....                      | 12 |
| Figure I 8 Convertisseur DC/DC.....  | 13 |
| Figure I 9 Circuit d'un convertisseur Buck .....   | 13 |
| Figure I 10 Circuit d'un convertisseur Boost.....  | 13 |
| Figure I 11 Circuit d'un onduleur monophasé .....  | 14 |
| Figure I 12 Circuit d'un onduleur Triphasé .....   | 14 |
| Figure I 13 Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes du générateur PV .....                         | 15 |
| Figure I 14 Structure de base du contrôleur Flou.....  | 16 |
| Figure I 15 Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque .....  | 16 |

### *Chapitre02*

|  |    |
|--|----|
| Figure II 1 Représentation de la machine asynchrone triphasée.....                       | 23 |
| Figure II 2 Représentation des axes de la machine.....                                   | 24 |
| Figure II 3 Représentation des axes de la machine asynchrone dans le repère de Park..... | 27 |
| Figure II 4 Schéma simplifié de la commande vectorielle.....                             | 32 |
| Figure II 5 Découplage par addition des termes de compensation.....                      | 33 |
| Figure II 6 Boucle du courant $I_{qs}$ après découplage.....                             | 33 |
| Figure II 7 Redresseur à diodes.....   | 35 |
| Figure II 8 Tension redressée.....   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Figure II 9 Représentation du filtre.....  | 36 |
| Figure II 10 Schéma block de la commande de l'onduleur triphasé.....                           | 38 |
| Figure II 11 (a) Pompe centrifuge accouplée MAS, (b) coupe longitudinale pompe centrifuge..... | 39 |
| Figure II 12 Simulation de la commande vectorielle de l'ensemble moteur/pompe.....             | 40 |
| Figure II 13 Allure de vitesse du moteur.....  | 41 |
| Figure II 14 Allure du couple moteur .....   | 41 |
| Figure II 15 Allure de zoom du couple $C_{em}$ .....   | 41 |
| Figure II 16 Allure des flux rotoriques $\phi_r$ .....   | 42 |
| Figure II 17 Allure des courants statoriques $I_{ds}$ , $I_{qs}$ .....                         | 42 |
| Figure II 18 Allure de courant statorique $I_s$ .....  | 42 |
| Figure II 19 Allure de zoom de courant statorique $I_s$ .....                                  | 43 |
| Figure II 20 Allure de la hauteur manométrique de la pompe (m).....                            | 44 |
| Figure II 21 Allure du débit de la pompe.....  | 44 |
| Figure II 22 Allure du Puissance Hydraulique .....   | 44 |
| Figure II-23: Allure du rendement moto- pompe à vitesse constante.....                         | 45 |
| Figure II 24 Allure du Couple résistant $C_r$ .....  | 45 |

### **Chapitre03**

|   |    |
|---|----|
| Figure III 1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle .....                | 49 |
| Figure III 2 Schéma équivalent du modèle à une diode .....                              | 52 |
| Figure III 3 Caractéristique I(V) d'un GPV dans les conditions standards .....          | 54 |
| Figure III 4 Caractéristique P(V) d'un GPV dans les conditions standards .....          | 55 |
| Figure III 5 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V .....  | 55 |
| Figure III 6 Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V ..... | 56 |
| Figure III 7 Schéma électrique d'un hacheur boost .....                                 | 56 |
| Figure III 8 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost .....               | 57 |
| Figure III 9 Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.....                            | 57 |
| Figure III 10 Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert .....                         | 58 |
| Figure III 11 Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.....                | 59 |
| Figure III 12 Relation entre PPV et le rapport cyclique D du CS.....                    | 60 |
| Figure III 13 Algorithme MPPT Hill Climbing (H.C).....                                  | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Figure III 14 Trajectoire par Incrémentation de Conductance .....                                 | 62 |
| Figure III 15 Algorithme d'incrémentation de la conductance .....                                 | 63 |
| Figure III 16 Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement..              | 64 |
| Figure III 17 Organigramme de la méthode P&O .....  | 65 |
| Figure III 18 Simulation de la commande vectorielle du système de pompage<br>Photovoltaïque ..... | 68 |
| Figure III 19 Tension de générateur photovoltaïque $V_{dc}$ .....                                 | 70 |
| Figure III 20 Le courant du générateur photovoltaïque $I_{dc}$ .....                              | 70 |
| Figure III 21 Allure de vitesse du moteur pour une consigne de 157 rad/s .....                    | 71 |
| Figure III 22 Allure des couples de moteur .....  | 71 |
| Figure III 23 Les Allures de flux rotorique .....   | 72 |
| Figure III 24 Les Allures de courant statorique .....   | 72 |
| Figure III 25 Allure de courant statorique $I_s$ .....  | 72 |
| Figure III 26 Allure de zoom du courant statorique $I_s$ .....                                    | 73 |
| Figure III 27 Allure de la hauteur manométrique de la pompe (m).....                              | 74 |
| Figure III 28 Allure du débit de la pompe .....   | 74 |
| Figure III 29 Allure du Puissance Hydraulique .....   | 75 |
| Figure III 30 Allure du rendement moto- pompe à vitesse constante .....                           | 75 |
| Figure III 31 Allure du couple résistant $C_r$ .....  | 75 |

# Liste des symboles et des abréviations

## Symboles

$E$  : L'irradiation solaire ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$E_0$  : L'irradiation solaire à la condition standard (donné par sur catalogue en STC( $E_0$ ,  $T_0$ )).

$K_0$  : coefficient de température de  $I_{ph}$  (donné par le fabricant).

$T_0$  : Température de cellule sous la condition standard ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$T$  : température de fonctionnement de la cellule ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$V_D$  : Tension à la borne de la diode.

$V_r$  : Amplitude de référence.

$V_p$  : Amplitude de la porteuse.

$I_D$ : courant délivré par la diode.

$I_{s0}$  : Courant de saturation de diode sous la condition standard.

$I_{ph}$  : photo- courant.

$I_s$  : Courant de la saturation de jonction non éclairé (A).

$q$  : Charge électrique élémentaire ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  (C) ).

$K$ : Constant Boltzmann ( $8.65 \cdot 10^{-5}$  (eV/ $^{\circ}\text{K}$ ) = ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  (J/ $^{\circ}\text{K}$ )).

$n$  : Facteur d'idéalité de la jonction;

$L_{ss}$ : Matrice des inductances propres et des mutuelles entre phases statoriques.

$L_{rr}$ : Matrice des inductances propres et des mutuelles entre phases rotoriques.

$M_{sr}$ : Matrice des inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

$L_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$L_s$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

$L_s$ : Inductance cyclique propre statorique.

$L_r$ : Inductance cyclique propre rotorique.

$M'sr$ : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique.

$R_r$  : Résistance d'une phase rotorique.

$\alpha$  : Ecart angulaire entre les axes des phases du stator et du rotor.

$J$  : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

$f_r$  : Coefficient du frottement visqueux.

$C_e$  : Couple électromagnétique (N.m).

$C_r$  : Couple de résistant (couple de charge).

$\eta_{mp}$  : Rendement de groupe motopompe (%).

$\rho$  : Masse volumique de l'eau (Kg/m<sup>3</sup>).

$g$  : L'accélération de pesanteur soit 9,81 (m/s<sup>2</sup>).

$Q$  : Débit volumique (m<sup>3</sup>/s).

$P_h$  : Puissance communiqué au fluide par la pompe(W).

$P_n$  : Puissance nominale de moteur(W).

$P_{elec}$  : Puissance électrique du moteur asynchrone (W).

$\Omega_n$  : Vitesse nominale de moteur (rad/s).

$\Omega_r$  : Vitesse rotorique de moteur (rad/s).

$\Omega$  : Vitesse de rotation de l'axe de la pompe (rad/s).

## Abréviation

**GPV** : Générateur photovoltaïque.

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking.

**PPM** : Point de Puissance Maximal.

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

**TNOCT**: Nominal Operating Cell Temperature.

**MAS** : Machine asynchrone.

**MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion.

**HMT** : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).

## Liste des tableaux

Tableau III.1 Modules PV (Nb): Nombre de modules PV et Générateur éolien (Nb): Nombre de générateur éolien.

## Introduction générale

L'énergie solaire, gratuite et abondante dans la plupart des régions du monde, s'est avérée efficace être une source d'énergie économique dans de nombreuses applications. L'énergie que la Terre reçoit du Soleil est si énorme et si durable que l'énergie totale consommée annuellement par le monde entier est fourni en aussi peu de temps qu'une demi-heure.

Le prix de la puissance crête du watt a considérablement baissé depuis les années soixante-dix. Ce conduit à une application à grande échelle des systèmes photovoltaïques dans plusieurs domaines. Par rapport aux sources d'énergie fossiles conventionnelles, à petite échelle les systèmes photovoltaïques (PV) sont la meilleure option pour de nombreuses applications à distance autour le monde. Les systèmes photovoltaïques autonomes (PV) à petite échelle fournissent désormais de l'électricité pour des centaines de milliers d'installations à travers le monde. Ils ont le potentiel d'être utilisé dans des millions de plus, en particulier dans les pays en développement où deux milliards de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité [1].

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en développement. L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à condition d'être bien dimensionner. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèle qui reflète la réalité et ils se doivent d'être précis [2].

Le système largement utilisé est celui dit au 'fil du soleil'. Ce système est le plus simple puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. La pompe ne fonctionnera qu'en présence de la lumière et dès que l'éclairement sera suffisant elle atteint la puissance demandée. La particularité des pompes solaires installées au fil du soleil est que les caractéristiques (débit, pression, rendement) sont en fonction de l'éclairement qui varie au cours de la journée et au cours des saisons.

Dans notre étude nous somme intéressés à la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque optimisé, de ce fait, le présent mémoire est subdivisé en trois chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :



La première partie de ce travail correspond à une généralité sur les systèmes de pompage photovoltaïque. Nous allons présenter quelques notions indispensables sur l'énergie solaire. Nous décrirons ensuite, le potentiel et le gisement solaire en Algérie. Puis, la photovoltaïque et tous ce qui est en relation avec le pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, la commande vectorielle, l'alimentation, et la pompe centrifuge ainsi que des résultats de simulation de la commande vectorielle de l'ensemble moteur/pompe à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK seront présentés par la suite de ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation de chaque élément qui constitue le système à savoir le générateur photovoltaïque, l'optimisation de système de pompage photovoltaïque et de la puissance produite par le générateur photovoltaïque en utilisant des algorithmes de la MPPT (Maximum Power Point Tracking). Le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque, ainsi que des résultats de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Enfin on terminera notre travail par une conclusion générale, dans laquelle, nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

**Chapitre I :**

**Etat de l'art des**

**systemes de**

**pompage**

**photovoltaïque**

## I.1 Introduction

Aujourd'hui et dans le monde entier, l'électricité est un besoin fondamental au développement économique. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse. Cependant, les énergies fossiles assurent actuellement la majorité de cette production, mais face à l'épuisement de ces ressources énergétiques, aux problèmes de l'environnement et à l'augmentation considérable des besoins en énergie, la recherche de nouvelles ressources énergétiques est l'une des priorités de la politique énergétique de beaucoup de pays. Les énergies renouvelables représentent une alternative écologique aux combustibles fossiles. Leur exploitation permettrait de fournir de l'électricité partout, et particulièrement aux sites isolés, et d'éviter ainsi la création de nouvelles lignes électriques. Pour une meilleure compréhension de l'importance des énergies renouvelables, et particulièrement, l'énergie solaire, le présent chapitre présente un bilan des formes d'énergies les plus consommées au monde. Nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie solaire puisque c'est le sujet de nos recherches. Nous détaillons aussi les étapes importantes d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables en Algérie [3].

Dans le premier chapitre, nous aborderons d'abord quelques notions de base sur l'énergie solaire. Nous décrirons ensuite le potentiel et le le gisement solaire de l'Algérie. Et puis, la photovoltaïque et tout ce qui a à voir avec le pompage photovoltaïque.

## I.2 Système photovoltaïque

Il existe deux types de systèmes PV : les systèmes autonomes et les systèmes connectés au réseau. **Les systèmes photovoltaïques autonomes** avec des puissances PV maximales peuvent avoir des milliwatts à plusieurs kilowatts. Ils ne sont pas connectés à un réseau électrique. Afin d'assurer l'approvisionnement du système autonome avec alimentation électrique également dans les moments sans rayonnement ou avec très faible rayonnement, les systèmes autonomes ont généralement un système de stockage intégré. Si les systèmes sont utilisés seulement pendant le temps où le rayonnement est suffisant pour alimenter le système en énergie électrique directement, un système de stockage n'est pas nécessaire. Ceci s'applique également à la situation dans laquelle le produit. Livres par le système peuvent être stockés. Il existe actuellement une très grande variété de systèmes autonomes. Les exemples vont du

solaire calculatrices et montres aux systèmes de contrôle du trafic, aux systèmes capables de fournir un ou plusieurs bâtiments situés dans des zones reculées alimentés en électricité. Ils peuvent être des systèmes à courant continu avec ou sans batterie de stockage, ou ils peuvent être des systèmes AC avec un onduleur. Les systèmes PV connectés au réseau sont toujours connectés au réseau public onduleur adapté car un module PV ne délivre que du courant continu [4].

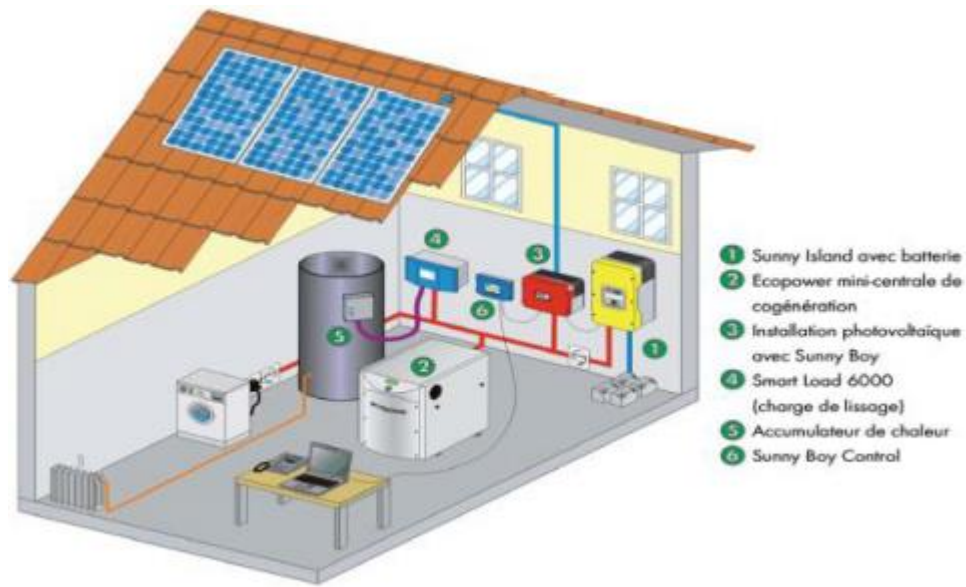


Figure I.1 Les systèmes photovoltaïques autonomes [5]

**Les systèmes PV décentralisés connectés** au réseau ont principalement une petite plage de puissance et sont installés sur le toit des bâtiments (installation sur toit plat) ou intégré aux façades des bâtiments. Les systèmes PV connectés au réseau centrale ont une puissance installée allant jusqu'à la plage en MW. Avec une telle centrale photovoltaïque, il est possible d'alimenter directement le réseau moyenne ou haute tension.

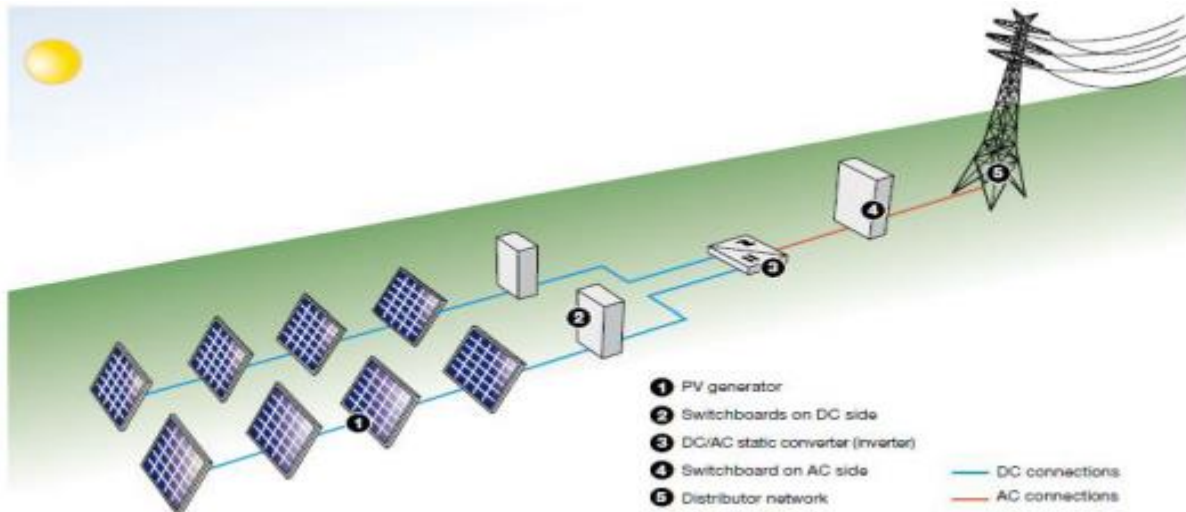


Figure I 2 Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau [5]

### I.2.1 Energie solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période déterminée. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exacte possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde [6].

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 kwh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{ KWh/m}^2/\text{an}$  au Nord et  $2263\text{ kwh/m}^2/\text{an}$  au Sud du pays [7] [8].

La Figure suivante montre l'irradiation solaire globale quotidienne reçue sur un plan horizontal pour les mois de Décembre et Juillet.

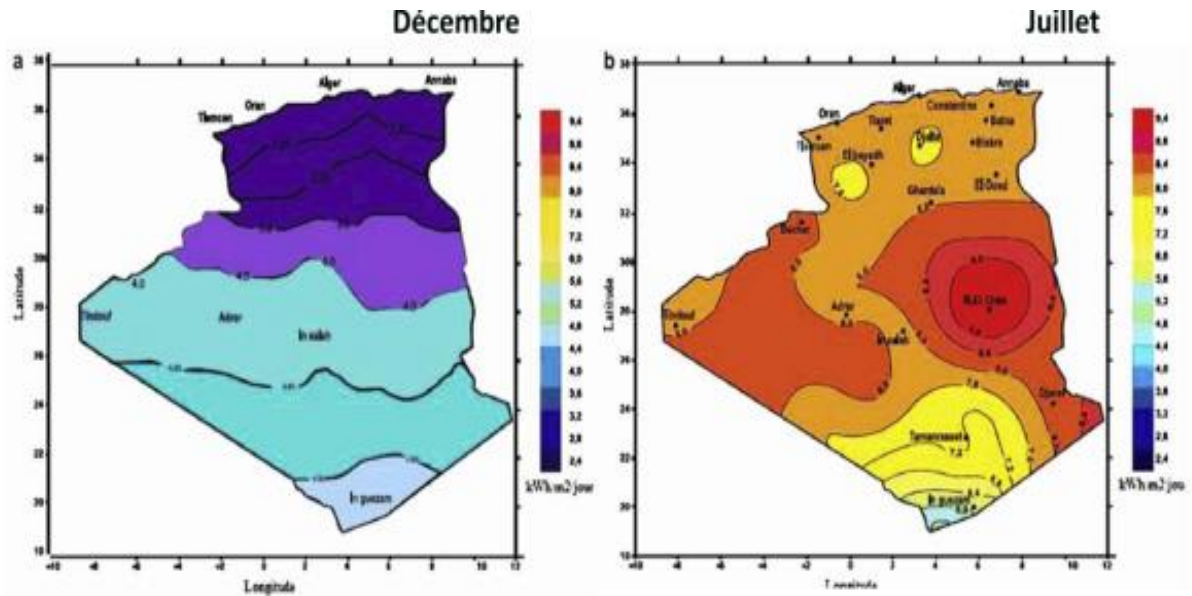


Figure I 3 Quotidien de l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal aux mois de Décembre et Juillet

### I.2.2 Conversion photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est la conversion du rayonnement solaire en électricité. Photovoltaïque est un mot grec qui réunit photo qui veut dire lumière et volt qui est une unité qui mesure la tension électrique et qui tient son nom du physicien Volta.

L'histoire du PV débute en 1839 lorsque le physicien français Antoine César Becquerel découvre le principe photovoltaïque (C'est son petit-fils, Antoine Henri Becquerel qui découvrira la radioactivité). L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz. C'est Albert Einstein qui, le premier, a pu expliquer le principe photovoltaïque, avec à la clef, le prix Nobel de physique en 1921.

En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %. Les Américains lancent en 1959 le satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%.

La première maison avec une installation photovoltaïque voit le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique. C'est en 1983 que la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt 4000 kilomètres en Australie.

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de 20% [9].

**I.2.2.1 Effet photovoltaïque**

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905. Einstein a écrit sur l'effet photovoltaïque en postulant que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites permettant la création d'un courant électrique [3].

**I.2.2.2 Principe de la conversion photovoltaïque**

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers (des impuretés) en petit nombre sont substitués dans un réseau cristallin (dopage). Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore), au contraire si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple : silicium dopé au bore).

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore [10].

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés afin de collecter les électrons en mouvement. (Figure I.4).

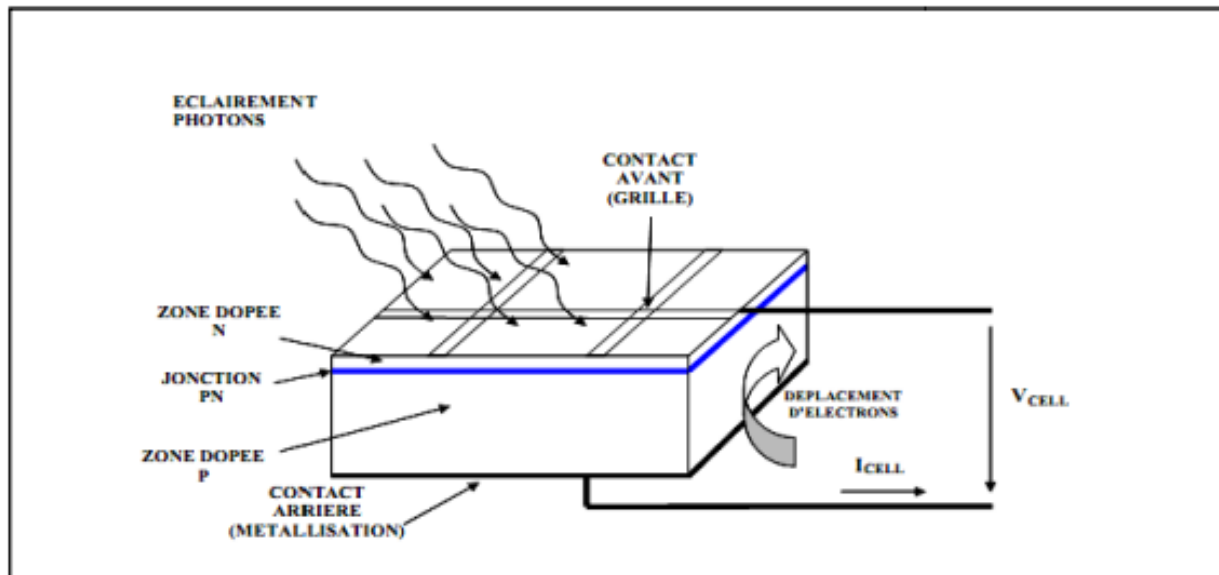


Figure I 4 Etat de l'art des systèmes de pompage photovoltaïque [10]

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ; Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux conducteurs pour permettre l'écoulement du courant : conducteurs pour l'industrie photovoltaïque [10].

### I.2.2.3 Cellule photovoltaïque

Généralement on distingue des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques.

- **Les cellules de 1<sup>ère</sup> génération**

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. Le silicium est fondu puis refroidi afin d'obtenir un cristal qui sera découpé en fines tranches (les wafers) pour obtenir la cellule photovoltaïque. Cette méthode de production est très énergivore et



donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium de grande pureté. On différencie les cellules en silicium monocristallin et en silicium polycristallin

- **Les cellules de 2<sup>ème</sup> génération**

Les couches minces constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), le tellure de cadmium (cdTE), entre autres, ...

Dans le cas de couches minces, la couche de semi-conducteur est directement déposée sur un substrat (ex : verre, plastique,). La production de ce type de cellules est moins coûteuse que celle de 1<sup>ère</sup> génération puisqu'elles consomment moins de matériaux semi-conducteur et ne nécessitent pas de passer par l'étape de transformation en « wafers ».

- **Les cellules de 3<sup>ème</sup> génération**

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles, qui est d'environ 30%. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif :

- Superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes)
- Cellules à concentration
- Utilisation de photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas abordés par la cellule
- Cellules à électrons chauds produisant plus de paires d'électron/trou pour des énergies supérieures à la bande d'énergie
- Conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur

#### **I.2.2.4 Association des cellules PV**

- **Associations série**

Plusieurs cellules photovoltaïques sont mises en série pour obtenir la tension désirée comme l'indique la Figure. I.5 Chaque cellule produit un courant continu dont la puissance dépend de la surface de la cellule. Les différentes cellules sont montées en série pour former des modules qui délivrent des tensions normalisées, la tension résultante est la somme des tensions de nombre des cellules associées, quant à la puissance maximale de l'ensemble est égale à la puissance maximale d'une cellule multipliée par le nombre de cellules reliées [11].

Au cas de «  $N_s$  » cellules identiques montées en série, il suffit de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur «  $N_s$  » dans la direction de l'axe des tensions comme indiqué en Figure. I.5

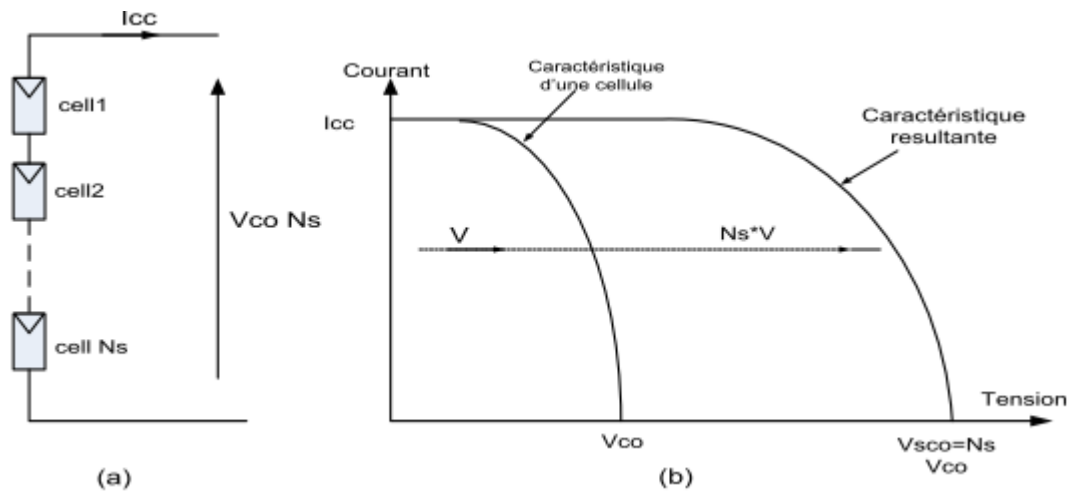


Figure I 5 Association de  $N_s$  cellules en série

- **Association parallèle**

La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en parallèle de deux cellules identiques montre que la puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale d'une cellule et la tension optimale est la même pour une seule cellule alors que le courant optimal de l'ensemble est égal au double du courant optimal d'une seule cellule.

Ce résultat se généralise sans difficulté au cas de «  $N_p$  » cellules identiques montées en parallèle, Figure. I.6 il suffit de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur «  $N_p$  » dans la direction de l'axe des courants, comme on le voit en Figure. I.6

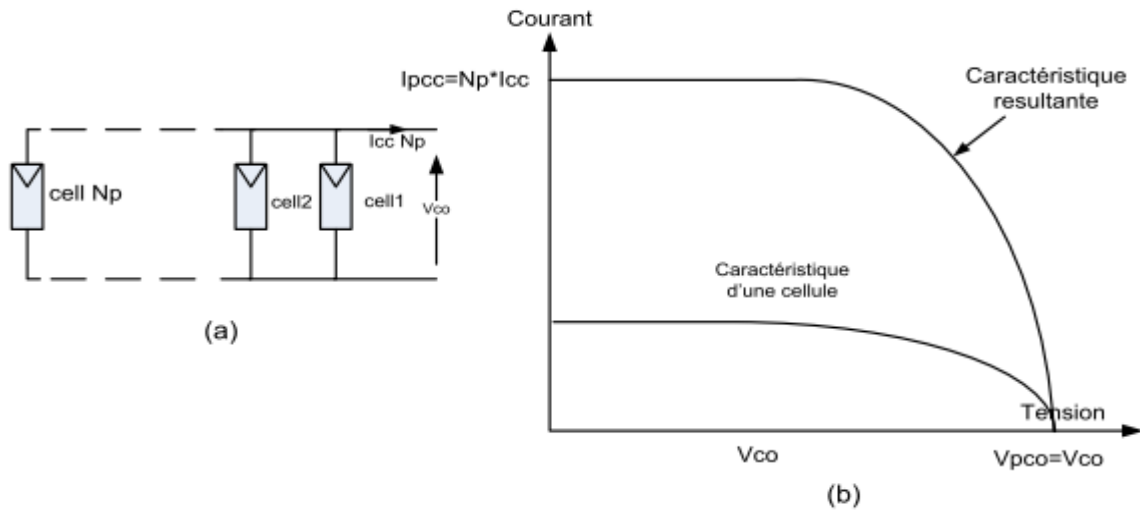


Figure I 6 Association de  $N_p$  cellules en parallèle

- Association hybride (en série et en parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [10].

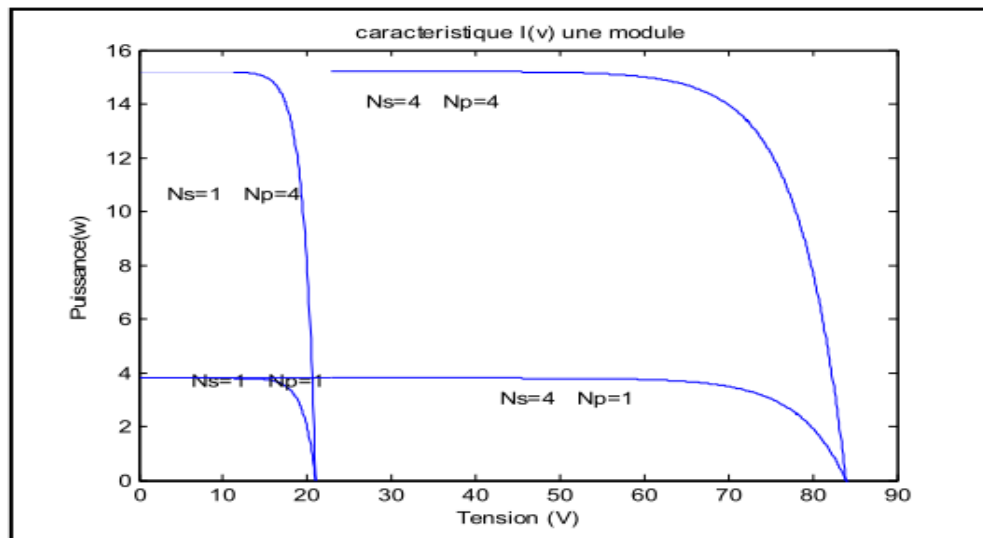


Figure I 7 Caractéristique résultante d'un groupement hybride des cellules ( $n_p + n_s$ ).

### I.2.3 Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Ces types de convertisseurs ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Ils sont constitués d'un seul transistor, d'une diode et d'une inductance comme composants principaux dans le cas le plus simple. La figure suivante montre le schéma synoptique de l'hacheur.

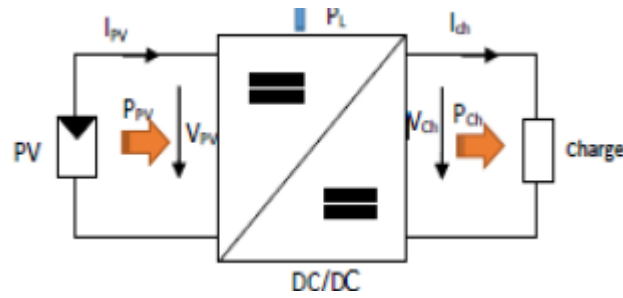


Figure I 8 Convertisseur DC/DC

- **Convertisseur Buck**

Le convertisseur Buck est l'un des circuits électroniques de puissance les plus simples et consiste essentiellement en une inductance, un commutateur électronique de puissance (généralement un MOSFET ou un IGBT) et une diode.

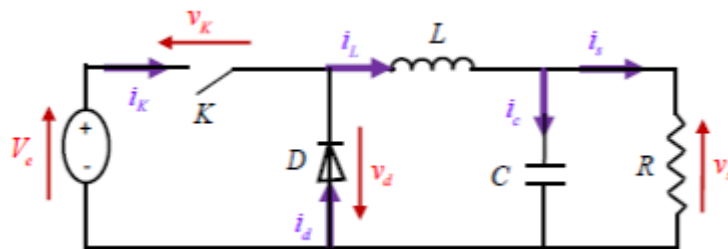


Figure I 9 Circuit d'un convertisseur Buck

- **Convertisseur Boost**

Le convertisseur Boost est un autre convertisseur électronique de puissance simple et consiste essentiellement en une source de tension, une inductance, un commutateur électronique de puissance (généralement un MOS-FET ou un IGBT) et une diode.

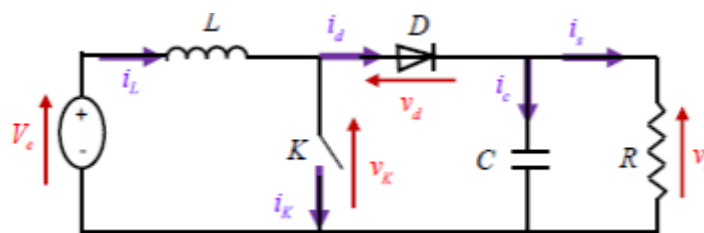


Figure I 10 Circuit d'un convertisseur Boost

### I.2.4 Convertisseur DC/AC (onduleur)

Ces types de convertisseurs ont pour fonction de transformer le courant continu, produit par le générateur PV en courant alternatif monophasé ou triphasé. Afin de permettre une

variation de la vitesse de rotation de la pompe, les onduleurs utilisés pour le pompage sont en général en fréquence ( $f$ ) variable.

- **Convertisseur DC/AC (monophasé)**

Un onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet une conversion de la grandeur d'entrée continue, en grandeur de sortie alternative.

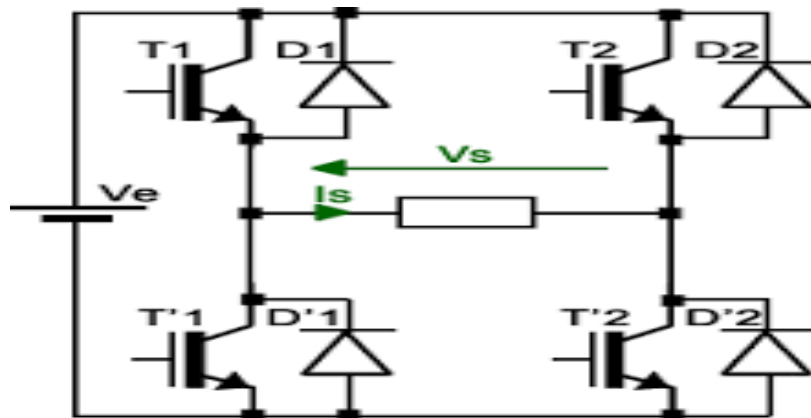


Figure I 11 Circuit d'un onduleur monophasé

- **Convertisseur DC/AC (Triphasé)**

L'onduleur Triphasé assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique d'aujourd'hui.

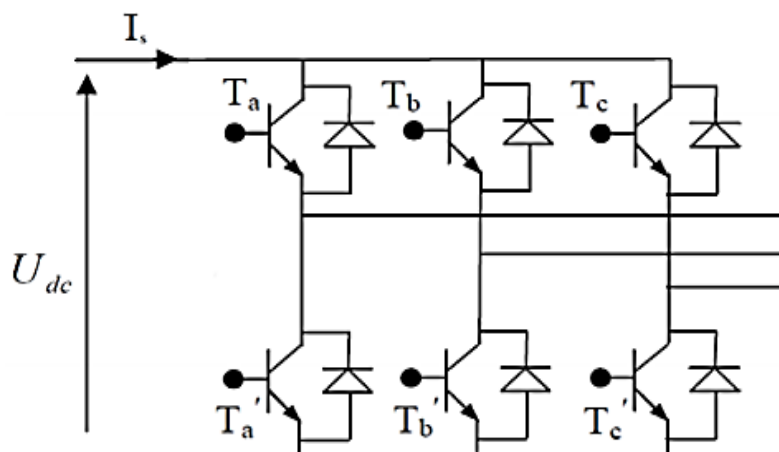


Figure I 12 Circuit d'un onduleur Triphasé

### I.2.5 Technique de commande MPPT

- **La méthode Perturbation et Observation (P&O)**

Est l'une des méthodes les plus utilisées est sans doute la plus naturelle qui vient à l'esprit pour faire une recherche du point maximal de puissance PPM. Le principe de P & O est d'introduire une petite perturbation de tension en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur statique, puis en observant le sens de la variation de puissance de sortie PV, si à tout instant  $j$  la sortie PV puissance  $P(j)$  et tension  $V(j)$  est supérieure à la précédente calculée puissance  $P(j-1)$  et  $V(j-1)$ , puis la direction de la perturbation est maintenue sinon il est inversé. L'organigramme de l'algorithme a 4 cas comme le montre la figure 3.14 et peut être détaillé comme suit [3] :

- Pour une tension  $U(k)$  fixée va mesurer la puissance correspondante  $P(k)$  délivrée par le générateur
- Après un certain temps, l'algorithme impose une tension  $U(k+1) = U(k) + \Delta U$  et mesure également la puissance correspondante  $P(k+1)$ ,
- Si  $P(k+1)$  est supérieure à  $P(k)$  : l'algorithme cherche à imposer une tension plus grande  $U(k+2) = U(k+1) + \Delta U$ . Sinon l'algorithme cherchera au contraire à abaisser la tension  $U(k+2) = U(k+1) - \Delta U$

La figure I 13 représente la variation de la puissance en fonction de la tension d'un panneau photovoltaïque. On voit que, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

La trajectoire de la variation de ces points est représentée sur la figure I 13

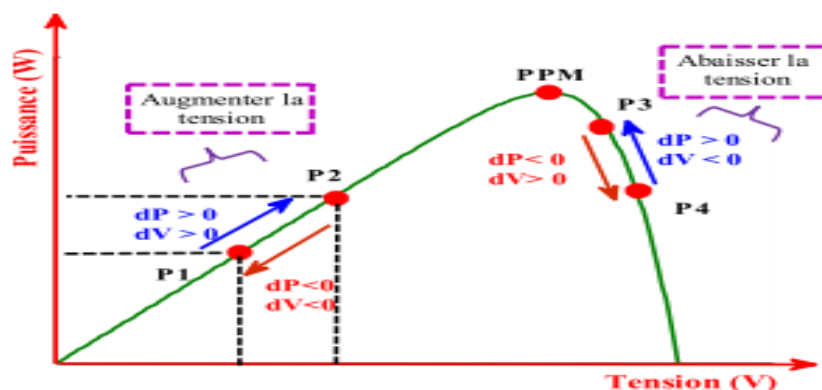


Figure I 13 Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes du générateur PV [3]

- **La commande MPPT à base de la logique floue**

La Figure. I 14 présente la configuration du contrôleur flou qui se compose de : entrées  $E$  et  $DE$ , fuzzification, décision floue et la défuzzification [11].

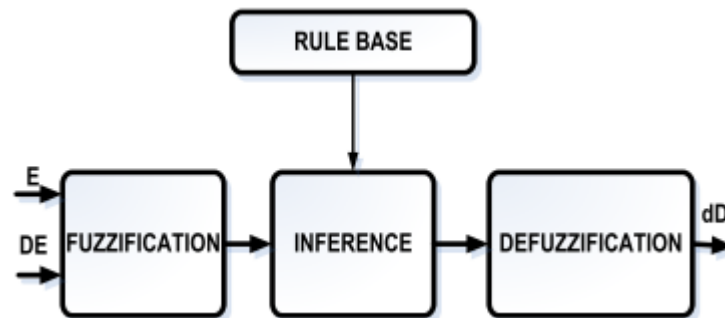


Figure I 14 Structure de base du contrôleur Flou [11]

### I.3 Système de pompage d'eau

Les systèmes de pompage d'eau photovoltaïque sont conceptuellement divisés en quatre parties:

- Le panneau PV qui convertit l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique sous forme continue.
- La partie d'électronique de puissance.
- Le sous-système moteur-pompe dans lequel la sortie électrique du réseau est convertie en énergie mécanique puis hydraulique.
- Le système hydraulique qui délivre l'eau à son point d'utilisation.

Le schéma général d'un système de pompage PV peut être représenté par la Figure I.15.

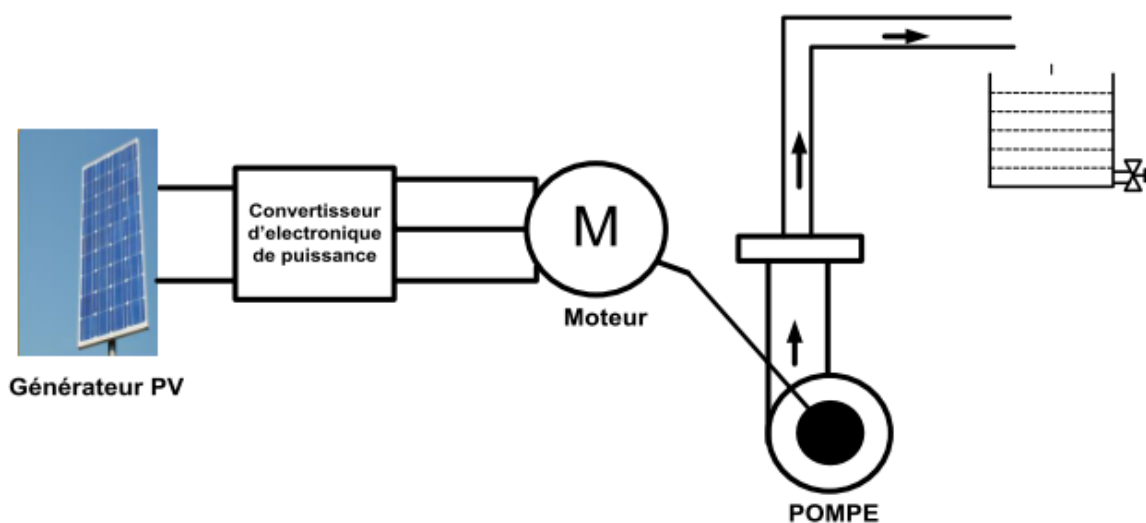


Figure I 15 Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque

### **I.3.1 Ressources en eaux de l'Algérie**

Grace à la présence de l'eau, l'évolution de la vie a été facile et possible, seule une portion de cette eau est réellement disponible pour la consommation humaine, une grande partie se trouve bloqué sous forme de neige, de glaciers ou d'eaux souterraines profondes [11].

- **Les eaux souterraines**

Les eaux souterraines sont des ressources naturelles. Même si elles existent presque partout dans le monde, peu de gens comprend ce que les eaux souterraines. Elles constituent souvent la seule source d'approvisionnement en eau potable dans les pays en voie de développement.

L'eau souterraine est l'eau qui se trouve dans les aquifères sous la surface de la terre, dans les espaces interstitiels du sol et dans les fractures des formations rocheuses.

- **Puits et pompage**

Pour extraire l'eau de surface, il est nécessaire de creuser soit un puits, soit un forage, la différence entre ces deux derniers (puits et forage) réside principalement dans le diamètre de creusement.

Les puits ont un diamètre supérieur à  $0.8m$  et une profondeur de  $5$  à  $20m$  tandis qu'un forage aura un diamètre inférieur et une profondeur supérieur.

Pour le pompage, le choix d'une pompe se fait non seulement en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation (débit, hauteur manométrique totale HMT...) mais aussi en fonction des conditions particulières d'utilisation (puits, forage,) [11].

### **I.3.2 Définition générale du système de pompage d'eau**

Une pompe est un dispositif qui assure le déplacement d'un fluide d'un point à un autre. Les pompes sont classées soit par leur principe de fonctionnement, pompes volumétriques ou centrifuge, soit par l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompé, la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

#### **I.3.2.1 Différents types des pompes**

- Pompes volumétriques
- Pompes centrifuges
- Les pompes à aspirations



- Les pompes à refoulement (ou à immensément)

### **I.3.3 Domaine d'application pompage d'eau**

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Leur utilisation est infiniment diversifiée, on ne s'intéresse donc ici qu'aux principales d'entre elles. Les grands domaines d'utilisations peuvent être cités comme suit :

- Hydro-électricité (barrage).
- Agriculture (irrigation des surfaces cultivées).
- Alimentation urbaine (réseau d'alimentation d'eau urbaine).
- Château d'eau.
- Industrie hydrocarbure (production du pétrole).
- Transport des hydrocarbures liquides.
- Industrie de traitement des hydrocarbures.

Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas, comme :

- Utilisation de liquides visqueux, la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- Utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tel que le lait).
- Utilisation comme pompe doseuse; la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.

Ces types d'application nécessitent l'utilisation de pompes volumétriques. Par contre à la plupart des pompes volumétriques, les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides [12].

## **I.4 Moteur d'entraînement**

Le moteur d'un groupe moteur pompe est le dispositif qui assure la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Les moteurs électriques peuvent être à courant continu (CC) ou à courant alternatif (CA) utilisés pour les applications de pompage à énergie photovoltaïque. Dans le cas, où on utilise un moteur à courant alternatif, un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu de générateur photovoltaïque en courant alternatif. Il peut sembler que le choix d'un moteur à courant continu est plus intéressant, mais par la suite nous allons voir que le progrès des convertisseurs permet de choisir les moteurs à courant alternatif efficaces et moins coûteux [3].

#### **I.4.1 Moteur à courant continu**

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/collecteur rotatif qui s'usent, est complexe à réaliser et consommé de l'énergie [13].

#### **I.4.2 Moteur à courant alternatif**

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilos Watts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs courant alternatifs sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de  $120^\circ$ ) utilisé par les distributeurs d'électricité [13].

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

Les moteurs synchrones

Les moteurs asynchrones.

##### **I.4.2.1 Les moteurs synchrones**

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors « alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1500 MW. Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Il existe trois types de machines synchrones : les machines synchrones à rotor bobiné, les machines synchrones à réluctance, et les machines synchrones à aimants permanents [14].

### **I.4.2.2 Les moteurs asynchrones**

La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique. 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.

L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïque.

L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur.

Dans ce travail, on s'intéresse à l'utilisation de la machine asynchrone à cage d'écurie (MAS) dans notre système de pompage, car cette dernière est la machine la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération et la moins coûteuse à la fabrication [13].

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description sur la production mondiale de l'électricité. Nos études étant centrées sur l'utilisation des énergies renouvelables en Algérie, celle-ci ne représentait en 2019 qu'un pourcentage très faible inférieur à 0,8%. Nous avons également présenté la structure d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables pour couvrir une part de la demande nationale en électricité. L'objectif est d'atteindre d'ici 2030 un taux d'intégration supérieur à 40% de la production électrique. D'après notre étude, il apparaît que l'énergie renouvelable la plus intéressante du point de vue caractéristiques énergétiques en Algérie demeure le solaire photovoltaïque. Cette énergie est largement disponible avec un immense potentiel. Ce potentiel favorise son utilisation pour l'alimentation électrique, en particulier les sites isolés dans diverses régions en Algérie, nous présentons les différents concepts qui composent un système de pompage d'eau photovoltaïque, et le principe de fonctionnement de chaque élément, introduisant ainsi la modélisation et l'analyse du système, que nous aborderons au chapitre 2.

# **Chapitre II :**

## **Modélisation et**

### **commande vectorielle**

#### **d'un moteur/pompe**

##### **Alimenté par le réseau**

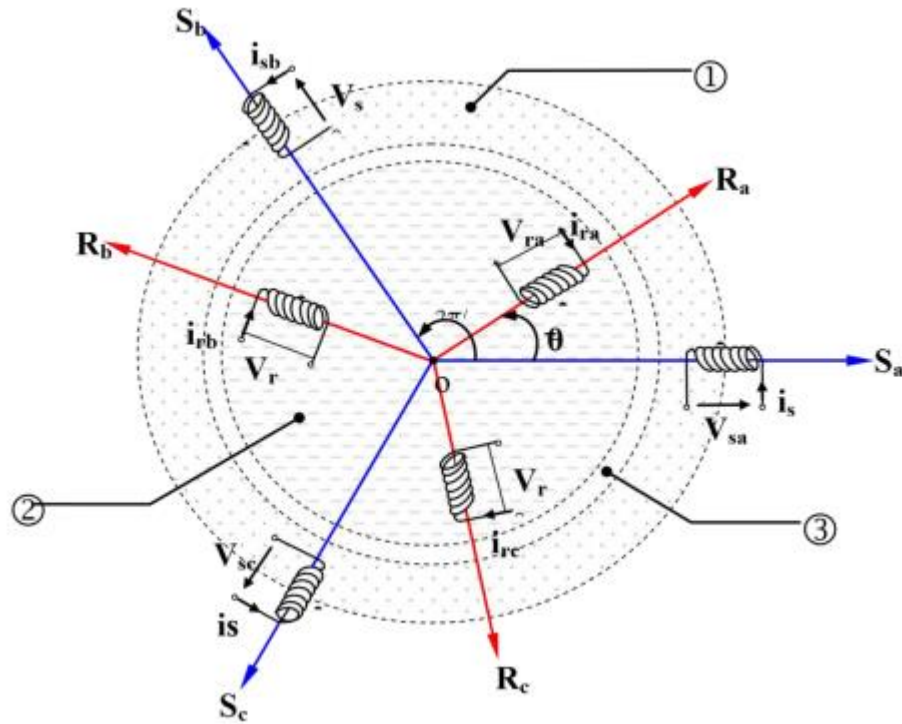
## **II.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation de la machine asynchrone et la modélisation de la commande vectorielle pour la variation de vitesse du moteur asynchrone, qui va nous permettre de réguler le débit de la pompe centrifuge. En effet, la régulation du débit par la variation de vitesse du moteur permet d'adapter en permanence la puissance de la pompe aux besoins de l'installation. Lorsque le débit augmente de façon linéaire, les pertes de charges de l'installation dans le carré du débit augmentent. Les pompes centrifuges ont un comportement similaire : lorsque le débit et la vitesse augmentent, la hauteur manométrique augmente avec le carré de la vitesse. En raison de ces lois hydrauliques, une faible variation de vitesse permet de couvrir une plage de fonctionnement importante, et on va présenter la Modélisation de l'alimentation et la pompe centrifuge. On termine ce chapitre par des résultats de simulation de la commande vectorielle de la motopompe dans les conditions de fonctionnement normales, ainsi que dans le cas des variations paramétriques du système.

## **II.2 Modélisation de la machine asynchrone**

La machine asynchrone représentée sur la figure (II-1) est constituée par :

- Le stator d'une machine asynchrone est identique à celui d'une machine synchrone, 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés de  $2\pi/3$  qui sont alimentés par un système de tensions équilibrées.
- Le rotor de la machine supporte un bobinage semblable à celui du stator, bobinage triphasé décalés de  $2\pi/3$  à même nombre de pôles que celui du stator. Ces 3 bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes. Ce type de rotor est dit bobiné mais on peut envisager un rotor plus sommaire constitué de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité.



①Partie fixe : Stator. ②Partie mobile : Rotor. ③Entrefer

Figure-II-1: Représentation de la machine asynchrone triphasée.

### II.2.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (II-1)$$

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (\$n\_1\$) diffère de celle du rotor (\$n\$), c'est-à-dire, lorsque \$n \neq n\_1\$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque \$n = n\_1\$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport :

## Chapitre II Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par le réseau

$$g = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (\text{II-2})$$

g représente le glissement de la machine asynchrone [15].

### II.2.2 Equations de la machine dans le repère (abc) et dans le repère (dq)

La machine est représentée par trois phases statoriques :  $a_s, b_s, c_s$  et trois phases rotoriques :  $a_r, b_r, c_r$ . (Figure-II-2).

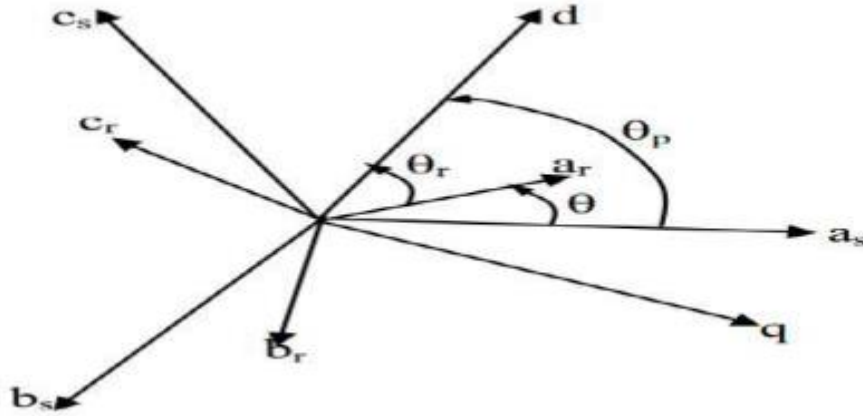


Figure-II-2: Représentation des axes de la machine.

$\theta_p$  : angle électrique stator/référentiel (d, q).

$$\theta_r = \theta_p - \theta$$

$$\omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

- **Equations aux électrique**

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

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

Ou :

$$[V_{S(abc)}] = [R_s] [I_{S(abc)}] + \frac{d}{dt} [\phi_{S(abc)}] \quad (\text{II.4})$$

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

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-5})$$

$$\text{Ou : } [V_{S(abc)}] = R_s [I_{S(abc)}] + \frac{d}{dt} [\phi_{S(abc)}] \quad (\text{II-6})$$

• **Equations Magnétiques**

Les relations entre les flux et les courants du stator et du rotor s'écrivent comme suit :

- Pour le stator :  $[\phi_{S(abc)}] = [L_{S(abc)}][i_{S(abc)}] + [M_{sr}][i_{r(abc)}]$
- Pour le rotor :  $[\phi_{r(abc)}] = [L_{r(abc)}][i_{r(abc)}] + [M_{sr}][i_{S(abc)}]$

Ou :

$[L_S]$  : Matrice d'inductances statoriques.

$[L_r]$  : Matrice d'inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$  : Matrice des inductances mutuelles du couplage entre stator-rotor.

Avec :

$$[L_S] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-7})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II-8})$$

Ou :

$l_s$  : Inductance propre d'une phase statoriques.

$l_r$  : Inductance propre d'une phase rotoriques.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$M_0$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

L'écriture matricielle ci-dessous résume les 3 équations du flux statoriques :



$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \\ L_m \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (II-9)$$

De façon similaire, on aura au rotor :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \\ L_m \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (II-10)$$

D'où :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}][I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}][I_r]) \quad (II-11)$$

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}][I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{rs}][I_s]) \quad (II-12)$$

• **Equations Mécaniques**

Le couple électromagnétique développé s'écrit:

$$C_e = p [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}][I_r] \quad (II-13)$$

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f . \Omega \quad (II-14)$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

$f$  : Coefficient du frottement visqueux.

$C_e$  : Couple électromagnétique.

$C_r$  : Couple de charge.

$\Omega$  : Vitesse rotorique.

## Chapitre II Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par le réseau

Les équations précédentes permettent la modélisation de la machine dans le plan (ABC). Elles peuvent être implantées dans un ordinateur, par contre, vu la complexité de ces équations non linéaires et multi variables, il est très difficile d'en tirer des stratégies de commande.

### Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park

La transformation de Park est ancienne (1929), si elle redevient à l'ordre du jour, c'est tout simplement parce que les progrès de la technologie des composants permettent maintenant de la réaliser en temps réel.

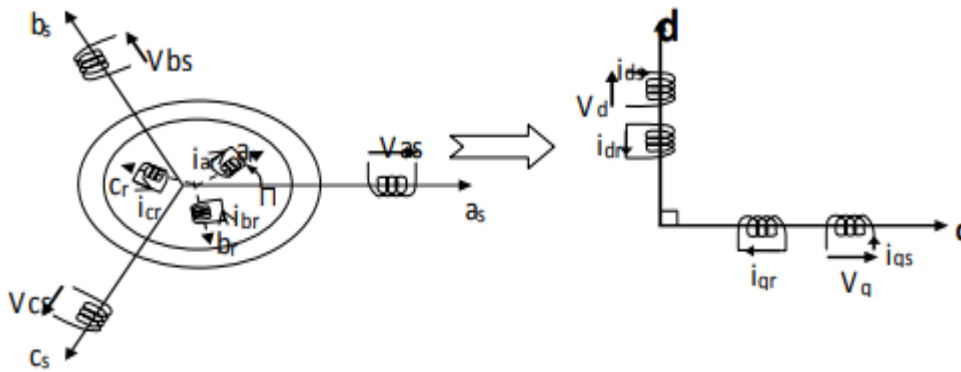


Figure-II-3: Représentation des axes de la machine asynchrone dans le repère de Park.

#### ○ Transformation de PARK

Soit  $[V_s]$  la vecteur tension appliqué aux 3 phases statoriques de la machine

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

La transformée de Park correspond tout simplement au changement de base (triphase- d q) qui permet de diagonaliser une matrice « inductance ». La matrice de changement de base est  $[P(\theta)]$  définie par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

## Chapitre II Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par le réseau

La matrice de changement de base  $[P(\theta)]$  étant orthogonal, le calcul de sa matrice inverse est très simple :

$$[P(\theta)]^{-1} = \text{transposée } [P(\theta)] = [P(\theta)]^{-1} \quad (\text{II-17})$$

$$\text{Donc : } P^{-1}\theta = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

Application de la Transformation de Park à la Machine Asynchrone :

Dans le repère de Park (d, q) :

- **Equations des Tensions**

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \quad (\text{II-19})$$

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{ds} \quad (\text{II-20})$$

$$V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qr} = 0 \quad (\text{II-21})$$

$$V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{dr} = 0 \quad (\text{II-22})$$

Avec :  $\omega_r = \omega_s - \omega_m$  et  $\omega_m$  est la vitesse mécanique.

- **Equations du Flux**

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \quad (\text{II-23})$$

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \quad (\text{II-24})$$

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \quad (\text{II-25})$$

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \quad (\text{II-26})$$

- **Équation mécanique**

L'équation mécanique dans le référentiel de Park est donnée par :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{II-27})$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II-28})$$

Avec :

$$\omega = p.\Omega \quad (\text{II-29})$$

$p$  : Nombre de paires de pôles.

• **Choix du Référentiel**

- Référentiel lié au stator :  $\omega_s = \mathbf{0}$  ;  $\omega_r = -\omega_m$
- Référentiel lié au rotor :  $\omega_r = \mathbf{0}$  ;  $\omega_s = \omega_m$
- Référentiel lié au champ tournant :  $\omega_r = \omega_s - \omega_m$

### II.2.3 représentation d'état

On représente les équations de la Machine Asynchrone sous forme d'état, cette représentation à la forme suivante :

$$[\dot{X}] = [A].[X] + [B].[U] \quad (\text{II-30})$$

Avec :

[X] : vecteur d'état qui représente l'ensemble des variables du système.

[U] : vecteur d'entrée ou de commande.

[A] : matrice d'état dite également matrice d'évolution.

[B] : matrice d'entrée.

On considère les tensions ( $V_{ds}$ ,  $V_{qs}$ ) comme grandeurs de commande, les courants statoriques ( $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$ ), les flux rotorique ( $\varphi_{dr}$ ,  $\varphi_{qr}$ ) comme variables d'état.

Alors :

Le vecteur d'état :  $[X] = [I_{ds}, I_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}]'$

Le vecteur de commande :  $[U] = [V_{ds}, V_{qs}]'$

• **Equations électriques**

A partir des systèmes d'équations (II-19) à (II-26), on obtient le système d'équation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\lambda \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot I_{qs} + \frac{k}{T_r} \cdot \varphi_{dr} + \omega \cdot k \cdot \varphi_{qr} + \frac{V_{ds}}{\sigma \cdot L_s} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = \omega_s \cdot I_{ds} - \lambda \cdot I_{qs} - \omega \cdot k \cdot \varphi_{dr} + \frac{k}{T_r} \cdot \varphi_{qr} + \frac{V_{qs}}{\sigma \cdot L_s} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = \frac{M}{T_r} \cdot I_{ds} - \frac{1}{T_r} \cdot \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \frac{M}{T_r} \cdot I_{qs} - \frac{1}{T_r} \cdot \varphi_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II-31})$$

Avec :  $\lambda = \frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} + \frac{R_r \cdot M^2}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r^2}$  ;  $k = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r}$  ;  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  ;  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}$

Sous forme d'état :

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & \omega_s & \frac{k}{T_r} & \omega \cdot k \\ -\omega_s & -\lambda & -\omega \cdot k & \frac{k}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega) \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II-32})$$

$$A = A_1 \cdot \omega + A_2 \cdot \omega_s + A_3 \quad (\text{II-33})$$

$$A = \left\{ \begin{array}{l} A_3 = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & \frac{k}{T_r} & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & \frac{k}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & 0 \\ 0 & \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \\ A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & k \\ 0 & 0 & -k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II-34})$$

$$\text{Et } B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-35})$$

• **Equation mécanique**

L'équation mécanique du mouvement et l'équation du couple électromagnétique sont définis comme suit :

$$\begin{cases} J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega_r \\ C_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{pM_0}{L_r} \cdot (I_{qs} \cdot \varphi_{dr} - I_{ds} \cdot \varphi_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II-36})$$

Donc, le système écrit :

$$\begin{cases} [\dot{X}] = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \\ J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega \\ C_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{pM_0}{L_r} \cdot (I_{qs} \cdot \varphi_{dr} - I_{ds} \cdot \varphi_{qr}) \\ \omega = p \cdot \Omega \end{cases} \quad (\text{II-37})$$

## II.3 Modélisation de la commande vectorielle

### II.3.1 Principe de fonctionnement

Le principe d'orientation du flux est apparu dans les travaux de Blaschke au début des années 70, il consiste à faire coïncider l'axe 'd' du repère tournant (d-q) avec le flux, afin de rendre le comportement de la machine asynchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, le flux est donc contrôlé par le courant inducteur et le couple par le courant induit.

Le but de cette commande est d'éliminer le couplage qui existe entre l'induit et l'inducteur et de ramener son fonctionnement comparable à celui d'une MCC en décomposant le courant statorique en deux composantes, dont l'une contrôle le flux ( $I_{ds}$ ) et l'autre contrôle le couple ( $I_{qs}$ ).

On distingue deux types des contrôles vectoriels: directe (FOC) et indirecte (IFOC); dans le contrôle vectoriel directe on effectue une régulation du flux qui nécessite la connaissance de celui-ci, alors que dans le contrôle vectoriel indirecte, on s'affranchit de la connaissance de ce flux en faisant quelques approximations.

La commande est dite indirecte lorsque la position du flux considéré est calculée à partir de la mesure de la vitesse du rotor et d'autres grandeurs accessibles, comme les tensions ou les courants statoriques [16].

La commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone alimentée en tension peut être représentée par la figure (II-4).

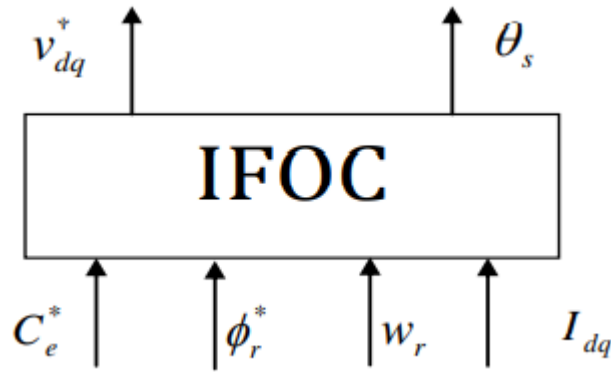


Figure II-4 : Schéma simplifié de la commande vectorielle indirecte de la MAS alimentée en tension.

**Découplage par compensation :**

Dans le cas de la machine asynchrone alimentée en tension, le modèle de la machine est d'ordre cinq, donc il est nécessaire de découpler les deux axes des tensions statoriques par des f.é.m. de compensation.

Nous utilisons une méthode de compensation qui a pour but d'annuler les termes croisés et les termes non linéaires. Cette méthode consiste à faire la régulation des courants en négligeant les termes de couplage. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs pour obtenir les tensions des références nécessaires pour le réglage. Les termes supplémentaires sont déterminés de sorte que les tensions restantes soient une relation du premier ordre avec les courants correspondants [16].

Les tensions statorique s'écrivent:

$$\begin{cases} V_{ds} = \lambda\sigma L_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} - (\omega\sigma L_s I_{qs} + \frac{K_s}{T_r} \sigma L_s \phi_{dr}) \\ V_{qs} = \lambda\sigma L_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} - (\omega\sigma L_s I_{ds} + \omega_r K_s \sigma L_s \phi_{dr}) \end{cases} \quad (II-38)$$

Pour rendre les axes d et q complètement indépendant, il est nécessaire d'ajouter des termes identiques de découplages mais de signe opposé à la sortie des régulateurs comme le montre la figure (II-5).

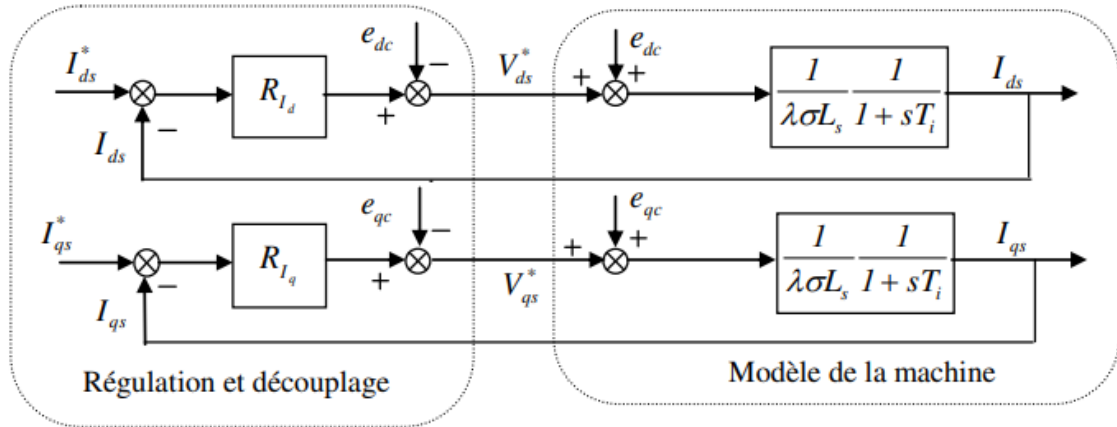


Figure II-5 : Découplage par addition des termes de compensation.

Ceci nous amène à écrire les tensions sous la forme :

$$\begin{cases} V_{ds} = V_{ds}^* + e_{ds} \\ V_{qs} = V_{qs}^* + e_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-39})$$

Les termes de compensation sont définis par les f.é.m.  $e_{dc}$  et  $e_{qc}$

$$\begin{cases} e_{dc} = \omega_s \sigma L_s I_{qs} + \frac{K_s}{T_r} \sigma L_s \Phi_{dr} \\ e_{qc} = \omega_s \sigma L_s I_{ds} - \omega_r K_s \sigma L_s \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II-40})$$

Finalement, on obtient un nouveau système d'équations linéaires parfaitement découplé :

$$\begin{cases} V_{ds}^* = \lambda \sigma L_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} \\ V_{qs}^* = \lambda \sigma L_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-41})$$

Le découplage permet d'écrire les équations de la machine sous une forme simple ce qui facilite considérablement le dimensionnement des coefficients des régulateurs. Donc, après orientation du flux rotorique et découplage par compensation, on aboutit alors à un schéma bloc simple et identique pour les deux composantes du courant statorique de la figure (II-6).

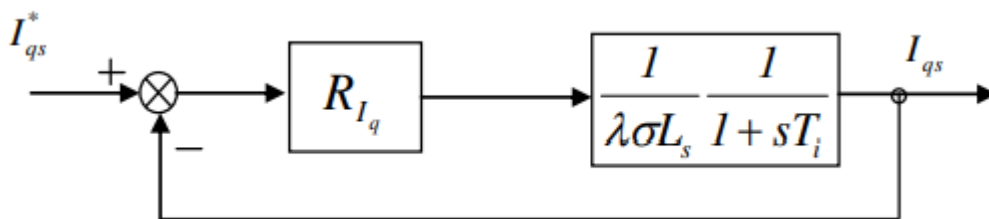


Figure II-6: Boucle du courant  $I_{qs}$  après découplage.



Avec:  $T_i = \frac{1}{\lambda}$  (II-42)

## II.4 Modélisation de l'alimentation

### II.4.1 Réseau triphasé

Un réseau électrique de tension triphasé est constitué de trois tensions sinusoïdaux de même fréquence, de même amplitude, et qui sont déphasés entre eux d'un tiers de tour soit  $2\pi/3$  dans le cas idéal. Lorsque les trois conducteurs sont parcourus par des tensions de même valeur efficace. Un réseau électrique peut être représenté par le système suivant [17]:

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(\omega t) \\ V_b(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.43)$$

Avec:

$$V_m = 220 \cdot \sqrt{2} \qquad W = 2 \cdot \pi \cdot f \qquad f = 50\text{Hz}$$

### II.4.2 Redresseur

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative -continu. Alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie [18]. Nous utilisons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tension sinusoïdales triphasées, représenté sur la figure (II-7).

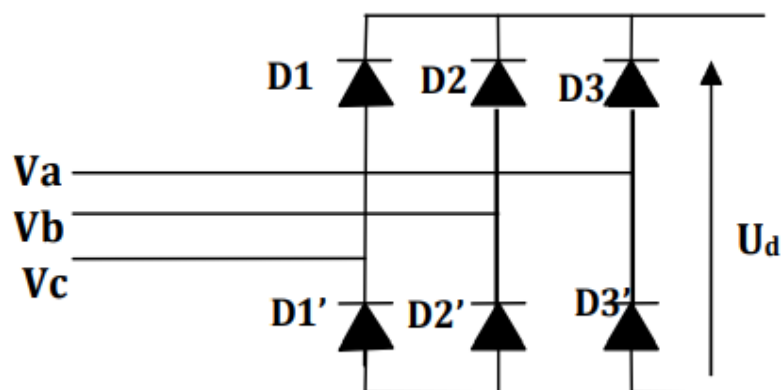


Figure. II.7. Redresseur à diodes [18]

## Chapitre II Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par le réseau

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque D1 conduit, l'une des deux diodes D2' et D3' conduit également. Il en vient que D1 conduit lorsque V1 est supérieur à V2 et V3, ou encore :

$$V1 = \text{Max}(Vj); j=1, 2, 3.$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

Di conduit si  $V_i = \text{Max}(V_j); i=1, 2, 3; j=1, 2, 3.$

Di' conduit si  $V_i' = \text{Min}(V_j); i=1, 2, 3; j=1, 2, 3.$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension Ud à la sortie du redresseur est :

$$U_d = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j); j=1, 2, 3.$$

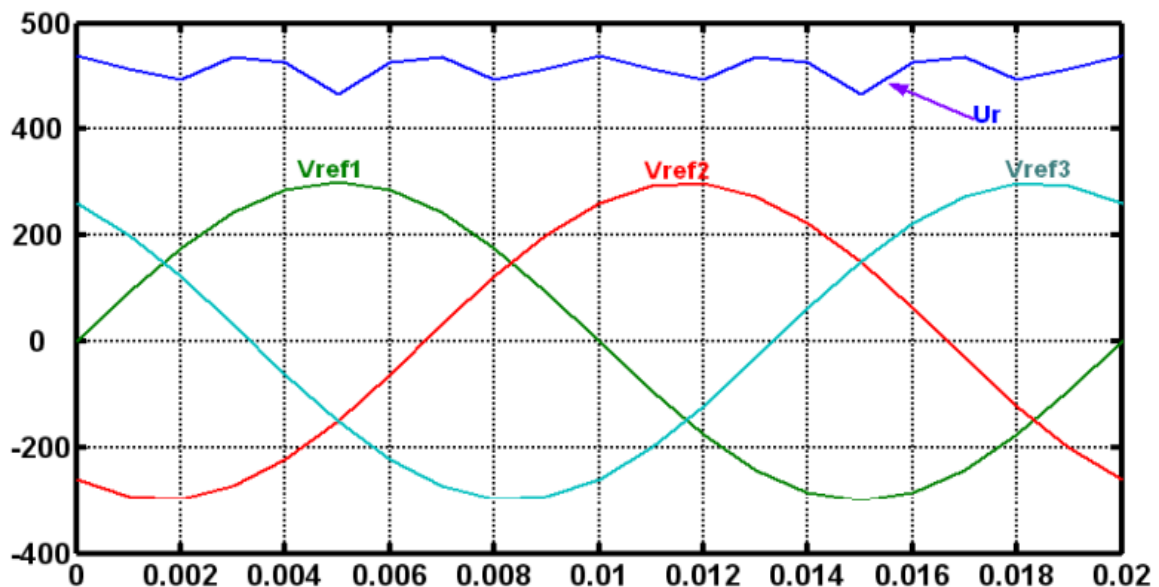


Figure.II.8. Tension redressée.

La tension obtenue par ce redresseur présente des ondulations importantes, ce qui nécessite un filtre.

### II.4.3 Filtre

Afin de réduire le taux d'ondulation de cette tension redressée, on utilise un filtre passe bas (Lfcf), schématisé par la figure (II-9) :

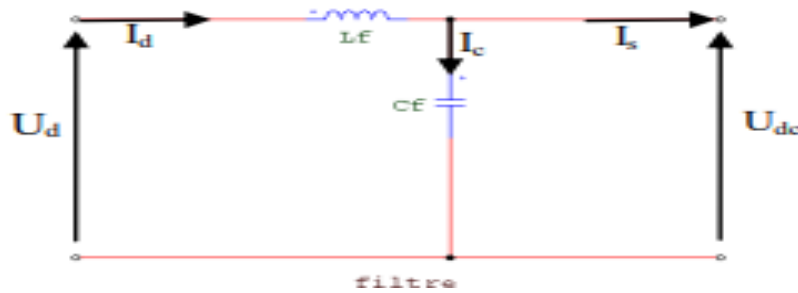


Figure.II.9.Représentation du filtre.

Ce filtre est modélisé par les équations suivantes :

$$U_d(t) = L_f \frac{dI_d(t)}{dt} U_{dc}(t) \quad (\text{II-44})$$

$$\frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_d(t) - I_s(t)) \quad (\text{II-45})$$

D'où la fonction de transfert du filtre ( $I_s=0$ ):

$$F(s) = \frac{U_{dc}(s)}{U_d(s)} = \frac{1}{1+(s\sqrt{L_f C_f})^2} \quad (\text{II-46})$$

C'est un filtre de deuxième ordre dont la pulsation de coupure est:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad [\text{rad/s}] \quad (\text{II-47})$$

La détermination de  $L_f$  et  $C_f$ , se fait en imposant une fréquence de coupure inférieure à la fréquence de la première harmonique à éliminer de  $U_d(t)$ .

#### **II.4.4 Onduleur à deux niveaux + MLI\_ST**

L'onduleur triphasé a pour but de convertir la tension continue à la sortie des panneaux en tension alternative afin d'alimenter le réseau triphasé. Cet onduleur est commandé en modulation de largeur d'impulsions (Fig.II.10) ; Le circuit d'alimentation est généralement constitué de commutateurs IGBT contenant un pont de six transistors de puissance avec des diodes antiparallèles. Il donne la possibilité de mesurer aux bornes des condensateurs une tension continue (Vdc) sans fluctuations. Afin d'assurer que l'onduleur dispose d'une tension maximale à sa sortie, il faut que la tension continue (Vdc) soit maintenue dans une plage bien spécifiée. En effet, la valeur minimale des tensions continues détermine directement l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur [19].

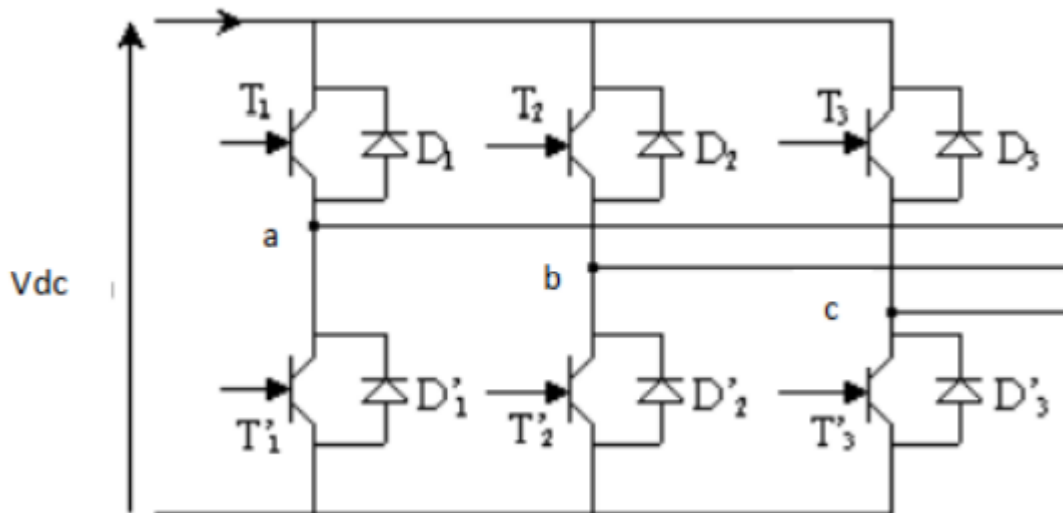


Figure II.10: Schéma block de la commande de l'onduleur triphasé.

Les états de commutation de l'onduleur sont définis par les fonctions logiques suivantes.

$$F_a = \begin{cases} 0 & \text{si } T_1 \text{ conduit et } T'_1 \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T'_1 \text{ conduit et } T_1 \text{ bloqué} \end{cases}$$

$$F_b = \begin{cases} 0 & \text{si } T_2 \text{ conduit et } T'_2 \text{ bloqué} \\ 0 & \text{si } T'_2 \text{ conduit et } T_2 \text{ bloqué} \end{cases}$$

$$F_c = \begin{cases} 0 & \text{si } T_3 \text{ conduit et } T'_3 \text{ bloqué} \\ 0 & \text{si } T'_3 \text{ conduit et } T_3 \text{ bloqué} \end{cases}$$

Avec :  $T_i, T'_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) : transistors des trois bras de l'onduleur, chaque bras est composé de deux interrupteurs bidirectionnelle (Fig.II.10).

Les tensions des phases sont exprimées en fonction des variables logiques  $F_a, F_b$  et  $F_c$  par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2F_a - F_b - F_c \\ 2F_b - F_a - F_c \\ 2F_c - F_a - F_b \end{pmatrix} \quad (\text{II-48})$$

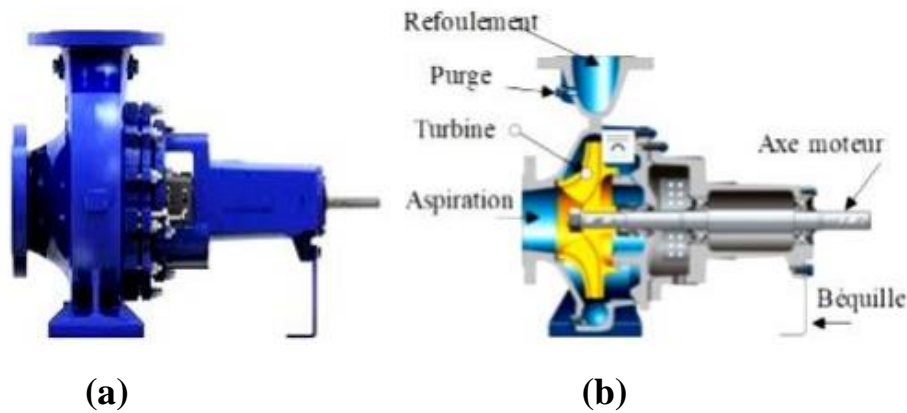
$V_{dc}$  : Tension d'alimentation continue de l'onduleur, obtenue à la sortie des PV.

## II.5 Modélisation de la pompe centrifuge

Les pompes sont généralement choisies selon la hauteur manométrique totale du puits (HMT). Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement : elles sont soit de type volumétrique ou bien de type centrifuge. Outre ces deux classifications, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de

## Chapitre II Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par le réseau

l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : pompe à aspiration et pompe à refoulement [20].



FigureII-11 :(a) Pompe centrifuge accouplée MAS, (b) coupe longitudinale pompe centrifuge.

### II.5.1 La Hauteur Manométrique HMT

La technologie des pompes centrifuges est la plus utilisée dans les systèmes de pompage photovoltaïques. Les pompes centrifuges sont conçues pour une tête fixe et un rendement en eau qui augmente avec la vitesse de rotation. Ces pompes sont simples, à prix réduit et disponibles pour une large gamme de débit. La caractéristique débit-hauteur d'une pompe centrifuge peut être estimée par le modèle de « Pleider-Peterman », et peut être exprimée par la formule suivante :

$$HMT = a_0 \cdot \Omega^2 + a_1 \cdot \Omega \cdot Q + a_2 \cdot Q^2 \quad (II-49)$$

Avec :  $a_0$  ;  $a_1$  ;  $a_2$  sont des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

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

$\Delta P$  : est la somme de pertes linéaires et singulières.

### II.5.2 Puissance Hydraulique

La principale caractéristique de la pompe centrifuge consiste à convertir l'énergie d'une source de mouvement (le moteur) d'abord en vitesse (ou énergie cinétique) puis en énergie de pression. Le rôle d'une pompe consiste en effet à transférer de l'énergie au liquide pompé (énergie transformée ensuite en débit et en hauteur d'élévation) selon les caractéristiques de fabrication de la pompe elle-même et en fonction des besoins spécifiques à l'installation. La puissance hydraulique fournie par la pompe est donnée par la relation :

## Chapitre II Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par le réseau

$$P_h = \eta_{mp} * P_{ele} = \rho * g * HMT * Q \quad (II-50)$$

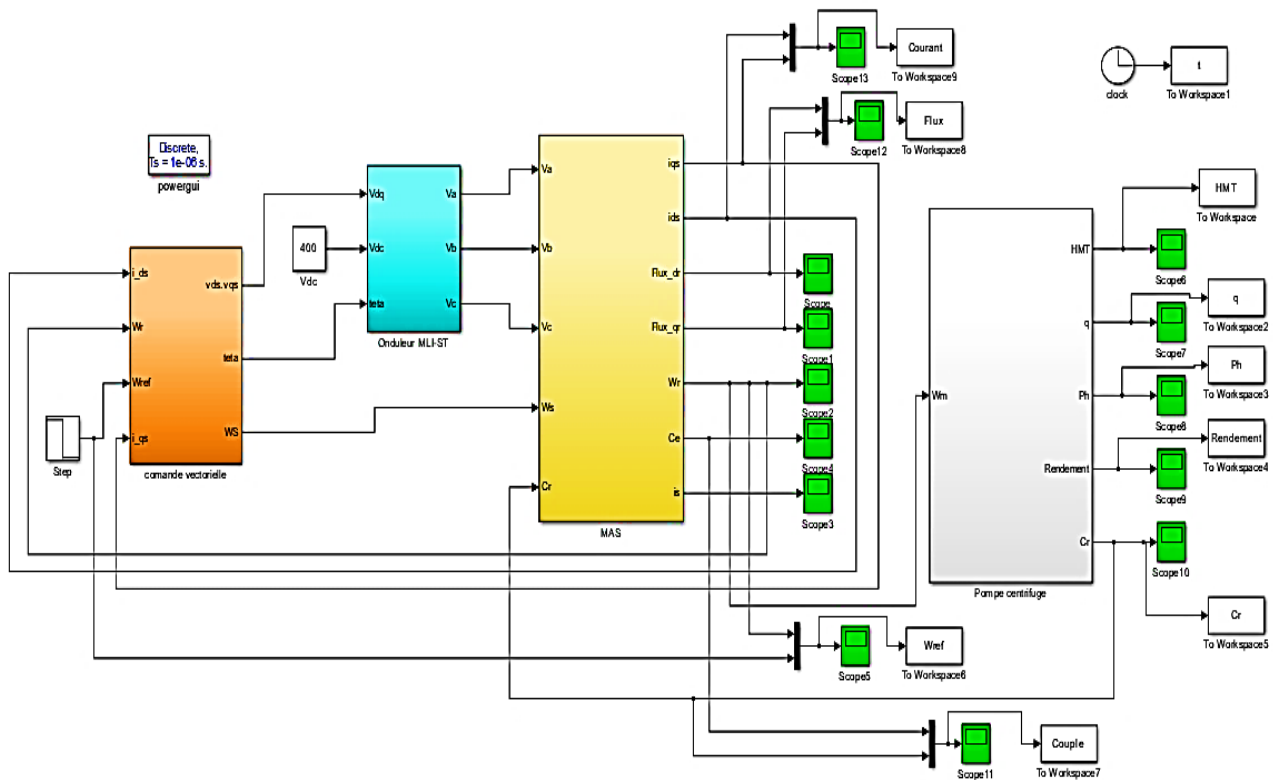
La pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$  :

$$C_r = K_r * \Omega_n^2 \quad (II-51)$$

Avec  $K_r$  un coefficient de proportionnalité [(Nm/ (rad.s-1)<sup>2</sup>] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (II-52)$$

### II.6 Simulation de la commande vectorielle de l'ensemble moteur/pompe



FigureII-12. Simulation de la commande vectorielle de l'ensemble moteur/pompe.

#### II.6.1 Résultat de simulation

La simulation est réalisée par MATLAB/SIMULINK, la pompe centrifuge est entraînée par la machine asynchrone à induction, alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux.

**- Simulation du moteur**

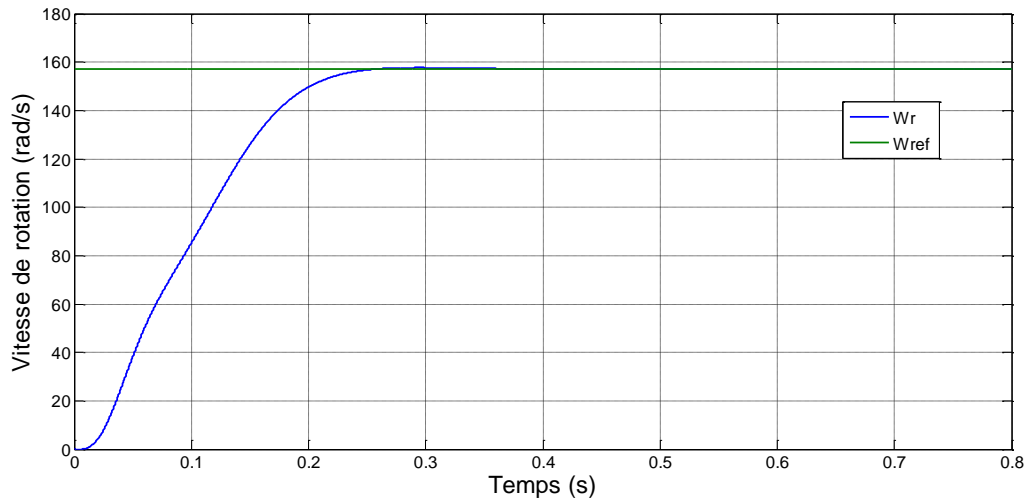


Figure II-13: Allure de vitesse du moteur.

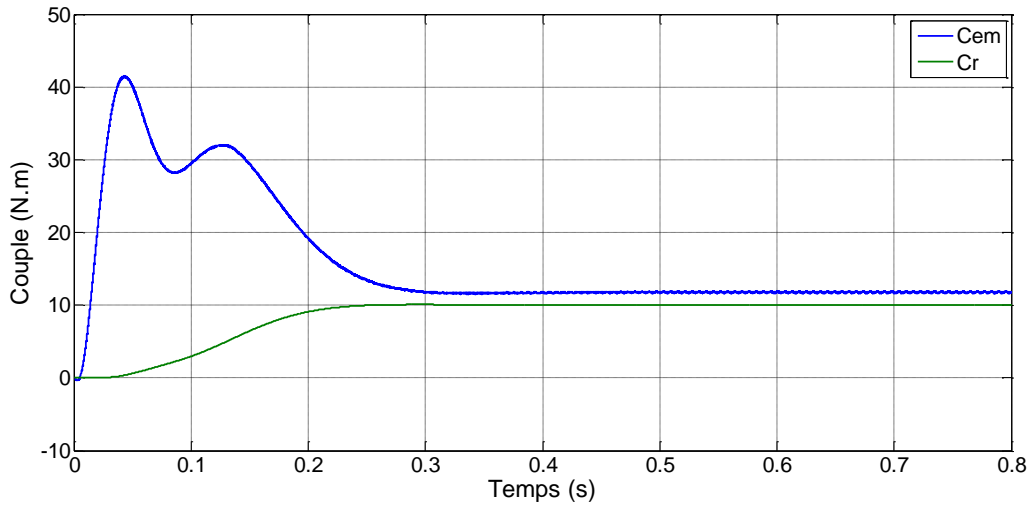


Figure II-14: Allure du couple moteur.

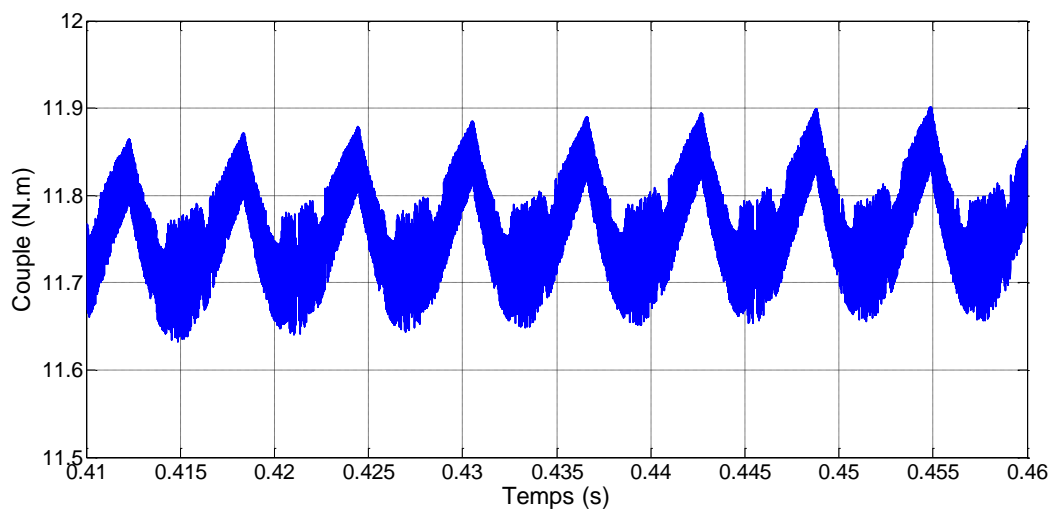


Figure II-15: Allure des ondulations du couple  $Cem$ .

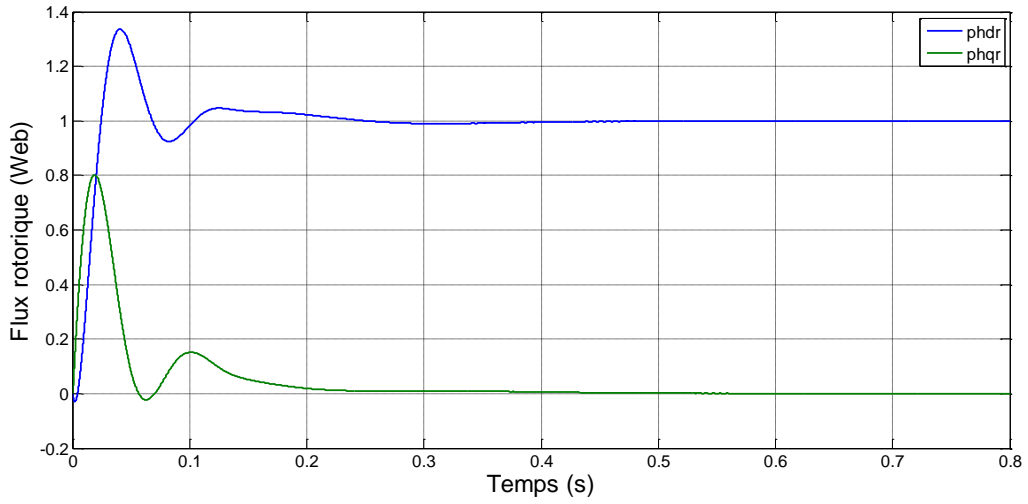


Figure II-16: Allure des flux rotorique  $\varphi_r$

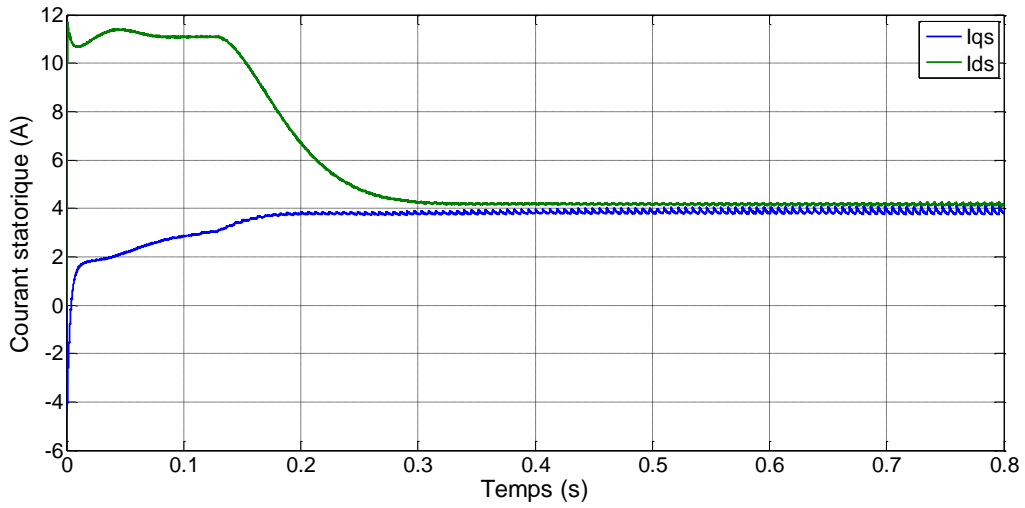


Figure II-17: Allure des courants statoriques  $I_{ds}, I_{qs}$

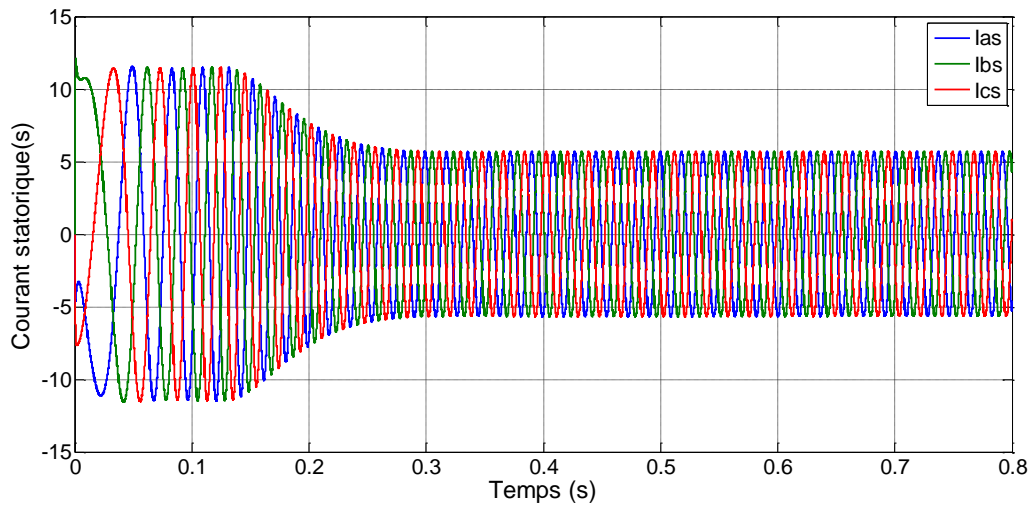


Figure II-18: Allure de courant statorique  $I_s$ .



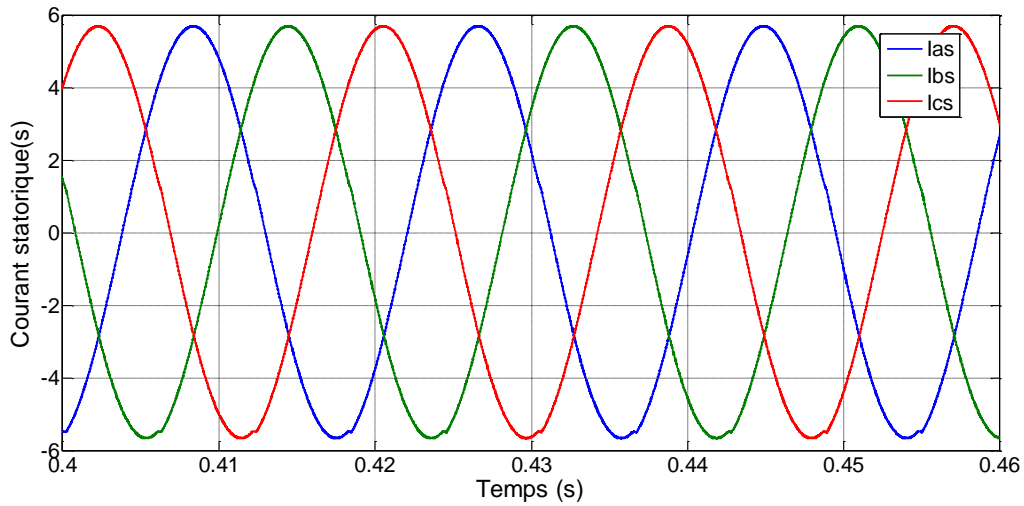


Figure II-19: Allure de zoom de courant statorique  $I_s$ .

### Interprétation de simulation

D'après la figure (II.13) la valeur de la vitesse  $\omega_r$  se stabilise vers la valeur de référence 157rad/s après un court régime transitoire 0.25s, après cette valeur la vitesse suit parfaitement sa référence.

La figure (II.14) montre que le couple moteur et le couple résistant sont presque identiques dans le régime permanent mais le couple moteur a une légère supériorité  $C_{em}=12N.m$  et  $C_r=10 N.m$  et dans le régime transitoire il a un grand dépassement arrive jusqu'à 42 N.m grâce au démarrage du moteur qui a besoin un grand couple, et dans la figure (II.15) on peut dire que le  $C_{em}$  a des faibles ondulations.

D'après la figure (II.17) des flux rotoriques :  $\varphi_{dr}$  se le stabilisé vers la valeur 1 après un léger dépassement pour une période de 0.25s par contre le  $\varphi_{qr}$  est nul. Pour les courant statorique  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  ils sont les mêmes forme que le flux et le couple successivement ce qui est confirmé dans la figure (II.17).

Les figures (II.18) et (II.19) montre que les courants statoriques ont la forme sinusoïdale.

**- Simulation de la pompe**

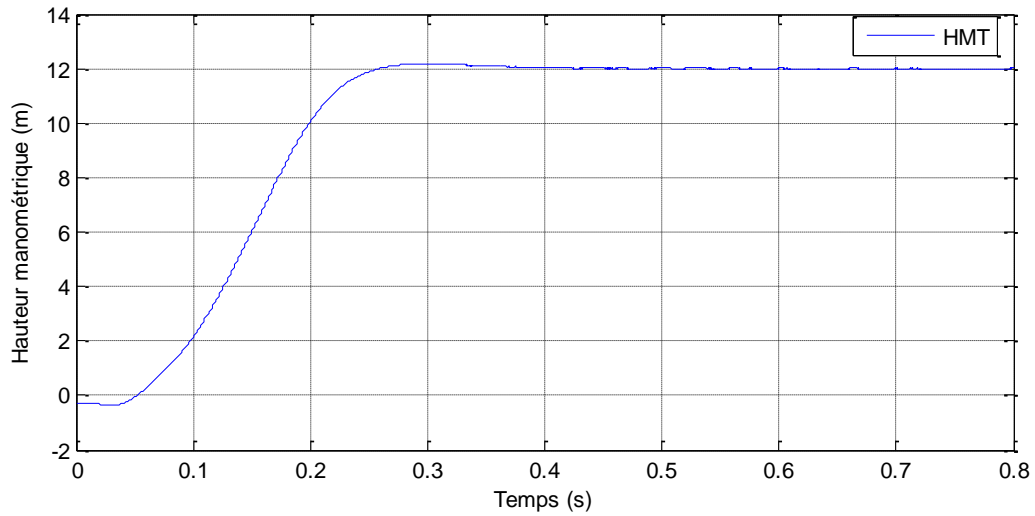


Figure II-20 : Allure de la hauteur manométrique de la pompe (m).

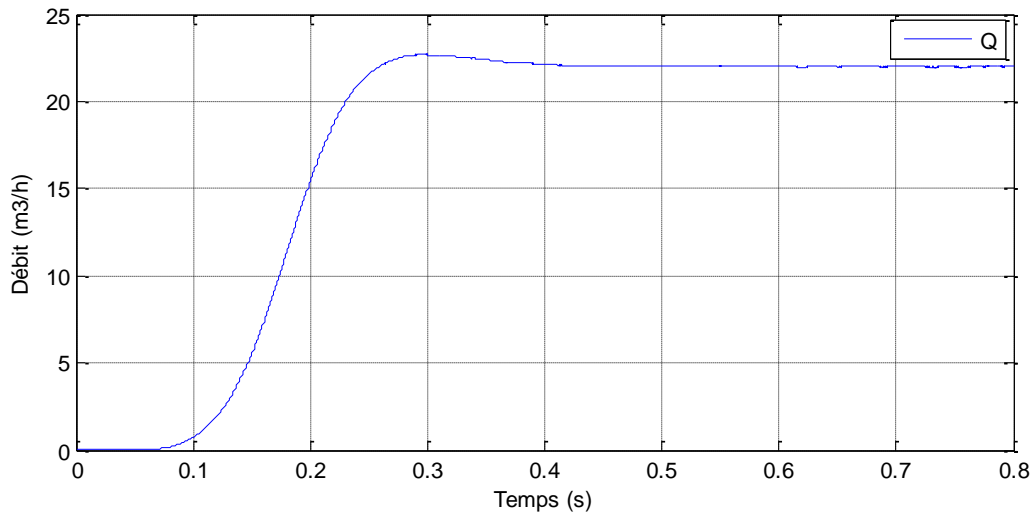


Figure II-21: Allure du débit de la pompe.

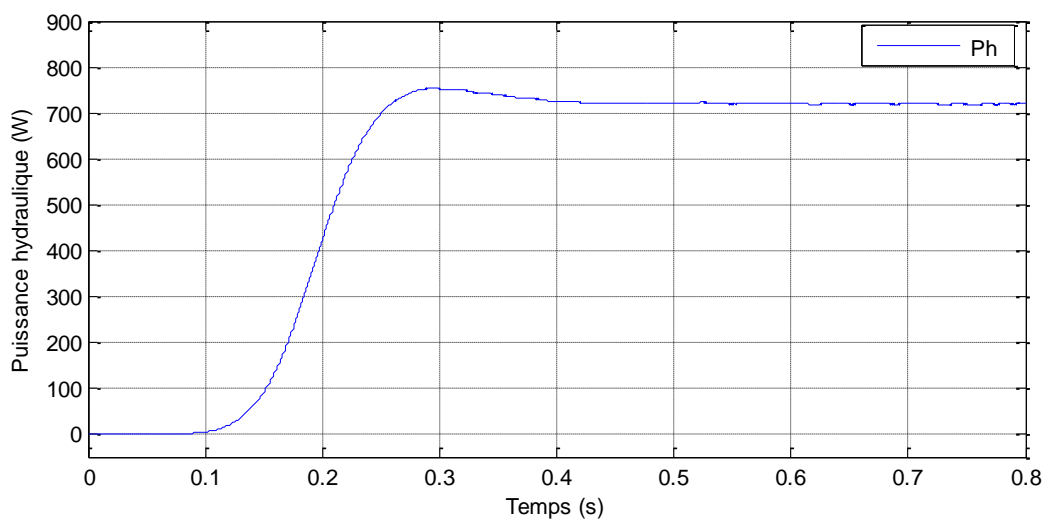


Figure II-22: Allure de la puissance hydraulique

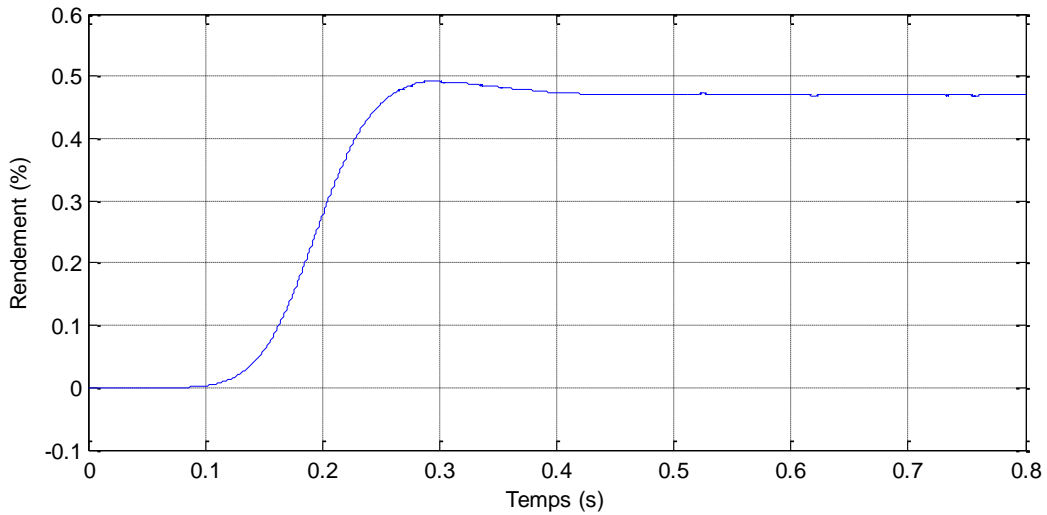


Figure II-23: Allure du rendement moto- pompe à vitesse constante.

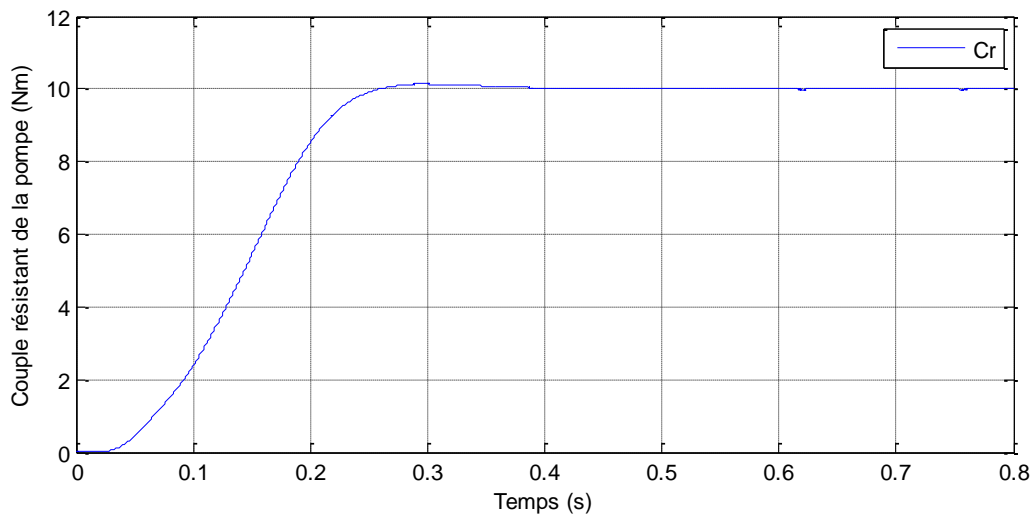


Figure II-24: Allure du Couple résistant Cr

### Interprétation de simulation

On peut voir que toutes les figures précédentes ont les mêmes formes de courbe, au début une augmentation des valeurs de (hauteur, puissance, débit ...) de 0s jusqu'à 0.3s, et après ça toutes les courbes se stabilise vers une certaine valeur pour la suite du temps.

## **II.7 Conclusion**

Dans ce chapitre on a fait l'étude de la modélisation de la machine asynchrone et la commande vectorielle à flux rotorique orienté et on a constaté qu'elle donne de meilleures performances pour un système invariant. Ensuite nous avons présenté l'alimentation et la pompe centrifuge.

Elle va nous permettre d'étudier la modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par un générateur photovoltaïque dans le chapitre (3).

# Chapitre III :

## Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe Alimenté par un générateur photovoltaïque

### **III.1 Introduction**

La modélisation est une étape essentielle qui doit précéder toute phase de dimensionnement, d'optimisation ou de simulation du système. Le système étudié est un système de pompage photovoltaïque composé particulièrement d'un générateur photovoltaïque (GPV), des convertisseurs statiques et du groupe moteur-pompe.

Dans ce chapitre, nous allons citer et expliquer les différents algorithmes de poursuite du point de puissance maximale puis on présente le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque qui est essentiel pour son bon fonctionnement et pour la satisfaction de l'utilisateur. Dans tous les cas il est nécessaire de connaître le besoin en eau, le gisement d'énergie solaire du lieu concerné. Ceci permet de faire le bon choix des modules photovoltaïques, leur implantation et la structure supporte et les choix des composantes électriques assurant la régulation et la protection du système et des usagers, nous présentons les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce système. Enfin, on présente les résultats de simulation de système de pompage photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK.

### **III.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque**

#### **III.2.1 Modèle à une diode : (Cellule réelle)**

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances ( $R_s$  et  $R_p$ ) [21].

- $R_s$  : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semi-conducteur, électrodes). Elle s'exprime par :

$$R_s = \rho \cdot \frac{L}{S_g} + R_m \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

$\rho$  : La résistivité de la grille.

$L$  : La longueur de la grille.

$S_g$  : Section des grilles collectrices.

$R_m$  : Résistance propre du matériau, sa valeur est faible ( $< 2\Omega$  pour les cellules au silicium).

-  $R_p$  : Résistance parallèle, dite « Shunt », provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'au non idéalité de la jonction.

$R_s$  Et  $R_p$  modifient le courant de court-circuit de la cellule en photo- courant  $I_{ph}$ , on aura donc le montage électrique équivalent suivant

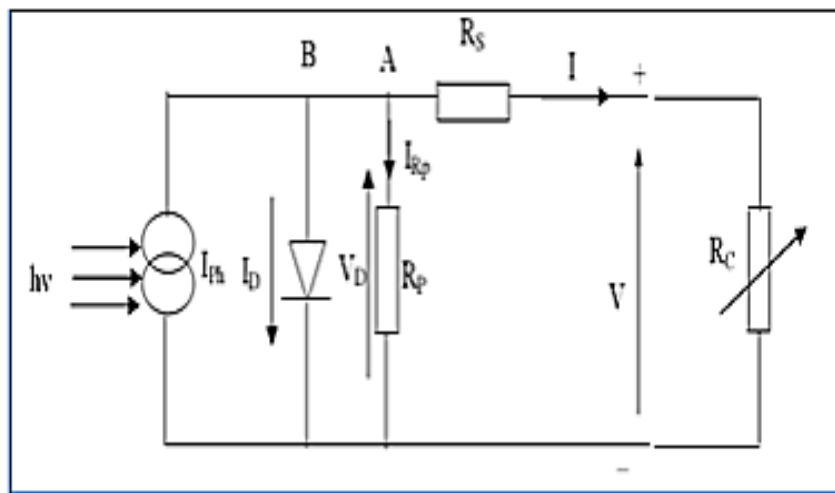


Figure III.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [21].

Appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \tag{III.2}$$

Le courant I débité par la cellule est la somme algébrique de trois courant :

- $I_{ph}$  : Photo courant indépendant de V (ou de  $R_s$ ), il est proportionnel au flux incident (taux de génération-recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs

$$I_{ph} = qg(L_n + L_p) \tag{III.3}$$

- $I_{Rp}$  : Courant traversant  $R_p$ , si  $R_p$  est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension.

$$I_{Rp} = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{III.4}$$

Car : 
$$V_d = R_p I_{Rp} = V + R_s I \quad (III.5)$$

➤  $I_D$  : Courant diode, il est de même ordre de grandeur que  $I_{Rp}$  pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de  $V_{co}$ , il s'écrit sous la forme :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) \quad (III.6)$$

Remplaçons dans (III.7) les équations (III.2), (III.4) et (III.6), l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (III.7)$$

A : est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace.

Pour les cellules actuellement commercialisées au Silicium, on prend A=1.

### III.2.2 Paramètre d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV :

#### III.2.2.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (III.7) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qR_s I_{cc}}{KT}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_p} \quad (III.8)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_s \rightarrow 0$  et  $R_p \rightarrow \infty$ )

$$I_{cc} = I_{ph} = qg(L_n + L_p) \quad (III.9)$$

Tenant compte de l'effet des résistances  $R_s$  et  $R_p$  ; le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident [21].

#### III.2.2.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (III.8)

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (III.10)$$



Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_s \rightarrow 0$ ,  $R_p \rightarrow \infty$ ,  $I_{ph} = I_{cc}$  et  $A = 1$ ) [21]

$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \text{Log} \left[ 1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right] \quad (\text{III.11})$$

### III.2.2.3 Puissance maximale

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{max}$ , correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{max}$  multipliée par le courant de court-circuit.

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (\text{III.12})$$

Le produit ( $V_{max} * I_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co} I_{sc}$ ).

### III.2.2.4 Rendement énergétique

Le rendement,  $\eta$  des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{III.13})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [22].

### III.2.2.5 Facteur de forme

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} * V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [22]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad (III.14)$$

### III.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé dans la littérature, est représenté sur la figure (III-2).

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 ( $T_j$ ) [23].

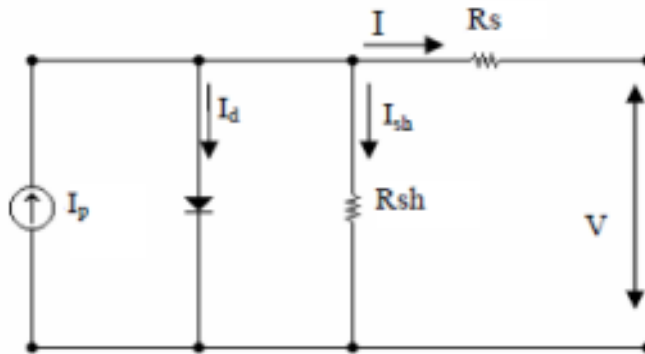


Figure (III-2) : Schéma équivalent du modèle à une diode [23].

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.

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

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (III.15)$$

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 [23]:

$$I_p = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (\text{III.16})$$

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

$$T_j = T_a + E_s \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (\text{III.17})$$

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 :

$$I_d = I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{A \cdot n_s \cdot k \cdot T_j} \right) - 1 \right] \quad (\text{III.18})$$

Avec :

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

$$I_{sat} = P_4 T_j^3 \cdot \exp \left( \frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right) \quad (\text{III.19})$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (\text{III.20})$$

Le courant du module I est donné par :

$$I = I_p(E_s, T_j) - I_d(V, I, T_j) - I_{sh}(V) \quad (\text{III.21})$$

$$I = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - P_4 T_j^3 \cdot \exp \left( \frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right) \cdot \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{A \cdot n_s \cdot k \cdot T_j} \right) - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (\text{III.22})$$

### III.3.1 Caractéristique tension-courant d'un GPV

La figure (III.3) illustre la caractéristique non linéaire  $I(V)$  d'un GPV à base de silicium pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  et une température  $T=25\text{C}^\circ$  (conditions de fonctionnement standards).

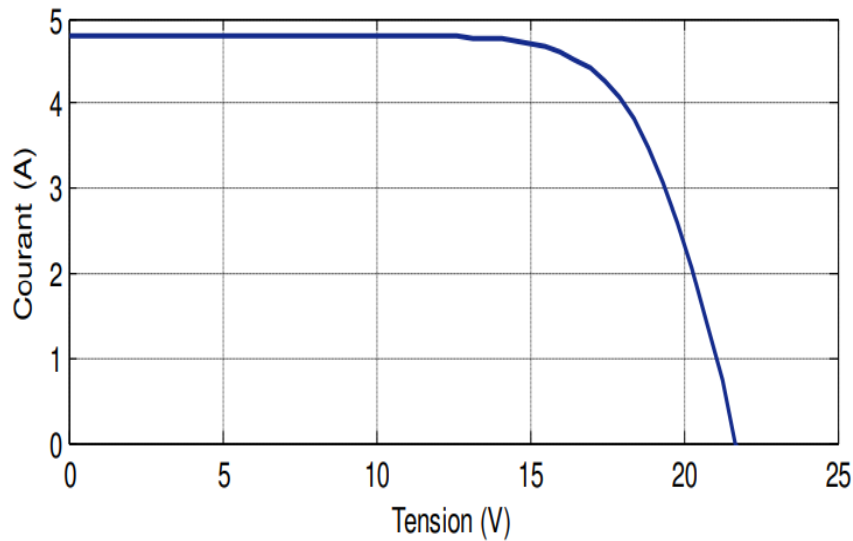


Figure III.3 : Caractéristique  $I(V)$  d'un GPV dans les conditions standards.

### III.3.2 Caractéristique puissance-courant d'un GPV

La figure (III.4) illustre la caractéristique non linéaire  $P(V)$  d'une GPV à base de silicium pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  et une température  $T=25\text{C}^\circ$  (conditions de fonctionnement standards).

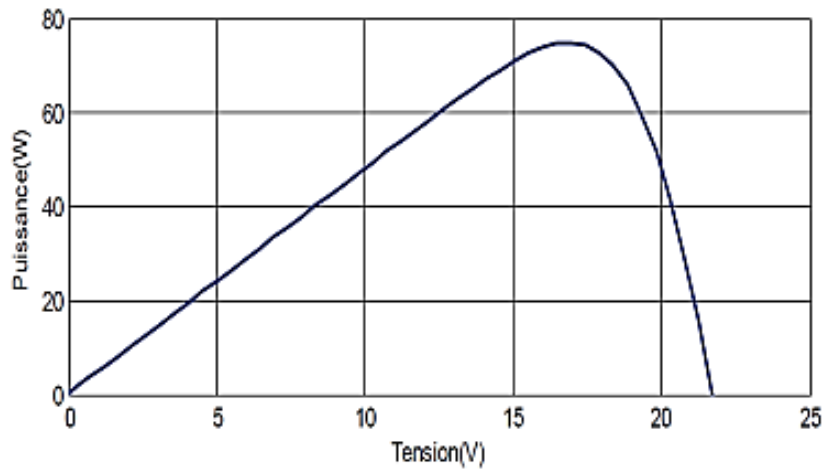


Figure (III.4):Caractéristique P(V) d'un GPV dans les conditions standards.

### III.3.3 Effet de l'éclairement et de la température

#### a) Effet de l'éclairement

L'augmentation de l'éclairement est directement proportionnelle à l'intensité du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement [24].

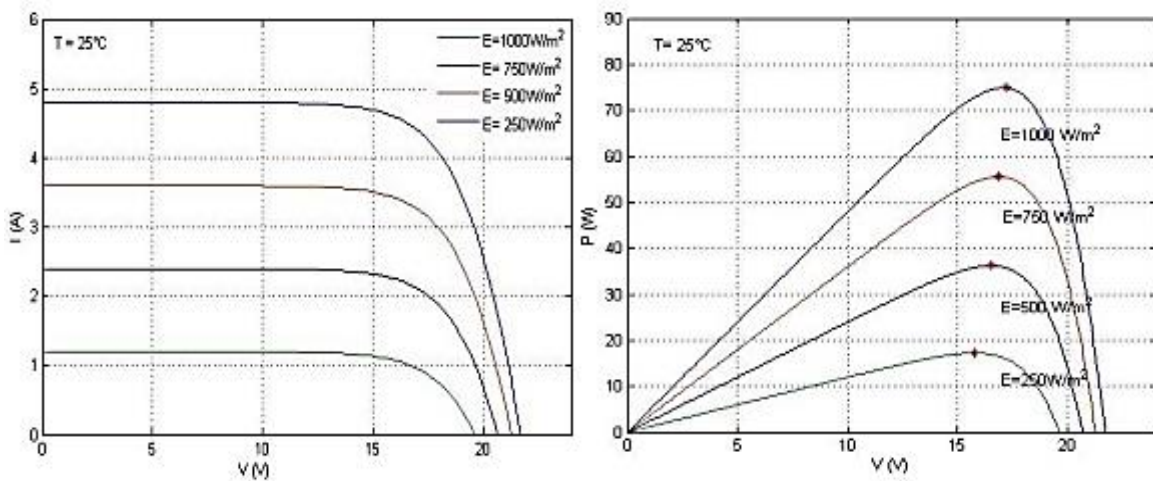


Figure III.5 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V

#### b) Effet de la température

La température est un paramètre important dans le comportement du générateur photovoltaïque. La figure (III.6) montre que l'augmentation de la température entraîne une

diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximal [24].

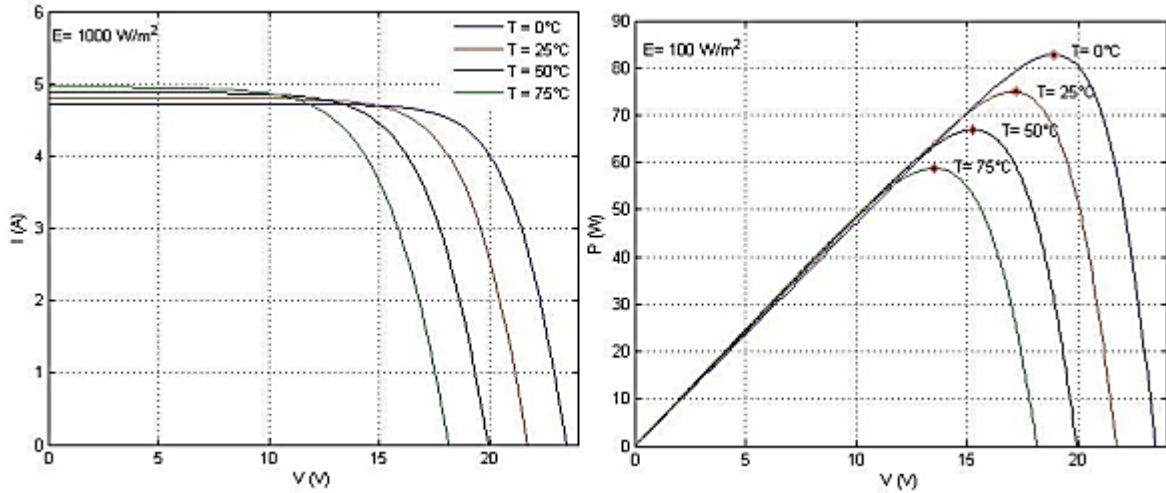


Figure III.6: Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V

### III.3.4 Modélisation du hacheur Boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [25].

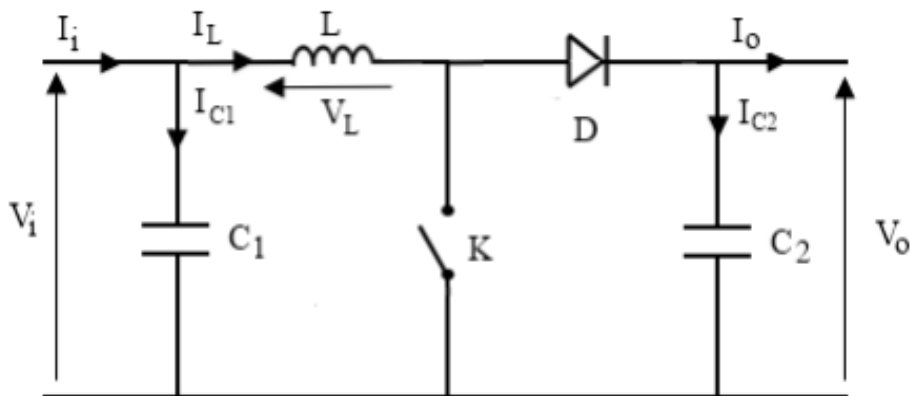


Figure III. 7: Schéma électrique d'un hacheur boost.

Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps  $t \in [\alpha T_e, T_e]$ , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors  $V_K = V_0$ . En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [25]:

$$V_0 = (1 - \alpha) = V_i \tag{III.23}$$

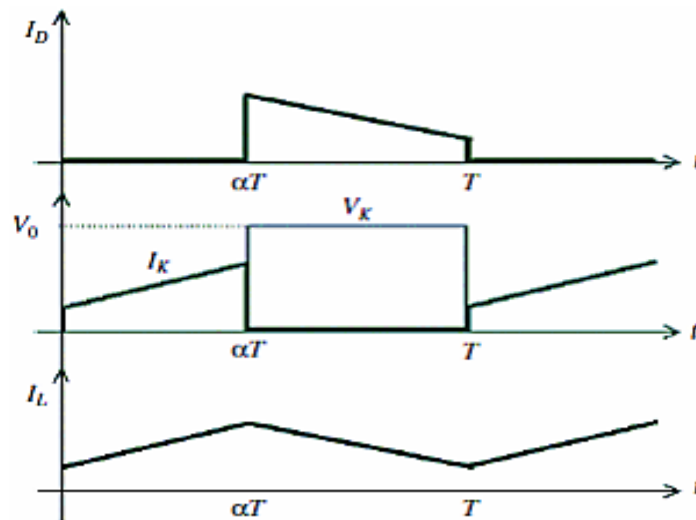


Figure III. 8: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

**Modèle mathématique équivalent**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (III.9), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d entre  $[0, \alpha T_e]$  [25].

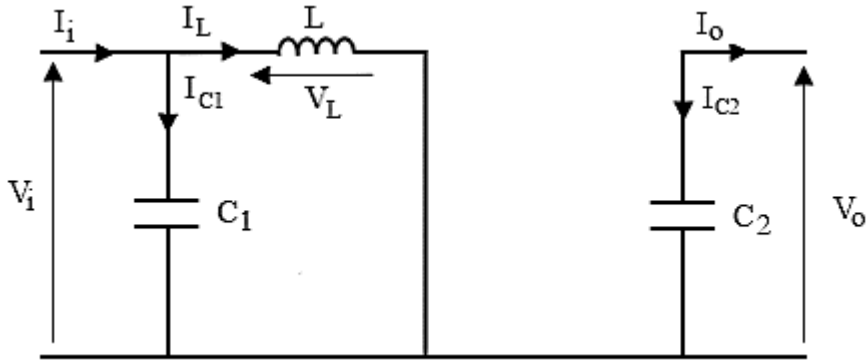


Figure III. 9: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (III.24)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (III.25)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (III.26)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

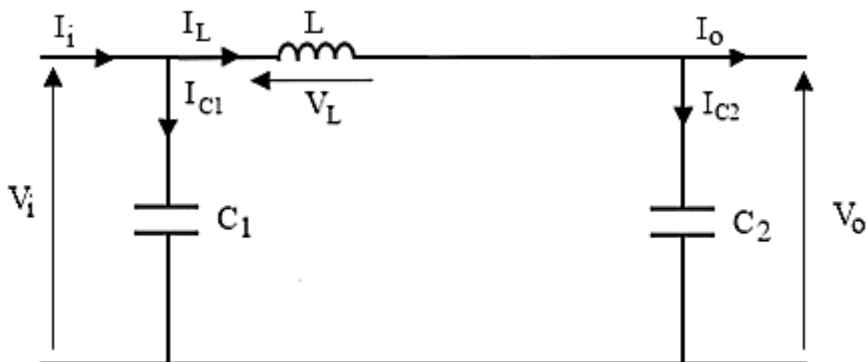


Figure III. 10: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (III.27)$$



$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (III.28)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (III.29)$$

### III.4 Optimisation de système de pompage photovoltaïque

#### III.4.1 Principe de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale, le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $D$  à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV [26].

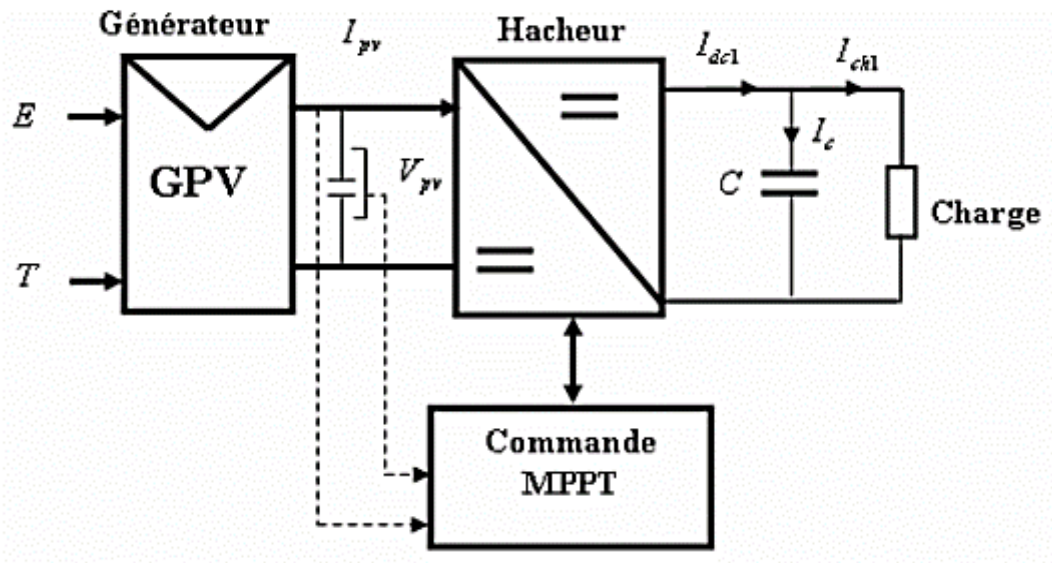


Figure (III - 11) : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT

#### III.4.2 Algorithmes du point de puissance maximale

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT. Nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O), l'incrément de

Conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones) [26].

### III.4.2.1 Principe des commandes HILL Climbing

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint.

Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS.

Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque ( $\frac{dP_{pv}}{dD} = \frac{d(Rin \cdot I_{pv}^2)}{dD}$ ) est forcé à zéro par la commande, comme le montre la (figure III.12) [27].

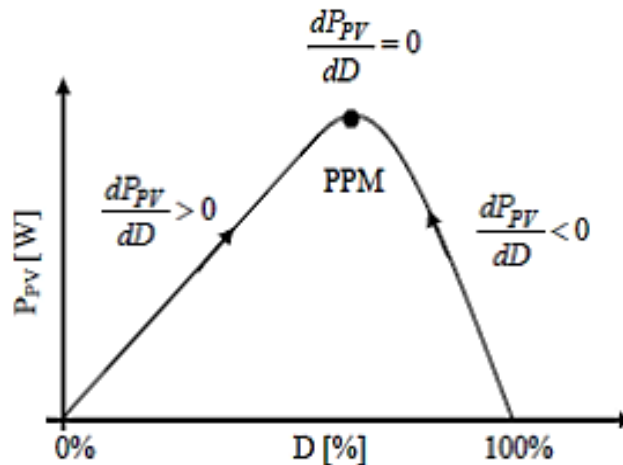


Figure III.12. Relation entre PPV et le rapport cyclique D du CS [27].

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la (figure III.13).

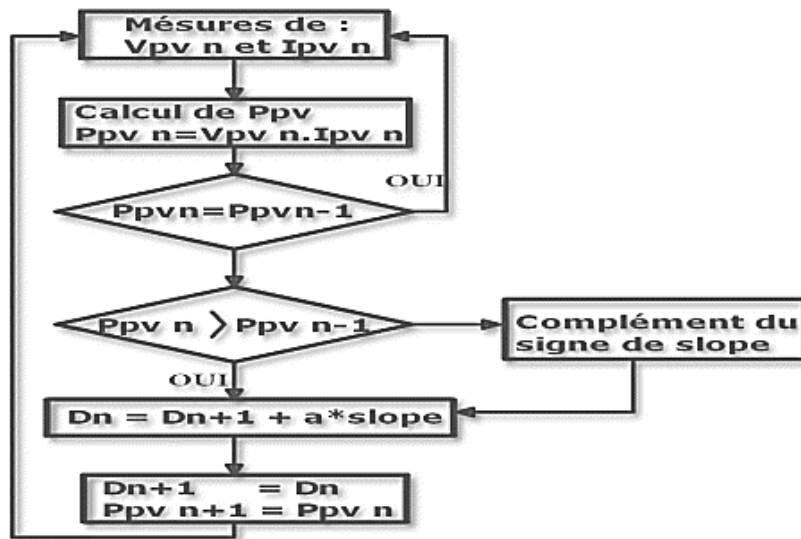


Figure III.13. Algorithme MPPT Hill Climbing (H.C).

Le slope correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. D et PPV représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, a symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique.

Périodiquement, la puissance  $P_{PVn}$  est comparé à la valeur déterminée précédemment  $P_{PVn-1}$ , en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur slope change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter [27].

#### III.4.2.2 La méthode incrémentation de la conductance

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite [28].

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par:

$$P_{PVn} = I_{PV} \cdot V_{PV} \quad (III.30)$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension  $P_{PV}$  :

$$\frac{1}{V} \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (III.31)$$

Ainsi on a noté avec  $G$  la conductance et avec  $\Delta G$  l'incrément de la conductance:

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (III.32)$$

$$\Delta G = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (III.33)$$

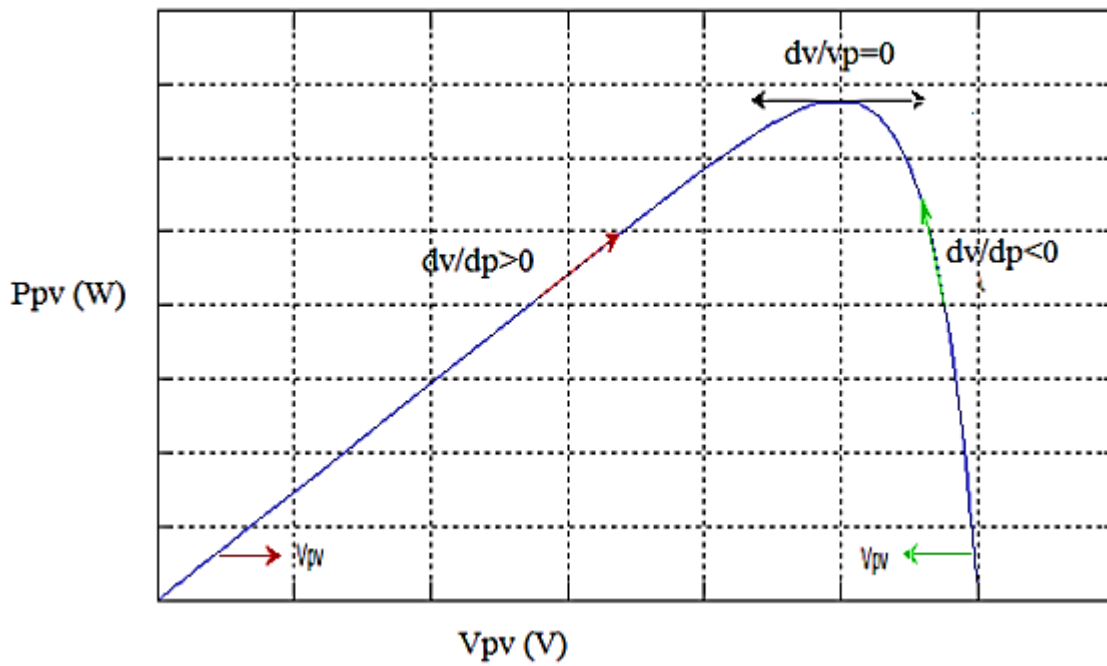
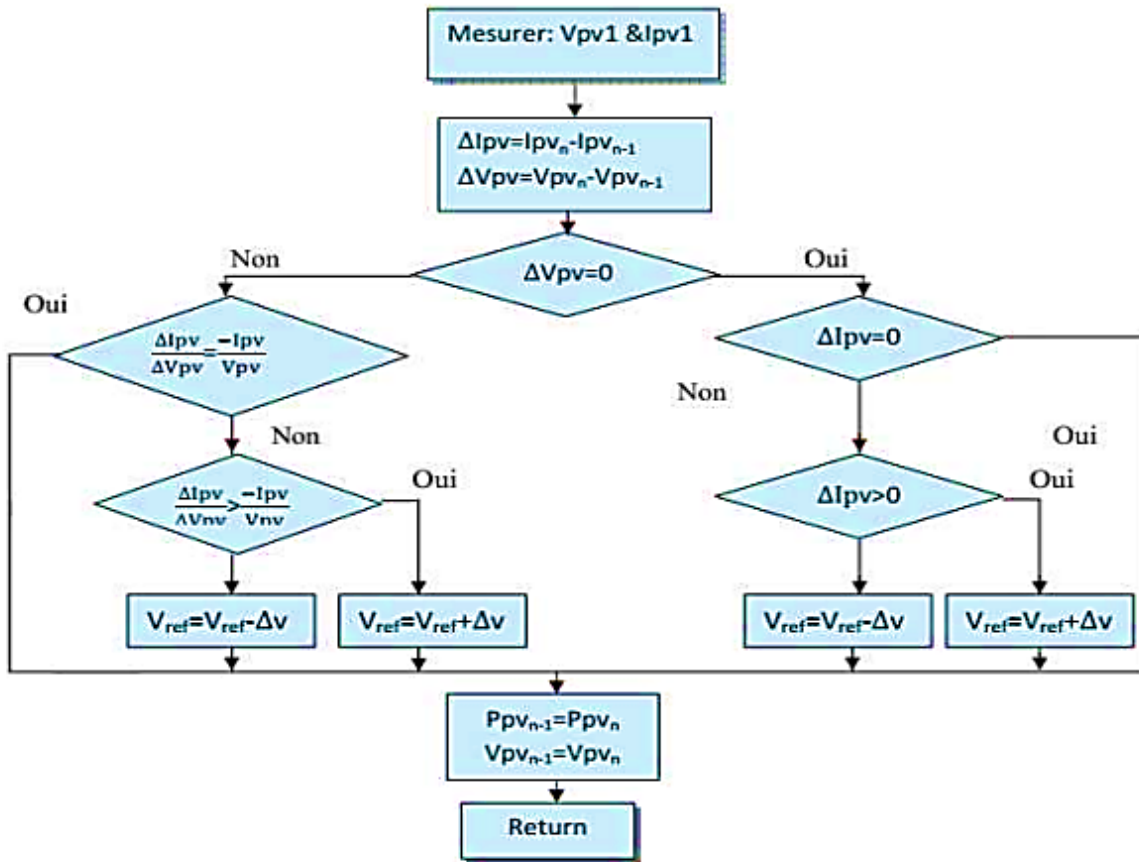


Figure (III.14): Trajectoire par Incrémentation de Conductance [28].



Figure(III.15) : Algorithme d'incrément de la conductance.

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0$  : Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$  : Le point de fonctionnement sur le PPM.

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0$  : Le point de fonctionnement est droit de PPM.

### III.4.2.3 Principe des commandes « Perturb and Observe » (P&O)

L'algorithme P&O est largement utilisé parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP [29].

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau VPV avec un DV et en observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

- Si  $\Delta P > 0$  alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

- Si  $\Delta P < 0$  le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

sur la figure (III-14) on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP du point  $A_2$  vers le point A puis vers le point  $A_1$  et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe P(V) du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point  $B_1$  ce si nous emmène à  $\Delta P > 0$  avec  $[\Delta P = P(K) - P(K - 1)]$  et le MPPT continue à perturber les tensions dans la même direction c à d vers le point  $B_2$ .

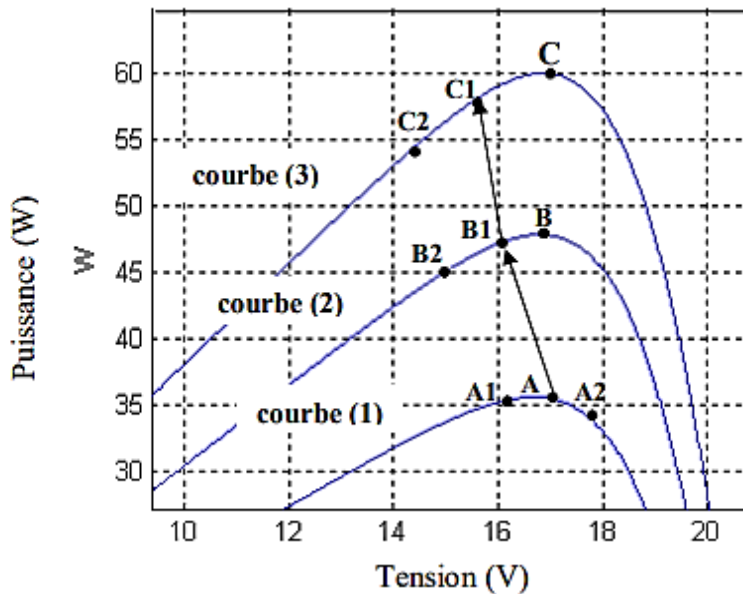


Figure III-16 : comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement [29].

Si l'éclairement augmente toujours le point de fonctionnement se déplace vers le point  $C_1$  de la courbe (3) au lieu du point  $B_2$  sur la courbe (2) alors le MPPT à toujours  $\Delta P > 0$  et il déplace le point de fonctionnement vers le point  $C_2$ .

A partir des points  $A \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$  l'algorithme P&O continu à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminué.

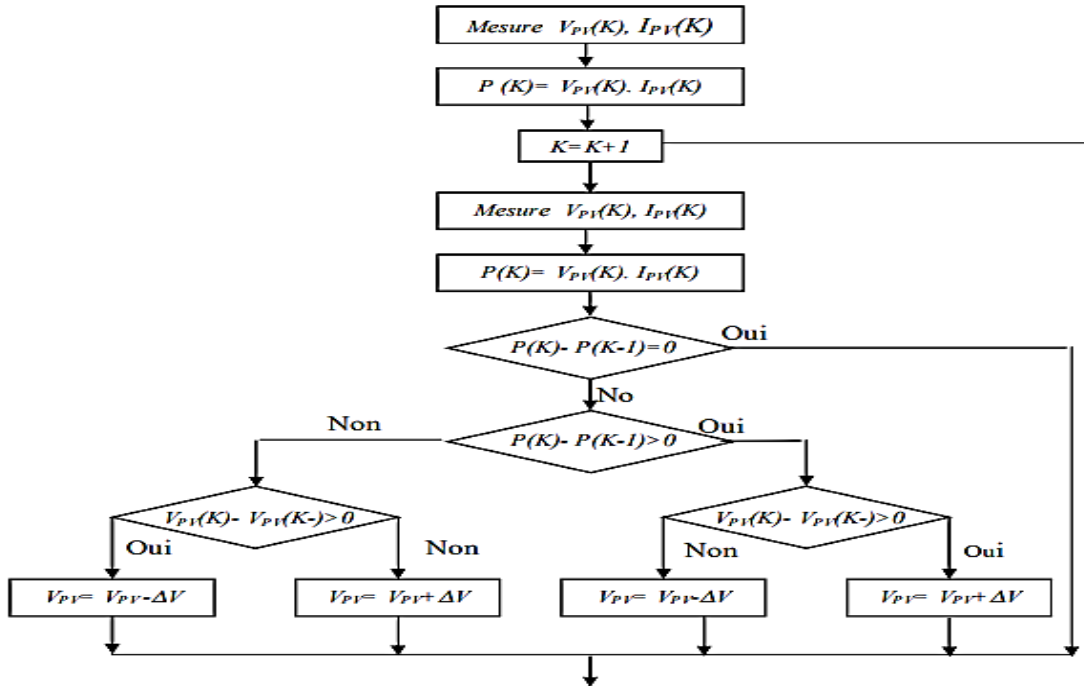


Figure III-17 : Organigramme de la méthode P&O [29].

### III.5 Dimensionnement de l'installation de pompage photovoltaïque

#### III.5.1 Méthode de la moyenne annuelle

Dans cette méthode, la taille des générateurs photovoltaïques et éoliens est tirée des valeurs moyennes annuelles de chaque contribution nommée  $E_{pv}$ ,  $E_{el}$  (pour un mois). De la même manière, la charge est représentée par la valeur moyenne mensuelle annuelle. Par conséquent, les surfaces des deux générateurs photovoltaïque et éolien sont données par [30]:

$$A_{pv} = f \cdot \frac{E_L}{E_{pv}} \quad (III.34)$$

$$A_{el} = (1 - f) \cdot \frac{E_L}{E_{el}} \quad (III.35)$$

Cette méthode est utilisée lorsque les données météorologiques incidentes sont disponibles.

Dimensionnement selon la moyenne mensuelle annuelle

**Chapitre III Modélisation et commande vectorielle d'un moteur/pompe alimenté par un générateur photovoltaïque**

| f = 1 ⇒ 100 % PV |                                      |                       | et f = 0 ⇒ 100 % Eolien              |                           |            |                |                              |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------|------------|----------------|------------------------------|
| f                | A <sub>pv</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | Modules<br>PV<br>(Nb) | A <sub>el</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | Générateur<br>éolien (Nb) | Coût<br>PV | Coût<br>éolien | Coût<br>total PV<br>+ éolien |
| 1                | 1,5                                  | 5                     | 0                                    | 0                         | 293,9      | 0              | <b>293,9</b>                 |
| 0,9              | 1,5                                  | 5                     | 0,65                                 | 1                         | 293,9      | 327            | 620,9                        |
| 0,8              | 1,2                                  | 4                     | 0,65                                 | 1                         | 293,9      | 327            | 562,12                       |
| 0,7              | 1,2                                  | 4                     | 0,65                                 | 1                         | 235,12     | 327            | 562,12                       |
| 0,6              | 0,9                                  | 3                     | 0,65                                 | 1                         | 176,34     | 327            | 503,34                       |
| 0,5              | 0,9                                  | 3                     | 0,65                                 | 1                         | 176,34     | 327            | 503,34                       |
| 0,4              | 0,6                                  | 2                     | 0,65                                 | 1                         | 117,56     | 327            | 444,56                       |
| 0,3              | 0,6                                  | 2                     | 0,65                                 | 1                         | 117,56     | 327            | 444,56                       |
| 0,2              | 0,3                                  | 1                     | 0,65                                 | 1                         | 58,78      | 327            | 385,78                       |
| 0,1              | 0,3                                  | 1                     | 0,65                                 | 1                         | 58,78      | 327            | <b>385,78</b>                |
| 0                | 0                                    | 0                     | 0,65                                 | 1                         | 0          | 327            | <b>327</b>                   |

Tableau III.1 Modules PV (Nb): Nombre de modules PV et Générateur éolien (Nb): Nombre de générateur éolien [30].

### III.5.2 Dimensionnement de la pompe centrifuge

La pompe choisie a un rendement de  $\eta_p = 55\%$ , et l'efficacité du moteur est d'environ  $\eta_{mot} = 85\%$  au point de fonctionnement nominal. Le rendement total du groupe motopompe  $\eta_{mp} = 47\%$ . La puissance électrique requis par la pompe est décrit par l'équation suivante :

$$P_e = \frac{C_h \times Q_j \times HMT}{\eta_{mp}} = \frac{2.725 \times 22 \times 12}{0.47} = 1530.6 KW \quad (III.36)$$

Avec:

$$C_h = g \times \delta = 9.81 * \frac{1000}{3600} = 2.725 \quad (III.37)$$

$\delta$  : Masse volumique de l'eau kg/m<sup>3</sup>.

Donc, on choisit une pompe de puissance  $P_p = 1530.6 W$

Avec:

$$K_r = 4.056 \times (10^{-4}) \quad (III.38)$$

### III.5.3 Dimensionnement du module photovoltaïque

La consommation moyenne quotidienne nécessaire pour le fonctionnement des équipements en (Wh/j) est donnée par la formule suivante [31]:

$$C_j = \sum P \times h \quad (III.39)$$

Avec :



$P$  : La puissance électrique consommée par la charge (en W) ;

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

Le nombre de modules nécessaire à installer est :

$$N_m = \frac{P_c}{P_{cm}} \quad (\text{III.40})$$

Avec :

$P_{cm}$  : La puissance crête correspondant à un module.

#### **III.5.4 Puissance crête du générateur photovoltaïque**

La puissance crête des modules  $P_c$  est donnée par sa formule :

$$P_c = \frac{C_j}{K} \times E \quad (\text{III.41})$$

Où :

$E$  : Le rayonnement solaire global journalier minimal reçu sur le plan des modules (en  $\text{KW/m}^2 / \text{j}$ ).

$K$  : Facteur tenant compte des diverses considérations qui affectent le rendement de l'installation, en général il est égal à 0,56 [31].

#### **III.5.5 Nombre de module photovoltaïque**

Le nombre total de modules photovoltaïques est calculé en rapportant la puissance globale du champ à celle ( $P_m$ ) d'un seul module :

$$N = \frac{P_{pv}}{P_m} \quad (\text{III.42})$$

Le nombre de modules connectés en série sera :

$$N_s = \frac{V}{V_m} \quad (\text{III.43})$$

Où  $V$  et  $V_m$  sont respectivement les tensions du système et du module.

Le nombre de branches (modules en parallèle) :

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad (\text{III.44})$$

### III.6 Simulation de la commande vectorielle du système de pompage photovoltaïque

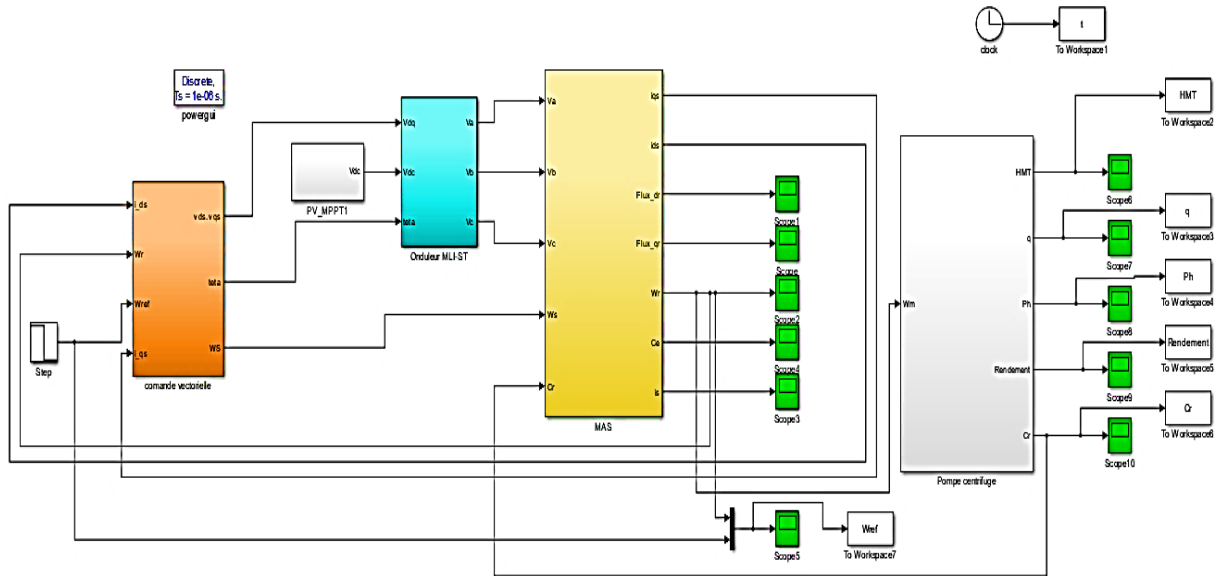


Figure III.18: Simulation de la commande vectorielle du système de pompage photovoltaïque

#### III.6.1 Résultat de simulation du système photovoltaïque

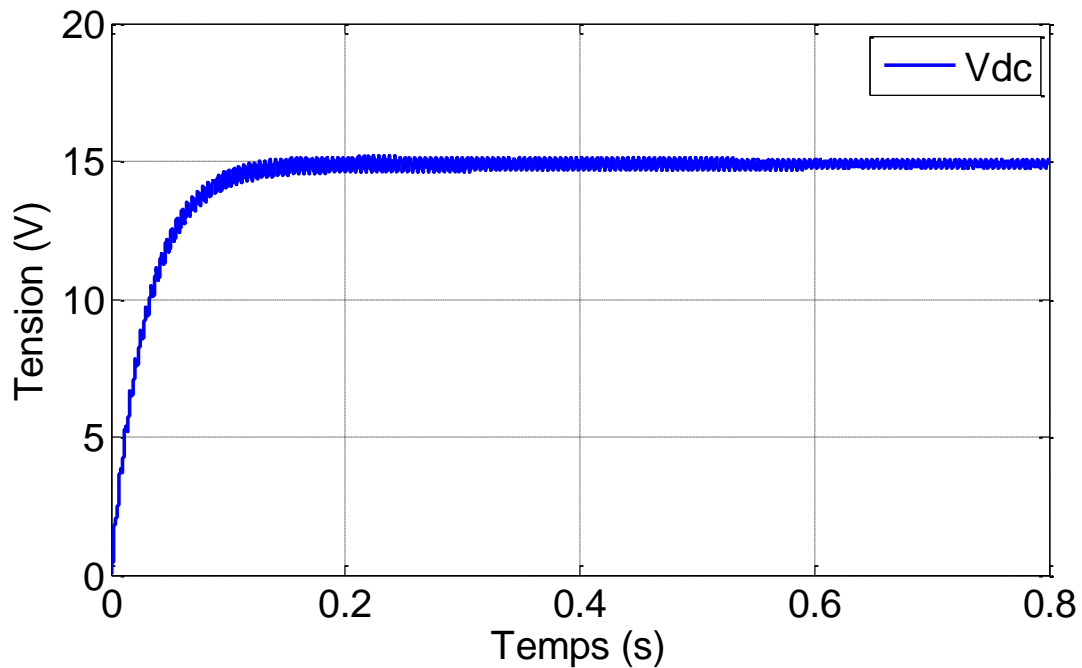


Figure III.19 : Tension de générateur photovoltaïque Vdc.

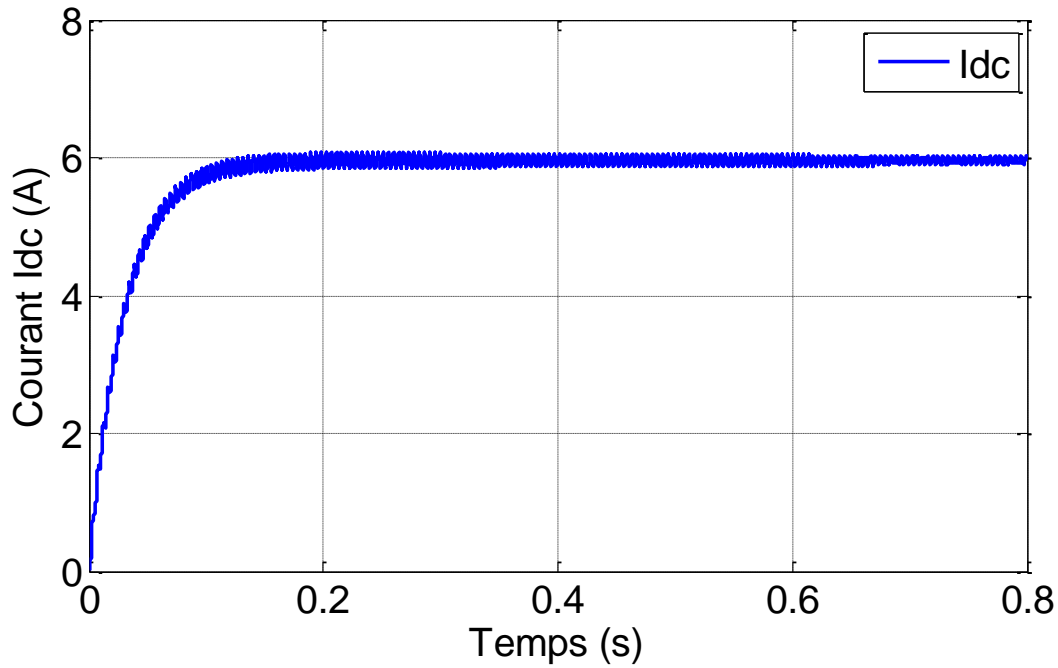


Figure III.20 : le courant du générateur photovoltaïque  $I_{dc}$ .

### Interprétation de résultat

La figure III.19 montre la tension de générateur photovoltaïque, elle est stable vers la valeur  $V_{dc}=15$  v après un court régime transitoire (augmentation rapide de la tension) cette valeur est parfait grâce aux régulateur intégré dans la commande MPPT.

La figure III.20 montre le courant de générateur photovoltaïque, il se stabilise vers la valeur  $I_{dc}=6$  A après un court régime transitoire (augmentation rapide du courant).

**III.6.2 Résultat de simulation du moteur**

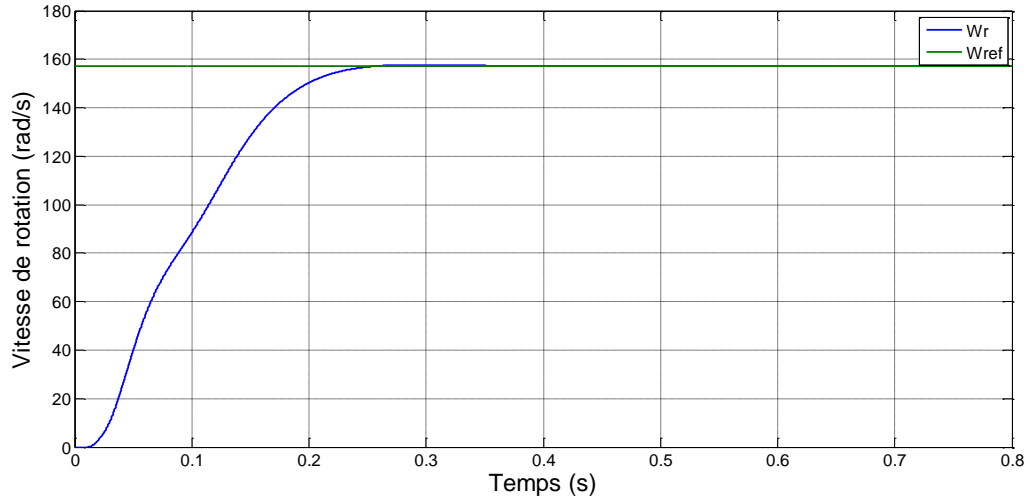


Figure III.21: Allure de vitesse du moteur pour une consigne de 157 rad/s.

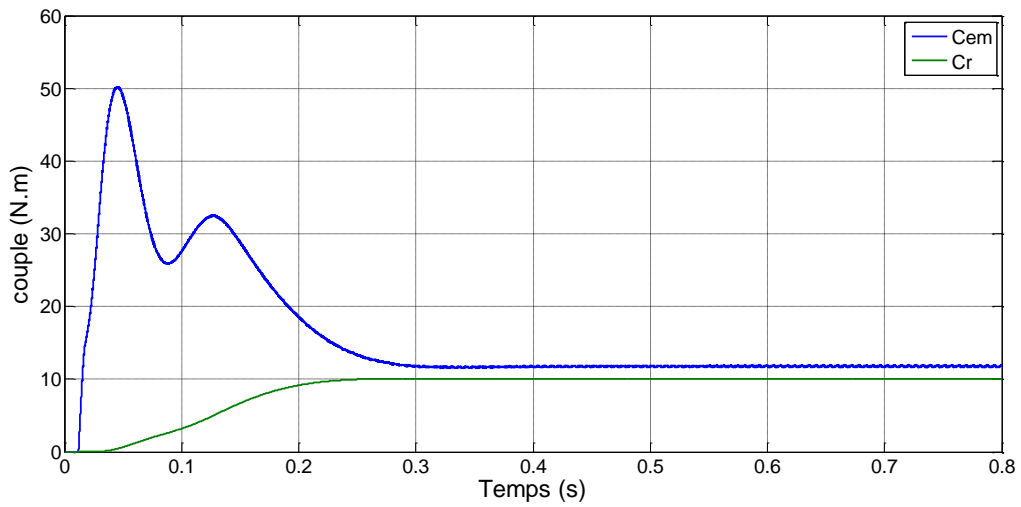


Figure III.22: Allure des couples de moteur.

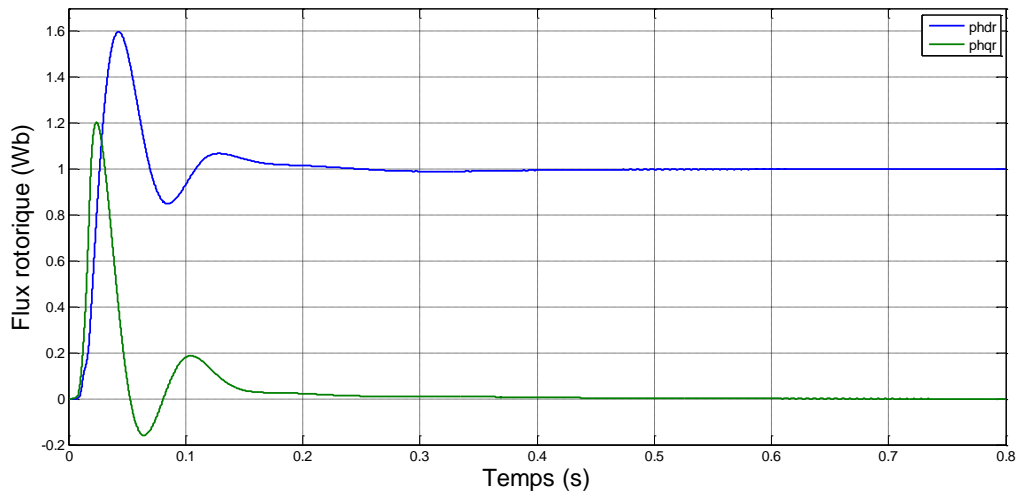


Figure III.23: les Allures de flux rotorique.

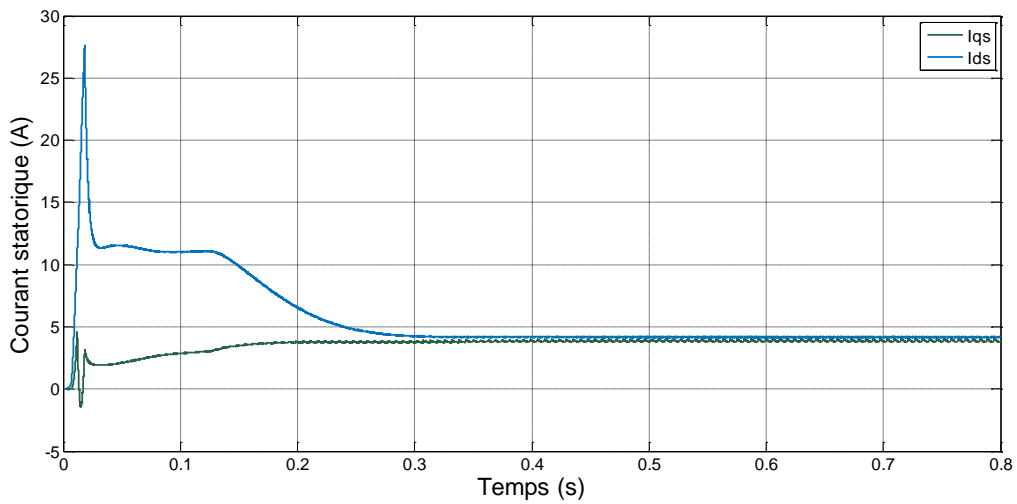


Figure III.24: les Allures de courant statorique

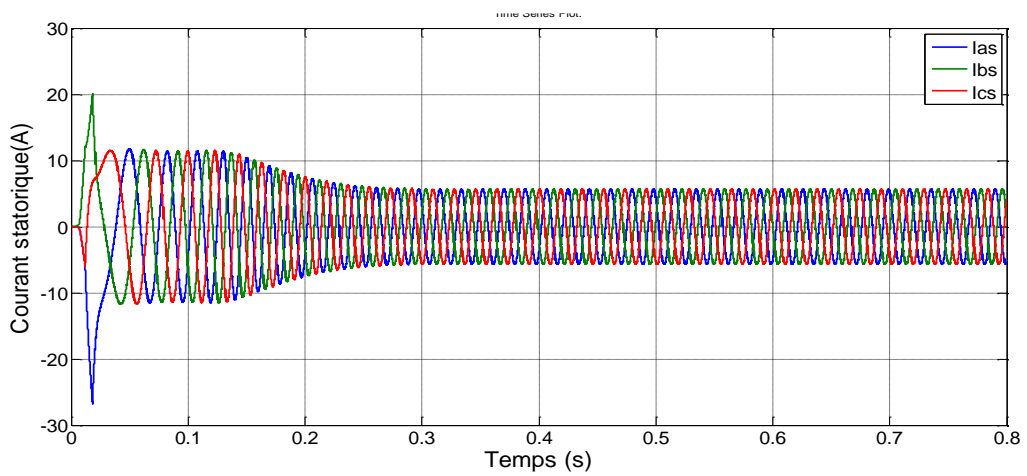


Figure III.25: Allure de courant statorique Is.

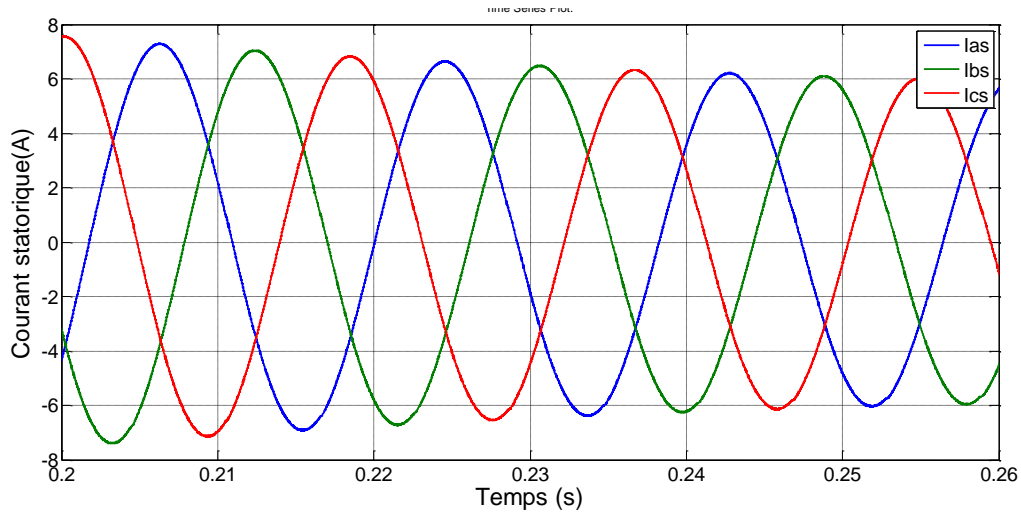


Figure III.26: Allure de zoom du courant statorique  $I_s$

### Interprétation de résultat

La figure III.22 montre que le couple de moteur  $C_{em}$  et le couple résistant sont presque identiques mais toujours le couple moteur est supérieure du couple résistant  $C_{em}=12N.m$  et  $C_r=10N.m$

Cette supériorité permet du moteur de fonctionner normalement, le couple a augmenter directement dans le première période  $t= 0.25s$  parce ce que le démarrage du moteur besoin un grande couple ce qui est confirmé dans les figures III.23 des flux rotorique qui montre que le flux  $\varphi_{dr}$  est de même forme que le couple  $C_{em}$  mais le flux rotorique  $\varphi_{qr}$  s'annule après le une courte période  $t=0.25s$  (il avoir une pique jusqu'à 1.2 Wb grâce aux démarrage du moteur ) mais le flux  $\varphi_{dr}$  se stabilise vers la valeurs 1 Wb à l'instant  $t=0.25s$  .La même chose pour les courants statoriques pendant le démarrage du mais après l'instant  $t=0.25s$  les courants se stabilise vers la valeurs  $I=4A$  , et il ont une forme sinusoïdale d'après la figure III.24.

**III.6.3 Résultat de simulation de la pompe**

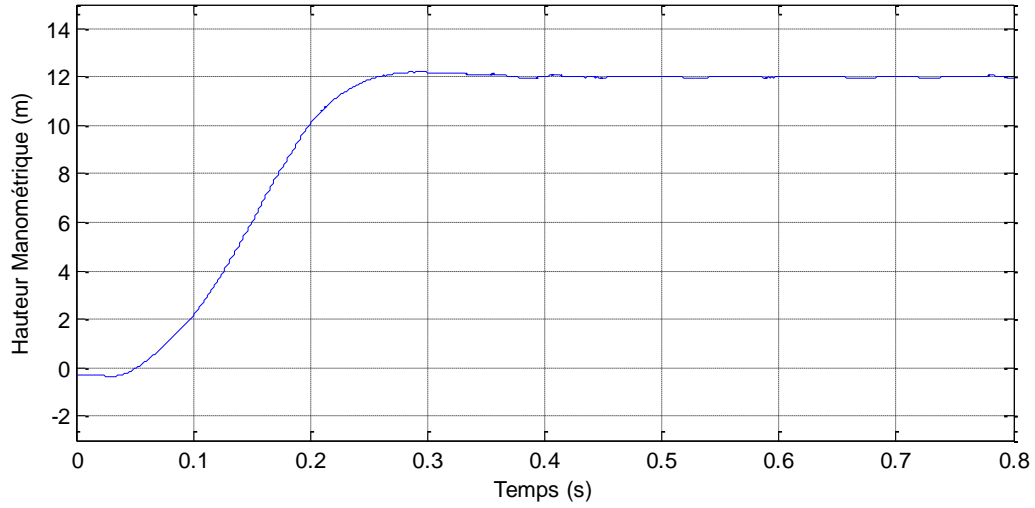


Figure III.27: Allure de la hauteur manométrique de la pompe (m).

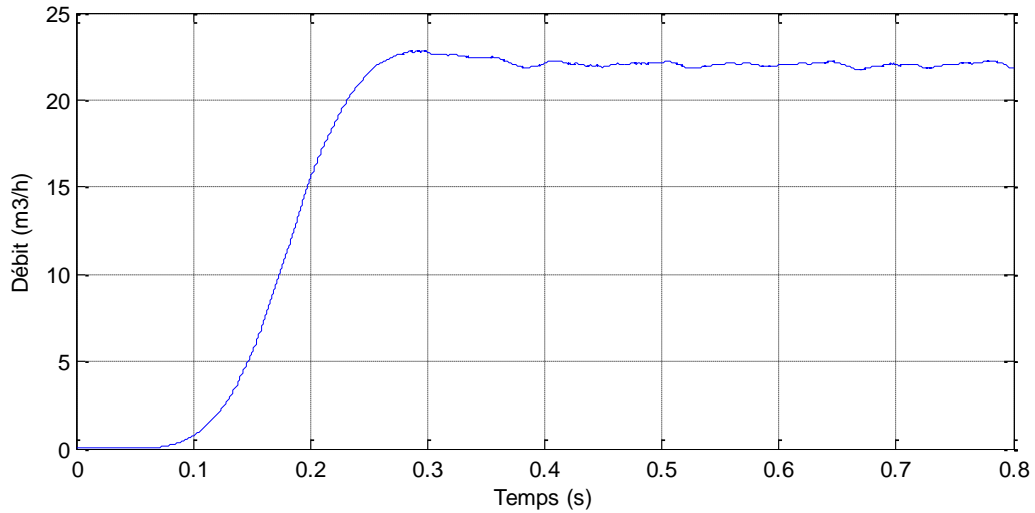


Figure III.28: Allure du débit de la pompe.

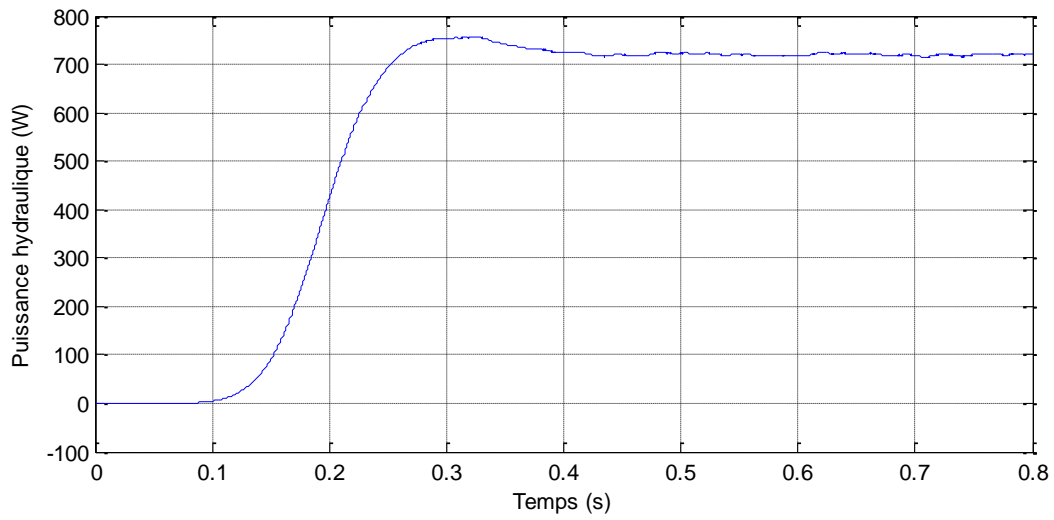


Figure III.29: Allure du Puissance Hydraulique

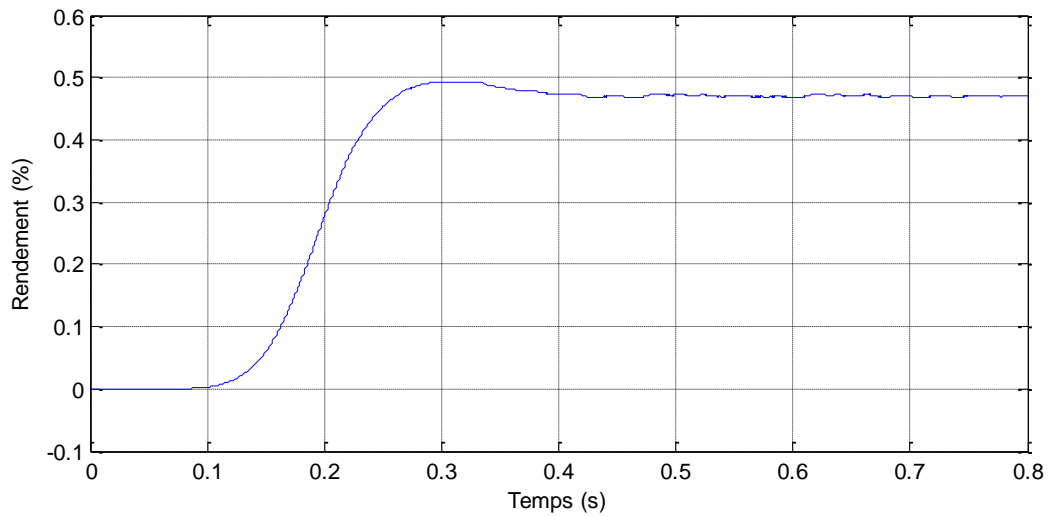


Figure II-30: Allure du rendement moto- pompe à vitesse constante.



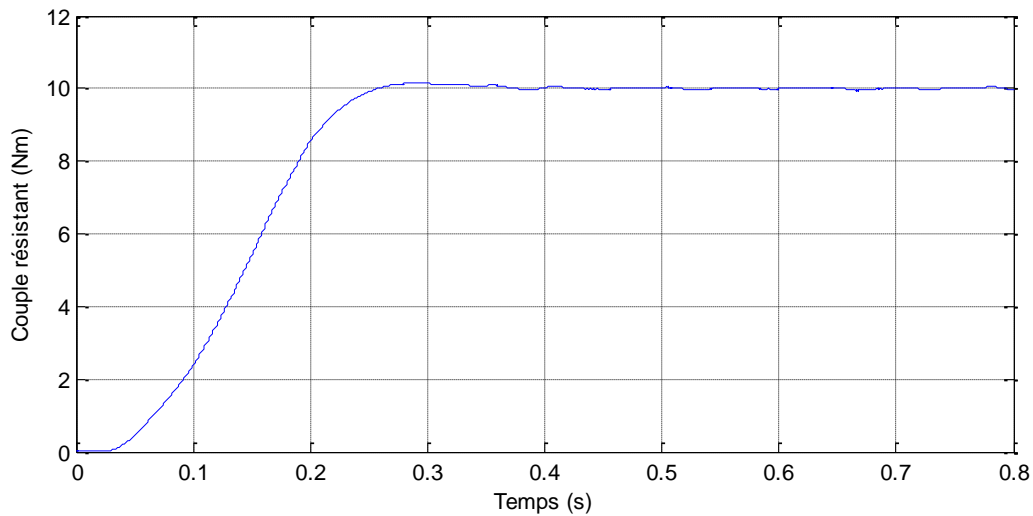


Figure III.31: Allure du couple résistant  $C_r$

### Interprétation de résultat

La figure III.27 qui montre la hauteur manométrique nous a montré que la hauteur augmente rapidement vers la valeur  $HMT=16.5$  m à l'instant  $t=0.4$ s.

D'après la figure III.28 nous pouvons voir que le débit de la pompe augmente rapidement jusqu'à la valeur  $22\text{m}^3/\text{h}$ , à l'instant  $t=0.4$ s ce débit se stabilise à cette valeur grâce aux stabilisations du couple moteur après l'instant  $t=0.4$ s, donc la pompe suit le fonctionnement du moteur.

Pour les courbes de la puissance hydraulique et du rendement moto- pompe à vitesse constante et du couple résistant  $C_r$  qui sont montrées successivement sur les figures III.29, III.30, III.31 tous ses courbes ont les même forme d'allure que le débit et la hauteur manométrique.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque (module photovoltaïque), nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique  $I(V)$  non linéaire. La modélisation de chaque composant du système de pompage photovoltaïque, cette modélisation est une étape essentielle. Ensuite nous avons traité les différents types de commandes MPPT ou on a choisis la méthode P&O dans notre étude, puis la détermination du dimensionnement de l'installation de pompage. Enfin, on présente les résultats de simulation de système de pompage sous MATLAB/SIMULINK.

# Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire été de faire la modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme MPPT pour obtenir le point de puissance maximale, un convertisseur statique et un groupe motopompe. Le convertisseur est un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge). Le moteur de notre pompe solaire fonctionnera au fil du soleil. Ensuite nous avons appliqué une commande vectorielle indirecte afin d'avoir un débit réglable, et étudier le contrôle de la motopompe. Afin d'amener des meilleurs performances à notre système de pompage.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré aux différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de pompage photovoltaïque et les principes de fonctionnement de chaque élément.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de la machine asynchrone et la commande vectorielle indirecte qui améliorera les performances de notre moteur asynchrone, responsable de l'entraînement de la pompe centrifuge, ainsi que la modélisation l'alimentation et la pompe centrifuge. Enfin nous avons donné des résultats de simulations obtenus par le logiciel MATLAB/SIMULINK pour des conditions variables.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous présentons la modélisation de tous les éléments de notre chaîne de pompage photovoltaïque, chaque modélisation est basée sur des équations provenant de la littérature scientifique, ainsi qu'on voit l'effet de la température et l'éclairement sur les caractéristiques du GPV (puissance-tension et courant-tension). Ensuite nous avons présenté trois types de la commande MPPT, notre choix est basé sur l'algorithme de MPPT « P&O » avec laquelle notre générateur photovoltaïque sera optimisé. Puis la définition de toutes les étapes à suivre pour le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque étudié, On termine ce chapitre par des résultats de simulation de système de pompage photovoltaïque dans les conditions de fonctionnement normales.

## **Références bibliographiques**

- [1]. BEDDIAR Saloua - DJEDDI Samia « Modélisation et simulation d'un système hybride photovoltaïque/thermique », Mémoire de Master, Université Larbi Tébessi– Tébessa.2021.
- [2]. SALI Sara et OUAKLI Aldjia « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque», Mémoire de Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia.2017.
- [3]. Mohamed Lakhdar Louazene « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla », Thèse de Doctorat en Sciences, BATNA.2015.
- [4]. FABRIZIO OLITA « advanced control and condition monitoring pv systems », University Aalborg, Danemark, Master Thesis, June 2012.
- [5]. Khair Oussama « Etude et commande d'un système photovoltaïque soumis à un ombrage partiel » Université Mohamed Khider de Biskra 2019.
- [6]. Y.Bakelli, “Contribution à l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome”,These de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna,Algerie, 2012.
- [7]. L.Chiter, “Modélisation et simulation d'un systeme de pompage solaire à base d'un moteur asynchrone monophasé”, Mémoire de Magister,Université de Hadj lakhedhar ,Batna,Algerie, 2012.
- [8] A.Daoud, “Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire”, These de Doctorat, Université des sciences et de la technologie d'oran, Algérie, 2013.
- [9]. M elle MEDJDOUB Sarra « Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération », Mémoire pour l'obtention de diplôme de Master 2, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen 2016.
- [10]. Soula youcef. Mémoire de fin d'études « Optimisation et dimensionnement d'un système solaire de pompage d'eau » Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées 2016.

- [11]. Lazizi Aldjia « Modélisation, contrôle et gestion énergétique d'une installation de pompage solaire », Thèse de Doctorat, université m'hamed bougara-boumerdes 2019.
- [12]. CHERAYET Azzeddine et LIFA Islam « Calcul de l'installation de ravitaillement d'une agglomération en eau potable » These de Master, Université Larbi TebessiTébessa, 2021.
- [13]. S. Makhloufi : «Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes» ; Thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [14]. N.Debili, « *Etude et optimisation en environnement MATLAB/SIMULINK d'un système de pompage Photovoltaïque* » ; Mémoire de magister, Université de Constantine, 2015.
- [15]. Radouane BOUSSEKSOU «Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic», Université Mentouri, Constantine2007.
- [16].M.NEFSI, «Commande directe du couple d'une machine asynchrone sans capteur Mécanique », Mémoire de magister, Université Djilali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 2008.
- [17]. M.HADJ MAHAMMED Mohammed. M.SAID Abdellah. «Modélisation, Alimentation et Commande de la machine asynchrone double stator (MASDS) », Université de Ghardaïa, 2020.
- [18]. LEILA BENALIA «commande en tension des moteurs a induction double alimentes », Université de Batna, 2010.
- [19]. TARGANT Lyes et KHALEF Sofiane «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2017/2018.
- [20].F.Bendioudi et F.Lakhdari, « *Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries* » ; Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa,2014.
- [21]. Meftah Aissa «Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque» Mémoire de Magister, Université abou bekr belkaid - TLEMCEM, 2011.

- [22]. Aziz TOULAIT et Rachid Aili «Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT» Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2014.
- [23]. Kefsi Djamila et Ouikene Fetta «Commande d'un Système de Pompage Photovoltaïque » Mémoire de Master, universite mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2010.
- [24]. AOUIFI Saliha «Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque» Mémoire de Magister, universite ferhat abbas — setif-1, 2014.
- [25]. mechalikh Med Nadjib et H Charaf Eddine «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Mémoire de master, Université de OUARGLA, 2013.
- [26]. Bendjamâa Ibrahim «Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque» Mémoire de Magister, universite abou-bakr belkaid –TLEMCEM-, 2012.
- [27]. Lahlah salah «Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C) » Mémoire de MAGISTER, Université de Batna, 2007.
- [28]. Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane «Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque » Mémoire de MASTER, Université d'El-Oued, 2015.
- [29]. BOUKHERS Djamil «optimisation d'un systeme d'énergie photovoltaïque applicatiou au pompage » Mémoire de MAGISTER, Université de Constantine, 2007.
- [30]. S. Diaf, M. Haddadi et M. Belhamel «Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar » Centre de Développement des Energies Renouvelables, Alger, 2006.
- [31]. HENNOUS Chahrazet et AIT-ALLALA Kahina «dimensionnement et installation d'un systeme photovoltaïque (application a la f.g.e.i.) » mémoire de master, université mouloud mammeri, tizi-ouzou, 2009.

## Annexes

### Annexe I : Paramètre du système de pompage photovoltaïque

#### - I. Paramètre du moteur asynchrone.

|                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| Puissance nominale                 | 1.5 kW                  |
| Tension nominale                   | 220/380 V               |
| Rendement nominal                  | 85%                     |
| Facteur de puissance nominal       | 0.8                     |
| Vitesse nominale                   | 1500 tr/min             |
| Fréquence nominale                 | 50 Hz                   |
| Courant nominal                    | 11.25/6.5 A             |
| Résistance statorique              | 4.850 $\Omega$          |
| Résistance rotorique               | 3.805 $\Omega$          |
| Inductance cyclique statorique     | 0.274 H                 |
| Inductance cyclique rotorique      | 0.274 H                 |
| Inductance mutuelle                | 0.258 H                 |
| Nombre de paires de pôles          | 2                       |
| Moment d'inertie                   | 0.031 kg.m <sup>2</sup> |
| Coefficient de frottement visqueux | 0.114 s/rd              |

**Tableau. A.2 : Paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil.**

#### - II. Paramètre de la pompe centrifuge.

|                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| Puissance hydraulique | 719.4 W              |
| Débit volumique       | 22 m <sup>3</sup> /h |
| Hauteur manométrique  | 12 m                 |
| Rendement             | 47 %                 |
| Vitesse nominale      | 1500 tr/min          |

**Tableau. A.3 : Paramètres de La pompe centrifuge.**

#### - III. Paramètre du générateur photovoltaïque

| Caractéristiques électriques           | Valeurs               |
|--|-----------------------|
| Eclairement standart, $E_0$            | 1000 W/m <sup>2</sup> |
| Température standart, $T_0$            | 25 C°                 |
| Puissance maximal ( $P_{max}$ )        | 75 W                  |
| Tension à Pmax ( $V_{mp}$ )            | 17.2V                 |
| Courant à Pmax ( $I_{mp}$ )            | 4.4A                  |
| Tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ )  | 21.7V                 |
| Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )  | 4.8A                  |
| Coefficient de température de $I_{cc}$ | 0.0017C°              |
| Coefficient de température de $V_{co}$ | -160 $\pm$ 20 mV/ C°  |

|                                     |                |
|-------------------------------------|----------------|
| Nombre des cellules en série        | 36             |
| Nombre des cellules en parallèle    | 1              |
| Résistance série                    | 0.338 $\Omega$ |
| Résistance parallèle                | 1850 $\Omega$  |
| Facteur d'idéalité de la jonction,n | 1.3971         |

**Tableau. A.1 : Paramètres caractéristiques du générateur PV (Shell SP 75).**

## **Annexe II : Identification des paramètres des régulateur PI**

|   |               |
|---|---------------|
| <b>Régulateur PI des courants statoriques</b> |               |
| $K_q = K_d$                                   | <b>7.7664</b> |
| $T_q = T_d$                                   | <b>0.0027</b> |

|  |               |
|--|---------------|
| <b>Régulateur PI de la vitesse de rotation</b> |               |
| $K_v$  | <b>0.1768</b> |
| $K_{iv}$                                       | <b>3.5700</b> |



## Résumé

La demande d'énergie dans les régions éloignées augmente. Par conséquent, pour répondre à cette demande, le développement de solutions pour les systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque à haute performance est une priorité absolue, mais l'utilisation de l'énergie photovoltaïque dépend largement des conditions atmosphériques. Donc l'objectif de ce mémoire est d'apporter une contribution à l'étude d'un système photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale et énergétiquement autonome. Le cas étudié dans ce travail, concerne la commande d'un système de pompage photovoltaïque dans un site isolé. Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, l'utilisation d'un algorithme dit MPPT est devenu une nécessité. Dans ce but, la technique de perturbation et observation (P&O) a été choisie ; la modélisation et la simulation des différents constituants de système de conversion d'énergie sont présentées en premier lieu. Nous avons étudié ensuite le cas d'un système de pompage utilisant un moteur asynchrone triphasé comme moteur d'entraînement. Dans le but d'avoir la possibilité de régler le débit d'eau de la pompe centrifuge, le type de commande utilisé est la commande vectorielle indirecte (IFOC) pour la commande de la vitesse de rotation de la motopompe.

**Mots clés :** Energie solaire photovoltaïque, machine asynchrone, commande MPPT, pompe centrifuge, commande vectorielle.

## Abstract

The demand for energy in remote areas is increasing. Therefore, to meet this demand, the development of solutions for high-performance photovoltaic energy conversion systems is a top priority, but the use of photovoltaic energy largely depends on atmospheric conditions. So, the objective of this thesis is to make a contribution to the study of a photovoltaic system operating at its maximum power and energetically autonomous. The case studied in this work concerns the control of a photovoltaic pumping system in an isolated site. In order for the photovoltaic system to operate at its maximum power, the use of an algorithm called MPPT has become a necessity. For this purpose, the technique of disturbance and observation (P&O) was chosen; the modeling and simulation of the different components of the energy conversion system are presented in the first place. We then studied the case of a pumping system using a three-phase asynchronous motor as the drive motor. In order to have the possibility to adjust the water flow of the centrifugal pump, the type of control is used, the indirect vector control (IFOC) for the control of the rotational speed of the motor pump.

**Keywords:** Photovoltaic solar energy, asynchronous machine, MPPT control, centrifugal pump, vector control

## ملخص

الطلب على الطاقة في المناطق النائية أخذ في الازدياد. لذلك، لتلبية هذا الطلب، يعد تطوير حلول لأنظمة تحويل الطاقة الكهروضوئية عالية الأداء أولوية قصوى، ولكن استخدام الطاقة الكهروضوئية يعتمد إلى حد كبير على الظروف المناخية. لذا فإن الهدف من هذه المدكرة هو المساهمة في دراسة نظام كهروضوئي يعمل بأقصى طاقته ومستقل بنشاط. تتعلق الحالة التي تمت دراستها في هذا العمل بالتحكم في نظام ضخ كهروضوئي في موقع معزول. من أجل أن يعمل النظام الكهروضوئي بطاقته القصوى، أصبح استخدام خوارزمية تسمى MPPT ضرورة. لهذا الغرض، تم اختيار تقنية الاضطراب والملاحظة (P & O)؛ يتم تقديم النمذجة والمحاكاة للمكونات المختلفة لنظام تحويل الطاقة في المقام الأول. ثم درسنا حالة نظام الضخ باستخدام محرك غير متزامن ثلاثي الطور كمحرك دفع. من أجل الحصول على إمكانية ضبط تدفق المياه لمضخة الطرد المركزي، يتم استخدام نوع التحكم، وهو التحكم الشعاعي غير المباشر في النواقل (IFOC) للتحكم في سرعة دوران مضخة المحرك.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الشمسية الكهروضوئية، الة لا تزامنية، التحكم، مضخة الطرد المركزي، التحكم الشعاعي.