



N° d'ordre:

N° de série:



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la**  
**Recherche Scientifique**

**Université Echahid Hamma Lakhdar - El-Oued**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

**En: Electrotechnique**

**Spécialité: Commande Electrique**

**Par: Souid Abdelmonaim et Zouizia Nour Elhouda**

**Thème**

**Etude sur l'Utilisation de l'Energie  
Photovoltaïque dans un Système de  
Pompage**

**Devant le jury composé de:**

**Pr. Laid ZELLOUMA**

**Président**

**Dr. Tedjani MAHNI**

**Examineur**

**Pr. Youcef BEKAKRA**

**Encadreur**

**Mr. Mohammed ADAIKA**

**Co-Encadreur**

**2022-2023**



## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions "Allah" Tout-Puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la force de faire ce modeste travail. Merci de nous avoir éclairés sur le chemin du succès.*

*Nous tenons à remercier très chaleureusement et notre profonde gratitude, à l'avance les membres du jury qui feront l'honneur d'évaluer ce travail de fin d'études.*

*Ces remerciements vont d'abord à notre cher professeur Pr. YUCEF BAKAKRA, qui est notre professeur superviseur, pour les conseils précieux pendant l'étude et la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier le doctorant et superviseur adjoint ADAIKA MOHAMED, pour son bon suivi du projet et son aide précieuse.*

*Nous remercions sincèrement la faculté et le département administratif du département "Génie électrique".*

*Enfin, nous exprimons notre gratitude à toute notre famille, à tous nos amis, camarades, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, en particulier ceux que nous n'avons pas cités, ils resteront toujours dans nos cœurs.*





## ***Dédicace***

***Nous dédions cette humble œuvre :***

***À nos parents, frères et sœurs pour votre soutien***

***À tous nos amis que nous aimons et respectons beaucoup.***

***Et à tous ceux qu'on aime.***

***SOUID Abdelmonaim***

***ZOUIZIA Nour Elhouda***



## Résumé:

Le projet de système de pompage photovoltaïque est très important, surtout dans les zones isolées et rurales où l'accès à l'énergie traditionnelle est difficile. En effet, la majorité de ces zones bénéficient d'un ensoleillement abondant, tandis que les ressources en eaux souterraines sont disponibles. Cela est également vrai pour notre wilaya (El Oued).

Notre projet consiste à étudier et à réaliser un système d'irrigation utilisant l'énergie photovoltaïque afin de résoudre le problème de pénurie d'eau. Ce projet se divise en trois parties : la première consiste en une revue de la littérature sur les systèmes de pompage photovoltaïque, qui comprend des connaissances de base sur tous les composants du système. La deuxième partie se concentre sur la modélisation et la simulation des composants principaux. Enfin, la troisième partie consiste à expliquer tous les aspects pratiques et à mettre en œuvre le projet tout en discutant des résultats obtenus.

**Mots clés:** Énergie photovoltaïque, panneau solaire, pompage solaire, convertisseur CC/CC, onduleur, MPPT.

## Abstract:

The photovoltaic pumping system project is very important, especially in isolated and rural areas where access to traditional energy is difficult. Indeed, the majority of these areas benefit from abundant sunshine, while groundwater resources are available. This is also true for our region (El Oued).

Our project aims to study and develop a solar-powered irrigation system to address the water scarcity issue. This project is divided into three parts: the first part involves conducting a literature review on photovoltaic pumping systems, which includes fundamental knowledge about all the system components. The second part focuses on modeling and simulation of the main components. Lastly, the third part involves explaining all the practical aspects and implementing the project while discussing the obtained results.

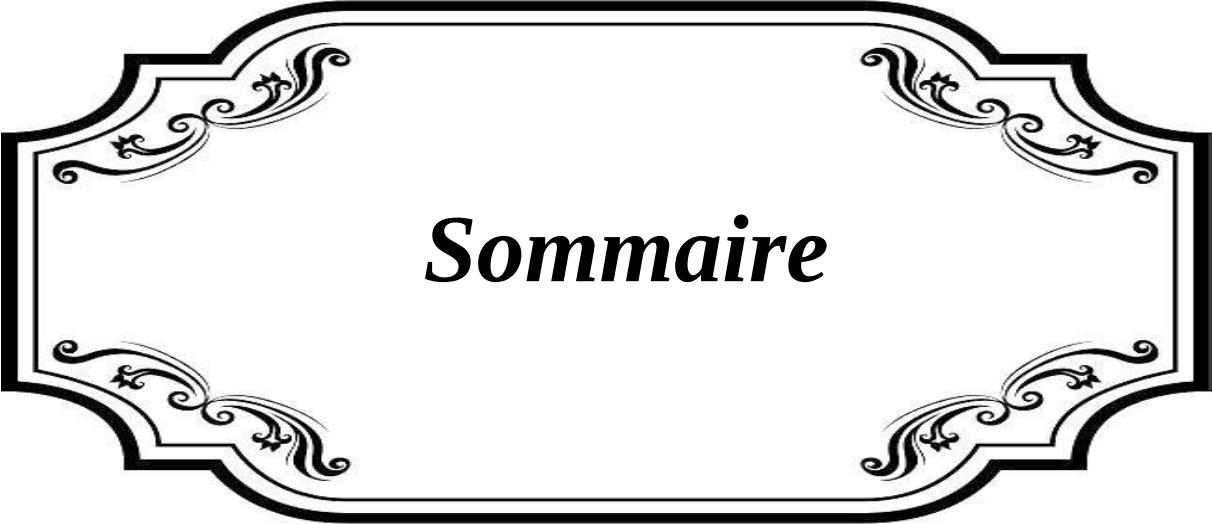
**Keywords:** Photovoltaic energy, solar panel, solar pumping, converter DC/DC, inverter, MPPT.

## ملخص:

يعد المشروع الخاص بنظام الضخ الشمسي مهم جداً، خاصة في المناطق المعزولة والريفية حيث يكون الوصول إلى الطاقة التقليدية صعباً. ففي الواقع، تستفيد غالبية هذه المناطق من ساعات شمس وفيرة، بينما تتوفر موارد المياه الجوفية حيث ينطبق هذا الأمر أيضاً على ولايتنا (الوادي).

يهدف مشروعنا إلى دراسة وتنفيذ نظام الري باستخدام الطاقة الشمسية (الكهروضوئية) من أجل حل مشكلة نقص المياه حيث يتكون هذا المشروع من ثلاثة أجزاء: الجزء الأول يتضمن مراجعة للمصادر الأدبية حول أنظمة الضخ الشمسي، والتي تتضمن المعرفة الأساسية حول جميع مكونات النظام. الجزء الثاني يركز على نمذجة ومحاكاة المكونات الرئيسية. وأخيرًا، الجزء الثالث يتضمن شرح جميع الجوانب العملية وتنفيذ المشروع مع مناقشة النتائج المتحصل عليها.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الشمسية، الألواح الشمسية، الضخ الشمسي، المحول مستمر/مستمر، العاكس، MPPT.



# *Sommaire*

## Table des Matières

|                                                                         | page       |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Remerciements</b>                                                    | -          |
| <b>Dédicace</b>                                                         | -          |
| <b>Résumé</b>                                                           | -          |
| <b>Sommaire</b>                                                         | <b>II</b>  |
| <b>Liste de figure</b>                                                  | <b>III</b> |
| <b>Liste de tableau</b>                                                 | <b>IV</b>  |
| <b>Listes des symboles et abréviations</b>                              | <b>V</b>   |
| <b>Introduction générale</b>                                            | <b>01</b>  |
| <b>Chapitre I: Généralités sur le système de pompage photovoltaïque</b> |            |
| I.1. Introduction                                                       | <b>03</b>  |
| I.2 Les systèmes photovoltaïques                                        | <b>03</b>  |
| I.2.1 Composants de système photovoltaïques                             | <b>04</b>  |
| I.2.1.1 Générateur photovoltaïques                                      | <b>04</b>  |
| I.2.1.2 Les Batteries                                                   | <b>08</b>  |
| I.2.1.3 Le Régulateur                                                   | <b>10</b>  |
| I.2.1.4 L'Onduleur                                                      | <b>10</b>  |
| I.2.1.5 Le Câblage                                                      | <b>11</b>  |
| I.2.1.6 La charge                                                       | <b>11</b>  |
| I.2.2 Types de Systèmes PV                                              | <b>11</b>  |
| I.2.2.1 Systèmes fixes                                                  | <b>11</b>  |
| I.2.2.2 Système avec poursuite solaire ( <i>Solar Trackers</i> )        | <b>12</b>  |
| I.3 Les Pompages                                                        | <b>13</b>  |
| I.3.1 Machine électrique                                                | <b>13</b>  |
| I.3.1.1 Moteur à courant continu                                        | <b>14</b>  |
| I.3.1.2 Moteur à courant alternatif                                     | <b>14</b>  |
| I.3.2 Les pompes                                                        | <b>18</b>  |
| I.3.2.1 Types des pompes                                                | <b>18</b>  |
| I.3.2.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries)            | <b>21</b>  |
| I.4 Conclusion                                                          | <b>22</b>  |

| <b>Chapitre II: Modélisation et Simulation du Système de Pompage Photovoltaïque</b> |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1 Introduction                                                                   | 24 |
| II.2 Générateur Photovoltaïque                                                      | 24 |
| II.2.1 Modélisation des générateurs photovoltaïque                                  | 24 |
| II.2.1.1 Modèle à une diode sans résistance shunt (cellule idéale)                  | 24 |
| II.2.1.2 Modèle à une diode (Cellule réelle)                                        | 25 |
| II.2.2 Simulation de générateur photovoltaïque                                      | 28 |
| II.3 Hacheur Boost                                                                  | 30 |
| II.3.1 Modélisation d'un convertisseur statique DC/DC( boost)                       | 30 |
| II.3.2 Simulation de Hacheur Boost                                                  | 32 |
| II.3.3 Adaptation de l'énergie photovoltaïque                                       | 33 |
| II.3.4 La commande du point de puissance maximale (MPPT)                            | 33 |
| II.4 L'onduleur Triphasé                                                            | 33 |
| II.4.1 Modélisation d'un onduleur triphasé                                          | 33 |
| II.4.2 Simulation de onduleur triphasé                                              | 36 |
| II.4.3 Généralité sur commande de l'onduleur                                        | 37 |
| II.4.4 Contrôle du courant par M.L.I                                                | 38 |
| II.5 Moteur Asynchrone                                                              | 39 |
| II.5.1 Hypothèses simplificatrices                                                  | 39 |
| II.5.2 Principe de fonctionnement                                                   | 40 |
| II.5.3 Modélisation du moteur asynchrone                                            | 40 |
| II.5.4 Choix du repère                                                              | 46 |
| II.5.5 Référentiel fixe par rapport au rotor                                        | 47 |
| II.5.6 Simulation de moteur asynchrone                                              | 49 |
| II.6 Conclusion                                                                     | 54 |
| <b>Chapitre III: Réalisation d'un système de pompage photovoltaïque</b>             |    |
| III.1 Introduction                                                                  | 56 |
| III.2 Le rayonnement solaire dans la wilaya d'El Oued                               | 56 |
| III.3 Expressions utilisées dans le calcul                                          | 57 |
| III.3.1 Calcul du debit                                                             | 57 |
| III.3.2 Calcul du rendement du générateur photovoltaïque                            | 57 |
| III.3.3 Rendement du groupe motopompe                                               | 58 |
| III.3.4 Le rendement total                                                          | 58 |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| III.4 La partie pratique          | 58        |
| III.4.1 Les instruments utilisées | 58        |
| III.4.2 Schéma électrique         | 64        |
| III.4.3 Schéma de system global   | 65        |
| III.4.4 Résultats et discussion   | 65        |
| III.5 Conclusion                  | 66        |
| <b>Conclusion Générale</b>        | <b>68</b> |
| <b>Annexe</b>                     | <b>70</b> |
| <b>Bibliographie</b>              | <b>75</b> |

### Liste des Figures

| Figure                                                                  | Page |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Chapitre I: Généralités sur le système de pompage photovoltaïque</b> |      |
| Figure I.1: Principe d'énergie solaire                                  | 03   |
| Figure I.2: Principe de fonctionnement d'un cellule PV                  | 04   |
| Figure I.3: Cellules Monocristallines                                   | 05   |
| Figure I.4: Cellule poly-cristallines                                   | 06   |
| Figure I.5: Cellules amorphes                                           | 06   |
| Figure I.6: Cellules identiques en série                                | 07   |
| Figure I.7: Cellules identiques en parallèle.                           | 07   |
| Figure I.8: Composant d'un générateur photovoltaïque                    | 08   |
| Figure I.9: composants de la batterie                                   | 08   |
| Figure I.10: Régulateur autonome                                        | 10   |
| Figure I.11: Symbole d'onduleur                                         | 10   |
| Figure I.12: Exemple de câblage                                         | 11   |
| Figure I.13: Panneau photovoltaïque fixe                                | 12   |
| Figure I.14: Système avec poursuite solaire                             | 12   |
| Figure I.15: Moteur à courant continu avec balais                       | 14   |
| Figure I.16: Moteur synchrone                                           | 15   |
| Figure I.17: Eléments de constitution d'un Moteur asynchrone            | 16   |
| Figure I.18: Stator de la machine asynchrone                            | 17   |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.19: rotor bobiné                                                                               | 17 |
| Figure I.20: rotor à cage d'écureuil                                                                    | 18 |
| Figure I.21: Electropompe                                                                               | 18 |
| Figure I.22: Schéma d'une pompe centrifuge                                                              | 19 |
| Figure I.23: une pompe immergée.                                                                        | 20 |
| Figure I.24: Fonctionnement de quelques pompes volumétriques rotatives                                  | 20 |
| Figure I.25: Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie.                                | 21 |
| Figure I.26: principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries.                 | 22 |
| <b>Chapitre II: Modélisation et Simulation du Système de Pompage Photovoltaïque</b>                     |    |
| Figure II.1: Schéma équivalent à une cellule idéale                                                     | 25 |
| Figure II.2: Schéma équivalent d'une cellule réelle                                                     | 25 |
| Figure II.3: Schéma de générateur PV en MATLAB/SIMULINK                                                 | 29 |
| Figure II.4: Caractéristique I(V) générateur PV ( $T=25^{\circ}\text{C}$ , $G=1000\text{W/m}^2$ )       | 29 |
| Figure II.5: Caractéristique P(V) d'une générateur PV e $T=25^{\circ}\text{C}$ , $G=1000\text{W/m}^2$ ) | 30 |
| Figure II.6: Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost)                                          | 31 |
| Figure II.7: Simulation d'un hacheur Boost en MATLAB/SIMULIK                                            | 32 |
| Figure II.8: Caractéristique $v(t)$ d'un hacheur Boost                                                  | 32 |
| Figure II.9: schéma de principe d'un onduleur triphasé                                                  | 34 |
| Figure II.10: Schéma d'un onduleur en MATLAB/SIMULIK                                                    | 36 |
| Figure II.11: caractéristique ( $U_{an}(t)$ et $U_{bn}(t)$ et $U_{cn}(t)$ ).                            | 37 |
| Figure II.12: schéma synoptique d'un M.L.I                                                              | 38 |
| Figure II.13: M.L.I à échantillonnage naturel                                                           | 39 |
| Figure II.14: Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasée                               | 41 |
| Figure II.15: Les enroulements équivalents dans le repère (d, q).                                       | 45 |
| Figure II.16: schéma de représentation d'état                                                           | 48 |
| Figure II.17: Le schéma de moteur asynchrone en environnement Matlab/Simulink                           | 50 |
| Figure II.18: Allure du flux                                                                            | 51 |
| Figure II.19: Allure du couple électromagnétique de la machine                                          | 52 |
| Figure II.20: Allure de la vitesse de la machine                                                        | 53 |
| Figure II.21: Allure du courant de la machine                                                           | 53 |
| <b>Chapitre III: Réalisation d'un système de pompage photovoltaïque</b>                                 |    |
| Figure III. 1: Modèle de la carte arduino UNO                                                           | 58 |
| Figure III. 2: Conception du support de panneau solaire                                                 | 60 |
| Figure III. 3: Image du panneau solaire                                                                 | 60 |
| Figure III. 4: Image du moteur pas à pas                                                                | 61 |

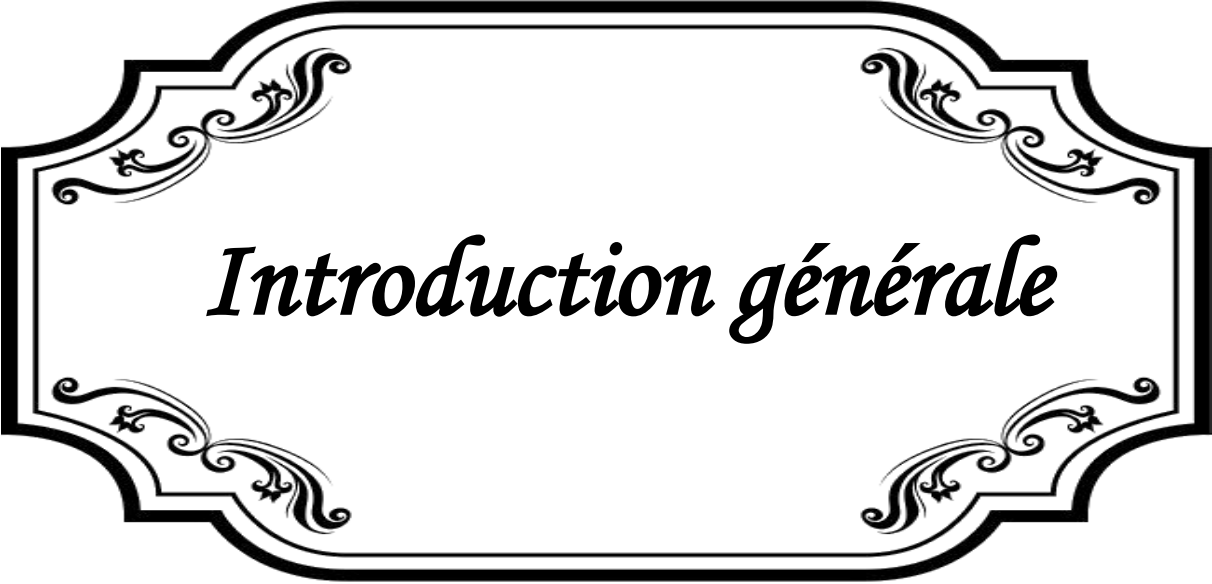
|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Figure III. 5: Image Blac DC                                                | <b>61</b> |
| Figure III. 6: Image de deux résistances 10K $\omega$                       | <b>62</b> |
| Figure III. 7: Image de la résistance photovoltaïque (LDR)                  | <b>62</b> |
| Figure III. 8: Image de la batterie au lithium                              | <b>63</b> |
| Figure III. 9: Régulateur de tension d'image                                | <b>63</b> |
| Figure III. 10: L'Electropompe DC                                           | <b>63</b> |
| Figure III.11: Image de deux Pin you                                        | <b>64</b> |
| Figure III.12: Fils de composants électroniques pour système photovoltaïque | <b>64</b> |
| Figure III.13: Image de Schéma global                                       | <b>65</b> |

### Liste des Tableaux

| <b>Tableaux</b>                                                                  | <b>Page</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tableau 1- La différence entre les batteries PV                                  | <b>09</b>   |
| Tableau 2- Caractéristique électrique de la générateur photovoltaïque            | <b>28</b>   |
| Tableau 3- Les résultats du tableau ont été obtenus à partir du programme PVsyst | <b>57</b>   |

## Listes des symboles et abréviations

| Symbole                                                                        | Unité                           |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| G : Ensoleillement                                                             | $(\omega/m^2)$                  |
| Rs : Résistance série                                                          | $(\Omega)$                      |
| Rsh : Résistance shunt                                                         | $(\Omega)$                      |
| Iph : Représente le Image courant                                              | (A)                             |
| Impp : Courant au point de puissance maximale, appelé aussi courant optimum    | (A)                             |
| Icc : Courant de court-circuit                                                 | (A)                             |
| K : Constante de Boltzmann                                                     | $(k = 1.3 \times 10^{-23} J/K)$ |
| Vco : Tension en circuit ouvert                                                | (V)                             |
| Vmpp : Tension au point de puissance maximale                                  | (V)                             |
| Pc : Puissance crête                                                           | $(W_c)$                         |
| Pmax : Puissance au point maximum                                              | (W)                             |
| Is : Courant de saturation de la diode                                         | (A)                             |
| Irsh : Courant de la résistance shunt                                          | (A)                             |
| Isc : Coefficient d'idéalité                                                   | $(\omega/m^2)$                  |
| Gref : Ensoleillement de référence                                             | $(\Omega)$                      |
| Ns : Nombre de module en série                                                 | -                               |
| Np : Nombre de module en parallèle                                             | -                               |
| Rs : Résistance de l'induit                                                    | $(\Omega)$                      |
| Rmp : Rendement motopompe                                                      | (%)                             |
| Tem : Couple électromagnétique                                                 | (N.m)                           |
| Rb : Résistance interne de la batterie                                         | $(\Omega)$                      |
| $\rho$ : Masse volumique de l'eau                                              | $(\rho = 1000 Kg/m^3)$          |
| Q : Débit de l'eau pompé                                                       | $(m^3/s)$ ou $(m^3/j)$          |
| Isd,Isq : Courant statorique directe et quadratique                            | (A)                             |
| Ird,Irq : Courant rotorique directe et quadratique                             | (A)                             |
| Isabc,Irabc : Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique | (A)                             |
| Icc,stc : Représente le courant photovoltaïque dans les conditions STC         | (A)                             |
| Ls,Lr : Inductances cyclique statorique et rotorique                           | (H)                             |
| $\Omega$ : Vitesse mécanique                                                   | (tr/min)                        |
| In : Inclinaison sur plan                                                      | -                               |
| Ft : Facteur de transposition                                                  | -                               |
| Glo : L'énergie globale capturé sur plan                                       | -                               |
| g : la gravité                                                                 | -                               |
| H : la hauteur manométrique totale                                             | (m)                             |
| CNC : Computer Numerical Control                                               | -                               |



# *Introduction générale*

## **Introduction Générale:**

L'utilisation de l'énergie solaire présente de nombreux avantages, notamment sa propriété environnementale. Contrairement aux énergies fossiles, l'énergie solaire ne produit pas de dioxyde de carbone, de gaz à effet de serre, ni ne contribue au réchauffement climatique. Elle est donc une source d'énergie verte, à l'impact environnemental minimal. Les panneaux photovoltaïques sont également majoritairement constitués de matériaux recyclables et son utilisation devient de plus en plus commune, avec de nombreuses compagnies d'électricité qui les emploient comme source d'énergie d'appoint. Bien que son coût d'installation soit parfois conséquent, son coût compétitif, malgré le faible taux d'ensoleillement des pays tempérés, en fait une alternative intéressante par rapport aux autres formes d'énergie [1].

L'énergie photovoltaïque est également de plus en plus utilisée pour de nombreuses applications terrestres, notamment pour les télécommunications, les pompes, la réfrigération et l'éclairage. L'usage de générateurs photovoltaïques pour alimenter les groupes moteur-pompes est de plus en plus courant dans les zones rurales et isolées où la demande en eau est croissante. Les pompes solaires sont une alternative plus silencieuse, moins polluante et moins coûteuse que les pompes à moteur diesel [2].

Cependant, l'absence de contrainte énergétique peut entraîner une diminution non durable des eaux souterraines, il est donc important de veiller à la durabilité du système. Les compétences, le contrôle de la qualité et les coûts associés posent également des défis à la mise en place de ces systèmes. Cependant, les avantages de la conversion photovoltaïque sont nombreux, notamment la décentralisation de la production d'énergie, l'autonomie des systèmes photovoltaïques, aussi bien en autonomie de lieu qu'en autonomie de fonctionnement [1].

Le présent mémoire traite plus particulièrement les aspects d'une solution de pompage d'eau en utilisant une source d'énergie solaire photovoltaïque.

Le contenu de ce mémoire est organisé en trois chapitres:

- Le premier chapitre présente une approche générale sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques.
- Dans le deuxième chapitre, nous étudierons la modélisation et la simulation en composantes principales à l'aide de Matlab/Simulink.
- Le troisième chapitre comportera des illustrations du travail effectué ainsi que des informations importantes concernant les exigences à respecter.

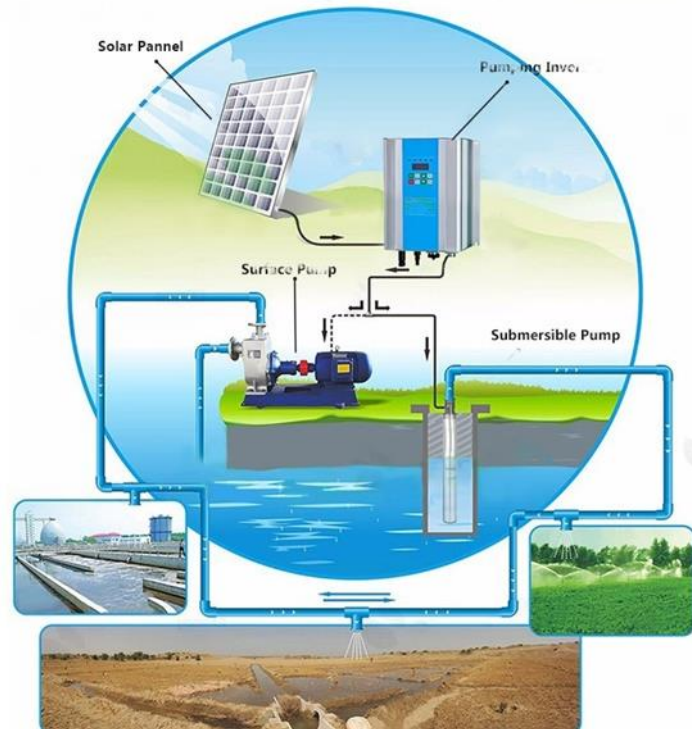


*Chapitre I:*  
*Généralités sur le système de*  
*pompage photovoltaïque*

### I.1 Introduction:

La première génération de systèmes de pompes photovoltaïques, en particulier ceux utilisés dans les applications à basse et moyenne altitude, utilisait des moteurs à courant continu à aimants permanents. Ces dernières années, les moteurs asynchrones entraînés par des convertisseurs à fréquence variable sont devenus le moteur standard pour les applications de pompes à eau solaires. Ceci est principalement dû à leur simplicité, leur robustesse et leur faible coût par rapport aux moteurs à courant continu [3].

Les systèmes de pompage d'eau photovoltaïques sont devenus une préoccupation majeure aujourd'hui. Utilisé pour améliorer les conditions de vie et le développement dans les zones rurales et désertiques [4].



*Figure I.1: Principe d'énergie solaire*

### I.2 Les systèmes photovoltaïques:

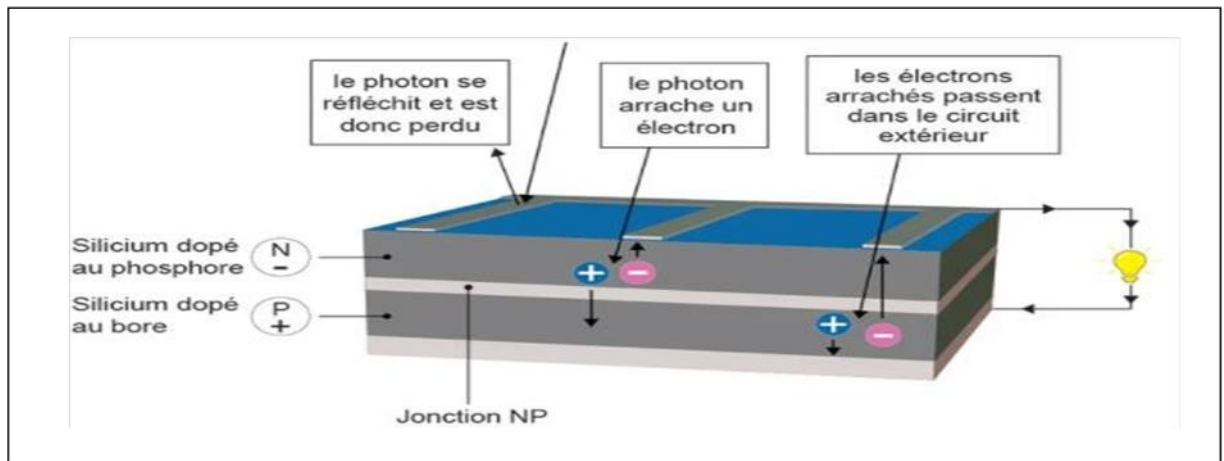
Principe de l'énergie solaire photovoltaïque : transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque [5].

## I.2.1 Composants de système photovoltaïque:

### I.2.1.1 Générateur photovoltaïques:

#### I.2.1.1.1 Principe de fonctionnement:

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.



**Figure I.2: Principe de fonctionnement d'une cellule PV**

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur

sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface [5].

#### **I.2.1.1.2 Caractéristiques de PV:**

##### **I.2.1.1.2.1 Type des Cellules:**

Il existe trois principaux types de cellules solaires.

##### **I.2.1.1.2.1.1 Les Cellules Monocristallines:**

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique. cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans) [6].



**Figure I.3: Cellules Monocristallines**

##### **I.2.1.1.2.1.2 Les Cellules Poly-Cristallines:**

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors Hétérogènes. Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.

- Rendement de 13% et jusqu'à 20% en labo [6].



**Figure I.4: Cellule Poly-Cristallines**

#### **I.2.1.1.2.1.3 Les Cellules Amorphes:**

Le silicium amorphe, est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, - cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5% par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement [6].



**Figure I.5: Cellules Amorphes**

### I.2.1.1.2.2 Méthodes de Liaison [7]:

#### I.2.1.1.2.2.1 Association en série:

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

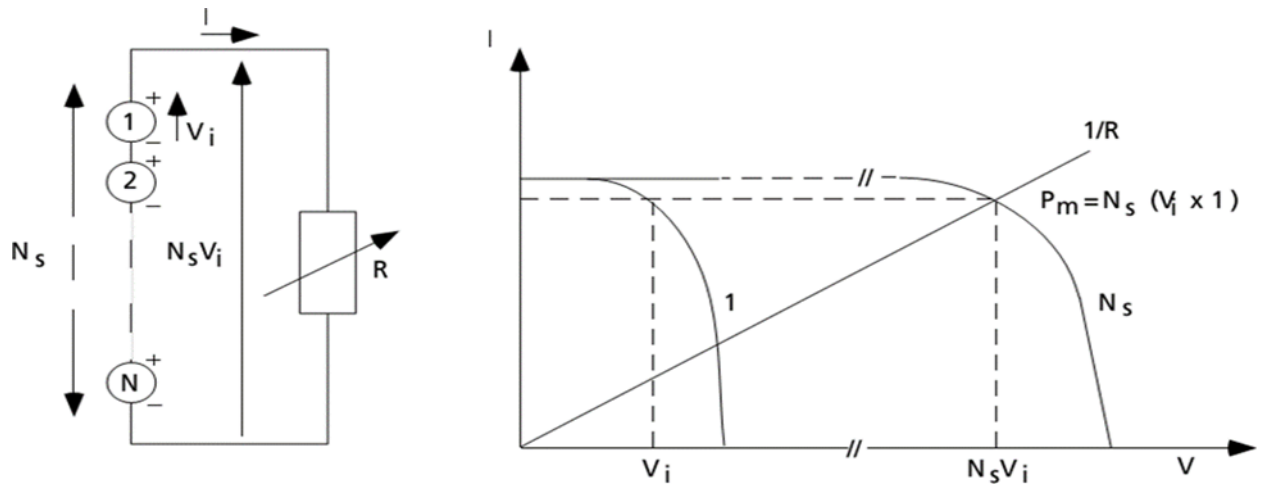


Figure I.6: Cellules identiques en série

#### I.2.1.1.2.2.2 Association en parallèle:

En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

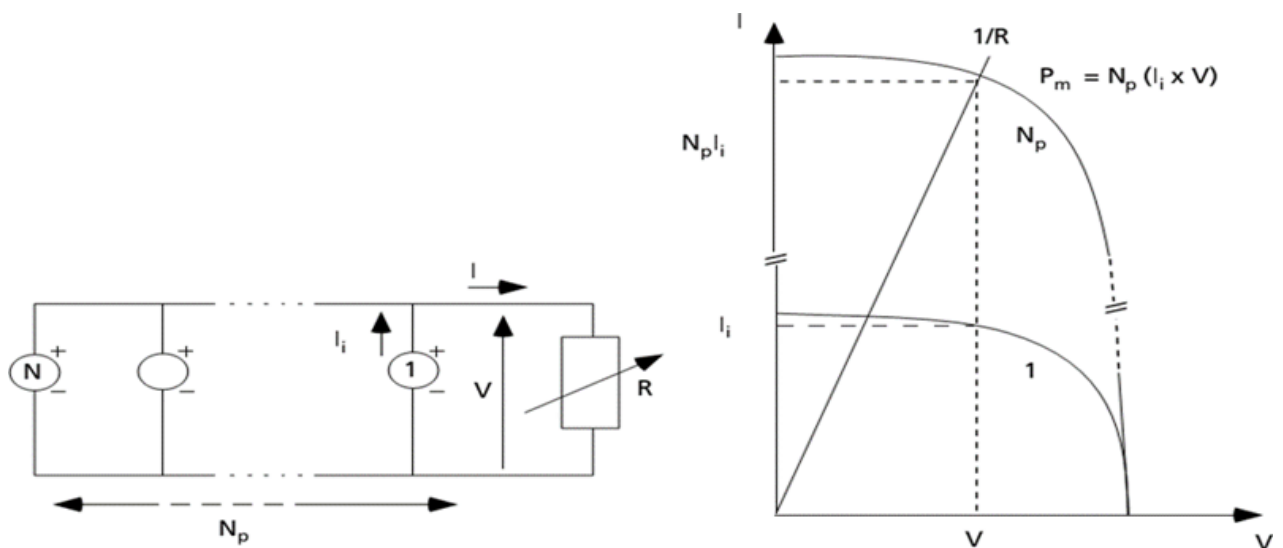
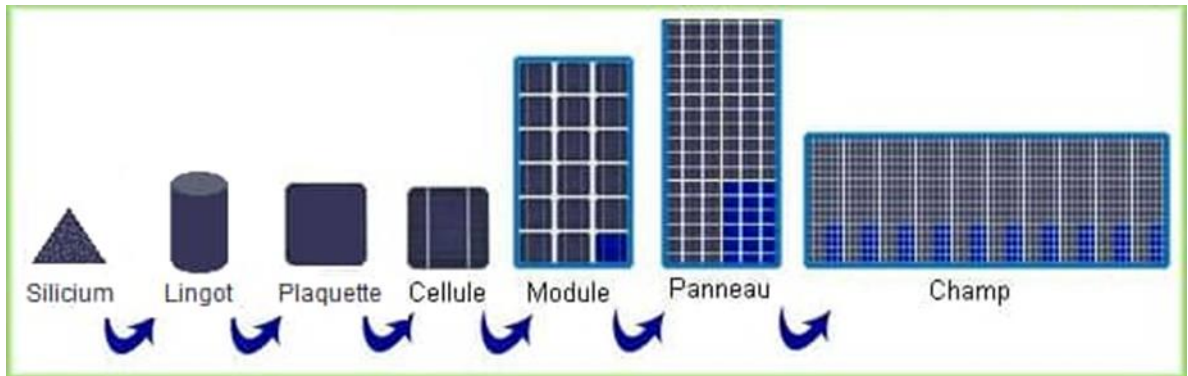


Figure I.7: Cellules identiques en parallèle.

### I.2.1.1.3 Le champ photovoltaïque:

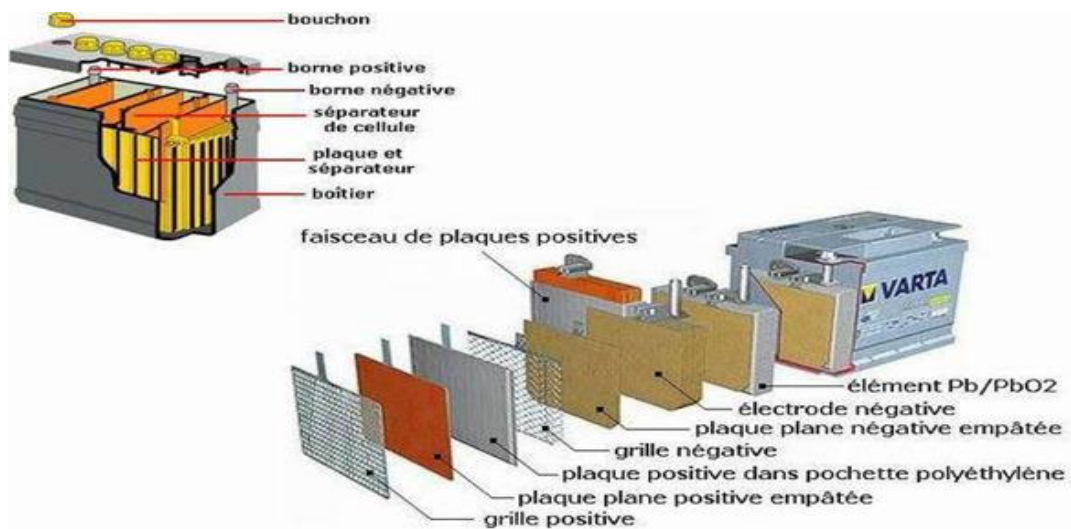
Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique [3].



*Figure I.8: Composant d'un générateur photovoltaïque*

### I.2.1.2 Les Batteries:

Les batteries utilisées pour le stockage d'énergie. Les batteries solaires sont adaptées au cyclage quotidien et à la charge lente par panneaux solaires. Leur durée de vie est considérablement augmentée si la profondeur de décharge quotidienne est inférieure à 30% de la capacité totale pour les batteries plomb et jusqu'à 70% pour les batteries lithium [6].



*Figure I.9: composants de la batterie*

### I.2.1.2.1 Systèmes autonomes avec stockage électrochimique:

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

**Tableau 1- La différence entre les batteries PV**

| Type de batterie<br>(décharge de 30% / temp. 25°C) | Nombre de cycles<br>cycle = 1 x (décharge + charge) | Durée de vie |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------|
| Batterie AGM                                       | 1500 cycles (600 cycles à 50%)                      | ≈ 4 ans      |
| Batterie AGM Plomb-Carbone                         | 1500 cycles (1000 cycles à 50%)                     | ≈ 4 ans      |
| Batterie GEL                                       | 1800 cycles (750 cycles à 50%)                      | ≈ 5 ans      |
| Batterie GEL Plomb-Carbone                         | 2500 cycles (1750 cycles à 50%)                     | ≈ 7 ans      |
| Batterie OPzV / OPzS                               | 5000 cycles (3000 cycles à 50%)                     | ≈ 13 ans     |
| Batterie Lithium                                   | 6000 cycles (5000 cycles à 50%)                     | ≈ 15 ans     |

### I.2.1.2.2 Systèmes autonomes sans stockage électrochimique:

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonome.

La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable en fonction du rayonnement solaire.

### I.2.1.3 Le Régulateur:

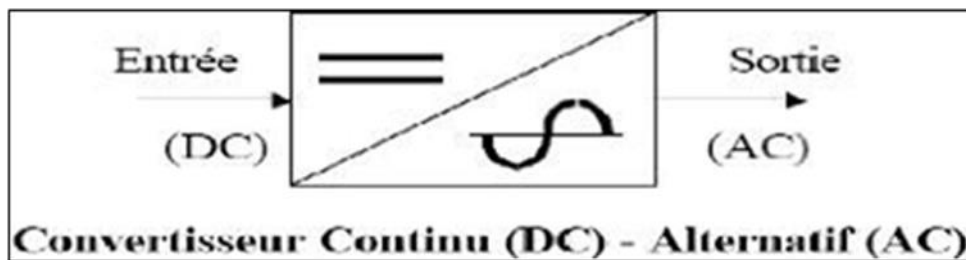
Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome. Il se place entre les panneaux et les batteries. Son objectif est de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes pour lui assurer une meilleure durée de vie, pour que l'application autonome le soit pendant longtemps [6].



*Figure I.10: Régulateur autonome*

### I.2.1.4 L'Onduleur:

Un onduleur est un appareil électrique permettant de transformer la tension / courant continu issue des modules photovoltaïques ou des batteries en tension / courant alternatif il dit autonome s'il assure de lui-même sa Fréquence et sa forme d'onde.



*Figure I.11: Symbole d'onduleur*

Les principales caractéristiques des onduleurs sont :

- Puissance nominale.
- Puissance de point ou surcharge.
- Consommation à vide ou en charge
- Tension d'entrée et de sortie.
- Rendement et la durée de vie [6].

### I.2.1.5 Le Câblage:

Toute installation solaire photovoltaïque comporte des câbles permettant le passage de l'électricité du panneau à la batterie, puis aux charges. Généralement, les câbles recommandés coté cc sont en cuivre souple, le cuivre présentant le meilleur rapport prix / conductivité et la caractéristique multibrin permet d'assurer des connexions de qualité optimale donc de minimiser les pertes d'énergie par chute de tension [6].



*Figure I.12: Exemple de câblage*

### I.2.1.6 La charge:

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système, pouvant être de type continu des équipements de télécommunication, nécessite un onduleur :

- Le pompage de l'eau.
- Les lampes.

## I.2.2 Types de Systèmes PV:

### I.2.2.1 Systèmes fixes:

C'est la configuration la plus classique, les modules sont installés sur des supports fixes avec une position fixe elle aussi. Certains supports fixes permettent cependant un réajustement de l'angle d'orientation suivant les saisons. Les matériaux métalliques utilisés pour la fabrication des supports ne doivent pas altérer physiquement et chimiquement les modules (acier inox, alu anodisé, acier galvanisé) [8].



**Figure I.13: Système photovoltaïque fixe**

#### **I.2.2.2 Système avec poursuite solaire (*Solar Trackers*):**

Des systèmes de poursuite solaire un axe (d'est en ouest) ou 2 axes peuvent augmenter de façon assez significative la production d'énergie électrique de 20 à 40% suivant le lieu d'installation. Ces matériels sont surtout utilisés aux USA pour des systèmes couplés au réseau électrique local et pour le pompage solaire.



**Figure I.14: Système avec poursuite solaire**

##### **I.2.2.2.1 Les avantages des traqueurs solaires sont multiples:**

- Orientation optimale en permanence sur plus de 240° d'Est en Ouest, le traqueur solaire suit la course du soleil.
- Les panneaux solaires sont très bien ventilés.
- Plus de production pour moins de surface de panneaux solaires ce qui fait du traqueur solaire une solution bien plus écologique.
- Faible emprise au sol, ce qui permet la culture habituelle du sol.
- Monté sur mât, le traqueur solaire n'est pas soumis aux ombres basses.

**I.2.2.2 Les inconvénients des traqueurs solaires sont multiples:**

- Coût : Les suiveurs solaires sont généralement plus coûteux à installer et à entretenir que les panneaux solaires fixes, ce qui peut rendre leur utilisation moins rentable.
- Maintenance : Les suiveurs solaires nécessitent une maintenance plus importante que les panneaux solaires fixes en raison des mouvements mécaniques qu'ils effectuent pour suivre le mouvement du soleil.
- Taille : Les suiveurs solaires sont généralement plus grands et plus encombrants que les panneaux solaires fixes, ce qui peut poser des problèmes de place dans certains environnements.
- Orientation : Bien que les suiveurs solaires suivent le mouvement du soleil, ils peuvent ne pas être en mesure de suivre le soleil à tout moment en raison de conditions météorologiques défavorables, comme les nuages ou les tempêtes. Cela peut réduire l'efficacité de la production d'énergie solaire.

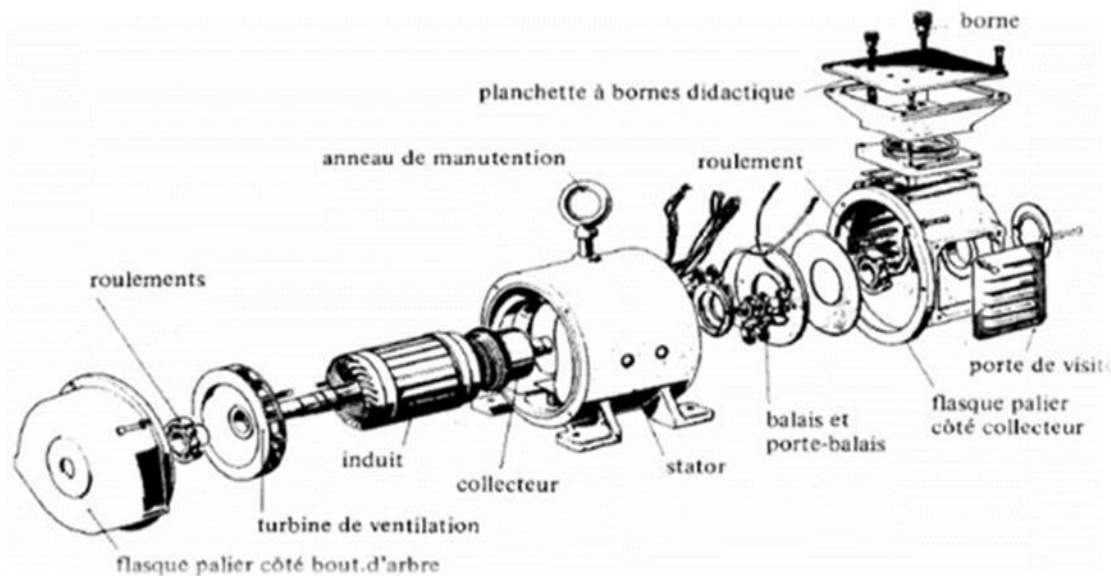
**I.3 Les Pompages:****I.3.1 Machine électrique:**

Le moteur électrique d'une électropompe, que ce soit en courant continu (CC) ou alternatif (CA), permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Pour une installation de pompage solaire photovoltaïque, le choix d'un moteur (CC) est en premier lieu une solution économique puisque le générateur photovoltaïque fournit une puissance cc et ainsi on peut éviter le recours à l'utilisation d'un convertisseur statique. L'évolution des convertisseurs statiques efficaces permet également de choisir des moteurs efficaces, disponibles, et surtout, moins coûteux.

Les convertisseurs statiques peuvent être à fréquence variable afin de contrôler le transfert de puissance entre la source et la pompe. Un système de pompage utilisant un moteur ça peut aussi nécessiter des batteries de stockage électrochimique et ces dernières requièrent un entretien ce qui signifie un coût supplémentaire qui s'ajoutera au coût global et en même temps diminuera le rendement de l'installation [9].

### I.3.1.1 Moteur à courant continu:

En variant le sens du courant circulant dans un rotor soumis à un champ magnétique produit par le stator, alors l'énergie électrique appliquée sera transformée en énergie mécanique. Les balais d'un moteur cc sont composés de charbon et de graphite assurent la commutation du courant dans le rotor (figure I.15). Ces balais doivent être changés périodiquement et ceci constitue un problème dans le cas des pompes à moteur immergé où l'isolation du moteur ne doit pas être compromise afin de ne pas la fragiliser aux infiltrations d'eau, ce qui n'est pas évident sur le site. Certains constructeurs offrent des moteurs à balais de longue durée, réduisant cet entretien à toutes les 5000 heures de fonctionnement.



**Figure I.15: Moteur à courant continu avec balais**

### I.3.1.2 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 à courant alternatif 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 [10].

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs synchrones.
- Les moteurs asynchrones.

### **I.3.1.2.1 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 1 500 MW.

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Ce type de machine peut être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation [10].



**Figure I.16: Moteur synchrone**

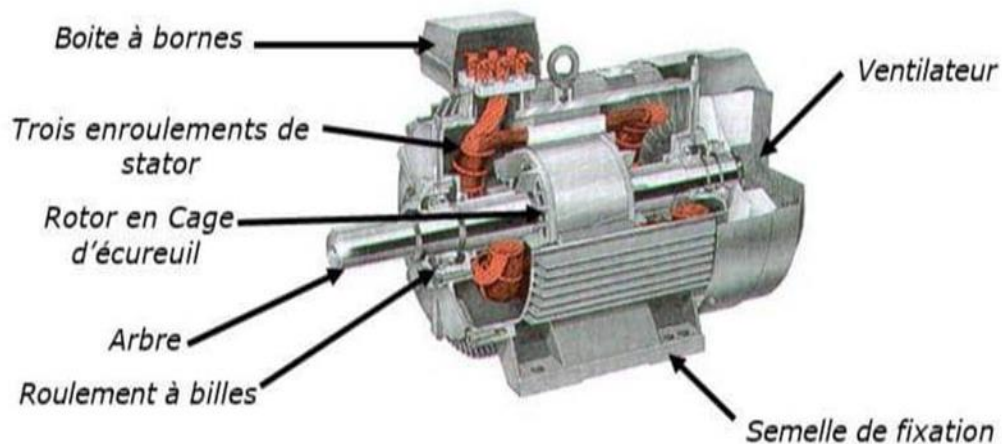
### **I.3.1.2.2 Les Moteurs asynchrone:**

La machine asynchrone ou bien le moteur à induction est une machine électrique tournante à courant alternatif dont sa vitesse de rotation est inférieure à celle du champ magnétique du stator d'où vient le nom « asynchrone ». Cette machine est réversible ça veut dire qu'elle peut fonctionner comme moteur en transformant l'énergie électrique en énergie mécanique comme elle peut fonctionner comme génératrice en transformant l'énergie mécanique en énergie électrique. Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Cette machine est reliée directement au réseau industriel à tension et fréquence constante [11].

#### **I.3.1.2.2.1 Constitution de la machine asynchrone:**

- La machine asynchrone triphasée peut se décomposer, du point de vue de sa construction, en trois parties distinctes :

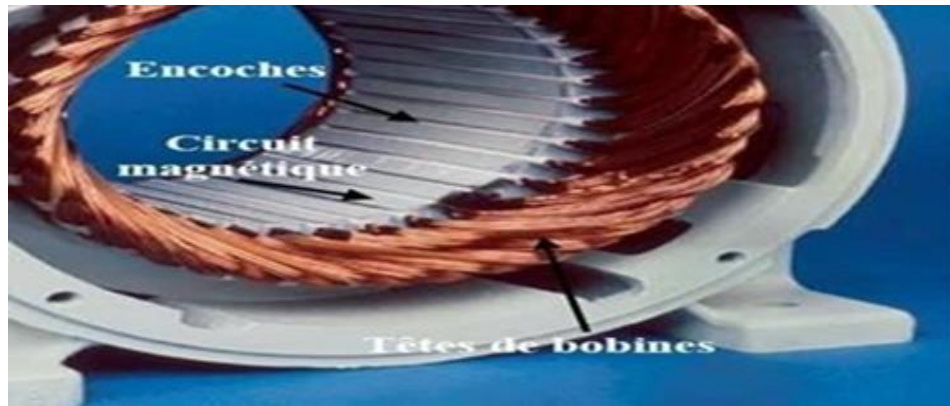
- Le stator, (partie fixe) où est fixée l'alimentation, est constitué de disques en tôles magnétiques empilés portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Le rotor (partie tournante), permet de mettre en rotation la charge mécanique, il est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement qui peut être bobiné semblable à celui du stator ou injecté de type cage.
- Les organes mécaniques, permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles [11].



**Figure I.17: Eléments de constitution d'un Moteur asynchrone**

#### **I.3.1.2.2 Le Stator de la machine asynchrone:**

Le stator de la machine asynchrone est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. Les tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Le bobinage statorique peut être décomposé en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer un champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes des bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [12].



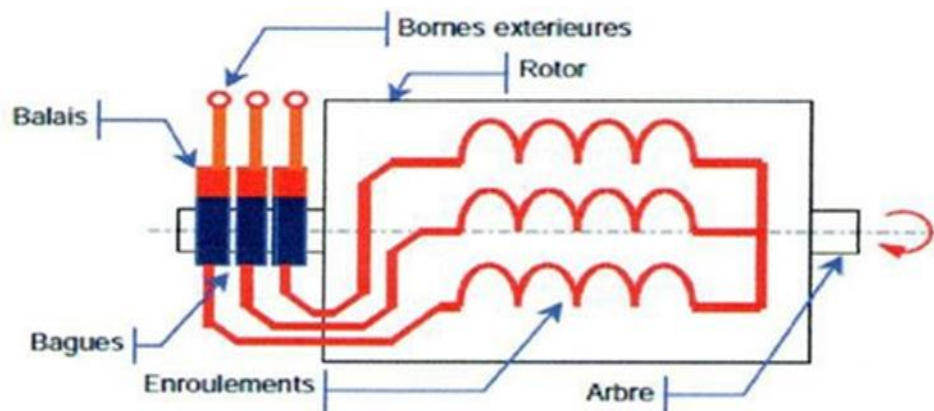
*Figure I.18: Stator de la machine asynchrone*

#### **I.3.1.2.2.3 Le rotor de la machine asynchrone:**

Le rotor se décompose aussi d'un circuit magnétique constitué de tôles d'acier qui sont en général de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Le rotor de la machine asynchrone peut être de deux types : bobiné ou à cage d'écureuil [12].

##### **I.3.1.2.2.3.1 Le Rotor Bobiné:**

Est construit de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans leurs encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors accessibles grâce à un système de bagues- balais positionné sur l'arbre de la machine [9].



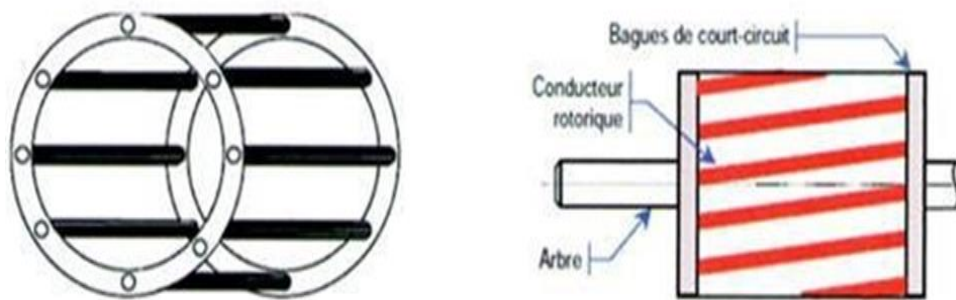
*Figure I.19: rotor bobiné*

##### **I.3.1.2.2.3.2 Le Rotor à Cage:**

Est constitué de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits, ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court-circuit. Très souvent les barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et aussi

diminuer fortement le bruit lors de l'accélération de la machine. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre [12].

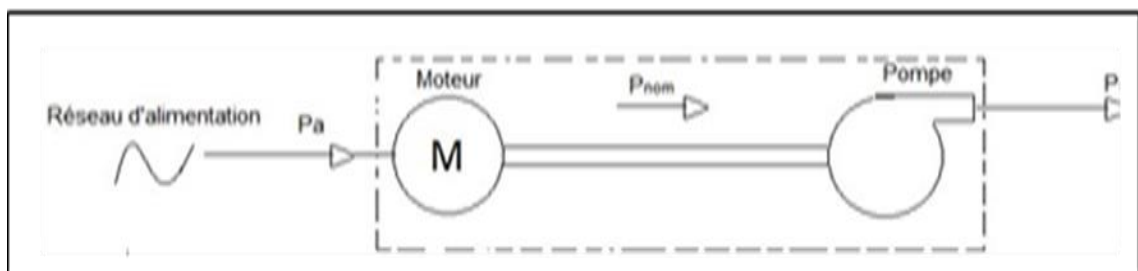
Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible. Le rotor à cage d'écureuil peut aussi être considéré comme un enroulement polyphasé fermé.



**Figure I.20: rotor à cage d'écureuil**

### I.3.2 Les pompes:

Les pompes ont pour fonction d'accroître la pression d'un liquide et de générer un débit. Pour assurer cette tâche différents types de pompes ont été développés, dont les plus importants sont les pompes volumétriques et les pompes centrifuges.



**Figure I.21: Electropompe**

#### I.3.2.1 Types des pompes:

Les pompes véhiculant des liquides se divisent en deux catégories principales:

### I.3.2.1.1 Les pompes centrifuges:

Le mouvement du liquide est rigoureusement normal à l'axe, car il pénètre au centre de la roue et est projeté vers l'extérieur par l'action combinée de la force centrifuge et des aubes du rotor [12].

### I.3.2.1.2 Principe de fonctionnement:

Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge. Les turbopompes sont des machines tournantes qui grâce à un rotor à aubes convenablement orientées augmente l'énergie cinétique et projette à l'aide de la force centrifuge.

Le liquide à la périphérie sur la volute. A la sortie et à l'aide d'un divergent, une grande partie de l'énergie cinétique se transforme en pression motrice [13].

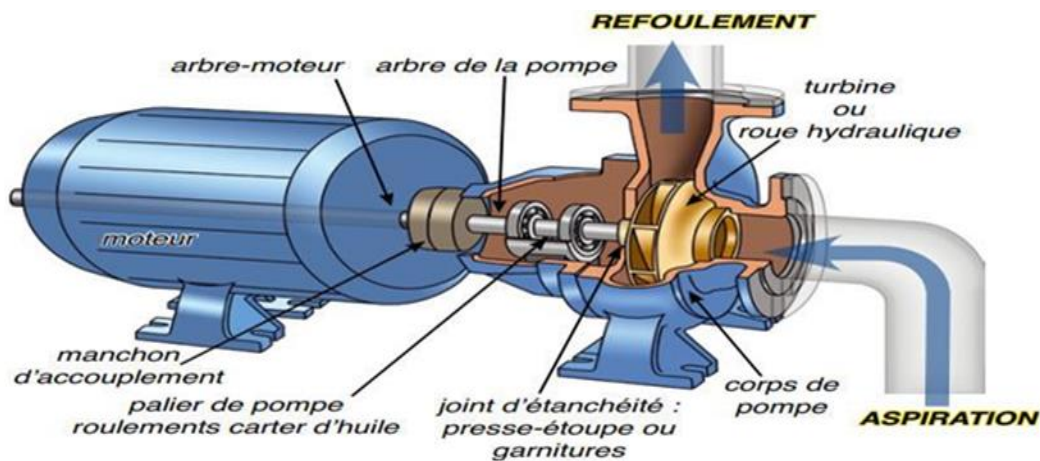
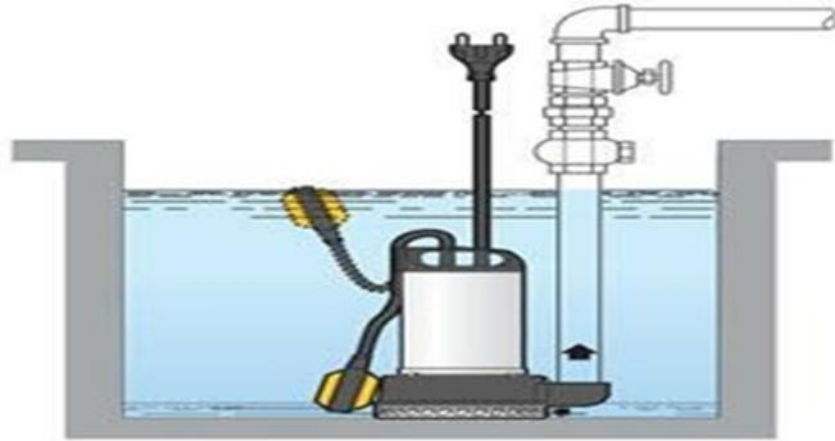


Figure I.22: Schéma d'une pompe centrifuge

### I.3.2.1.3 Pompes immergées:

Une pompe immergée c'est une pompe verticale mono ou multicellulaire centrifuge avec roues radiales ou semi-axiales. Les roulements de guidage et les bagues d'usure garantissent la résistance à l'usure en assurant la constance et la fiabilité des caractéristiques hydrauliques dans le temps. Sur demande, les pompes sont disponibles en bronze ou en acier inoxydable pour les applications en eau de mer ou avec des liquides agressifs.



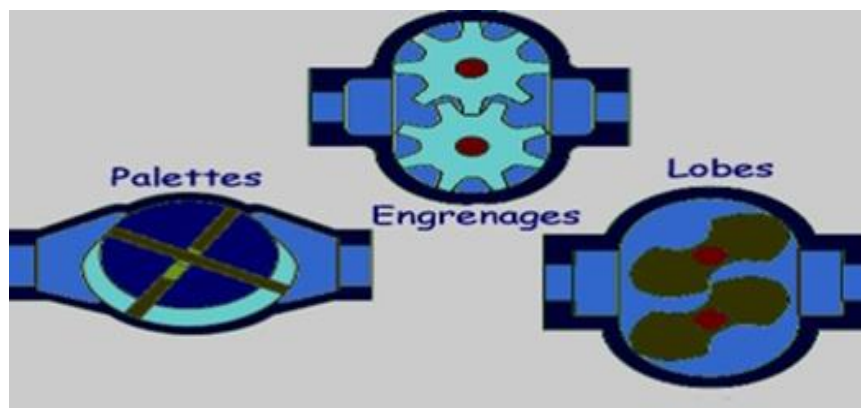
*Figure I.23: une pompe immergée.*

#### **I.3.2.1.3.1 Domaines d'applications:**

Les pompes submersibles sont utilisées dans les systèmes de lutte contre l'incendie et les stations de pompage ainsi que pour élever l'eau primaire des puits. Ils peuvent être utilisés pour transporter de l'eau pure et dans les usines de purification d'eau, les pompes sont utilisées pour alimenter les systèmes d'irrigation et les systèmes d'eau utilisés dans les activités agricoles [14].

#### **I.3.2.1.2 Les pompes volumétriques:**

La pompe volumétrique, ou dite à capacité variable, est une pompe dans laquelle l'écoulement du fluide résulte de la variation d'une capacité occupée par le fluide. Son fonctionnement repose sur le principe du mouvement cyclique [16].



*Figure I.24: Fonctionnement de quelques pompes volumétriques rotatives*

### **I.3.2.1.2.1 Principe de fonctionnement:**

La particularité de la pompe volumétrique est d'être composée d'éléments mobiles placés dans une pièce fixe. Lors de la mise en route du moteur, ces pièces se déplacent en créant un vide partiel. Sous la pression atmosphérique, le liquide contenu dans le réservoir est poussé dans cet espace où il se retrouve emprisonné. Le mouvement des pièces va ensuite réduire cet espace et mettre le liquide sous pression. Entraîné par la vitesse de rotation, le fluide est poussé jusqu'à la sortie de la pompe.

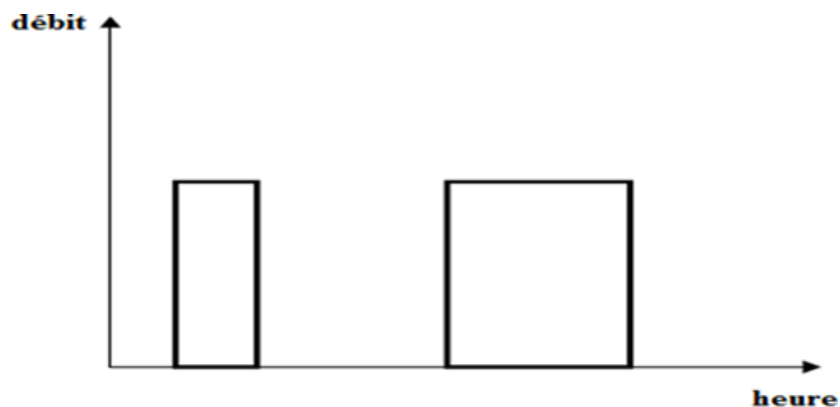
Le principe de fonctionnement d'une pompe volumétrique repose donc sur des variations de volume permettant le déplacement d'un liquide. Autrement dit, en un temps donné, la pompe va prélever une quantité de liquide. Celui-ci est aspiré dans le mécanisme puis transféré grâce à la pression de refoulement. C'est pourquoi on trouve aussi, dans les bases de données de brevet, le nom de "pompe à déplacement positif.

Il faut savoir que le débit d'une pompe volumétrique dépend de sa vitesse de rotation ainsi que du nombre de cycles et de la taille (volume) des chambres [15].

### **I.3.2.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries):**

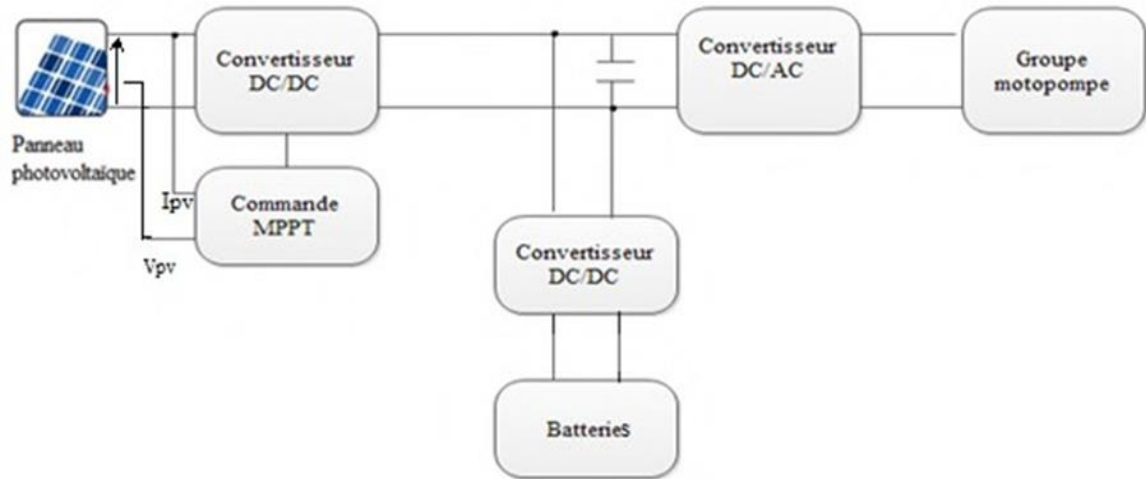
Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage [17].

Le pompage photovoltaïque avec batterie, permet d'assurer une autonomie énergétique, et un débit constant selon la demande, comme nous montre la figure ci-dessous :



**Figure I.25: Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie.**

Les batteries permettent de stocker l'électricité afin de la restituer en temps voulu. Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives pour sa durée de vie [8].



**Figure I.26: principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries.**

#### I.4 Conclusion:

Ce chapitre a constitué une introduction complète à tout ce qui concerne le système de pompage, car nous avons pu définir de nombreux termes et concepts importants dans ce domaine. L'énergie photovoltaïque est l'une des formes d'énergie verte les plus efficaces et économiques, et l'intérêt pour ses applications dans les domaines du pompage et de l'irrigation a augmenté dans le monde entier.



*Chapitre II:*  
*Modélisation et Simulation*  
*du Système de Pompage*  
*Photovoltaïque*

## **II.1 Introduction:**

La modélisation d'un système physique et sa simulation sont des outils essentiels dans de nombreux domaines de la science et de l'ingénierie. Ces techniques permettent de comprendre et d'analyser le comportement d'un système physique complexe en utilisant des modèles mathématiques et des simulations numériques.

La modélisation consiste à créer un modèle mathématique qui décrit les propriétés et le comportement d'un système physique. Ce modèle peut être basé sur des lois physiques fondamentales telles que la mécanique newtonienne, la thermodynamique ou l'électromagnétisme, ou sur des observations empiriques [21].

Une fois le modèle créé, la simulation consiste à utiliser des techniques numériques pour résoudre les équations mathématiques qui décrivent le système physique. Les résultats de la simulation peuvent être utilisés pour comprendre le comportement du système dans différentes conditions, pour prédire son comportement futur ou pour optimiser sa conception [22].

Dans ce chapitre, nous présenterons les équations caractérisant le fonctionnement ainsi que les modèles mathématiques qui seront utilisés pour la modélisation des différentes parties du système de pompage photovoltaïque. Ces modèles seront ensuite simulés à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

## **II.2 Générateur Photovoltaïque:**

### **II.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque:**

Il y a plusieurs modèles de générateurs photovoltaïques décrits dans la littérature, qui varient en termes de méthode et de nombre de paramètres utilisés pour calculer la tension et le courant générés par le générateur [23].

#### **II.2.1.1 Modèle à une diode sans résistance shunt (cellule idéale):**

Dans l'hypothèse d'un comportement idéal, il est possible de modéliser la jonction PN d'un générateur photovoltaïque sous illumination en utilisant un générateur de courant en parallèle avec une diode qui symbolise la jonction P-N de la cellule.

Le schéma équivalent de ce modèle est représenté par un circuit électrique à une seule diode, comme illustré dans la figure (II.1).

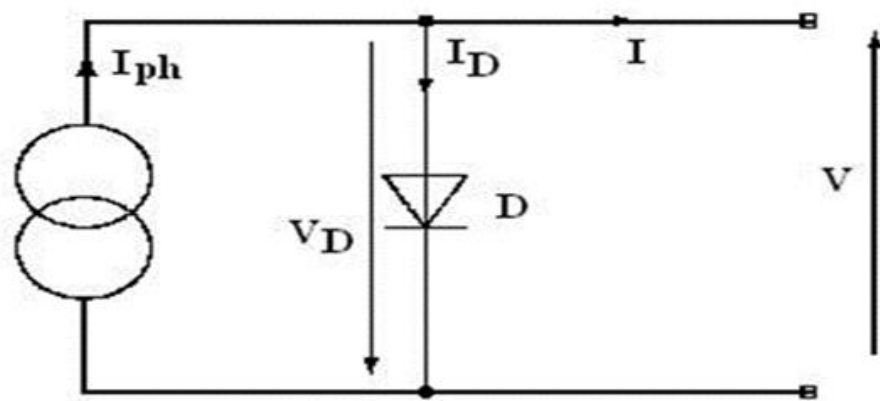


Figure II.1: Schéma équivalent à une cellule idéale

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

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance Shunt( $R_{sh}$ )

. Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(V)$  :

- La résistance série : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend Principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [24-25].
- La résistance shunt : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [24-25].

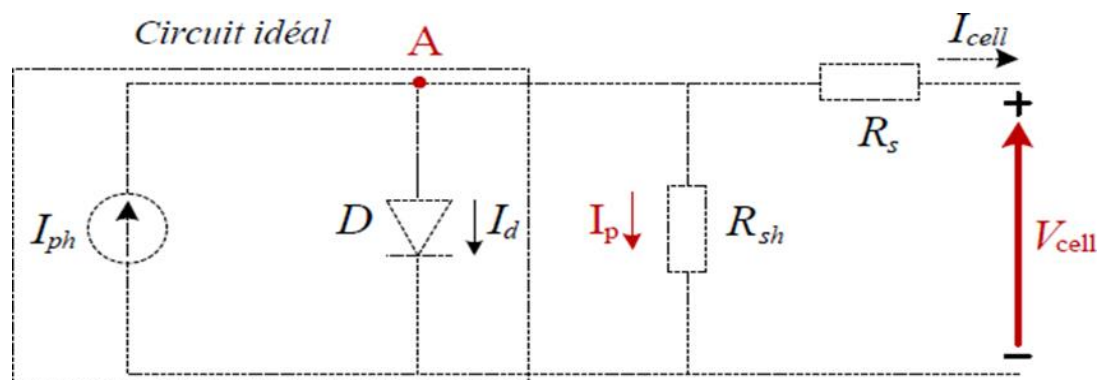


Figure II.2: Schéma équivalent d'une cellule réelle

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes [24-26].

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont :

Le photo-courant ( $I_{ph}$ ), le courant de saturation ( $I_0$ ), le facteur d'idéalité de la jonction ( $A$ ), la résistance série ( $R_s$ ) et la résistance shunt ( $R_{sh}$ ).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt  $R_{sh}$ , en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision.

Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [24-27] :

L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.1)$$

Avec :

$I_{cell}$  : Le courant délivré par le module.

$I_d$  : Courant de diode.

$I_{sh}$  : Le courant shunt.

On a la résistance  $R_{sh}$  plus élevée donc on peut négliger le courant  $I_{sh}$  donc l'équation s'écrit :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \quad (II.2)$$

#### II.2.1.2.1 Le photo-courant $I_{ph}$ :

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

Avec :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] \times \frac{G}{G_{ref}} \quad (II-3)$$

$I_{cc}$  [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

$K_i$  [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

$T$  [K] : Température ambiante.

$G$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation sur la surface de la cellule.

$T_{ref}$  [K] : Température de référence (298 K).

$G_{ref}$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

#### II.2.1.2.2 Le courant de saturation $I_0$ :

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{Rs} \times \left( \frac{T}{T_{ref}} \right) \times \left[ \frac{q \cdot E_{g0} \times (1/T_{ref} - 1/T)}{n \times K} \right] \quad (II-4)$$

Avec :

$E_g$  [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

#### II.2.1.2.3 Courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite):

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{Rs} = \frac{I_{cc}}{e^{\left( \frac{q \times V_{oc}}{n \times N_s \times K \times T} \right) - 1}} \quad (II-5)$$

Où :

$V_{oc}$  [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

$q$  [C] : Charge de l'électron ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  C).

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série.

$n$  : Constante d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 2$ ).

$K$  [J/K] : Constante de Boltzmann ( $1.3805 \cdot 10^{-23}$  J/K).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right)} - 1 \right] - \left( \frac{V_{cell} + R_s \cdot I_{cell}}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-6})$$

#### II.2.1.2.4. Le courant du panneau:

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{PV} = N_p \cdot I_{ph} - N_p I_0 \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V_{cell} + R_s \cdot I_{cell})}{N_s \cdot n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (\text{II-7})$$

Où :

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série dans un module (51 cellules).

$N_p$  : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module (1 cellules).

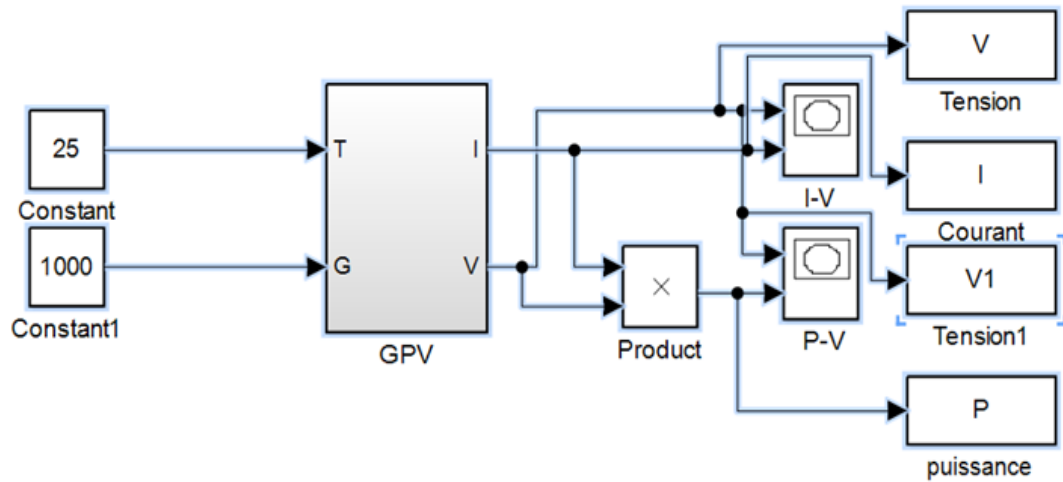
#### II.2.2 Simulation de générateur photovoltaïque:

Les caractéristiques électriques de cellule sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 2- Caractéristique électrique du générateur photovoltaïque**

|                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Facteur d'idéalité n              | n=1.6                      |
| Energie de la bande interdite     | $E_g \approx 1.1\text{Ev}$ |
| Courant de court-circuit $I_{cc}$ | 8.21A                      |
| Tension a circuit ouvert $V_{oc}$ | 32.9V                      |
| La puissance maximale $P_{max}$   | 200W                       |

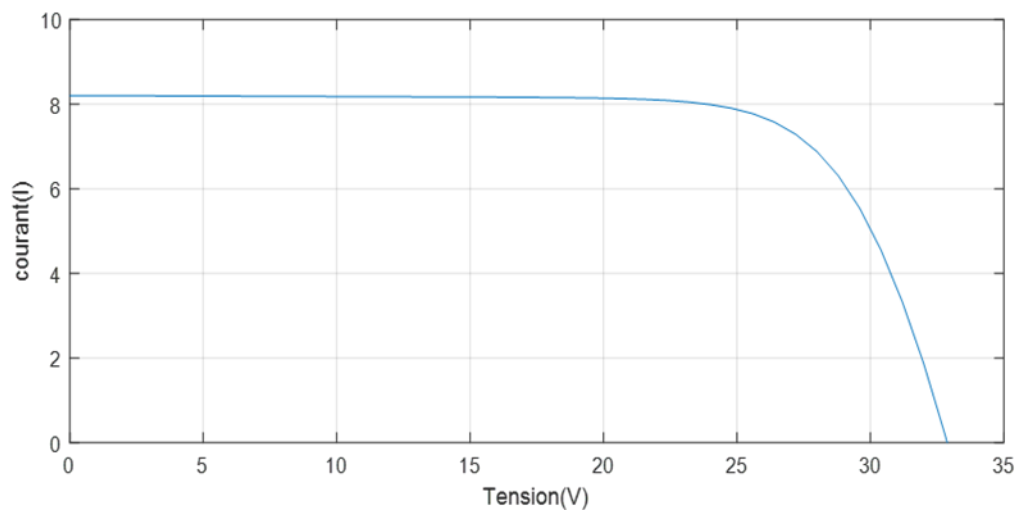
Le schéma de générateur photovoltaïque en environnement Matlab/Simulink est représenté par :



**Figure II.3: Schéma de générateur PV en MATLAB/SIMULINK**

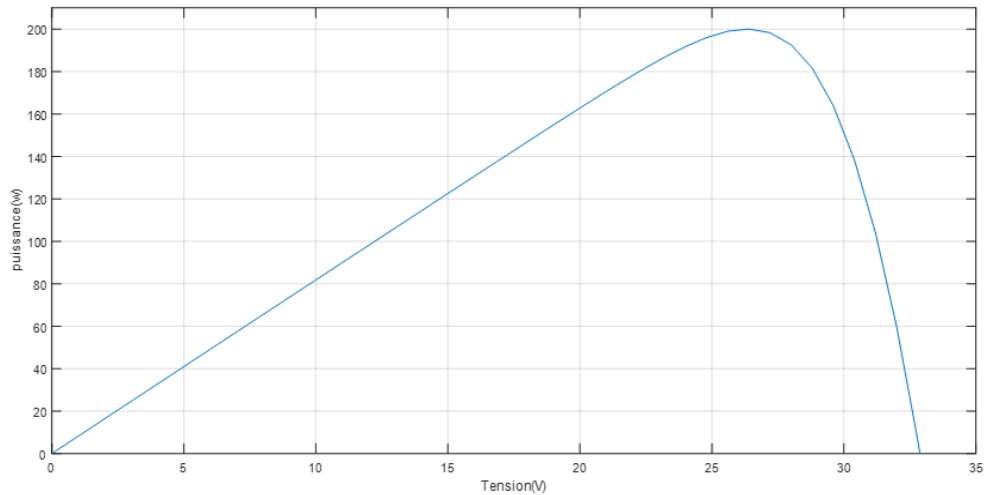
Les résultats de simulation de générateur photovoltaïque sont représentés par la figure (II.3) ces figures représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension à  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

La figure (II.4) représente la caractéristique courant – tension d'un générateur photovoltaïque dans les conditions de  $G=1000\text{ W/m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ . Le courant de court-circuit est égale 8.21A et la tension de circuit ouvert est 32.9 v.



**Figure II.4: Caractéristique I(V) générateur PV ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{ W/m}^2$ )**

La figure (II.5) représente la caractéristique puissance – tension d'un générateur photovoltaïque dans les conditions de  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ . La puissance maximale est  $P_{\text{max}}=200\text{W}$ . On remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale ( $P_{\text{max}}$ ) ensuite elle décroît.



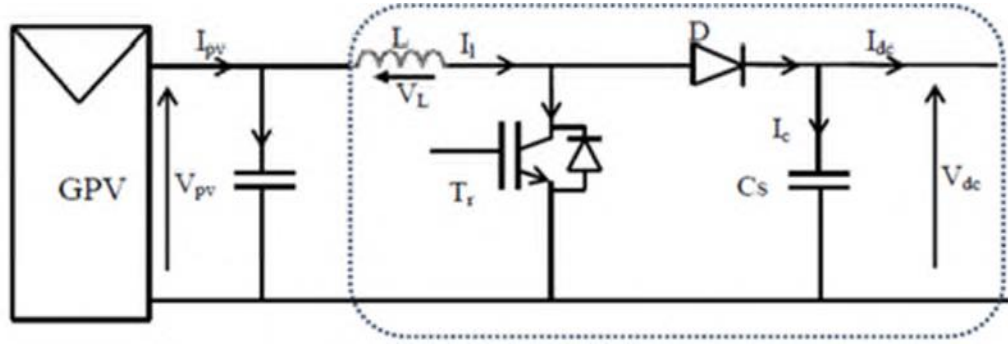
**Figure II.5: Caractéristique  $P(V)$  d'un générateur PV e  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ )**

### II.3 Hacheur Boost:

#### II.3.1 Modélisation d'un convertisseur statique DC/DC ( boost):

Les convertisseurs statiques DC/DC, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. Le convertisseur boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée [28].

La figure (II.6) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque.



**Figure II. 6: Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost)**

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$ , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant ( $T_r$  est passant) et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha.T$  ( $\alpha$  rapport cyclique, et compris entre  $0$  et  $1$ ). la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv}$ , le courant traversant l'inductance augmente linéairement. Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha.T$  à  $T$ .

La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv} - V_{dc}$ , dans cette phase le condensateur  $C_s$  se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [29].

**Les équations électriques du hacheur boost sont:**

$$V_{pv} = L \frac{dI_1}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \quad (\text{II-8})$$

$$(1 - \alpha) I_1 = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II-9})$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II.10).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (\text{II-10})$$

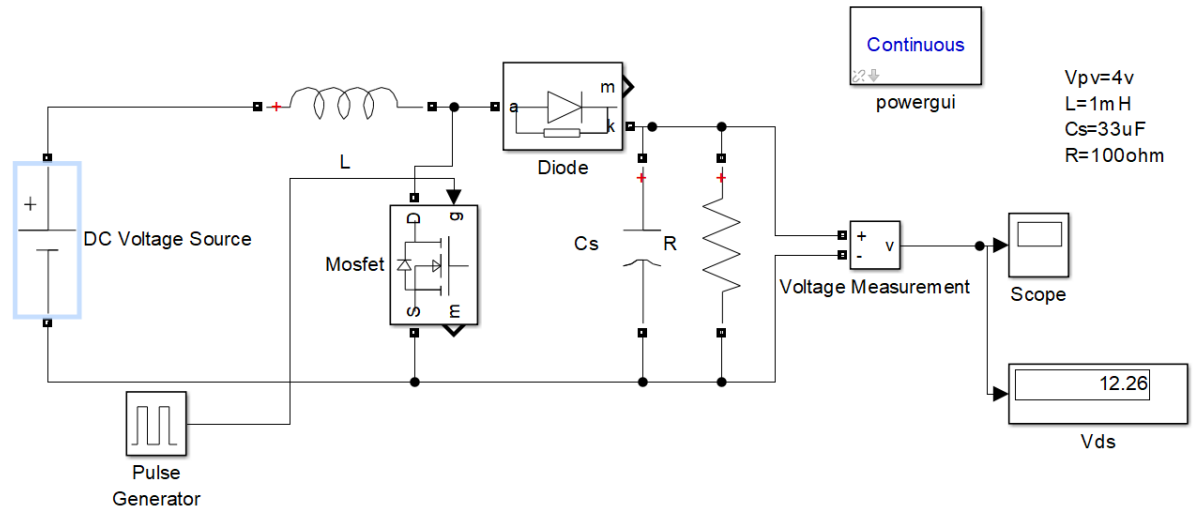
**Le courant par la relation:**

$$I_{dc} = (1 - \alpha) I_1 \quad (\text{II-11})$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

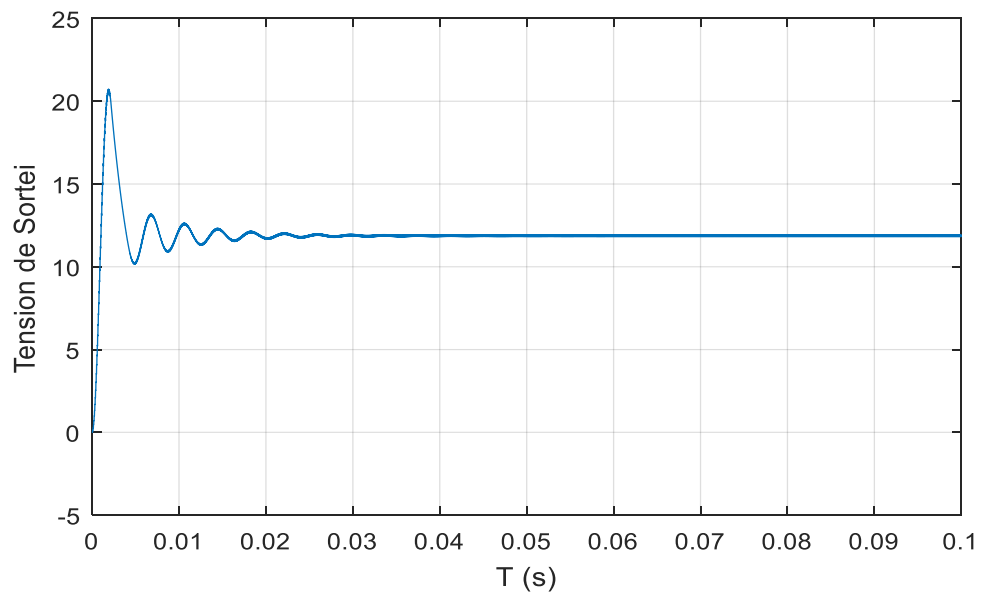
### II.3.2 Simulation de Hacheur Boost:

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



**Figure II.7: Simulation d'un hacheur Boost en MATLAB/SIMULIK**

Résultat de simulation d'un hacheur est représenté par la figure (II.8) :



**Figure II.8: Caractéristique  $v(t)$  d'un hacheur Boost**

### **II.3.3 Adaptation de l'énergie photovoltaïque:**

Le module photovoltaïque est un générateur de puissance finie pouvant fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale (PPM) qui donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnée. La tension et le courant correspondants sont appelés tension optimale et courant optimum. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner le module à sa tension optimale (puissance maximale). Il est possible d'insérer un convertisseur DC/DC d'adaptation, appelé extracteur du point de puissance maximale (maximum power point traqueur (MPPT)), entre la source photovoltaïque et la charge, qui permet la recherche du (PPM) [30].

### **II.3.4 La commande du point de puissance maximale (MPPT):**

Par une commande MPPT (maximum power point tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soit les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande ainsi place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{ppm}$ ,  $I_{ppm}$ ). Le premier système de puissance MPPT a été introduits en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum [30].

## **II.4 L'onduleur Triphasé:**

### **II.4.1 Modélisation d'un onduleur triphasé:**

Le convertisseur statique permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences réglables à partir d'un réseau standard. Après redressement, la tension filtrée  $U_0$  (étage continu) est appliquée à l'onduleur.

Les composants de l'électronique de puissances (interrupteurs) sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement.

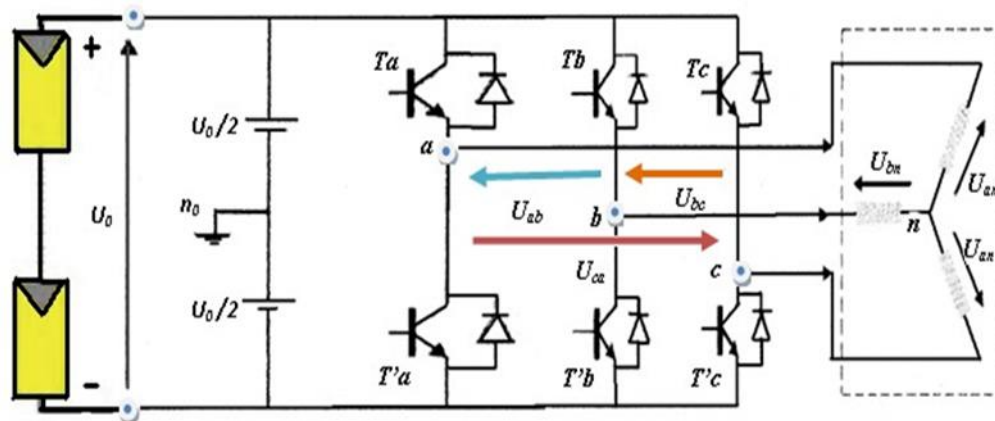
A titre indicatif, les transistors MOSFET, sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible. Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors MOSFET mais davantage plus puissants (quelques KHz à une dizaine de kW). Les

transistors IGBT sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20 KHz à une des dizaines de kW). Les thyristors GTO commutent très lentement les grandes puissances [31].

Ces composants sont du type commandable à l'ouverture et à la fermeture; ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique.

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur.

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras, il y'a donc deux états indépendantes. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.



**Figure II.9: schéma de principe d'un onduleur triphasé**

Les états des deux interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires : l'un étant ON, l'autre OFF.

Pour simplifier l'étude, on suppose que

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec le neutre isolé.

De la figure (II-9) on remarque qu'il ya deux types de tensions à étudier dans cette modélisation :

- Tensions composées ( $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ )

- Tensions simples ( $U_{an}$ ,  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$ )

Pour les tensions composées on a :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_{an0} - U_{bn0} \\ U_{bc} &= U_{bn0} - U_{cn0} \\ U_{ca} &= U_{cn0} - U_{an0} \end{aligned} \quad (\text{II-12})$$

$U_{an0}$ ,  $U_{bn0}$ ,  $U_{cn0}$ , peuvent être considérées comme des tensions d'entrée à l'onduleur (tensions continues).

$$\begin{aligned} U_{an0} &= U_{an} - U_{n0} \\ U_{bn0} &= U_{bn} - U_{n0} \\ U_{cn0} &= U_{cn} - U_{n0} \end{aligned} \quad (\text{II-13})$$

$U_{an}$ ,  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$  sont les tensions simples de la machine et  $U_{n0}$  est la tension fictive entre le neutre de la machine et le point fictif d'indice "o".

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors:

$$U_{an} = U_{bn} - U_{cn} = 0 \quad (\text{II-14})$$

La substitution de (II-14) dans (II-13) on obtient:

$$U_{n0} = \frac{1}{3}(U_{an0} + U_{bn0} + U_{cn0}) \quad (\text{II-15})$$

En remplaçant (II-15) dans (II-12) on obtient:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{an} &= \frac{2}{3}U_{an0} - \frac{1}{3}U_{bn0} - \frac{1}{3}U_{cn0} \\ U_{bn} &= -\frac{1}{3}U_{an0} + \frac{2}{3}U_{bn0} - \frac{1}{3}U_{cn0} \\ U_{cn} &= -\frac{1}{3}U_{an0} - \frac{1}{3}U_{bn0} + \frac{2}{3}U_{cn0} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-16})$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice  $[T]$  assurant le passage continu – alternatif, [matrice de transfert  $T$ ].

$$[U_{AC}] = [T][U_{DC}] \quad (\text{II-17})$$

Tel que :

$$[U_{AC}] = [U_{an}; U_{bn}; U_{cn}] \quad (\text{II-18})$$

$$[U_{DC}] = [U_{an0}; U_{bn0}; U_{cn0}] \quad (\text{II-19})$$

$$[UA] = U_{an0}(S_a \ S_b \ S_b) \quad (II-20)$$

Avec la matrice de transfert T

$$T = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (II-21)$$

Donc :

$$[U_{AC}] = U_{n0} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II-22)$$

#### II.4.2 Simulation de l'onduleur triphasé:

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

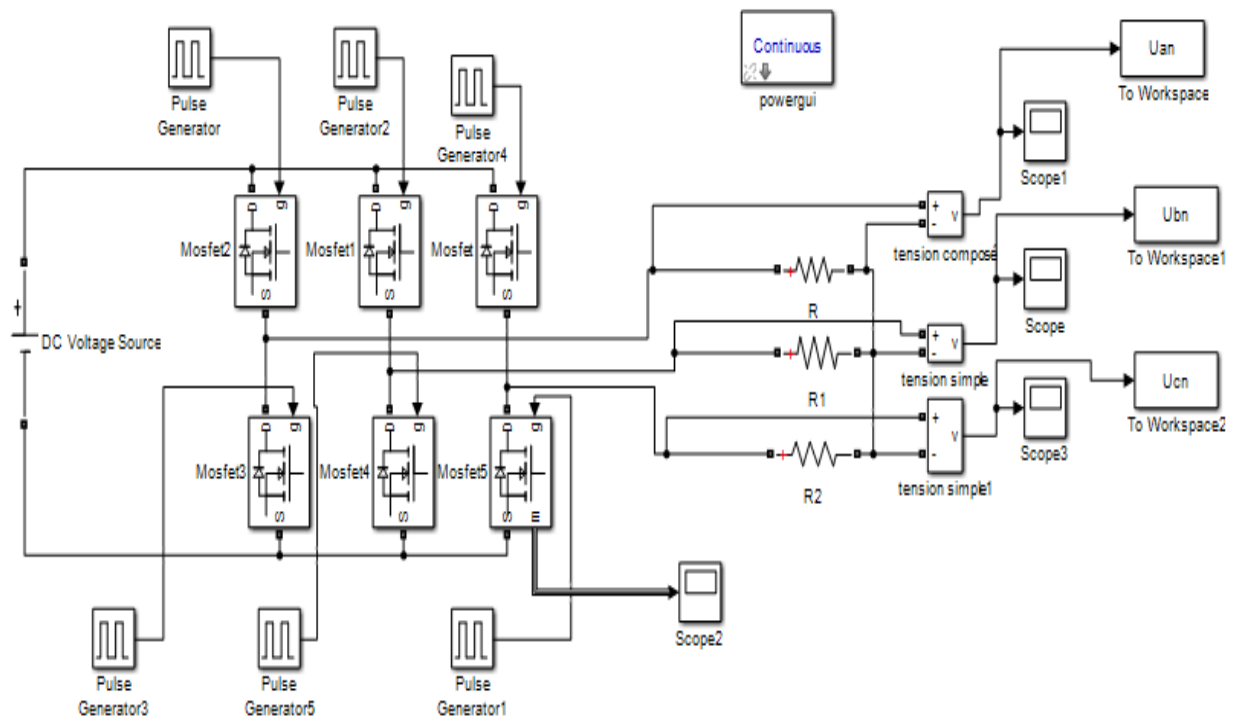
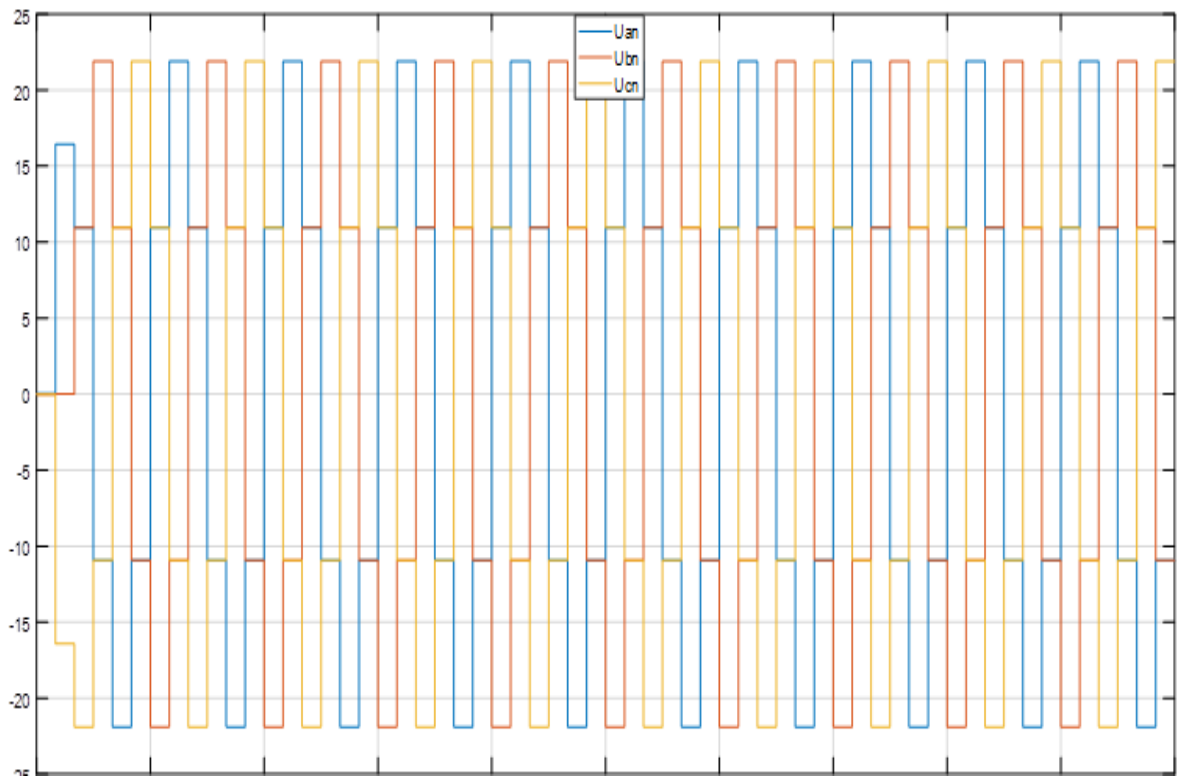


Figure II.10: Schéma d'un onduleur en MATLAB/SIMULIK

Résultat de simulation d'un onduleur est représenté par la figure (II.11):



**Figure II.11: caractéristique ( $U_{an}(t)$  et  $U_{bn}(t)$  et  $U_{cn}(t)$ ).**

#### II.4.3 Généralité sur commande de l'onduleur:

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. Le choix d'une stratégie de commande dépend du type de charge à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme.

A faibles fréquences, ils sont pilotés à pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur). A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode). Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, on trouve différentes stratégies de commande de l'onduleur, en pleine onde ( $180^\circ$ ), MLI sinusoïdale, vectorielle et par hystérésis.

En pleine onde ( $180^\circ$ ) les tensions obtenues sont très riches en harmonique ce qui provoque l'échauffement des charges.

La MLI sinusoïdale demande de déterminer les instants de commutations des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur séparément.

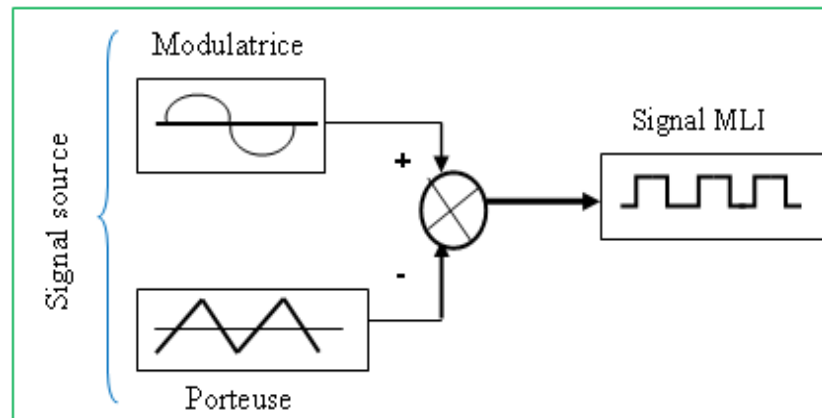
La commande par hystérésis est très simple et très rapides mais sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable [32].

#### II.4.4 Contrôle du courant par M.L.I:

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La M.L.I. est obtenue par la comparaison de deux signaux :

Un signal triangulaire de haute fréquence (**F<sub>p</sub>**) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence **F<sub>m</sub>** << **F<sub>p</sub>**. Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur.



*Figure II.12: schéma synoptique d'un M.L.I*

Ces deux signaux sont définis comme étant :

**II.4.4.1 L'onde porteuse** : qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).

**II.4.4.2 L'onde modulatrice** : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (En général une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres qui caractérisent la MLI

**II.4.4.3 L'indice de modulation  $M_L$**  : appelé aussi (taux d'harmonique) qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse :

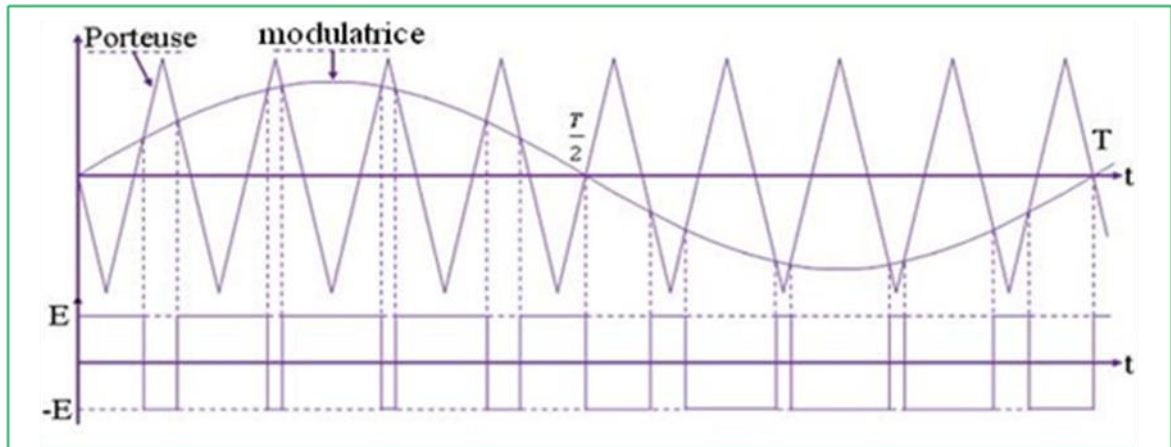
$$M_L = \frac{V_m}{V_p} < 1 \quad (\text{II-23})$$

Le rapport de modulation  $M_r$  : qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice :

$$M_r = \frac{F_p}{F_m} \quad (\text{II-24})$$

#### II.4.4.4 MLI à échantillonnage naturel:

L'échantillonnage naturel, est un processus de sélection naturelle des points échantillonnés, c'est la technique la plus utilisée et la plus simple, consiste à comparer le signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (Modulateur). L'intersection de ces deux signaux définit les instants de commutation des interrupteurs.



*Figure II.1: M.L.I à échantillonnage naturel*

### II.5 Moteur Asynchrone:

#### II.5.1 Hypothèses simplificatrices:

Du fait que la machine est un système complexe et non linéaire, plusieurs phénomènes sont introduits lors du fonctionnement. Ce qui rend la machine difficile à commander et à modéliser. Pour pallier à ce problème, on tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes [31] :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- On néglige l'effet des pertes fer.
- La répartition de l'induction magnétique dans l'espace est sinusoïdale, et la perméabilité est constante.
- Les effets des courants de Foucault, ainsi que l'effet de peau et d'échauffement sont négligés.
- L'entrefer de la machine est constant et l'effet des encoches est négligé.
- Les inductances propres sont des constantes et les inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements.

### **II.5.2 Principe de fonctionnement:**

Le moteur asynchrone fonctionne selon le principe de l'induction de courants dans le bobinage du rotor par un champ tournant créé dans l'entrefer. Ce champ tournant engendre un couple moteur qui agit sur les conducteurs des courants induits, ce qui entraîne le démarrage et la rotation du rotor dans la même direction que le champ tournant. Le glissement, exprimé en pourcentage et noté "g", est la grandeur qui mesure la différence de vitesse entre le champ tournant et le rotor [32].

### **II.5.3 Modélisation du moteur asynchrone:**

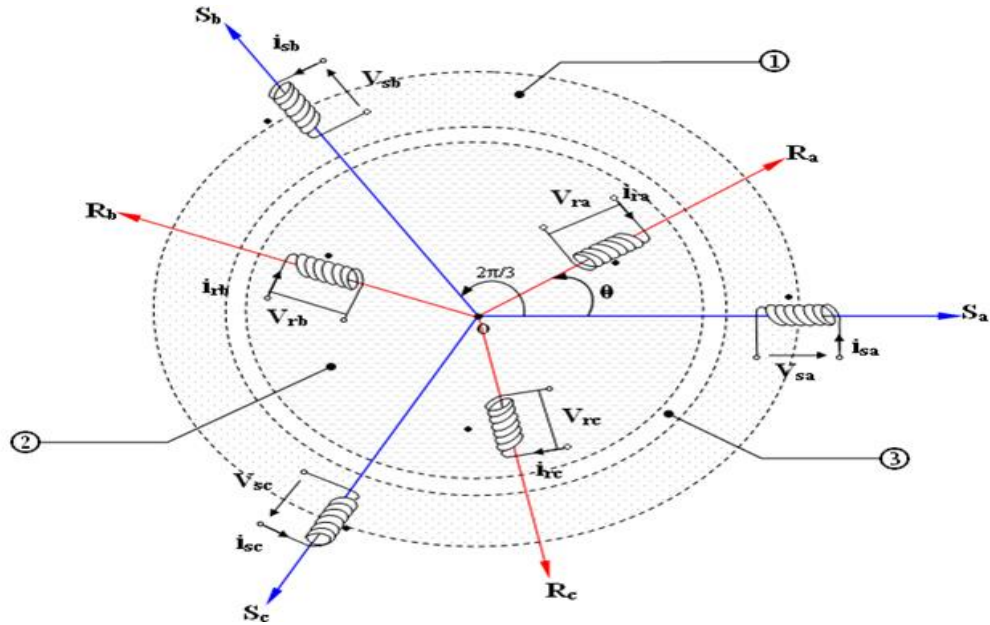
La machine asynchrone a l'avantage d'être robuste, peu coûteuse et simple à construire. Cependant, cette simplicité s'accompagne d'une grande complexité physique due aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Pour élaborer des approches de contrôle qui assurent le rendement attendu, nous avons besoin d'un modèle qui reflète le fonctionnement de la machine dans des régimes transitoires et à l'état d'équilibre [33].

Nous établissons le modèle mathématique en trois phases de la machine asynchrone qui sera adoptée plus tard, ainsi que ses différentes transformations dans les cadres biphase Concordia et Park.

#### **II.5.3.1 Modèle de la machine asynchrone:**

La structure principale de la machine asynchrone dans le repère (ABC) est présentée par la Figure (II.14) Les trois axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle  $2\pi/3$ , ainsi les axes

rotoriques. Un angle  $\theta$  repère le déphasage entre les axes rotoriques par rapport aux axes statoriques.



**Figure II.14: Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasée**

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée, les équations de la machine s'écrivent comme suit:

### II.5.3.2 Equations électriques:

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

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

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

On définit les tensions statoriques et rotoriques comme suit :

#### II.5.3.2.1 Phases statoriques :

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

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

$R_s$  : Résistance de la phase du stator.

**II.5.3.2.2 Phases rotoriques:**

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

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

$Rr$  : Résistance de la phase du rotor.

**II.5.3.3 Equations magnétiques:**

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

Avec :  $\alpha = \omega t$

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

A partir des relations (II.26) ; (II.27) et (II.28) les équations électriques deviennent :

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

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

#### II.5.3.4 Equation mécanique:

L'équation mécanique régissant la vitesse de rotation de la machine est donnée par

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f \cdot \omega \quad (\text{II.36})$$

Avec :

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

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

$C_r$  : Couple résistant de la charge.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

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

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

Avec  $p$  est le nombre de paires de pôles.

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

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

#### II.5.3.5 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée:

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

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

Pour transformer un système triphasé  $[abc]$  en un système biphasé  $[dq]$  avec une composante homopolaire comme indique dans l'équation suivante:

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

Le passage inverse est donner par:

$$[X_{abc}] = [P_{(\theta)}]^{-1} \cdot [X_{dq0}] \quad (\text{II.39})$$

$X$  : peut être la tension, le courant ou le flux.

$[P_{(\theta)}]$  : peut être la tension, le courant ou le flux.

$[P_{(\theta)}]^{-1}$  : est la matrice de transformation inverse de Park.

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

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

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

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

La matrice de passage inverse est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

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

#### II.5.3.6 Equations de la machine asynchrone dans les axes $d$ et $q$ :

La représentation de la machine dans les axes  $d$  et  $q$  est donnée par la Figure (II.15).

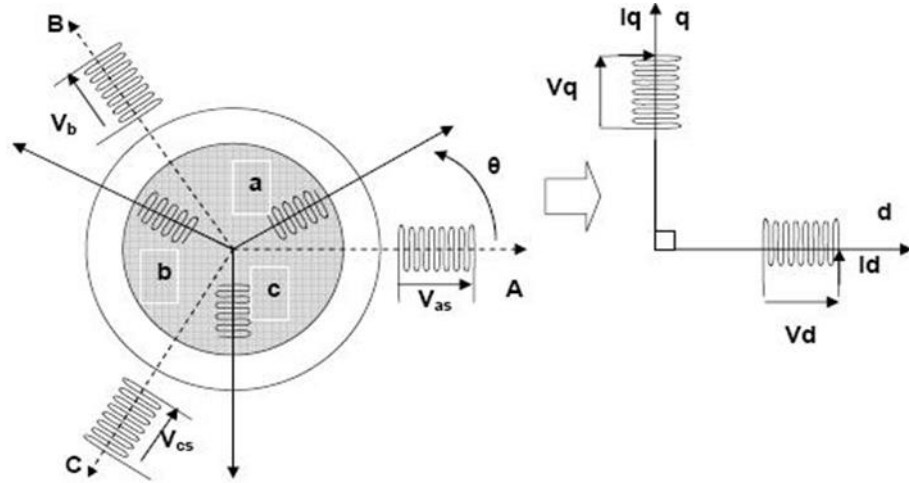


Figure II. 15: Les enroulements équivalents dans le repère (d, q).

### II.5.3.7 Equations électriques:

En appliquant la transformée de Park aux équations électriques (II.25) et (II.26) citées précédemment on aura :

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{qs} \quad (\text{II.42})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{ds} \quad (\text{II.43})$$

$$V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{qr} \quad (\text{II.44})$$

$$V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{dr} \quad (\text{II.45})$$

Dans le repère de PARK (d,q) tournant à la vitesse angulaire  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  l'équation suivant:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \quad (\text{II.46})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \quad (\text{II.47})$$

$$V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \quad (\text{II.48})$$

$$V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \quad (\text{II.49})$$

### II.5.3.8 Equations magnétiques:

L'application de la transformation de Park sur l'équation (II.4)

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (\text{II.50})$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (\text{II.51})$$

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II.52})$$

$$\Phi_{qr} = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{II.53})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.54})$$

Le nombre des paramètres électromagnétiques est réduit, tel que :

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique.

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

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

#### II.5.3.9 Equation mécanique et couple électromagnétique:

L'équation mécanique reste inchangée dans le repère (d,q). Par contre, le couple électromagnétique est concerné par la transformation. En dérivant les inductances mutuelles et en appliquant la transformée de Park pour l'expression (II.37), on aura l'expression suivante:

$$C_{em} = p \frac{3}{2} (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.55})$$

#### II.5.4 Choix du repère:

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (d,q) qui fait un angle électrique  $\theta_s$  avec le stator et qui fait également un angle électrique  $\theta_r$  avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre.

Il existe trois choix important. On peut fixer le repère (d,q) au stator, au rotor ou au champ tournant. Rappelons que le repère (d,q) est le repère mobile, c'est-à-dire qu'il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park  $\theta_s$  et  $\theta_r$  afin d'effectuer les rotations.

### II.5.5 Référentiel fixe par rapport au rotor:

Ce référentiel est le seul qui n'introduise pas de simplification dans la formulation des équations. Il fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent ; raison pour laquelle ce référentiel est utilisé en commande.

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (\text{II.56})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = \omega_r \quad (\text{II.57})$$

Les équations électriques prennent la forme

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \quad (\text{II.58})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \quad (\text{II.59})$$

$$V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \quad (\text{II.56})$$

$$V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \quad (\text{II.61})$$

Avec les flux :

$$\Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (\text{II.62})$$

$$\Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (\text{II.63})$$

$$\Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (\text{II.64})$$

$$\Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{II.65})$$

Avec :

$\sigma : 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  : Le coefficient de fuite totale.

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$  : Constante de temps statorique.

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$  : Constante de temps rotorique.

Après arrangement des équations, on aboutit à :

$$\frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{1}{T_s \sigma} i_{ds} + \left( \omega_r + \frac{1}{\sigma} \omega \right) i_{qs} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} i_{dr} + \frac{M}{L_s \sigma} \omega i_{qr} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{ds} \quad (\text{II.66})$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\left( \omega_r + \frac{1}{\sigma} \omega \right) i_{ds} - \frac{1}{T_s \sigma} i_{qs} - \frac{M}{L_s \sigma} \omega i_{dr} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} i_{qr} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{qs} \quad (\text{II.67})$$

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{M}{L_r T_s \sigma} i_{ds} - \frac{M}{L_r \sigma} \omega i_{qs} - \frac{1}{T_r \sigma} i_{dr} + \left( \omega_r - \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} \omega \right) i_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{ds} \quad (\text{II.68})$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{M}{L_r\sigma} \omega i_{ds} + \frac{M}{L_r T_s \sigma} i_{qs} + \left( -\omega_r + \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} \omega \right) i_{dr} - \frac{1}{T_r \sigma} i_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{qs} \quad (\text{II.69})$$

Mise sous forme d'équation d'état :

$$\frac{d}{dt}[X] = [A][X] + [B][V]$$

$$[Y] = [C][X] + [D][U]$$

$[A]$  : la matrice fondamentale qui caractérise le système.

$[B]$  : la matrice d'entrée.

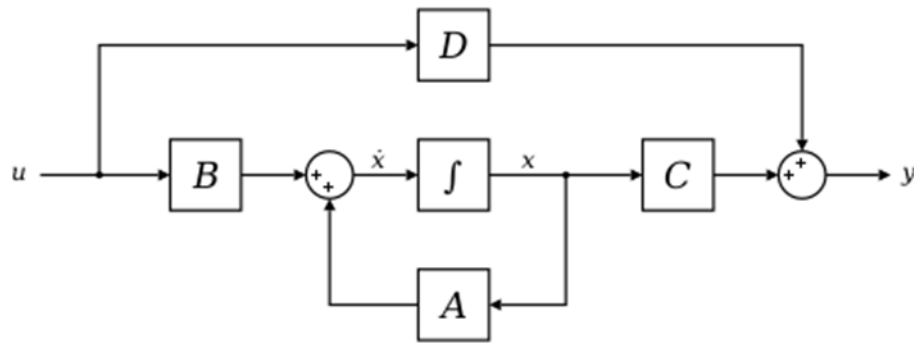
$[C]$  : la matrice de sortie.

$[D]$  : la matrice de transmission direct.

$[U]$  : le vecteur de commande.

$[X]$  : le vecteur d'état.

$[Y]$  : le vecteur de sortie.



**Figure II.16: schéma de représentation d'état**

Sous forme matricielle on peut écrire le système d'équations comme suit :

$$\frac{d}{dt}[X] = [A][X] + [B][V]$$

Avec :

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.70})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s\sigma} & \left(\omega_r + \frac{1}{\sigma}\omega\right) & \frac{M}{L_s T_r \sigma} & \frac{M}{L_s \sigma} \omega \\ -\left(\omega_r + \frac{1}{\sigma}\omega\right) & -\frac{1}{T_s\sigma} & -\frac{M}{L_s \sigma} \omega & \frac{M}{L_s T_r \sigma} \\ \frac{M}{L_r T_s \sigma} & -\frac{M}{L_r \sigma} \omega & -\frac{1}{T_r \sigma} & \left(\omega_r - \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} \omega\right) \\ \frac{M}{L_r \sigma} \omega & \frac{M}{L_r T_s \sigma} & \left(-\omega_r + \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} \omega\right) & -\frac{1}{T_r \sigma} \end{bmatrix} \quad (\text{II.71})$$

$$[A] = [A_1] + \omega [A_2] + \omega_r [A_3] \quad (\text{II.72})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s\sigma} & 0 & \frac{M}{L_s T_r \sigma} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_s\sigma} & 0 & \frac{M}{L_s T_r \sigma} \\ \frac{M}{L_r T_s \sigma} & -\frac{M}{L_r \sigma} \omega & -\frac{1}{T_r \sigma} & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_r T_s \sigma} & 0 & -\frac{1}{T_r \sigma} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sigma} & 0 & \frac{M}{L_s \sigma} \\ -\frac{1}{\sigma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_s \sigma} & 0 & -\frac{M^2}{L_s L_r \sigma} \\ \frac{M}{L_r \sigma} & 0 & \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.73})$$

$$[U] = [V] = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad 0 \quad 0] \quad (\text{II.74})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s \sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s \sigma} \\ -\frac{M}{L_s L_r \sigma} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_s L_r \sigma} \end{bmatrix} \quad (\text{II.75})$$

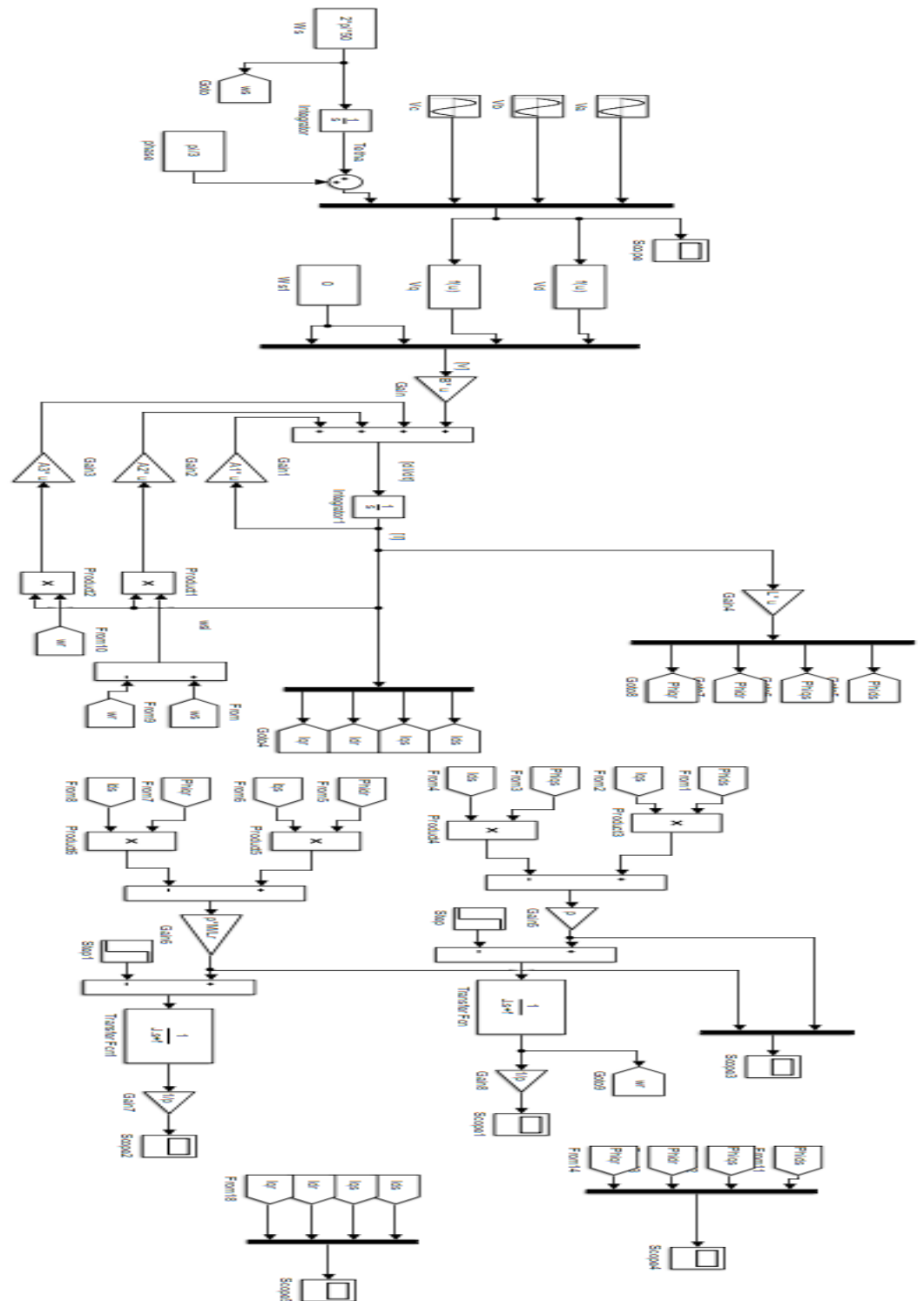
Equations de puissance et de couple :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.76})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \frac{L_r}{M} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.77})$$

### II.5.6 Simulation de moteur asynchrone:

Le schéma de moteur asynchrone en environnement Matlab/Simulink est représenté par :

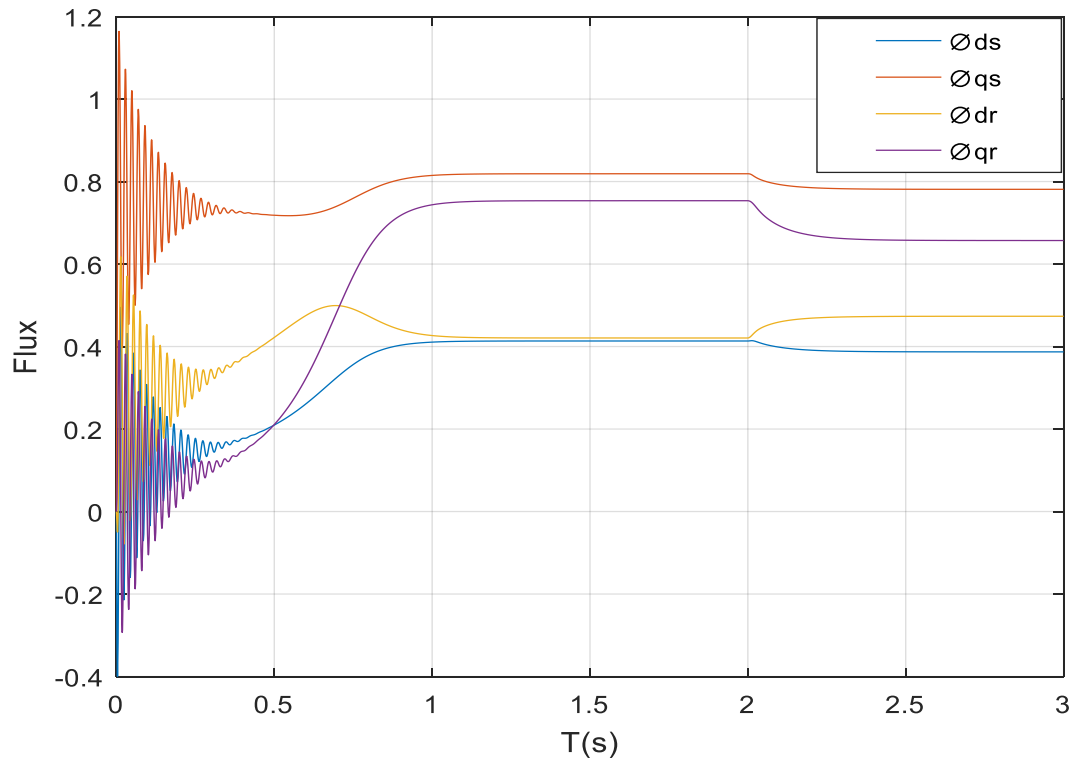


**Figure II.17: Le schéma de moteur asynchrone en environnement Matlab/Simulink**

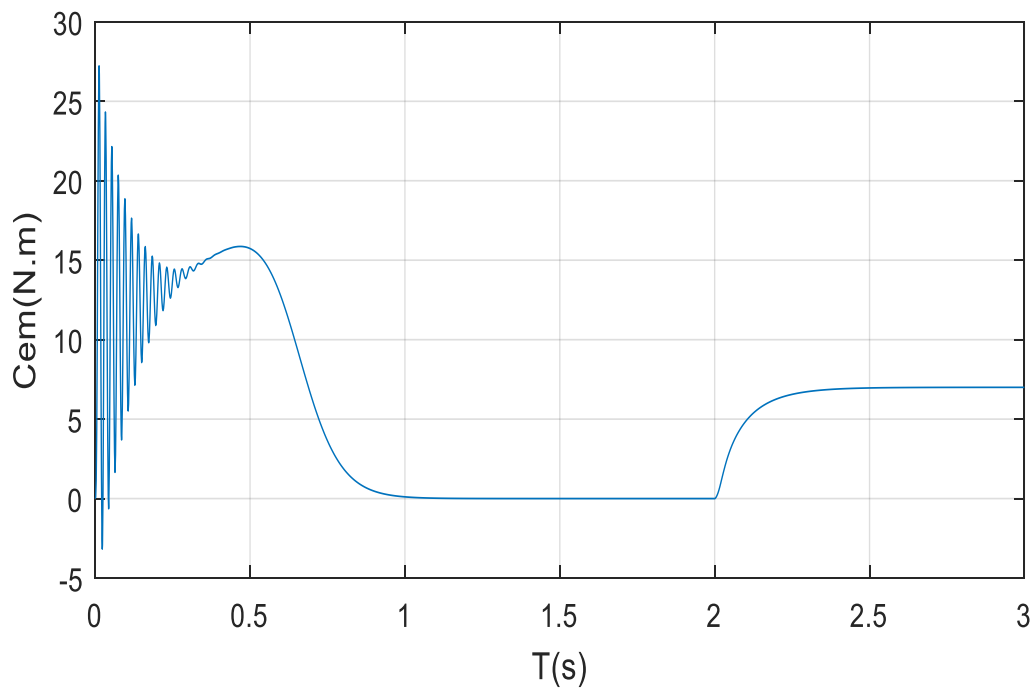
Nous ouvrons un nouveau fichier dans le programme Matlab pour définir nos variables :

|     |                                                                                        |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | clc ;                                                                                  |
| 2.  | clear ;                                                                                |
| 3.  | Rr=3.805 ;                                                                             |
| 4.  | J=0.031 ;                                                                              |
| 5.  | f=0 ;                                                                                  |
| 6.  | p=2 ;                                                                                  |
| 7.  | Rs=4.85 ;                                                                              |
| 8.  | M=0.258 ;                                                                              |
| 9.  | Ls=0.274 ;                                                                             |
| 10. | Lr=0.274 ;                                                                             |
| 11. |                                                                                        |
| 12. | R=[Rs 0 0 0 ; 0 Rs 0 0 ; 0 0 Rr 0 ; 0 0 0 Rr]                                          |
| 13. | L=[Ls 0 M 0 ; 0 Ls 0 M ; M 0 Lr 0 ; 0 M 0 Lr]                                          |
| 14. | sig=1-M^2/(Ls*Lr)                                                                      |
| 15. | Tr=Lr/Rr                                                                               |
| 16. | Ts=Ls/Rs                                                                               |
| 17. |                                                                                        |
| 18. | B=[1/(Ls*sig) 0 0 0 ; 0 1/(Ls*sig) 0 0 ; -M/(Ls*Lr*sig) 0 0 0 ; 0 -M/(Ls*Lr*sig) 0 0 ] |
|     | A1=[-1/(Ts*sig) 0 M/(Ls*Tr*sig) 0 ; 0 -1/(Ts*sig) 0 M/(Ls*Tr*sig) ; M/(Lr*Ts*sig) 0 -  |
|     | 1/(Tr*sig) 0 ; 0 M/(Ls*Ts*sig) 0 -1/(Tr*sig)]                                          |
|     | A2=[0 1 0 0 ; -1 0 0 0 ; 0 0 0 1 ; 0 0 -1 0]                                           |
|     | A3=[0 1/sig 0 M/(Ls*sig) ; -1/sig 0 -M/(Ls*sig) 0 ; 0 -M/(Lr*sig) 0 -M^2/(Ls*Lr*sig) ; |
|     | M/(Lr*sig) 0 M^2/(Ls*Lr*sig) 0]                                                        |

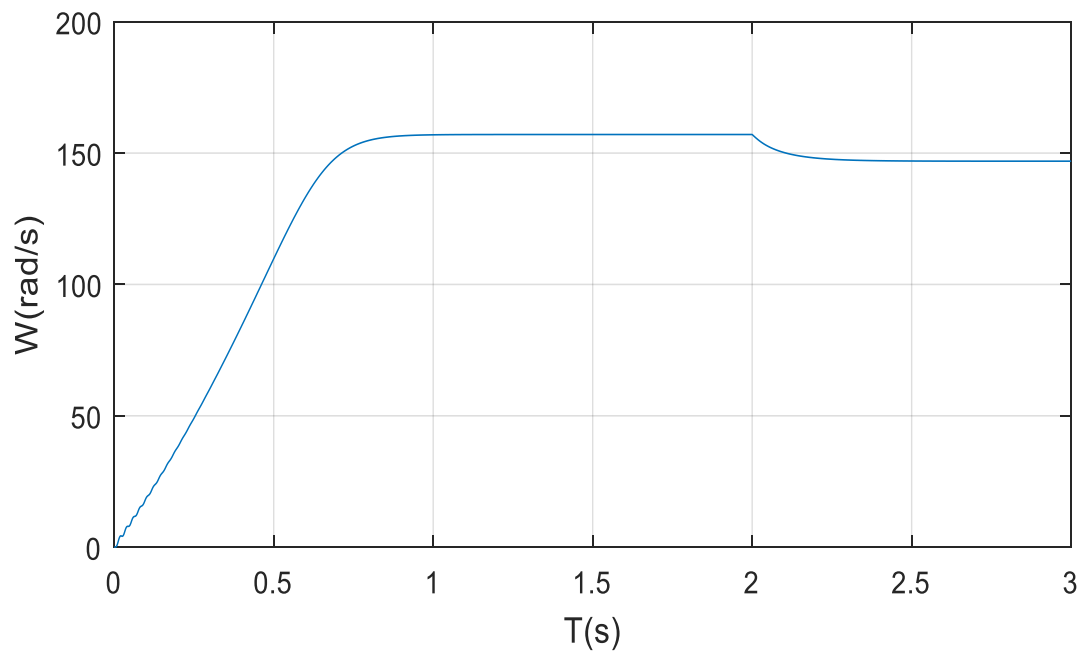
Résultat de simulation de moteur asynchrone est représenté par la figure (II.17):



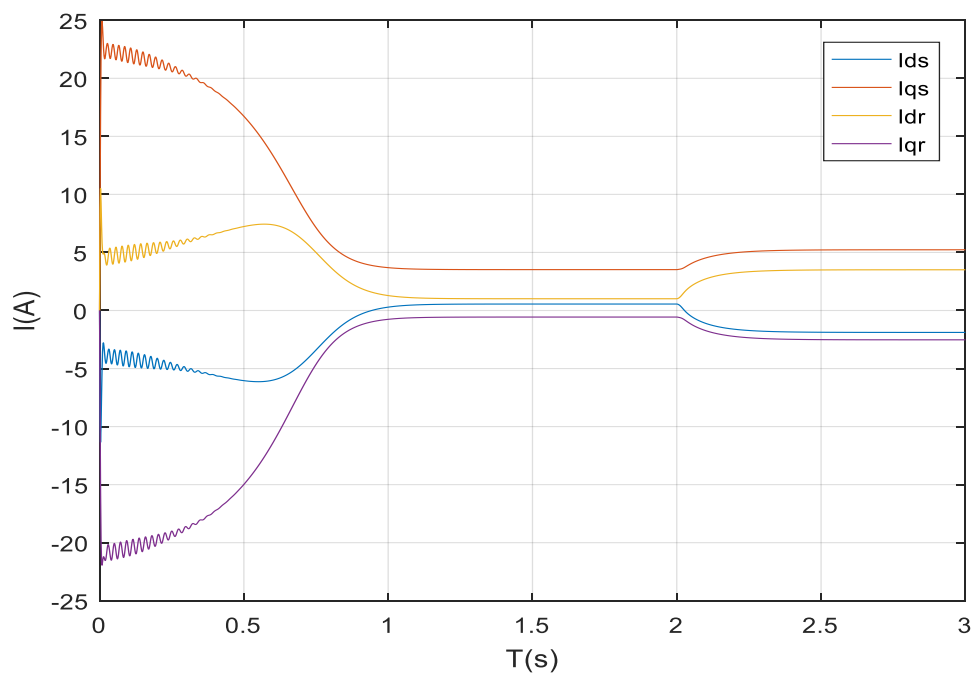
**Figure II.18: Allure du flux**



**Figure II.19: Allure du couple électromagnétique de la machine ( $C_r = 7$  N.m)**



**Figure II.20: Allure de la vitesse de la machine**



**Figure II.21: Allure du courant de la machine**

**• Interprétation des résultats obtenue:**

D'après les résultats obtenus, on remarque que le courant pendant le démarrage il atteint la valeur de 25 A ce qui est connus dans la théorie des machines électriques que le courant de démarrage atteint une valeur importante, ainsi que le couple de démarrage lui aussi atteint une valeur importante de l'ordre de 27 N.m. et lorsqu'on applique un couple résistant de 7N.m à 2 secondes on remarque une légère augmentation dans le courant de la machine ainsi que le couple de la machine et que la vitesse de machine diminue.

**II.6 Conclusion:**

La modélisation et la simulation des systèmes photovoltaïques de pompage sont des outils très utiles pour la conception, l'analyse et l'optimisation de ces systèmes. Les modèles mathématiques peuvent être utilisés pour simuler le comportement des panneaux solaires, des batteries, des pompes et des charges électriques, ainsi que pour évaluer les performances et l'efficacité énergétique des systèmes de pompage solaire. Les résultats de simulation peuvent également être utilisés pour optimiser la taille et la configuration des différents composants du système, afin de maximiser le rendement et de minimiser les coûts d'installation et d'exploitation



### *Chapitre III:*

## *Réalisation d'un système de pompage photovoltaïque*

### **III.1 Introduction:**

Dans ce chapitre, nous étudierons l'angle du soleil, l'étendue du rayonnement et la température dans la wilaya d'El Oued. Ensuite, nous présenterons les équations utilisées pour calculer le débit et le rendement du générateur et de l'électropompe. Nous expliquerons également en détail notre travail pratique réalisé dans la mise en place du système photovoltaïque. Pour améliorer l'efficacité du panneau solaire, nous mettrons en place un algorithme utilisant un contrôleur Arduino pour réguler le moteur, qui à son tour orientera le panneau selon la direction de la lumière du soleil.

### **III.2 Le rayonnement solaire dans la wilaya d'El Oued:**

Il existe plusieurs approches pour modéliser le rayonnement solaire sur un panneau solaire, mais la méthode la plus couramment utilisée est la méthode de la boîte à ciel (ou skybox en anglais).

Cette méthode consiste à diviser le ciel en plusieurs zones, chacune ayant une intensité, lumineuse et une direction spécifiques. Ensuite, pour chaque zone, on calcule la partie du rayonnement qui atteint la surface du panneau, en tenant compte de facteurs tels que l'angle d'incidence, la réflexion, la transmission et la diffusion.

Pour faciliter les calculs, on utilise souvent des modèles mathématiques simplifiés qui prennent en compte les caractéristiques du panneau solaire (par exemple, sa surface, son épaisseur et son type de matériau), ainsi que les conditions météorologiques locales (par exemple, la température, la pression, l'humidité et la pollution).

Ces modèles sont généralement implémentés dans des logiciels de simulation (par exemple, PVSyst, Trace Pro, ou SAM) qui permettent de prédire la performance d'un système photovoltaïque en fonction de différents paramètres, tels que l'orientation et l'inclinaison du panneau, le nombre de panneaux, la capacité de stockage de la batterie, etc.

En résumé, la modélisation du rayonnement solaire sur un panneau solaire est une tâche complexe qui fait appel à des concepts de physique, de mathématiques et d'informatique, mais qui est essentielle pour concevoir et optimiser des installations photovoltaïques efficaces et durables.

**Tableau 3- Les résultats du tableau ont été obtenus à partir du programme PVsyst**

| Régions | Irradiation annuelle |                |                              | Eté    |                |                              | Hiver  |                |                              |
|---------|----------------------|----------------|------------------------------|--------|----------------|------------------------------|--------|----------------|------------------------------|
|         | In (°)               | F <sub>t</sub> | Glo<br>(kwh/m <sup>2</sup> ) | In (°) | F <sub>t</sub> | Glo<br>(kwh/m <sup>2</sup> ) | In (°) | F <sub>t</sub> | Glo<br>(kwh/m <sup>2</sup> ) |
| El Oued | 35                   | 1.17           | 2488                         | 16     | 1.20           | 2564                         | 56     | 1.23           | 2623                         |

$I_n$  : Inclinaison sur plan.

$F_t$  : Facteur de transposition .

$Glo$  : L'énergie globale capturé sur plan

### III.3 Expressions utilisées dans le calcul:

Les différentes expressions utilisées sont :

#### III.3.1 Calcul du débit:

$$Q = V \times S \quad (III.1)$$

Avec :

$V$  : la vitesse de la machine a courant continue.

$S$  : la surface de la tuyauterie intérieur de la pompe.

#### III.3.2 Calcul du rendement du générateur photovoltaïque:

$$\eta_{pv} = \frac{P}{E_s \cdot S \cdot N_s \cdot N_p} \quad (III.2)$$

Avec :

$P$  : la puissance électrique ( $P = U \cdot I$ )(w).

$E_s$  : l'ensoleillement mesuré ( $W/m^2$ ).

$S$  : la surface du panneau utilisée ( $m^2$ ).

$N_s$  : le nombre de panneaux en série.

$N_p$  : le nombre de panneaux en parallèle.

### III.3.3 Rendement du groupe motopompe:

$$\eta_{\text{Pompe}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{3600 \cdot P} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$\rho$  : La masse volumique de l'eau.

$g$  : la gravité.

3600 : le nombre de secondes par heure.

$Q$  : le débit de l'eau pompé en  $l/h$  ou  $m^3/h$ .

$H$  : la hauteur manométrique totale ( $m^2$ ).

### III.3.4 Le rendement total:

$$\eta_T = \eta_{pv} \cdot \eta_{pompe} \quad (\text{III.4})$$

## III.4 La partie pratique:

### III.4.1 Les instruments utilisées:

#### ❖ Carte Arduino UNO:

L'Arduino Uno est un microcontrôleur programmable qui permet, comme son nom l'indique, de contrôler des éléments mécaniques : systèmes, lumières, moteurs, etc. Cette carte électronique permet donc à son utilisateur de programmer facilement des choses et de créer des mécanismes automatisés, sans avoir de connaissances particulières en programmation. Il est un outil pensé et destiné aux inventeurs, artistes ou amateurs qui souhaitent créer leur propre système automatique en le codant de toute pièce.

Il vous suffit de connecter votre carte électronique sur votre ordinateur et vous pouvez commencer à programmer quelque chose à partir du logiciel Arduino.



**Figure III. 1: Modèle de la carte Arduino UNO**

## ❖ Programme de system poursuite solaire:

Nous avons créé ce code pour contrôler le mouvement du panneau solaire :

```

1.      #include <Servo.h>           //including the library of servo
      motor
2.      Servo myservo;
3.      int initial_position = 90;
4.      int LDR1 = A0;              //connect The LDR1 on Pin A0
5.      int LDR2 = A1;              //Connect The LDR2 on pin A1
6.      int error = 5;
7.      int servopin=9;             //You can change servo just makesure
      its on arduino's PWM pin
8.      void setup()
      {
9.          myservo.attach(servopin);
10.         pinMode(LDR1, INPUT);
11.         pinMode(LDR2, INPUT);
12.         myservo.write(initial_position); //Move servo at 90
      degree
13.         delay(2000);
      }

14.     void loop()
      {
15.         int R1 = analogRead(LDR1); // read LDR 1
16.         int R2 = analogRead(LDR2); // read LDR 2
17.         int diff1= abs(R1 - R2);
18.         int diff2= abs(R2 - R1);

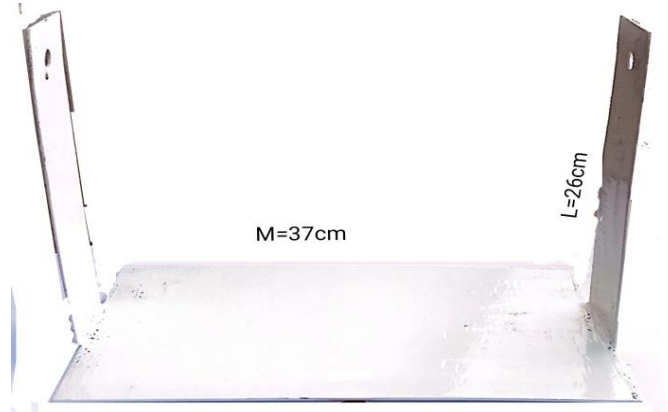
19.         if((diff1 <= error) || (diff2 <= error)) {

20.             } else {
21.                 if(R1 > R2)
22.                 {
23.                     initial_position = --initial_position;
24.                 }
25.                 if(R1 < R2)
26.                 {
27.                     initial_position = ++initial_position;
28.                 }
29.             }
30.             myservo.write(initial_position);
31.             delay(100);
32.         }

```

**❖ Le support:**

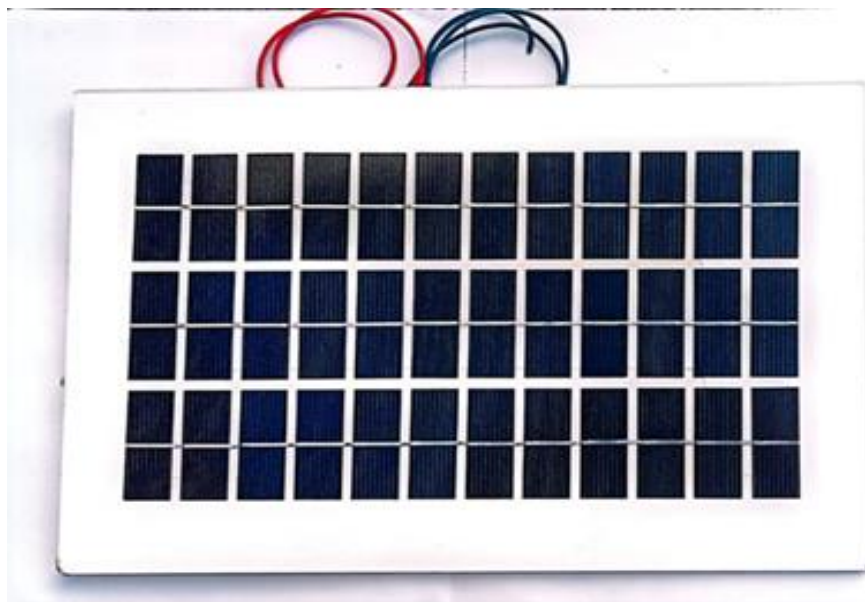
Nous avons utilisé le logiciel CorelDRAW X7 pour concevoir le support, et ensuite nous l'avons matérialisé grâce à une machine laser CNC .



**Figure III. 2: Conception du support de panneau solaire**

**❖ Le Panneau utilisé:**

Un panneau solaire d'une puissance maximale de 6 watts et une tension maximale de 12 volts.



**Figure III. 3: Image du panneau solaire**

### ❖ Le moteur pas à pas:

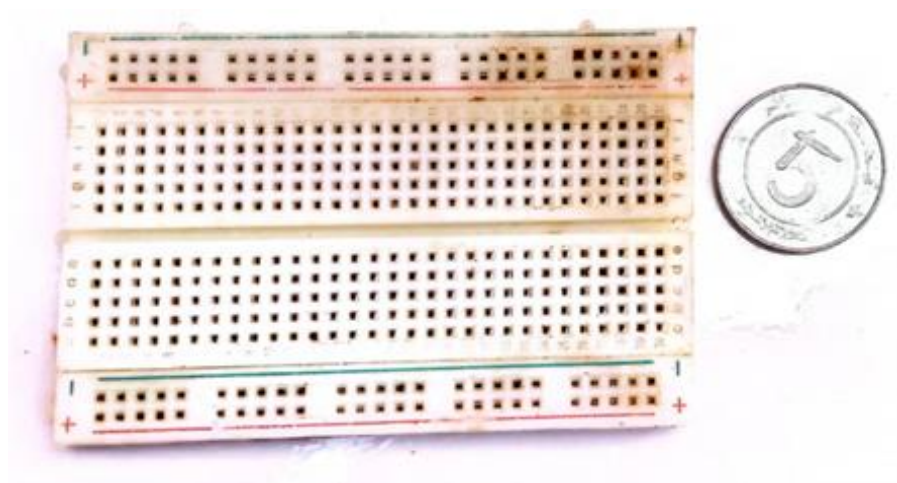
Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction d'impulsions électriques reçues dans ses bobinages. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas. On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour (c'est à dire pour  $360^\circ$ ).



*Figure III. 4: Image du moteur pas à pas*

### ❖ Blac DC:

Nous avons utilisé la carte de connexion afin de faciliter le processus de connexion des éléments entre eux.



*Figure III. 5: Image Blac DC*

### ❖ Les résistances:

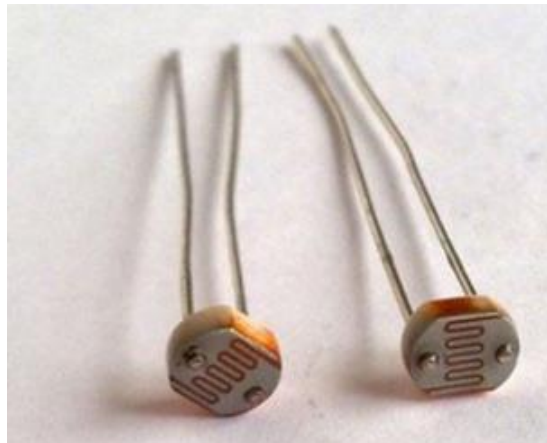
Nous avons connecté deux résistances de 0,25 W et 5 kOhm en série afin d'obtenir une résistance équivalente de 10 kOhm.



*Figure III. 6: Image de deux résistances 10kΩ*

### ❖ Les Photorésistances:

La LDR (ou photorésistance) est une résistance électrique sensible à la lumière. Elle présente une diminution de résistance lorsqu'elle est exposée à la lumière, raison pour laquelle elle a été intégrée dans notre projet.



*Figure III. 7: Image de la résistance photovoltaïque (LDR)*

### ❖ La batterie:

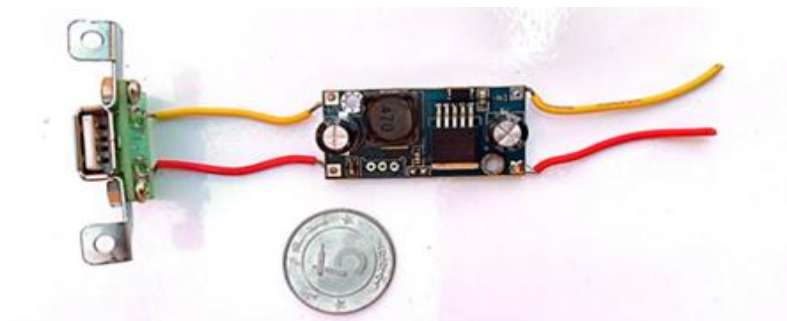
Type lithium où le dernier est spécialement conçu pour panneau photovoltaïque, 2200MAH/12V.



*Figure III. 8: Image de la batterie au lithium*

❖ **Le Régulateur:**

Notre boucle utilise un convertisseur de tension pour alimenter Arduino en régulant la tension de 12V à 5V.



*Figure III. 9: Régulateur de tension d'image*

❖ **L'Electropompe:**

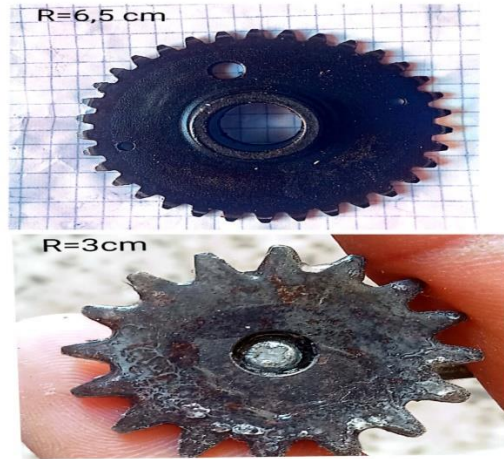
Dans le travail appliqué, nous avons utilisé Washer Pump 12v.



*Figure III. 10: L'Electropompe DC*

**❖ Le Réducteur:**

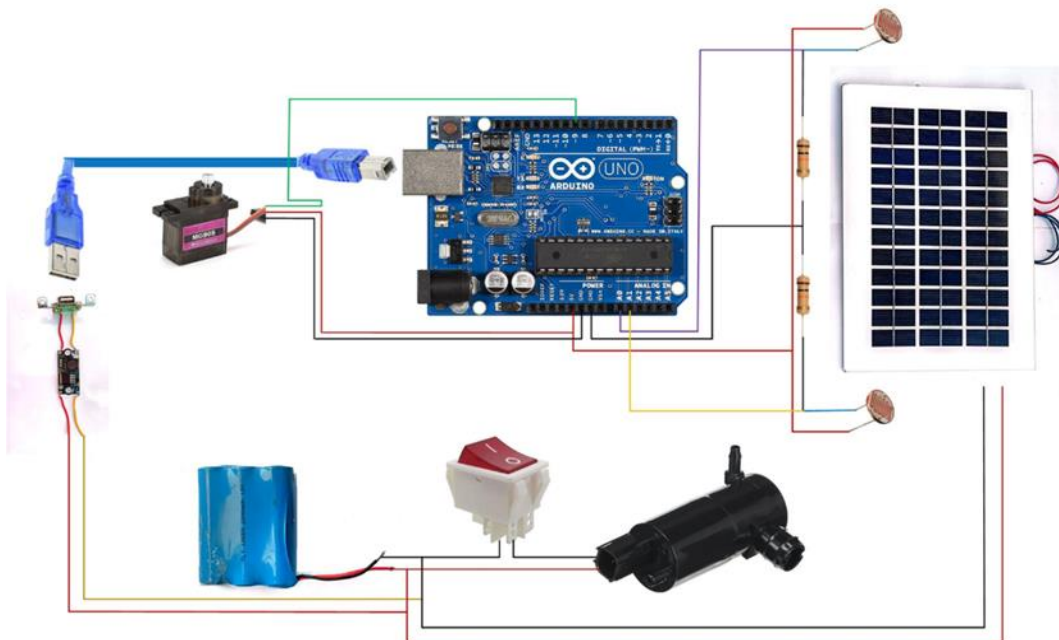
Nous avons utilisé des serrates de transmission de mouvement pour faciliter la rotation de la carte sur le moteur.



*Figure III.11: Image de deux Pin you*

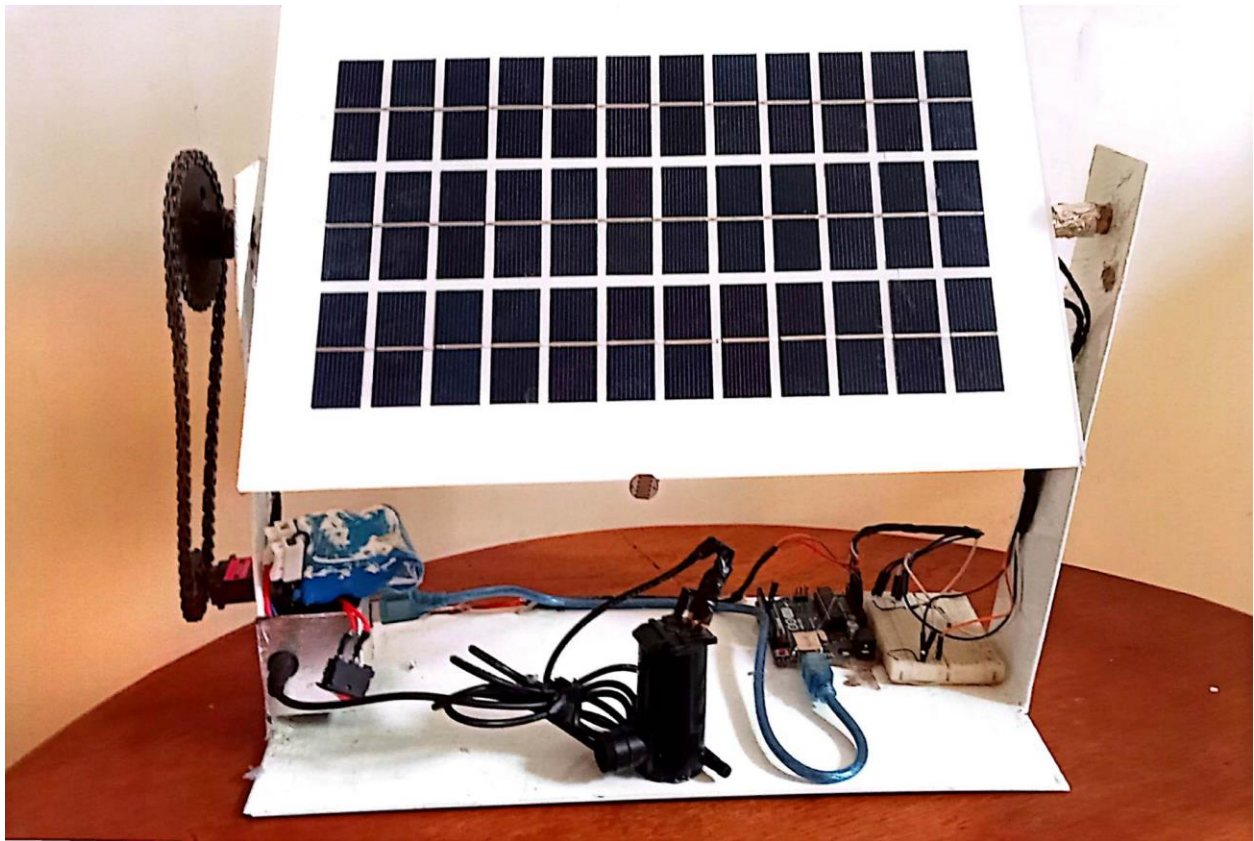
**III.4.2 Schéma électrique:**

Après l'installation de toutes les pièces et composants, maintenant, nous devons connecter l'électrique comme indiqué dans la figure ci-dessous.



*Figure III.12: Fils de composants électroniques pour système photovoltaïque*

### III.4.3 Schéma de system global :



*Figure III.13: Image de Schéma global*

### III.4.4 Résultats et discussion:

Avant de discuter des résultats, nous devons mentionner qu'une enquête numérique nous permet de contrôler le mouvement des panneaux solaires, qui a une grande valeur scientifique dans le domaine de l'électronique et de la programmation.

En plus de créer et de concevoir le corps à travailler, il nous a donné beaucoup d'expérience en ingénierie. En outre, le travail professionnel contribue à consacrer nos études dans le domaine de l'électricité. Tout cela s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'études.

Une fois la réalisation terminée, nous sommes allés aux tests. Les résultats obtenus ont été très satisfaisants, et le Sun Traking Project fonctionne dans un mouvement précis. Il est vrai que nous ne pouvions pas faire un vrai projet, mais nous avons fait la partie la plus difficile, la capacité de contrôler le mouvement des panneaux vers le soleil. En outre, afin de suivre le soleil, nous avons besoin de capteurs solaires (photorésistance) ainsi que d'autres accessoires. Enfin,

afin de soulager la charge sur le moteur, le testicule utilise une faible vitesse et un couple accru (réducteur).

### **III.5 Conclusion:**

Ce dernier chapitre nous a permis d'évaluer les différents éléments qui ont permis la réalisation du travail appliqué, à savoir le système de pompage photovoltaïque utilisant une pompe à courant continu et un panneau solaire que nous avons dirigé pour suivre le soleil à travers la carte Arduino.



# *Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

L'énergie photovoltaïque est considérée comme une technologie très prometteuse pour répondre à la demande croissante en énergie. Cette source d'énergie renouvelable et écologique est abondante, mais son utilisation est encore limitée en raison de plusieurs défis tels que sa nature fluctuante, sa faible efficacité ainsi que le coût élevé de l'investissement initial. Par ailleurs, l'expérience en matière de l'utilisation de la technologie solaire reste un point critique. En pratique, l'extraction moyenne d'énergie des générateurs photovoltaïques est souvent inférieure à 10% de la puissance reçue sur leurs surfaces. Dans notre travail, nous avons étudié spécifiquement le système de pompage photovoltaïque.

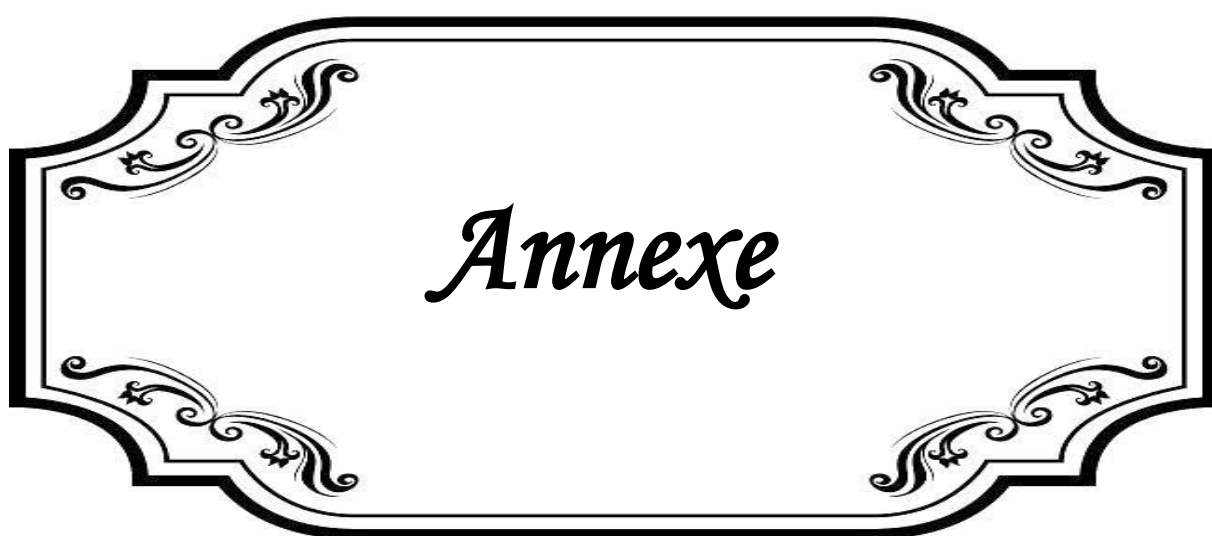
Dans un premier temps, on a donnée des généralités sur les systèmes photovoltaïques, principe de l'effet PV, cellule PV, ainsi que le générateur photovoltaïque, et tous les éléments de system du pompage photovoltaïque.

Ensuite nous avons étudié la modélisation du système photovoltaïque, et pour cela nous avons d'abord étudié la modélisation du générateur photovoltaïque en résolvant les équations caractéristiques, et nous avons également réalisé des simulations pour arriver aux résultats obtenus.

Les résultats de simulation indiquent que les performances du générateur photovoltaïque diminuent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et la variation de la charge. À noter que l'évaluation des performances du générateur PV s'effectue à partir des conditions standard qui consistent en un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Nous pouvons proposer comme pistes pour des projets à venir et comme perspectives suivantes :

- L'utilisation de l'intelligence artificielle dans l'interaction photoélectrique.
- Recherche de solutions pour maintenir la température du panneau solaire à une température modérée (0 à 25).



ANNEXE**1. Les avantages et les inconvénients des pompes immergées**

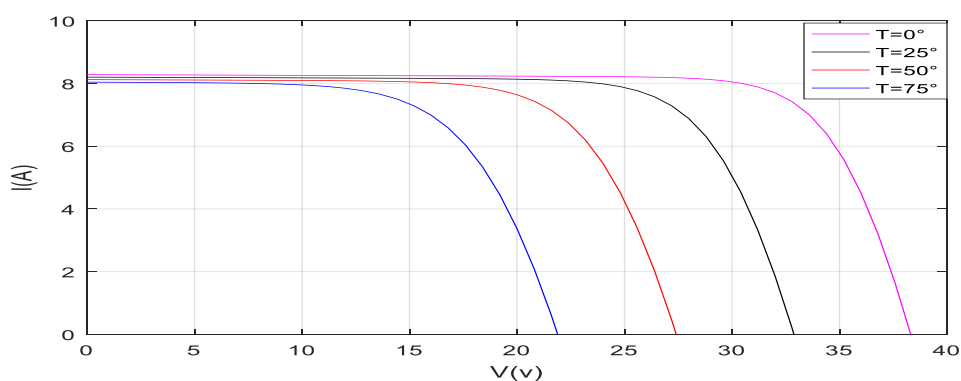
Ce tableau représente :

**Tableau 6- Avantages et inconvénients des pompes immergées**

| Avantages                                                                                                                                                                                                                                  | Inconvénients                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Très efficace, écoulement régulier,</li> <li>• Capacité constante.</li> <li>• Offre une vaste gamme de capacités et de pressions.</li> <li>• Silencieuse.</li> <li>• Bonne durabilité.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prematurée des pièces.</li> <li>• Couteuse et parfois difficile à réparer.</li> </ul> |

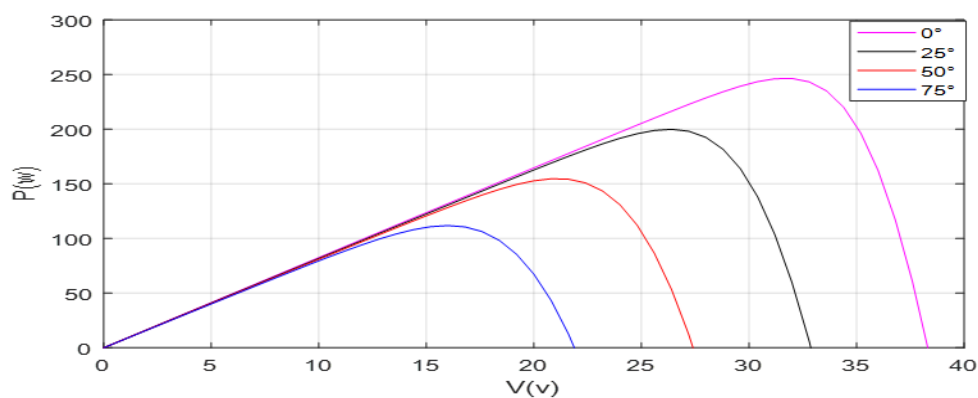
**1. Effets climatiques sur la cellule PV****A. Influence de la température sur la cellule**

➤ Caractéristique (I-V):



**Figure 1:Caractéristique  $I(V)$  pour différentes températures ( $G=1000W/m^2$ ).**

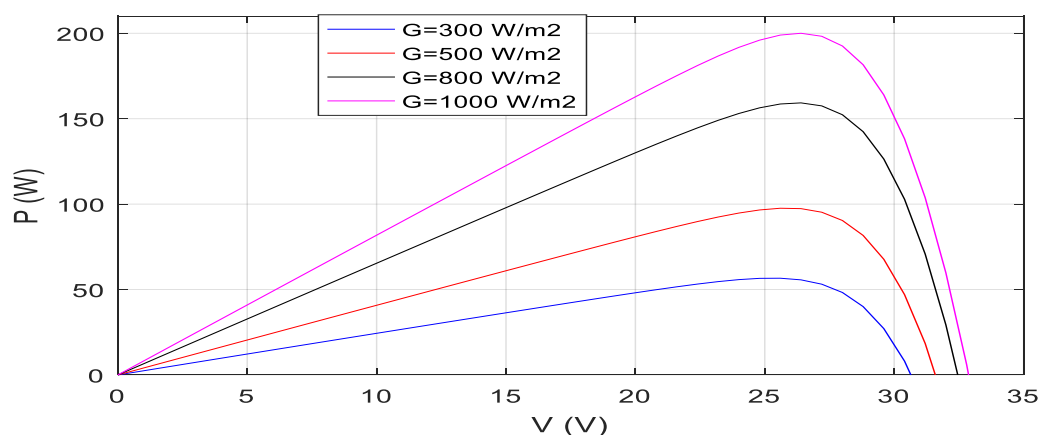
➤ Caractéristique (P-V):



**Figure 2:Caractéristique  $P(V)$  pour différentes températures ( $G=1000W/m^2$ ).**

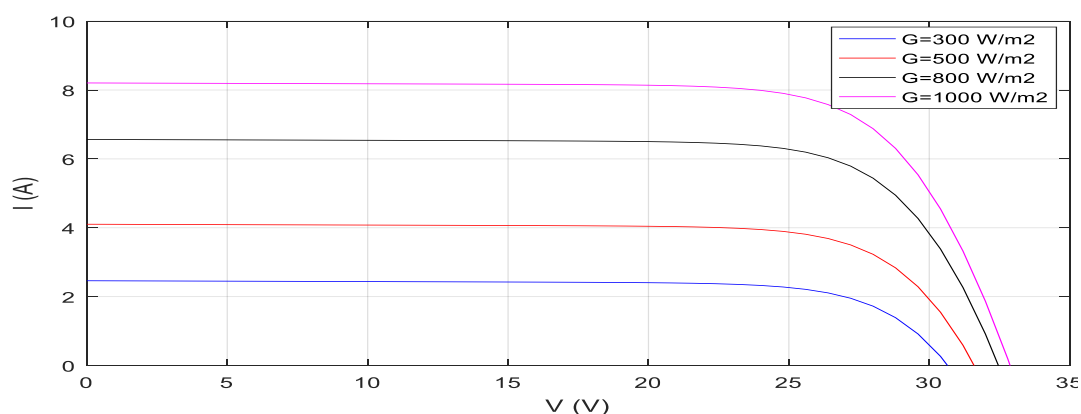
## B. Influence de l'éclairement sur la cellule

### ➤ Caractéristique (I-V):



**Figure 3:Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).**

### ➤ Caractéristique (P-V):



**Figure 4:Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).**

## 3. Système d'irrigation dans une ferme à l'ide de panneaux photovoltaïques

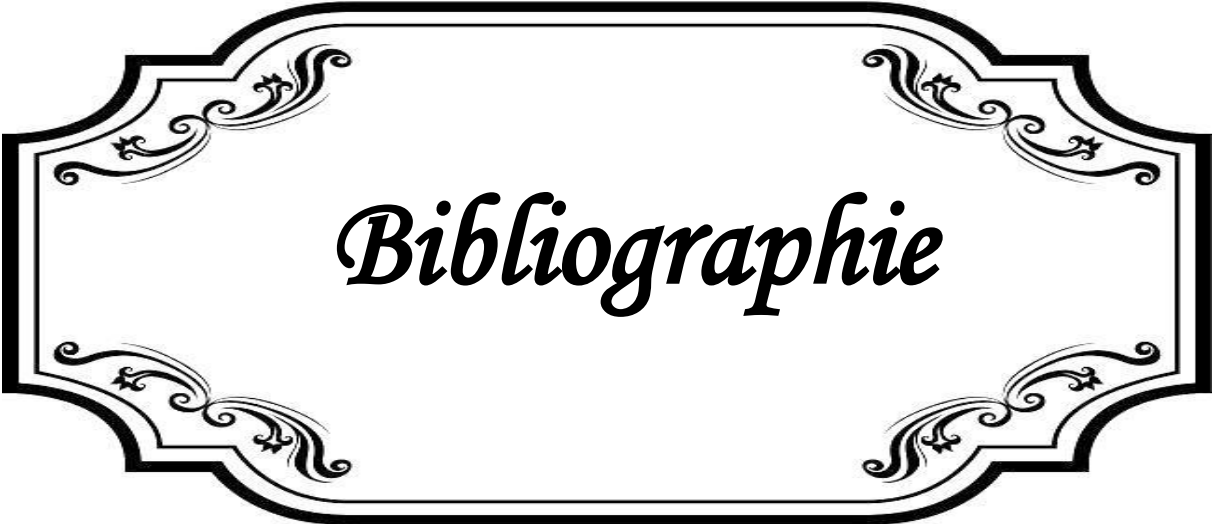
Nous avons visité une ferme (Voir Figure 5) dans la Wilaya d'El Oued pour en savoir plus sur le système d'irrigation photovoltaïque. La ferme est caractérisée par 42 panneaux solaires se dirigeant vers le sud avec un angle de 35°. Ce système alimente deux pompes à eau de puissance 5kW et 7kW contrôlé par une armoire centrale et deux onduleur modernes avec un courant maximal jusqu'à 30A. En plus des appareils de protection associés aux panneaux solaires, tels que la protection contre la foudre et les courts-circuits.



*Figure 5: Certaines des photos d'un système de pompage photovoltaïque dans une ferme*

#### 4. Matériels et logiciel





# *Bibliographie*

**Bibliographie**

- [1] <https://opera-energie.com/energie-solaire> .
- [2] M. Boulkamh, « Contribution à l'étude, la simulation et l'analyse des pompes accostées par l'énergie solaire », Mémoire de Magistère, Université Mentourie de Constantine, 2008.
- [3] M.ROUF : « optimisation de l'ensemble onduleur ; moteur et pompe branche sur générateur photovoltaïque ».Electrotechnique thèse de doctorat, université de Constantine.
- [4] Jimmy Royer, thomas Djiako, Erico SCHILLER, Bokar Sada : «le pompage photovoltaïque».manuel de cour à l'intension des ingénieurs et des techniciens.
- [5] Dimitri Bigot: «système dans le cas de parois complexes photovoltaïques (PC - PV) », la Réunion, 2011. Français.
- [6] L.Lazari ,N.Mebarki, «Etude D'un système Photovoltaïque» ;Mémoire De Master En Electrotechnique Option :Energies Renouvelables ,Université A. Mira Bejaïa,2014.
- [7] J. ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER et B. SADASY « Le pompage photovoltaïque» manuel de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA.ISBN 2-89481-006- 7, 1998.
- [8] Sylvain Brigand : «Installation solaires photovoltaïques » , Editeur : Le Moniteur (23 février 2011).
- [9] A. Daoud, «Contrôle De La Puissance D'un Générateur Photovoltaïque Pour Le Pompage Solaire », Thèse De Doctorat Es-Sciences Spécialité : Electronique Option : Systèmes Photovoltaïques ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf ; 2013.
- [10] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_électrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique).
- [11] T.FROUMHERZ, F.PADINGER ,D.GEBEYEHUR,C.BARBAREC ,J.C.Himmelen.
- [12] «sanicifei comparison of photovoltaic devirces containg varions blends of polymer and fullereme derivaties».
- [13] ANDRES Ricardo herreraorozco determinación de los parámetrosdelmotor de inducciónutilizando un algoritmo de optimizaciónporcúmulo departículas , Universidadtecnológica de pereira 2010.
- [14] Bernard DE CHARGERÉ et Robert REY, « Pompes volumétrique pour liquides ». Techniques d'ingénieur, Juillet 2009.
- [15] RABIA Lakhdar, Modélisation, identification expérimentale et commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé à cage", mémoire de master, université de Ouargla, 2015.
- [16] « Machines tournantes- les pompes centrifuges- technologie et fonctionnement des pompes centrifuges ». IFP ENSPM Formation Industrie T029 A, 2000.

- 
- [17] « Machines tournantes- les pompes centrifuges- technologie et fonctionnement des pompes centrifuges ». IFP ENSPM Formation Industrie T029 A, 2000.
- [18] « Pompes Volumétriques », ENPSSPM Formation industrie-IFP Training, Juillet 2005.
- [19] A. BELHOCINE et S.ZAIDI« Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012.
- [20] J. ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER et B. SADASY « Le pompage photovoltaïque» manuel de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA.ISBN 2-89481-006- 7, 1998 .
- [21] R. N. Goldman, "Simulation Modeling," in Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [22] J. A. Goguen, "Modeling and simulation," in Encyclopedia of Software Engineering, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc.2002.
- [23] BISKER. A, CHIRI .M, « Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau», Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Juin 2012.
- [24] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah, « Étude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP, 2010.
- [25] Dariga MEEKHUN, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [26] N. Pandiarajan, R. Ramaprabha, Ranganath Muthu, « Application of circuit model for photovoltaic energy conversion system», International Journal of Image energy, India, 2011.2016.
- [27] Chovet A, Masson P. « Physique des Semi-Conducteurs » Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille - 2004/2005.
- [28] R.Saisset, «Contribution à l'étude systématique de dispositifs énergétique à composants électrochimique. Formalise bond graph applique aux piles à combustible, accumulateurs lithium-ion », Thèse de Doctorat, Institut Nationale polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [29] A. Hamidat, B. Benyoucef, T. Hartani. « Small-Scall Irrigation With Photovoltaic Water Pumping System In Sahara Regions », Renewable Energy, Vol. 28, pp.1081 1096, 2003.
- [30] Rekioua, E. Matagne, « Optimization Of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation And Control », Series: Green Energy and Technology. Ed Springer, 2012.
- [31] D.R. Chouiter« Conception et réalisation d'une commande robuste de machine Asynchrone», Thèse CEGELY, Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 1997, 192p.

- [32] C.BERNARD, C. SEBRAO-Oliveira, B.LAVAL, C.VAUDOUER «panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique flou ».
- [33] B. GABRIEL « Commande vectorielle de machine asynchrone environnement temps réel Matlab simulink » thèse ingénieur C.N.A.M ( France 2001).