

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté Technologie

Département d'Electrotechnique



## Mémoire

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## MASTER

Filière :Electrotechnique

Option: Commande électriques

**Thème :**

---

### **Dimensionnement et commande d'un système de pompage photovoltaïque**

---

**présente par :**

- **Dahlab Roumaissa**
- **Abada Mehdi**

Soutenu le 27/06/2024 devant le jury composé de :

Souaihia maamar  
Yahdou adil  
Sahraoui hamza  
Bellouazani fadhila

MAB/ UHB-Chlef  
MAB/ UHB-Chlef  
MAB/ UHB-Chlef  
MAA/ UHB-Chlef

Encadreur  
Président  
Examineur  
Examineur

Année Universitaire 2023/2024

# *Remerciements*

*Tout d'abord, louange à « ALLAH » qui nous a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré les bons et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.*

*Nous tenons à exprimer mes remerciements et notre gratitude à monsieur **Souaihia Maamar**, pour tous ses efforts, ses conseils, son soutien moral et scientifique nous a permis de mener à terme ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble des professeurs de département Electrotechnique de l'université **Hassiba Ben Bouali chlef**, pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire et tous ceux à qui nous devons notre formation.*

*Pour terminer, nous tenons à remercier tous nos collègues et nos amis et nos père et nos mère pour leur soutien moral et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail:*

*À ma mère, à ma mère, à ma mère*

*À mon père*

*À mes frères .*

*À toute la famille : DAHLAB .*

*À mes amis et collègues.*

*À tous mes enseignants et enseignantes  
depuis le primaire.*

*À toute âme modeste ayant soif de  
science et de savoir .*

*ROUMAÏSSA...*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail:*

*À ma mère, à ma mère, à ma mère*

*À mon père*

*À mes frères .*

*À toute la famille :ABADA.*

*À mes amis et collègues.*

*À tous mes enseignants et enseignantes  
depuis le primaire.*

*À Toute la communauté de  
l'Electrotechnique.*

*MEHDI...*

## **Sommaire**

Remerciments .....	i
Dédicaces .....	ii
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	ix
Liste des symboles.....	x
Introduction générale .....	1

### **CHAPITRE I**

#### **généralité sur le pompage photovoltaïque**

I.1.Introduction.....	3
I.2. Energie solaire photovoltaïque.....	3
I.2.1.Irradiation solaire .....	4
I.2.2. Cellule photovoltaïque .....	4
I.2.3. Modélisation du cellule photovoltaïque .....	5
I.2.3.1. Modèle idéal.....	5
I.2.3.2. Modèle réel .....	6
I.2.4. Caractéristique puissance-tension (P-V).....	8
I.3. Système Photovoltaïque .....	8
I.4.Applications des systèmes photovoltaïques.....	9
I.4.1. Systèmes autonomes .....	9
I.4.2. Système hybrides .....	9
I.4.3. Systèmes couplés au réseau.....	10
I.5. Le champ photovoltaïque .....	10
I.5.1. Le module photovoltaïque .....	11
I.5.2. Le générateur photovoltaïque .....	11
I.6. Conclusion .....	12

## CHAPITRE II

### modélisation du système de pompage photovoltaïque

II.1.Introduction .....	13
II.2. Les convertisseurs .....	13
I.2.1. Les convertisseurs DC/DC (Les hacheurs) .....	13
I.2.2. Les convertisseurs DC/AC (Les onduleurs) .....	13
I.2.2.1. Onduleur de tension.....	14
II.3. Moteur asynchrone.....	15
II.4.La pompe .....	15
II.5.Modélisation du convertisseur DC/DC .....	16
II.6. Optimisation du générateur photovoltaïque .....	16
II.7.1.La commande MLI sinus-triangle .....	19
II.7.1.1.Equations des signaux de références .....	20
II.7.1.2.Equations des états des interrupteurs de l'onduleur .....	20
II.8.Modélisation de la machine asynchrone .....	21
II.8.1. Principe de la commande vectorielle .....	21
II.8.2.Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée .....	22
II.8.3.Mise en équation de la machine asynchrone.....	22
II.8.4. Equation mécanique.....	24
II.8.5.Equations de la machine asynchrone dans les axes d et q .....	25
II.9. Modélisation de la pompe centrifuge.....	27
II.9.1. La Hauteur Manométrique HMT.....	28
II.9.2. Puissance Hydraulique.....	30
II.9.3. Rendement.....	30
II.9.4. Couple résistant .....	30
II.10. Conclusion .....	30

## CHAPITRE III

### dimensionnement et résultats du système de pompage photovoltaïque

III.1.Introduction .....	31
III.2. Méthode de dimensionnement.....	31
III.3. Evaluation des besoins en eau .....	31

III.4.Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire .....	32
III.5.Détermination de l'énergie solaire disponible.....	33
III.6. Mois de dimensionnement .....	33
III.7. Dimensionnement du générateur photovoltaïque .....	33
III.8.Dimensionnement du moteur .....	34
III.9. Dimensionnement de la pompe .....	34
III.10. Dimensionnement des tuyauteries .....	35
III.11.Résultats de simulation .....	37
III.12.Conclusion.....	43
Conclusion générale .....	49
Annexe .....	50
Références bibliographiques.....	56

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Différente familles d'énergie renouvelable. ....	3
<b>Figure I.2:</b> La conversion d'énergie solaire photovoltaïque.....	3
<b>Figure I.3:</b> Structure d'une cellule photovoltaïque. ....	4
<b>Figure I.4:</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque- modèle idéal-.....	5
<b>Figure I.5:</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque- modele réel -.....	6
<b>Figure I.6:</b> Caractéristique puissance tension. ....	7
<b>Figure I.7:</b> Système photovoltaïque. ....	8
<b>Figure I.8:</b> Installation de système autonome. ....	8
<b>Figure I.9:</b> Installation de système hybride. ....	9
<b>Figure I.10:</b> Installation de système couplée au réseau. ....	10
<b>Figure I.11:</b> module photovoltaïque. ....	10
<b>Figure I.12:</b> Composant d'une cellule photovoltaïque.....	11
<b>Figure II.1:</b> Conversion DC/AC.....	11
<b>Figure II.2:</b> Structure d'une machine asynchrone à aimants permanents. ....	15
<b>Figure II.3:</b> Pompe centrifuge et la pompe volumétrique.....	16
<b>Figure II.4:</b> Schéma électrique d'une hacheur survolteur ou booster. ....	16
<b>Figure II.5:</b> Organigramme de la P&O.....	17
<b>Figure II.6:</b> Structure de l'onduleur de tension triphasé. ....	18
<b>Figure II.7:</b> Principe de la commande MLI ST.....	20
<b>Figure II.8:</b> Repérage angulaire des axes magnétique d'une MAS triphasé. ....	21
<b>Figure II.9:</b> Modèle de Park de la machine asynchrone. ....	25
<b>Figure II.10:</b> Pompe a main absorbants Piston. ....	27
<b>Figure II.11:</b> Pompe centrifuge.....	28
<b>Figure II.12:</b> Pompage d'eau dans un réservoir. ....	29
<b>Figure III.1:</b> Schéma d'association des éléments de pompage PV. ....	31
<b>Figure IV.1:</b> Schéma bloc de simulation . ....	36
<b>Figure IV.2:</b> Schéma bloc de la commande de la MAS. ....	37
<b>Figure IV.3:</b> Courbe de irradiation variable.....	37
<b>Figure IV.4:</b> Courbe de temperature variable. ....	38
<b>Figure IV.5:</b> Courbe de tension de panneau photovoltaïque . ....	38
<b>Figure IV.6:</b> Courbe de courant de panneau photovoltaïque . ....	39
<b>Figure IV.7:</b> Courbe de tension de sortie de survolteur . ....	39
<b>Figure IV.8:</b> Courbe de puissance de sortie de survolteur . ....	40
<b>Figure IV.9:</b> Courbe de 3 tension de sortie de l'onduleur . ....	40
<b>Figure IV.10:</b> Courbe de 3 courant de sortie de l'onduleur . ....	41
<b>Figure IV.11:</b> Courbe de couple électromagnétique et couple résistant . ....	41
<b>Figure IV.12:</b> La vitesse référznce et la vitesse de moteur . ....	42
<b>Figure IV.13:</b> Courbe de débit de la pompe . ....	42

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Rendement des cellules photovoltaïque.....	5
----------------------------------------------------------------	---

## Liste des symboles

$I_{cc}$	courant de court- circuit(A)
$V_{co}$	La tension en circuit ouvert (V)
$L_{as}$	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.
$J$	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.
$P$	le nombre de paires de pôles.
$d, q, o$	respectivement des composantes directe, quadratique et homopolaire.
$\theta$	l'angle de transformation
$L_s$	Inductance cyclique statorique.
$L_r$	Inductance cyclique rotorique.
$H_g$	hauteur géométrique entre le point dynamique d'aspiration et la hauteur de refoulement.
$N_e$	niveau d'eau.
$H_r$	L' hauteur de refoulement.
$d$	la distance entre le réservoir et le puits.
$P_c$	pertes de charge.
$\Delta H_1$	les pertes de charges linéaires.
$\Delta H_2$	les pertes de charges singulières.
$\lambda$	Coefficient de pertes de charges linéaires.
$L$	Longueur de la tuyauterie (m).
$D$	Diamètre de la tuyauterie (m).
$g$	Accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ ).
$v$	Vitesse moyenne du fluide (m/s).
$\varepsilon$	Coefficient de pertes de charges locales.
$K_{fr}$	Constante de la canalisation.
$\rho$	La masse volumique de l'eau étant de $1000Kg/m^3$
$A$	coefficient de proportionnalité [ $(Nm/(rad.s^{-1})^2)$ ]
$E_h$	énergie hydraulique (Wh/jour)

$h$	hauteur totale ( $m$ )
$V_a$	Volume d'eau ( $m^3/jour$ )
$P_a$	Densité de l'eau ( $1 g/cm^3$ )
$Q$	débit crête de la pompe ( $m^3/s$ )
$h_s$	Niveau statique ( $m$ )
$Q_P$	Débit d'essai ( $m^3/h$ )
$h_d$	Niveau dynamique ( $m$ )
$Q_A$	Débit apparent ( $m^3/h$ )
$f$	coefficient de friction des parois de la tuyauterie
$K_{ac}$	coefficient dépendant du type d'accessoire.
$P_p$	Puissance de sortie sous CSM ( $w$ )
$H_g$	Rendement du générateur à la température de référence ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )
$A$	Surface active du générateur ( $m^2$ )
$G_{ce}$	Éclairement dans les CSM ( $1000 W/m^2$ )
$\eta_{PV}$	Rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation
$G_{dm}(\beta)$	irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison $\beta$ ( $KWh/m^2/jour$ ).
$F_m$	Facteur de couplage
$T$	Coefficient de température des cellules.
$T_c$	Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.
$T_{c.ref}$	Température considérées référence ( $^\circ\text{C}$ ).
$\eta_{MP}$	Rendement du sous-système moteur-pompe.
$P_e$	La puissance électrique ( $W$ )
$P_{mec}$	La puissance mécanique ( $W$ )
$\eta_m$	Le rendement de MSAP
$P_h$	Puissance hydraulique nécessaire ( $W$ )
$h$	hauteur manométrique totale ( $m$ )
$\eta_{MB}$	Rendement crête du sous-système moteur-pompe.
$K$	coefficient qui varie de 0,75 à 1,40
$I_{mpp}$	Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum ( $I_{opt}$ )
$V_{mpp}$	Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum ( $I_{opt}$ )
$\Delta T_c$	Représente la variation de la température.
$\Delta I_{pv}$	Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.
$\Delta V_{pv}$	Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

$\alpha_{sc}, \beta_{oc}$	Représente un coefficient de température
$T_{stc}, T_C$	Représentent respectivement, la température dans les conditions STC et dans des conditions quelconques.
$G_{stc}, G$	Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions
HMT	Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe( $m$ )
GPV	générateur photovoltaïque
PV	Panneau photovoltaïque
PPM	Point de Puissance Maximale
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
AC	Courant alternatif ( $A$ )
DC	Courant continu ( $A$ )
MPP	Maximum power point.
P&O	Perturbation et observation
$R_S, R_r$	Résistance par phase statorique et rotorique
$[V_S], [V_r]$	Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques
$[\varphi_S], [\varphi_r]$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques
$[i_S], [i_r]$	Vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques
$V_p$	La tension au borne de la cellule en $[V]$ .
$T$	Température effective de la cellule en $[K]$ .
$G$	L'éclairement réel $[W/m^2]$ .
$G_0$	L'éclairement de référence en condition standard $[W/m^2]$ .
$N_S$	Nombre de cellule en série.
$I_d$	Le courant traversant la diode
$I_p$	Le courant fourni par la cellule en $[A]$ .
$I_{ph}$	Le photo-courant de la cellule en $[A]$ .
$K$	La constante de Boltzmann $[J/K]$ .
$V_p$	La tension au borne de la cellule en $[V]$ .
$I_{Sh}$	Le courant circulant au borne de la résistance parallèle $R_{Sh}$
$R_S$	La résistance série $[\Omega]$ .
$R_{Sh}$	La résistance shunt (parallèle) $[\Omega]$ .
$Q$	La charge de l'électron $q = 1.602 * 10^{-19}[C]$ .
$\alpha$	Le facteur d'idéalité de la diode : $1 \leq \alpha \leq 1.5$
$E_h$	Énergie hydraulique moyenne mensuelle (kWh)

# Introduction générale

## Introduction générale

Beaucoup de population dans les zones rurales des pays en voie de développement afférents des problèmes dus au déficit en eau. ces problèmes sont spécialement accentué dans des zones urbaines ,le déficit en eau dans des Zones arides et semi arides est une question vitales pour les populations [1].

Pour l'amélioration des conditions de vie dans ces zones est lié à la recherche des solutions adéquates a ce problème ,on a conçu au système photovoltaïque qui est très efficace [2].

Le système photovoltaïque est dépendant uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité.ils peuvent comporter des accumulateurs qui emmagasinent l'énergie produite par les modules au cours de la journée et servant la nuit ou lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant [3].

Ces systèmes peuvent également répondre au besoins d'une application (par exemple le pompage de l'eau) sans recours aux accumulateurs.

le pompage solaire photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent [4].

Parmi les avantages importants de la conversion photovoltaïque, nous pouvons citer, la décentralisation de la production d'énergie pour de petites communautés très dispersées comme le prouve déjà, les pompes solaires dont le fonctionnement s'est révélé très acceptable et l'autonomie du système photovoltaïque, autonomie de lieu mais tout aussi importante est l'autonomie de fonctionnement [3].

Une défaillance du pompage photovoltaïque peut survenir pour plusieurs raisons, notamment des dommages aux panneaux solaires ou l'accumulation de poussière sur ceux-ci, ce qui réduit l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Une défaillance des systèmes électroniques de pompage eux-mêmes peut également survenir, que ce soit en raison d'un dysfonctionnement du moteur ou d'autres composants électroniques. Il peut également y avoir des problèmes avec le système de contrôle ou les connexions des câbles, entraînant l'arrêt du fonctionnement de la pompe PV [5].

L'énergie fournie par le générateur photovoltaïque est une énergie chère malgré l'abaissement du coût du kilowatt-crête/heure [6]. Il est donc nécessaire de faire fonctionner ces générateurs à leur puissance optimale. L'approche du problème consiste à intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique (hacheur) pour effectuer le transfert optimal de puissance et améliorer les performances du système de pompage photovoltaïque [2].

Dans ce travail nous présentons un dimensionnement et une commande de système qui utilise l'énergie solaire photovoltaïque pour pomper l'eau d'irrigation, avec une évaluation du coût de cette application [7].

Un système de pompage photovoltaïque est un système qui utilise l'énergie solaire pour faire fonctionner une pompe à eau. Ce système se compose généralement de panneaux solaires qui convertissent la lumière du soleil en énergie électrique, d'une unité de contrôle qui régule le fonctionnement de la pompe et conserve l'énergie, en plus de la pompe elle-même qui pompe l'eau d'un puits, d'un étang ou d'un réservoir vers un point spécifique d'utiliser [8].

Pour ce faire, nous avons organisé notre mémoire en trois chapitres.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré à une étude générale sur l'énergie photovoltaïque et les systèmes de pompages.

Nous passons ensuite au deuxième chapitre, dans lequel nous avons abordé la modélisation des différents éléments qui composent le système de pompage photovoltaïque. Nous avons expliqué la modélisation des panneaux solaires, du hacheur, de l'onduleur, de la machine asynchrone et de la pompe centrifuge

Le troisième chapitre Concernant le dimensionnement du système, nous avons prévu différentes méthodes de dimensionnement, du moteur et de la pompe et des canalisations et une application numérique des résultats de simulation et une interprétation des résultats du système de pompage photoélectrique ont été présentées. .

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le pompage photovoltaïque**

## I.1.Introduction

L'énergie renouvelable, en particulier l'énergie photovoltaïque, est largement adoptée dans le monde en raison de son caractère respectueux de l'environnement et de ses technologies efficaces. Les chercheurs se concentrent sur son utilisation optimale pour assurer une transition énergétique vers des sources durables à l'avenir [9].

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu des composants des systèmes de pompage photovoltaïques.

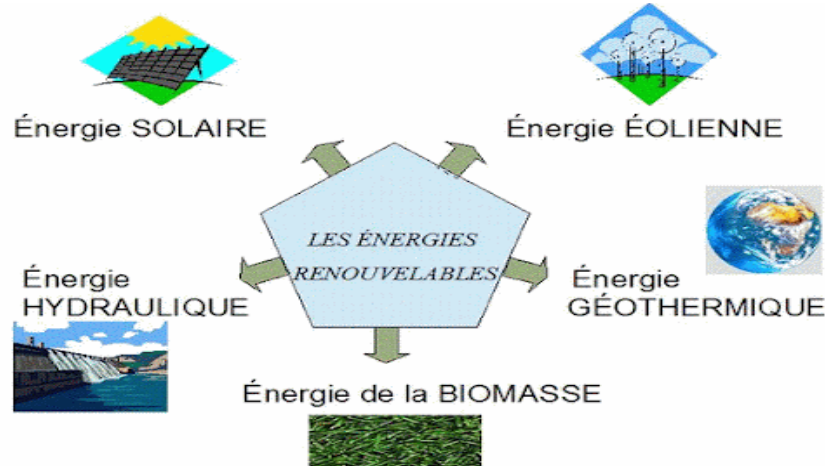


Figure I.1: Différente familles d'énergie renouvelable [9].

## I.2. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque implique la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont regroupées pour former des panneaux solaires, et l'assemblage de plusieurs panneaux constitue un champ photovoltaïque.

Ce système permet de capturer et d'utiliser l'énergie solaire de manière efficace [10].

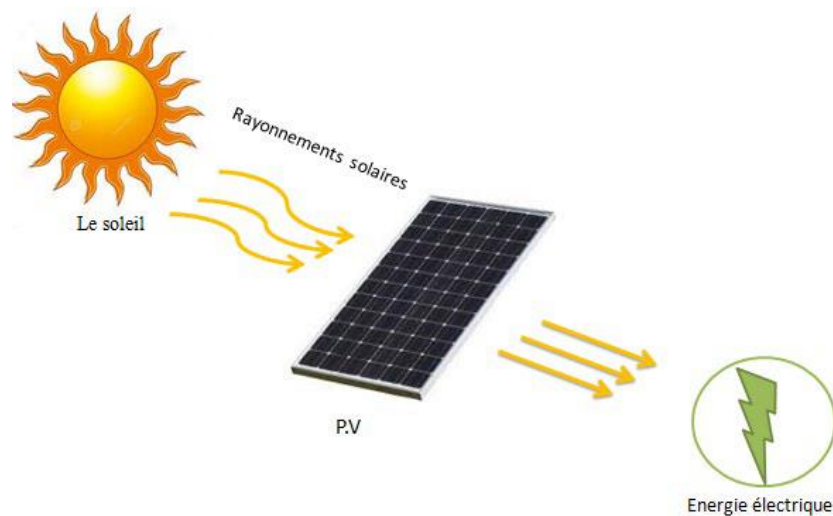


Figure I.2: La conversion d'énergie solaire photovoltaïque.

### I.2.1. Irradiation solaire

L'irradiation (Ensoleillement ou éclaircissement) est définie comme une puissance reçue par une surface[3] . L'irradiation solaire, exprimée en  $W/m^2$ (watt par mètre carré) ou en  $J/m^2$  (Joule par mètre carré), représente l'énergie reçue par une surface.

Le  $Wh/m^2$ (wattheure par mètre carré) est une unité courante pour mesurer l'énergie solaire sur une période donnée [11].

Cette irradiation dépend de divers facteurs tels que :

- ❖ L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires.
- ❖ La latitude du lieu.
- ❖ Le degré de pollution.
- ❖ La période de l'année.
- ❖ L'instant dans la journée.
- ❖ La nature des couches nuageuses.

Ces paramètres influent sur la quantité d'énergie solaire captée par les installations photovoltaïques.

### I.2.2. Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques convertissent la lumière en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Lorsqu'elles sont exposées à la lumière, elles génèrent une tension électrique entre 0,3 V et 0,7 V, dépendant de facteurs comme le matériau, la disposition, la température et le vieillissement [11].

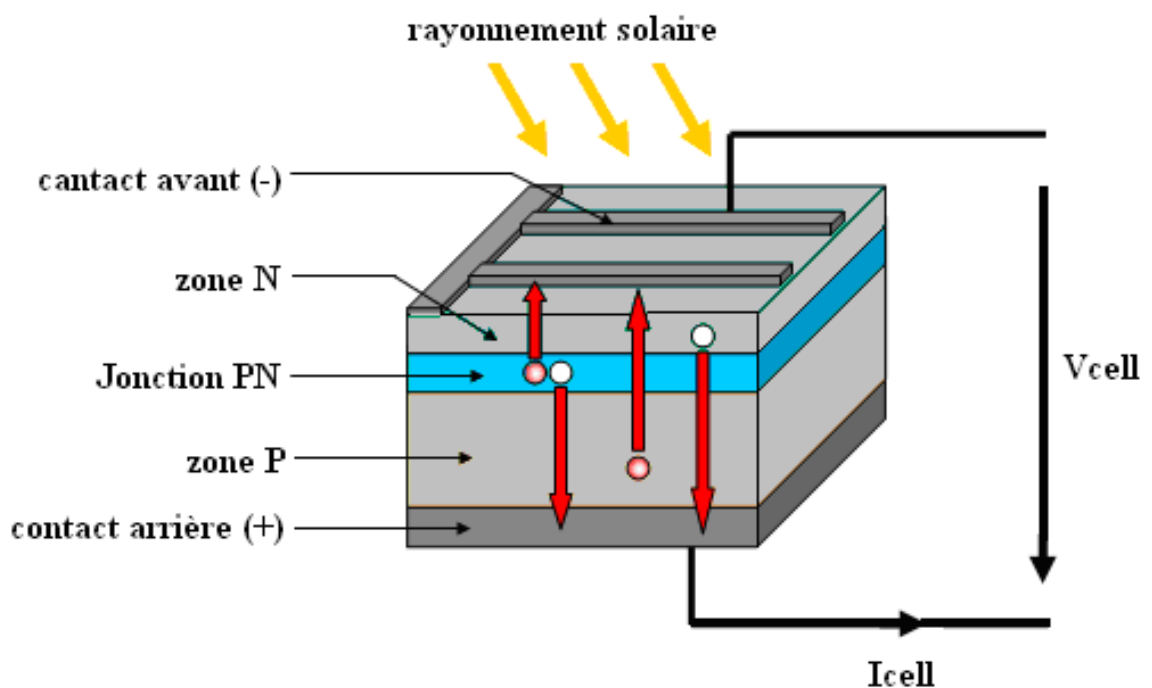


Figure I.3: Structure d'une cellule photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre couche dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel comme montré dans la figure précédente. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

Le tableau suivant présente les différents types de cellule photovoltaïque avec leurs rendements [12] :

Type des cellules	Rendement
Silicium Amorphe	5 à 9 %
Silicium poly –cristallin	11 à 15%
Silicium monocristalline	14 à 20%

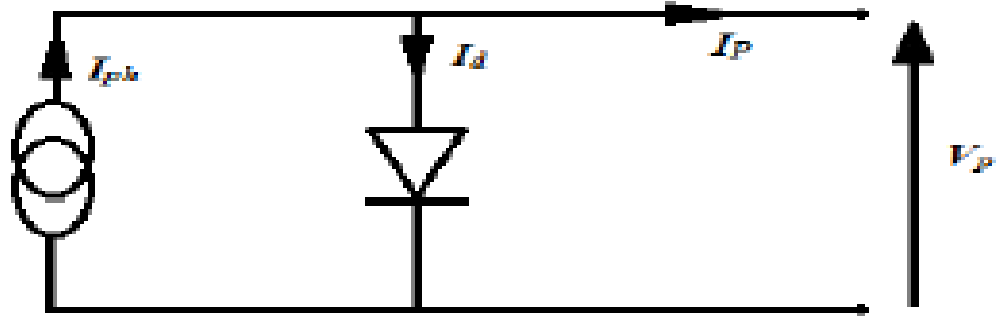
**Tableau I.1** : Rendement des cellules photovoltaïque.

### **I.2.3. Modélisation du cellule photovoltaïque**

La modélisation des cellules photovoltaïques nécessite un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule est essentiel. Divers modèles mathématiques, se distinguant par leurs procédures et le nombre de paramètres, représentent les comportements non linéaires pour calculer la tension et le courant des modules photovoltaïques [13]

#### **I.2.3.1. Modèle idéal**

Le principe de l'effet photovoltaïque repose sur celui d'une diode. Lorsqu'on éclaire la jonction PN d'une cellule photovoltaïque chargée par une résistance, un courant traverse la charge et une tension apparaît à ses bornes. Le modèle idéal d'une cellule photovoltaïque, le plus simple pour représenter une cellule solaire, ne considère que le phénomène de diffusion [13]. Ce modèle simplifié comporte une diode et une source de courant en parallèle. La source de courant produit un courant photonique proportionnel à l'éclairement solaire  $G$ .



**Figure I.4:** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque- modèle idéal-

L'équation du courant du circuit équivalent est donnée comme suit :

$$I_p = I_{ph} - I_d \quad \text{I.1}$$

$I_p$ : C'est le courant fourni par la cellule

$I_{ph}$ : Le photo-courant de la cellule proportionnelle à l'éclairement est égal :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_0} [I_{CC} + K_i(T - T_{ref})] \quad \text{I.2}$$

$I_d$ : Le courant traversant la diode est donné par la formule :

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_p q}{\alpha K T}\right) - 1 \right] \quad \text{I.3}$$

Le courant de saturation de la diode est donné par la formule :

$$I_0 = \frac{I_{CC} + K_i(T - T_{ref})}{\exp\left(\frac{V_{CO} + K_v(T - T_{ref})}{\alpha K T N_s}\right)} - 1 \quad \text{I.4}$$

Donc au final l'expression du courant délivrée par la cellule s'écrit comme suit :

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_p q}{\alpha K T N_s}\right) - 1 \right] \quad \text{I.5}$$

$V_p$  : C'est la tension aux bornes de la cellule en [V].

$V_{CO}$  : La tension en circuit ouvert [V].

$I_{CC}$  : Le courant du court-circuit [A].

$T$ : Température effective de la cellule en [K].

$T_{ref}$  : Température en condition standard [K].

$G$  : L'éclairement réel [ $W/m^2$ ].

$G_0$  : L'éclairement de référence en condition standard [ $W/m^2$ ].

$N_s$  : Nombre de cellule en série.

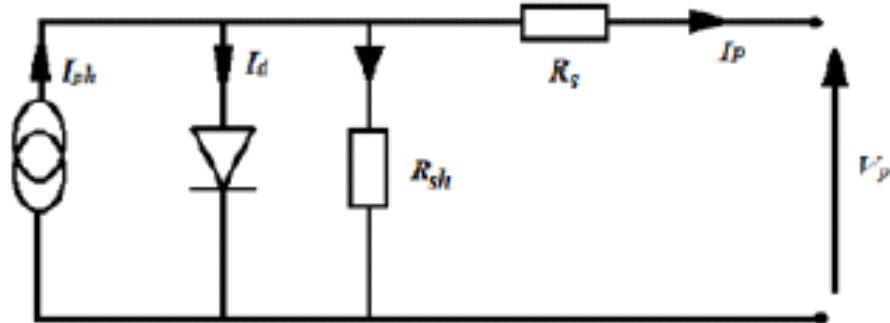
$q$  : La charge de l'électron  $q = 1.602 \times 10^{-19}$  [C].

$K$ : C'est la constante de Boltzmann  $K = 1.38 \times 10^{-23}$  [J/K].

### I.2.3.2. Modèle réel

Une cellule photovoltaïque **figure I.5** peut être modélisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode et deux résistances parasites. La résistance série  $R_S$  représente la résistance interne de la cellule, dépendant du semi-conducteur, de la résistance

de contact des grilles collectrices et de leur résistivité. La résistance shunt  $R_p$  provient d'un courant de fuite à la jonction, influencé par la réalisation de celle-ci. Ces résistances affectent la caractéristique I-V de la cellule [14].



**Figure I.5 :** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque- modèle réel -.

En appliquons la loi des noeuds on aura :

$$I_p = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{I.6}$$

$I_d$  : Est le courant circulant au borne de la diode il est définit par la formule :

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\alpha K T N_s}\right) - 1 \right] \quad \text{I.7}$$

$I_{sh}$  : C'est Le courant circulant au borne de la résistance parallèle  $R_{sh}$  est égale à :

$$I_{sh} = \frac{V_p + R_s I_p}{R_{sh}} \quad \text{I.8}$$

En remplaçant les courants  $I_d, I_{sh}, I_{ph}$  par leurs expressions on obtient[15] :

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\alpha K T N_s}\right) - 1 \right] \quad \text{I.9}$$

Où :

$I_p$  : Le courant fourni par la cellule en [A].

$V_p$ : La tension aux bornes de la cellule en [V].

$I_{ph}$  : C'est le photo-courant de la cellule en [A].

$R_s$  : La résistance série [ $\Omega$ ].

$R_{sh}$ : La résistance shunt (parallèle) [ $\Omega$ ].

$q$  : La charge de l'électron  $q = 1.602 * 10^{-19}$  [C].

$K$ : C'est la constante de Boltzmann /  $K = 1.38 * 10^{-23}$  [J/K].

$\alpha$  : C'est le facteur d'idéalité de la diode :  $1 \leq \alpha \leq 1.5$  .

$T$  : Température effective de la cellule [K].

### I.2.4. Caractéristique puissance-tension (P-V)

La puissance crête d'une cellule photovoltaïque, notée  $W_C$  (Watt crête) ou  $W_P$  (Watt peak), représente la puissance électrique maximale délivrée dans des conditions standard [16].

- éclairement solaire de  $1 \text{ KW}/\text{m}^2$  ;
- température de la cellule PV égale à  $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

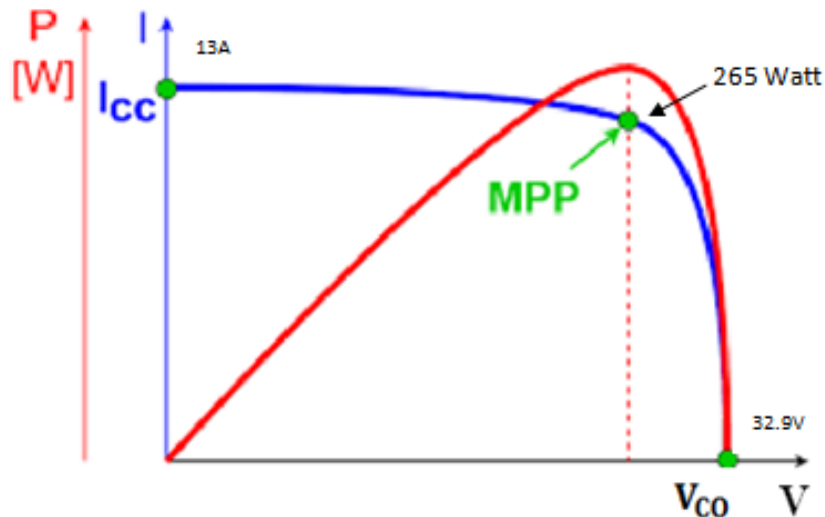


Figure I.6:Caractéristique puissance tension.

### I.3. Système Photovoltaïque

Un système photovoltaïque convertit la lumière solaire en électricité utilisable via des panneaux solaires. Cette électricité peut être utilisée immédiatement [17].

Ces systèmes offrent une source d'énergie renouvelable et durable.

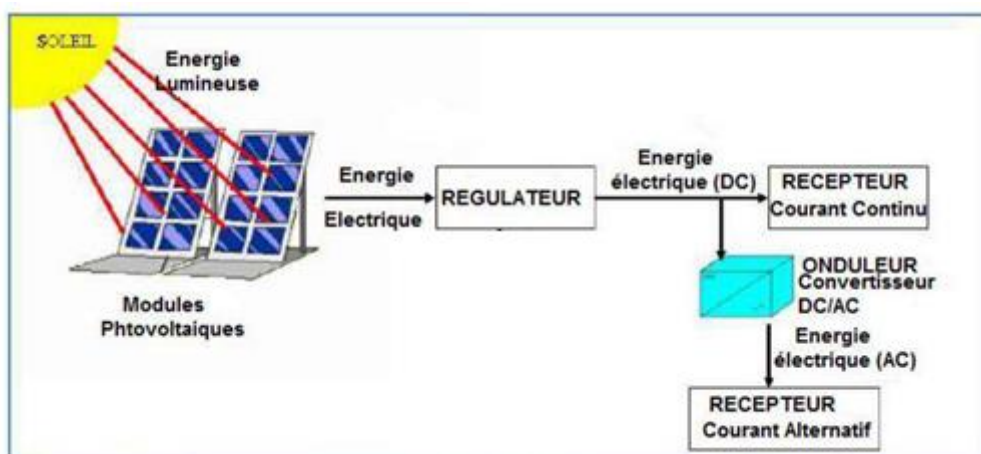


Figure I.7: Système photovoltaïque.

## I.4.Applications des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques (PV) ont diverses applications, allant des petites installations résidentielles aux grands parcs solaires commerciaux. Les systèmes photovoltaïques sont polyvalents et peuvent être adaptés à une variété de besoins énergétiques, contribuant ainsi à la transition vers des sources d'énergie plus durables et renouvelables [18].

### I.4.1. Systèmes autonomes

Les installations photovoltaïques "stand-alone," sont déconnectés du réseau électrique. Ils garantissent une alimentation électrique constante pour répondre à la demande locale, utilisant l'énergie solaire produite immédiatement ou la stockant dans des batteries pour une utilisation ultérieure, assurant ainsi une alimentation fiable dans des endroits non connectés au réseau [19].

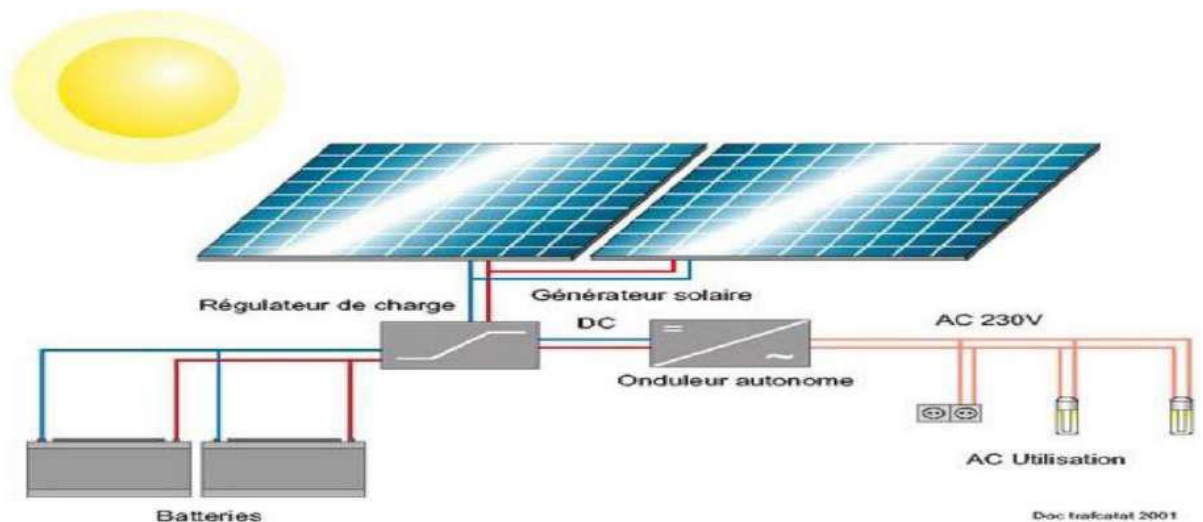
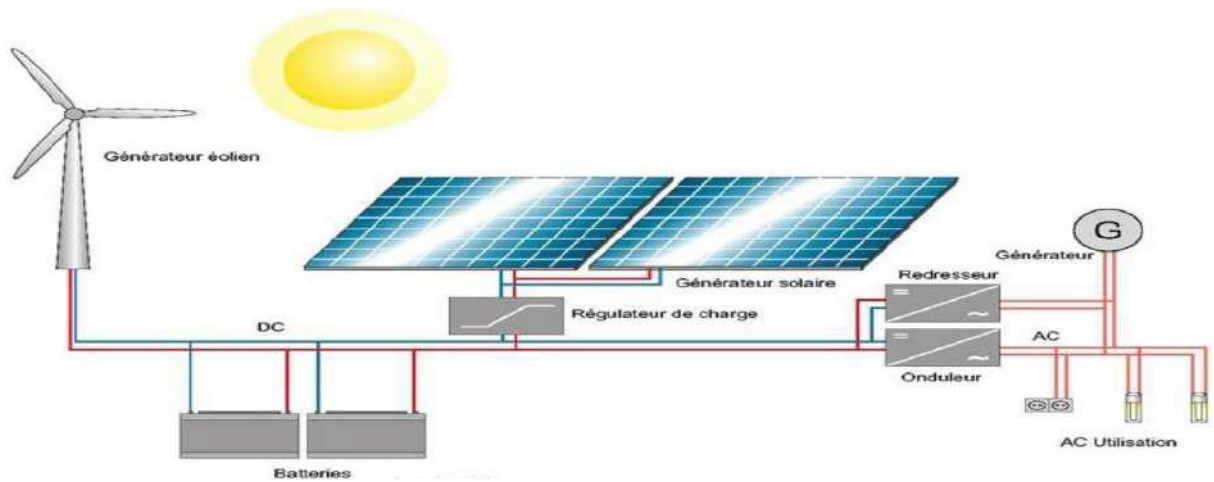


Figure I.8 : Installation de système autonome[19]

### I.4.2. Système hybrides

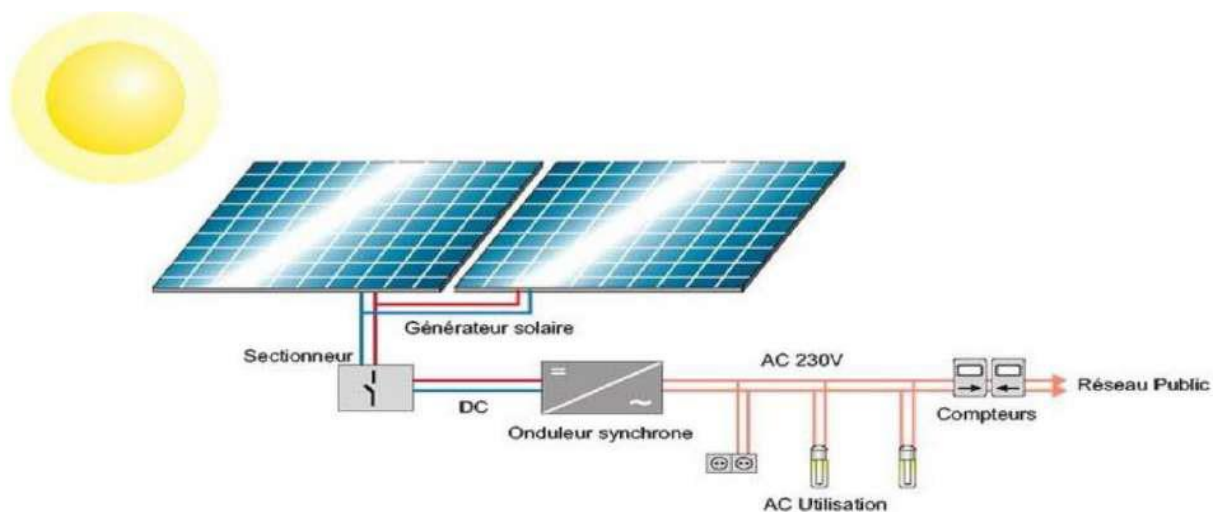
Les systèmes éoliens-solaires, combinent l'énergie solaire d'un système photovoltaïque avec une autre source d'énergie génératrice, comme l'éolien. Cette combinaison profite de la complémentarité des deux sources, car leurs pics de fonctionnement se produisent à des moments différents de la journée et de l'année. En résulte une production d'électricité plus constante et moins sujette aux fluctuations que celle de chaque sous-système individuel [19].



**Figure I.9:** Installation de système hybride[19].

### I.4.3. Systèmes couplés au réseau

Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau sont conçus pour fonctionner en parallèle et s'interconnecter avec le réseau électrique. Cette configuration permet une intégration efficace avec le service public, facilitant l'échange d'électricité entre le système photovoltaïque et le réseau, contribuant ainsi à la stabilité et à la flexibilité du réseau électrique [19].



**Figure I.10 :** Installation de système couplée au réseau [19].

## I.5. Le champ photovoltaïque

Un champ photovoltaïque, aussi appelé parc solaire ou ferme solaire, est une installation composée de nombreux panneaux solaires photovoltaïques déployés sur une grande surface pour capter l'énergie solaire et la convertir en électricité [20].

### I.5.1. Le module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est formé par l'association de plusieurs cellules photovoltaïques, créant ainsi un panneau solaire. Ces cellules convertissent la lumière solaire en électricité, contribuant à la production d'énergie solaire [21].



Figure I.11: module photovoltaïque.

### I.5.2. Le générateur photovoltaïque

En interconnectant plusieurs modules photovoltaïques, que ce soit en série pour augmenter la tension ou en parallèle pour augmenter le courant, on peut créer un générateur photovoltaïque[21].

Ce générateur, aussi appelé champ photovoltaïque, permet de générer une puissance plus importante à partir de l'énergie solaire captée par les modules

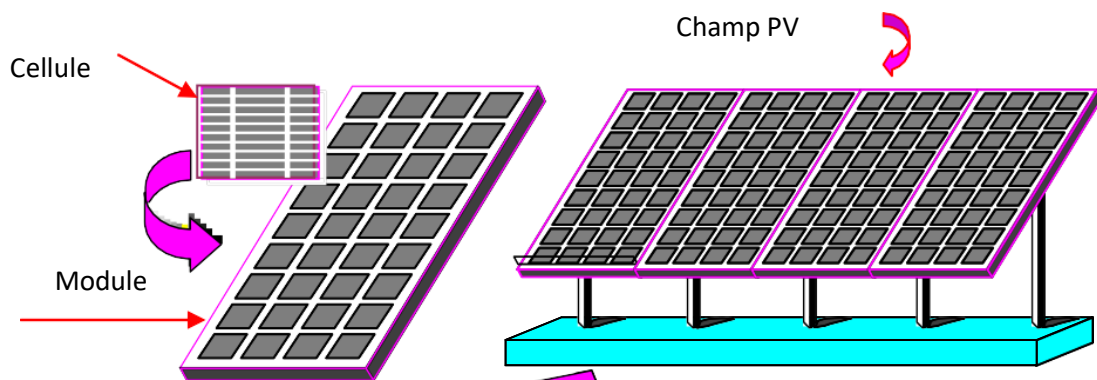


Figure I.12: Composant d'une cellule photovoltaïque.

## **I.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques, ainsi que les nombreuses topologies des systèmes photovoltaïques. Enfin, nous avons présenté le système de pompage photovoltaïque étudié. Dans ce mémoire, qui est constitué d'un ensemble d'éléments interconnectés.

# **CHAPITRE II**

## **Modélisation du système de pompage photovoltaïque**

## II.1.Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif est de modéliser chaque composant du système que nous avons décrit, c'est-à-dire le champ photoélectrique, les convertisseurs (DC/DC, DC/AC), le moteur asynchrone et la pompe centrifuge. En trouvant le modèle mathématique approprié pour chaque composant, nous pourrions étudier le système et le simuler plus facilement dans Matlab.

## II.2. Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adopter à des récepteurs fonctionnant soit en tension continue différente, soit en tension alternative [22].

### I.2.1. Les convertisseurs DC/DC (Les hacheurs)

Le hacheur est un convertisseur statique continu-continu utilisant essentiellement des interrupteurs électroniques unidirectionnels, des éléments passifs (inductances, condensateurs et diodes)[23].

#### a. Convertisseur Buck

Réduisent la tension d'entrée à une tension de sortie inférieure. Ils sont utilisés lorsque des composants nécessitent une tension plus basse que la source d'alimentation[23].

#### b. Convertisseur Boost

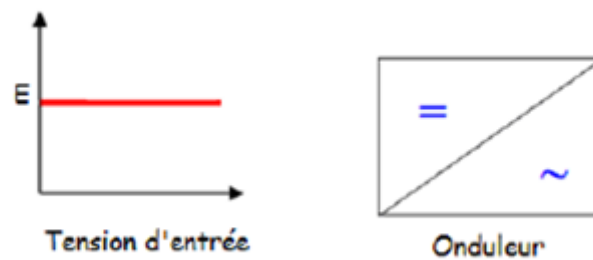
Augmentent la tension d'entrée à une tension de sortie supérieure. Ils sont utiles lorsque des composants nécessitent une tension plus élevée que la source d'alimentation[23].

#### c. Convertisseur Buck- Boost

Peuvent soit augmenter soit réduire la tension d'entrée, fournissant une grande flexibilité dans les applications où la tension de sortie doit être maintenue constante indépendamment de la tension d'entrée[23].

### I.2.2. Les convertisseurs DC/AC (Les onduleurs)

Les onduleurs sont des dispositifs statiques permettant de convertir l'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative. Ils sont réversibles, autorisant le transfert de puissance de l'alternatif vers le continu, bien que le sens habituel soit du continu vers l'alternatif [24].



**Figure II.1:**Conversion DC/AC.

Il existe deux principaux types d'onduleurs : ceux alimentés par une source de tension continue (onduleurs de tension) et ceux alimentés par une source de courant continu (onduleurs de courant).

### **I.2.2.1. Onduleur de tension**

L'onduleur de tension utilisé dans ce système est un onduleur triphasé à six interrupteurs commandés par des transistors de type IGBT, accompagnés de diodes en antiparallèle. Il se compose de trois bras, chaque bras ayant deux interrupteurs qui conduisent de manière complémentaire [25].

Les séquences de commutation des interrupteurs dépendent de la commande utilisée, telle que la commande en pleine onde ou la commande en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

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

La commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) des onduleurs implique le découpage de la tension  $V(t)$  en plusieurs créneaux de largeurs différentes en agissant sur les commutateurs de l'onduleur.

Cette opération a deux objectifs principaux : modifier le contenu harmonique de la tension tout en conservant sa période pour faciliter le filtrage en repoussant les harmoniques vers les rangs élevés, et permettre le réglage de la valeur efficace du fondamental de la tension  $V(t)$ [26].

#### **b. Types de commande en MLI :**

Il existe plusieurs stratégies de commande en Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI), chacune visant un compromis entre différents critères tels que le spectre d'harmoniques, la plage de variation de l'amplitude de sortie, la facilité d'implémentation, le coût et la facilité de réglage [27].

Ces modes de commande peuvent être classés en quatre catégories principales:

- Modulation en temps réel.
- Modélisation calculée.

- Modulation par comparaison
- Modulation vectorielle.

### II.3. Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone, également connu sous le nom de moteur à induction, est largement utilisé dans l'industrie en raison de sa robustesse, de sa fiabilité et de son coût relativement bas [28].

Le moteur asynchrone fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique, découvert par Nikola Tesla. Il est constitué de deux parties principales :

- Stator : Partie fixe du moteur contenant des enroulements dans lesquels un courant alternatif est appliqué pour créer un champ magnétique tournant.
- Rotor : Partie mobile du moteur qui tourne à l'intérieur du stator. Il peut être soit un rotor en cage d'écureuil, soit un rotor à bobines.

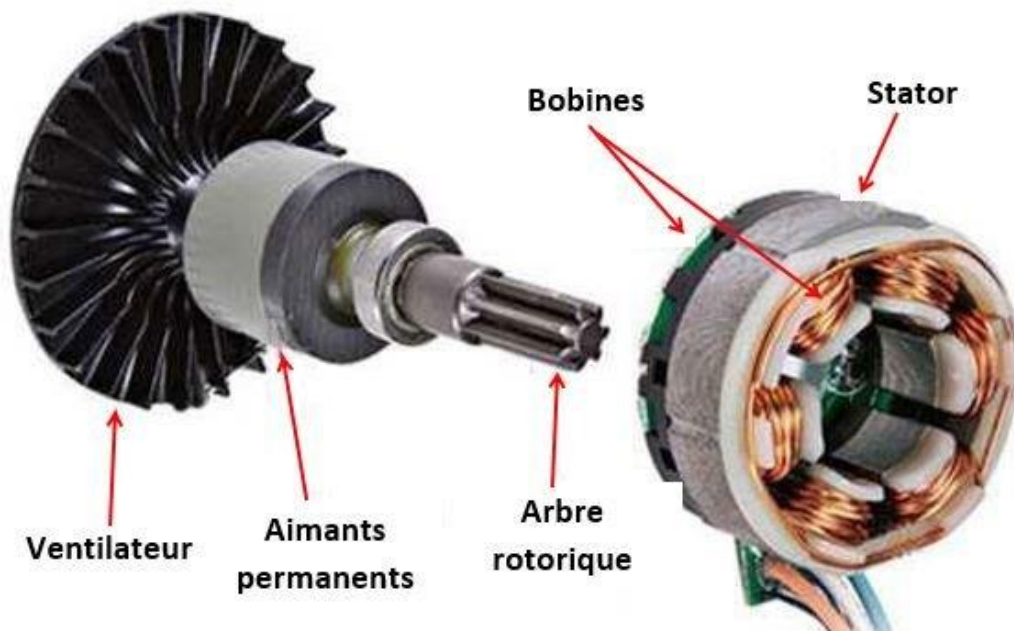


Figure II.2: Structure d'une machine asynchrone à aimants permanents[28].

### II.4. La pompe

Une pompe est un dispositif essentiel dans de nombreux domaines pour transférer de l'énergie mécanique en énergie hydraulique.

Dans le contexte des forages, le choix de la pompe dépend de la profondeur du forage et de la hauteur manométrique totale à surmonter, qui représente la somme des hauteurs de refoulement et des pertes de charge[29].

Il existe deux grands types de pompes :

- ✓ **Les pompes volumétriques** : sont en effet adaptées pour augmenter les faibles débits d'eau à des pressions élevées.

- ✓ **Les pompes centrifuges** : qui sont souvent utilisées pour des débits plus importants .



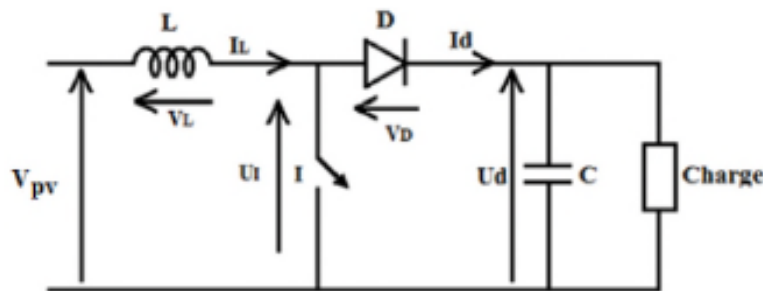
**Figure II.3:**Pomme centrifuge et la pompe volumétrique[29].

## II.5.Modélisation du convertisseur DC/DC

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de BOOST ou hacheur parallèle; Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est supérieure à celle de l'entrée.

Son circuit de base est celui de la **figure II.4** si dessous [30].

$$\left\{ \begin{array}{l} V_s = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot V_{pv} \end{array} \right. \quad \text{II.1}$$



**Figure II.4:**Schéma électrique d'un hacheur survolteur .

## II.6. Optimisation du générateur photovoltaïque

Pour l'optimisation du générateur nous avons utilisé une commande MPPT : une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un étage intermédiaire 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)[31].

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

Cet algorithme se base sur la recherche du point de fonctionnement optimal par la perturbation du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le générateur photovoltaïque. Donc, l'algorithme de poursuite consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte [31].

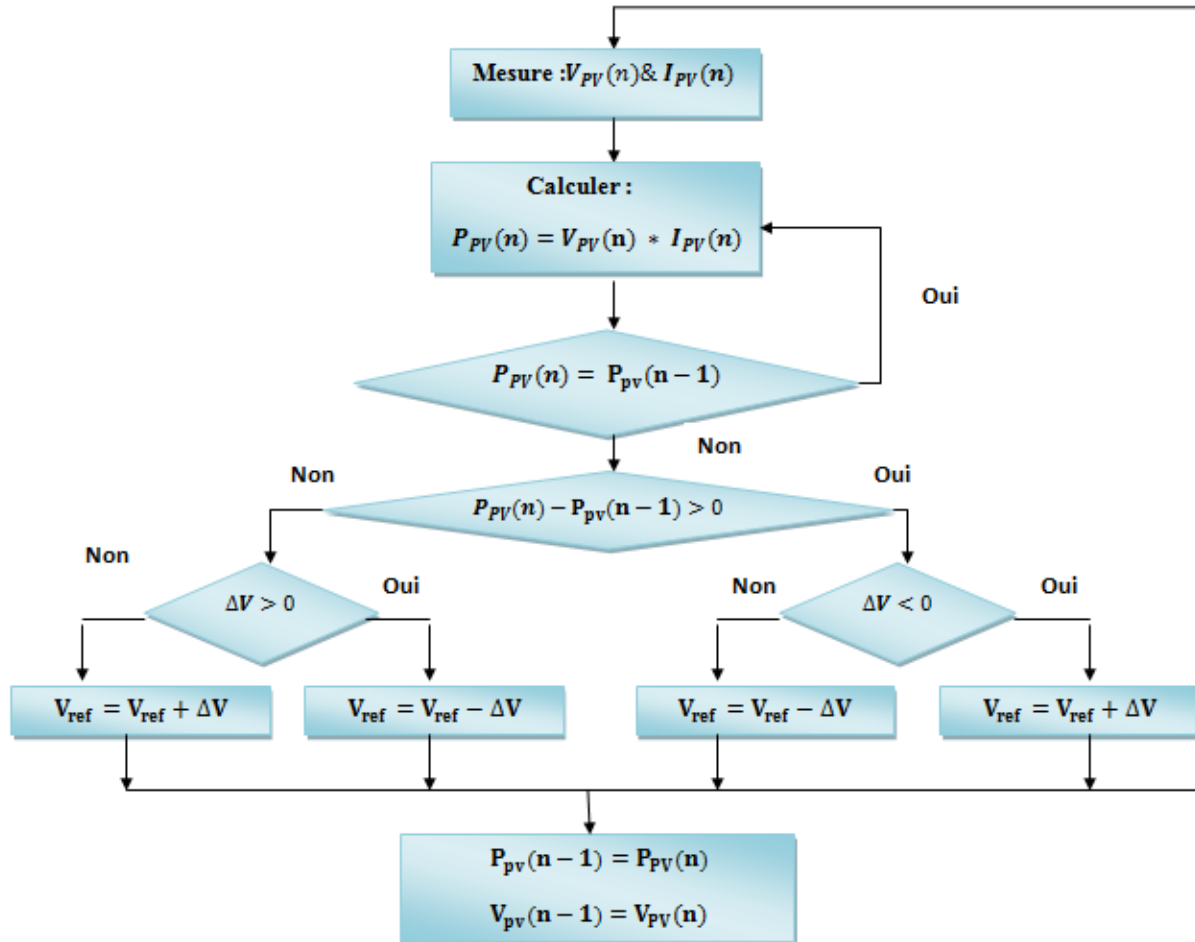
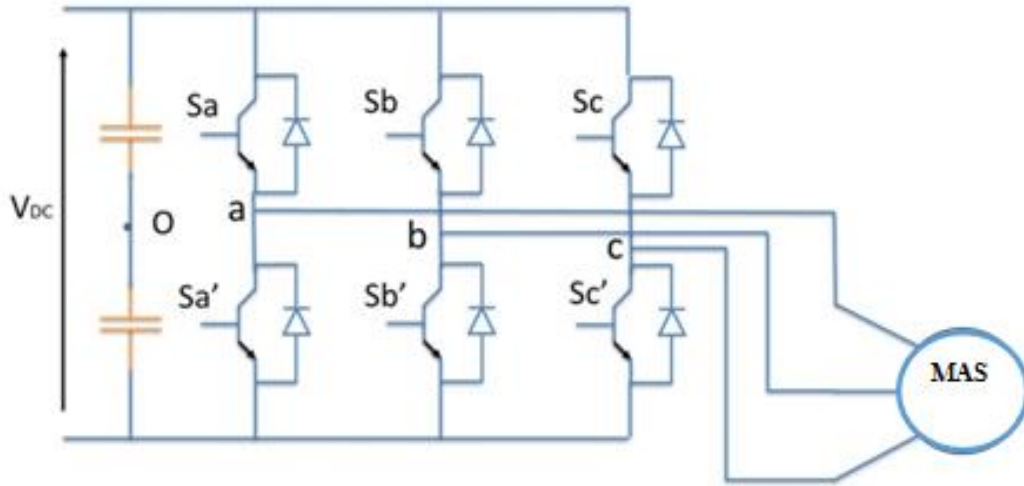


Figure II.5: Organigramme de la P&O[31].

## II.7. Modélisation de L'onduleur

La modélisation des hacheurs Boost ferme et ouvert :

- Etat ON : le circuit équivalent du convertisseur pendant l'état de fermeture (ON) est représenté sur la figure II.6.



**Figure II.6:** Structure de l'onduleur de tension triphasé.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande  $S_i$  ( $i = a, b, c$ ) :

- $S_i = 1$  le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$  le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Les trois tensions composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$  sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif «  $O$  »

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} \end{cases} \quad \text{II.2}$$

Soit «  $n$  » le point neutre du côté alternatif (MAS), alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad \text{II.3}$$

La charge est considérée équilibrée, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{II.4}$$

La substitution nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co})$$

II.5

En remplaçant l'équation II.12 dans le système d'équation II.14, on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = -\frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad \text{II.6}$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{dc}(2S_a - 1) \\ V_{bo} = V_{dc}(2S_b - 1) \\ V_{co} = V_{dc}(2S_c - 1) \end{cases} \quad \text{II.7}$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.8}$$

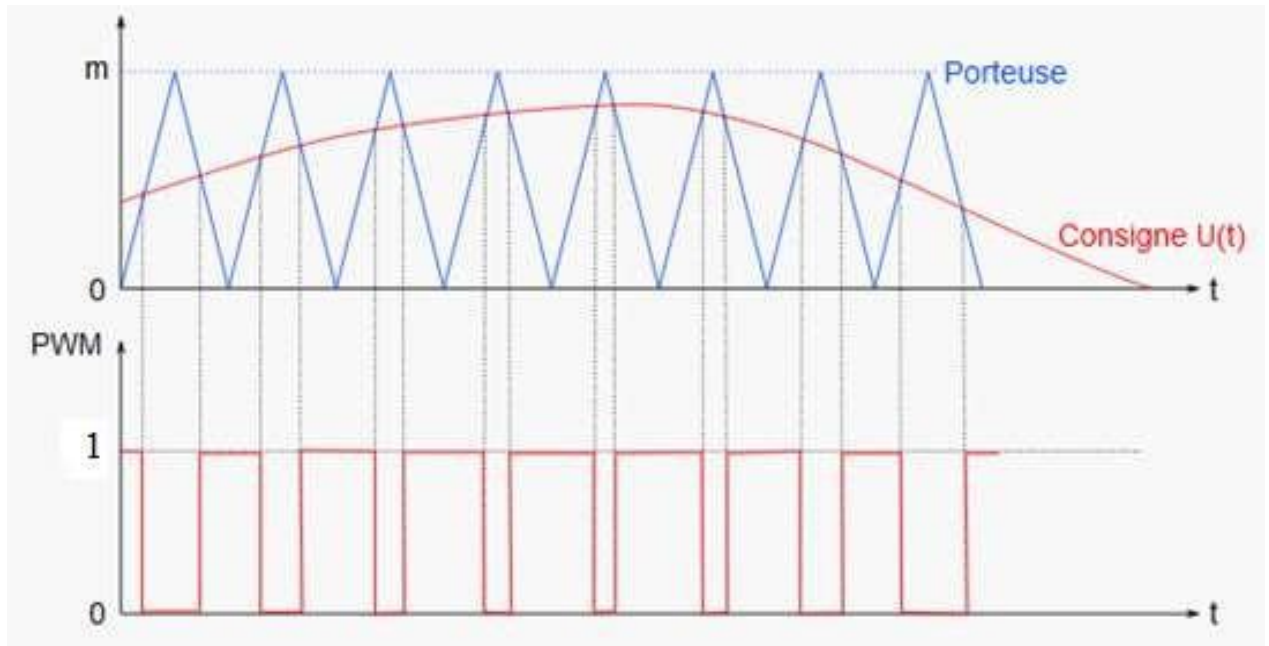
### II.7.1. La commande MLI sinus-triangle

La modulation triangle-sinusoïdale, ou modulation de largeur d'impulsion (MLI), combine une onde modulante sinusoïdale (généralement basse fréquence) avec une onde porteuse triangulaire (généralement haute fréquence). Le but est de contrôler les interrupteurs du circuit de puissance en fonction du résultat de la comparaison entre ces deux signaux [32].

Pour une référence sinusoïdale, deux paramètres sont essentiels :

1. L'indice de modulation ( $m$ ) qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse ( $F_p$ ) et la fréquence de la référence ( $f$ ) :  $m = F_p/f$ .
2. Le taux de modulation ( $r$ ), également appelé coefficient de réglage en tension ou rapport cyclique, qui est le rapport entre l'amplitude de l'onde modulante ( $V_r$ ) et la valeur crête de l'onde porteuse ( $V_p$ ) :  $r = V_r/V_p$ .

Le principe de fonctionnement de la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI - st) est illustré sur la **figure II.7**.



**Figure II.7:**Principe de la commande MLI ST.

### II.7.1.1. Equations des signaux de références

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude  $V_r$  et de fréquence  $f_r$ . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$V_{ar} = V_r \sin(2\pi f_r t) \quad \text{II.9}$$

$$V_{br} = V_r \sin(2\pi f_r t - (2\pi/3)) \quad \text{II.10}$$

$$V_{cr} = V_r \sin(2\pi f_r t - (4\pi/3)) \quad \text{II.11}$$

#### Equations de la porteuse :

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence  $f_p$ , et sa valeur de crête  $V_p$ . On définit l'équation de la porteuse dans sa période  $[0, T_p]$  par :

$$\begin{cases} X_1(t) = V_p \left( \left( \frac{4t}{T_p} \right) - 1 \right) & \text{Si } t \in [0, \frac{T_p}{2}] \\ X_2(t) = V_p \left( \left( -\frac{4t}{T_p} \right) + 3 \right) & \text{Si } t \in [\frac{T_p}{2}, T_p] \end{cases} \quad \text{II.12}$$

### II.7.1.2. Equations des états des interrupteurs de l'onduleur

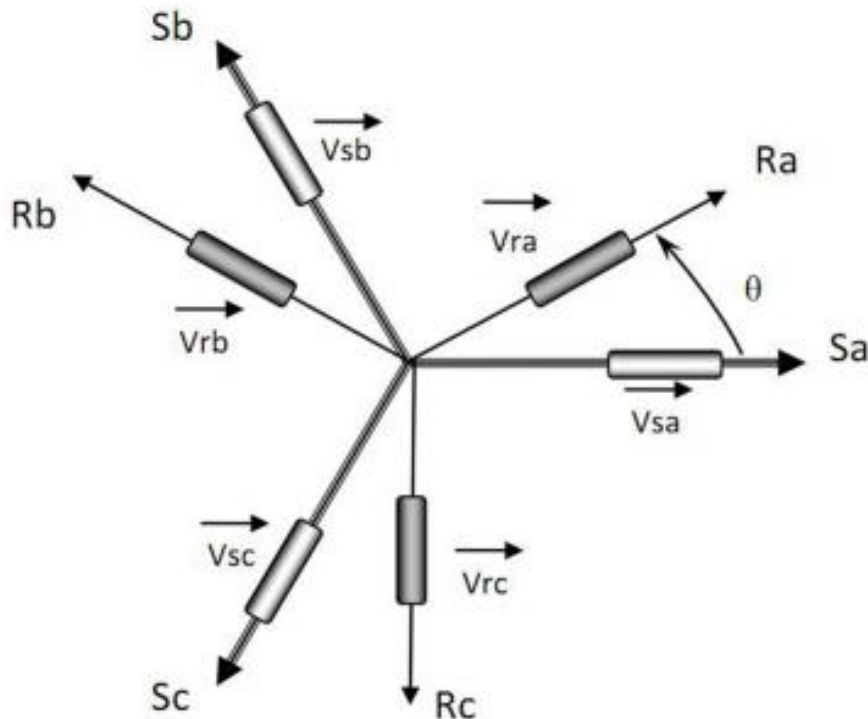
La commande MLI Sinus-triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états  $S_a, S_b$  et  $S_c$  des interrupteurs de l'onduleur [33].

Ceux-ci sont donnés par l'équation suivante II.13:

$$S = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Si : } (V_{\text{rabc}} - X(t)) \geq 0 \\ \text{Si : } (V_{\text{rabc}} - X(t)) \leq 0 \end{array} \quad \text{II.13}$$

## II.8. Modélisation de la machine asynchrone

La représentation schématique de la machine asynchrone dans l'espace électrique est donnée par la **figure II.8**[34].



**Figure II.8:** Repérage angulaire des axes magnétique d'une MAS triphasé.

### II.8.1. Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle a été découvert par Blaschke en 1972. Il ramène le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu.

De nombreuses variantes de commande vectorielle ont été présentées dans la littérature technique que l'on peut classer de la façon suivante [35]:

- Mode d'alimentation
  - Commande en tension
  - Commande en courant
- Détermination de la position du flux
  - Directe nécessite mesure du flux ou observation
  - Indirecte nécessite le contrôle de la fréquence de glissement
- Acquisition du flux
  - Fondée sur un modèle du rotor
  - Fondée sur un modèle du stator
  - Observation de flux
- Orientation du repère  $d, q$  sur
  - a- Flux rotorique , b- Flux statorique , c- Flux d'entrefer

### II.8.2. 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 [36].

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

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

$$[X_{dqo}] = [p(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad \text{II.14}$$

Où :

$d, q, o$  sont respectivement des composantes directe, quadratique et homopolaire. La matrice de Park de changement de base  $[P(\theta)]$  est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.15}$$

Où :

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

Le choix du coefficient  $(\sqrt{\frac{2}{3}})$  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 :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

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

### II.8.3. Mise en équation de la machine asynchrone

Le comportement de la machine peut être traduit par trois types de phénomènes régis par leurs équations respectives : équation électrique ; magnétique et mécanique [37].

### Equations électriques

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

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.17}$$

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

On définit les tensions statoriques et rotoriques comme suit

- **Phase statorique**

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.18}$$

$R_s$  : Résistance de la phase du stator.

- **Phase rotorique**

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

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.19}$$

$R_r$  : Résistance de la phase du rotor.

### Equations magnétiques

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad \text{II.20}$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{as} & M_s \\ M_s & M_s & L_{as} \end{bmatrix} \quad \text{II.21}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_r & M_r \\ M_r & L_{ar} & M_r \\ M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \quad \text{II.22}$$

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \quad \text{II.23}$$

$$= M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos \alpha & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad \text{II.24}$$

Avec :  $\alpha = \omega$

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & L_{as} & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_{as} & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_{ar} & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_{ar} & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.25}$$

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.18 ; II.19 et II.20 les équations électriques deviennent :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \} \quad \text{II.26}$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \} \quad \text{II.27}$$

#### II.8.4. Equation mécanique

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

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f \cdot \omega \quad \text{II.28}$$

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 :

$$C_{em} = \frac{1}{2} P [i_{sabc}]^t \frac{\partial}{\partial \Theta} [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad \text{II.29}$$

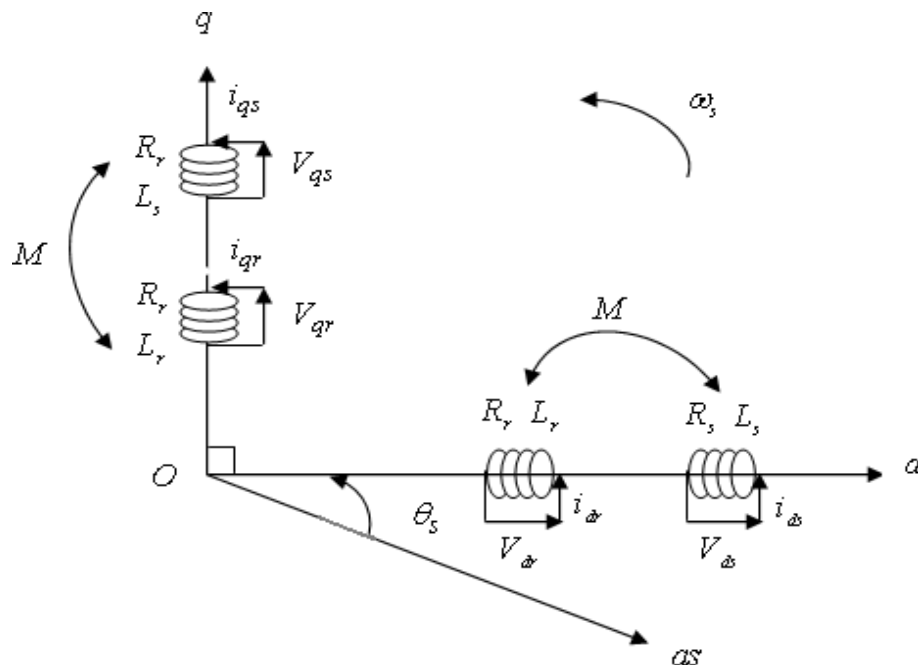
Avec  $p$  est le nombre de paires de pôles.

La résolution des systèmes d'équations II.8, II.9 et II.10 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.8.5. 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.9**[38].



**Figure II.9:**Modèle de Park de la machine asynchrone.

### Equations électriques

En appliquant la transformée de Park aux équations électriques II.11 et II.12 citées précédemment on aura :

$$V_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{ds} + R_S i_{ds} \quad \text{II.30}$$

$$V_{qs} = \frac{d\Phi_{qs}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{qs} + R_S i_{qs} \quad \text{II.31}$$

$$V_{dr} = \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{dr} + R_r i_{dr} \quad \text{II.32}$$

$$V_{qr} = \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{qr} + R_r i_{qr} \quad \text{II.33}$$

### Equations magnétiques

Les équations magnétiques deviennent

$$\Phi_{ds} = L_S \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad \text{II.34}$$

$$\Phi_{qs} = L_S \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad \text{II.35}$$

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad \text{II.36}$$

$$\Phi_{qr} = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad \text{II.37}$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & 0 & M & 0 \\ 0 & L_S & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{II.38}$$

Avec :

$l_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r$  : Inductance cyclique rotorique.

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

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

#### 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

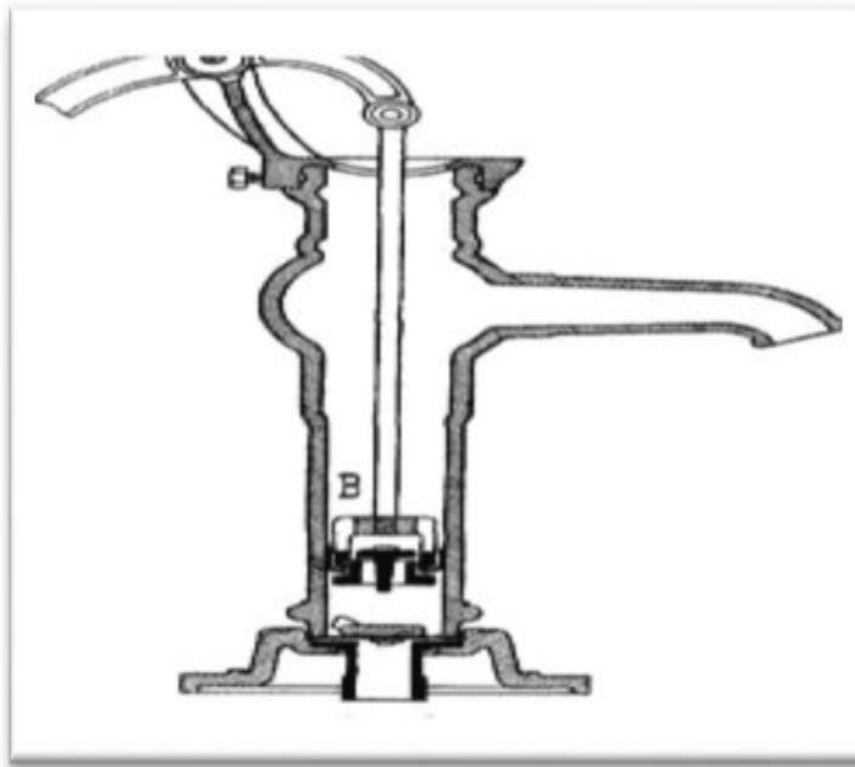
mutuelles et en appliquant la transformée de Park pour l'expression II.17, on aura l'expression suivante [39] :

$$C_{em} = P \frac{3}{2} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad \text{II.39}$$

## II.9. Modélisation de la pompe centrifuge

En raison de la nécessité urgente d'utiliser les eaux souterraines, le problème de son extraction apparaît, car les humains dépendent des roues manuelles et des pompes hydrauliques classiques [40].

Mais en conjonction avec l'émergence de moteurs électrique ,qui a été faite pour la première fois en 1888 par le célèbre physicien Nikola Tesla [41],les pompes à eau à propulsion électrique ont par la suit émergé ,qui peuvent être .



**Figure II.10:**Pompe a main absorbants Piston.

classifiées en deux sections principales :

- Les pompes volumétriques.
- Les pompes centrifuges.

Les principes des pompes centrifuges sont la technologie la plus utilisée dans les systèmes de pompage photovoltaïques. Les pompes centrifuges sont conçues pour une tête fixe et leur rendement en eau augmente avec la vitesse de rotation. Les pompes centrifuges sont simples, à prix réduit et sont disponibles pour une large gamme de débit. Dans la présente étude, le principe de base d'opération de la pompe centrifuge et le modèle mathématique sont développés pour décrire son comportement opérationnel [41].

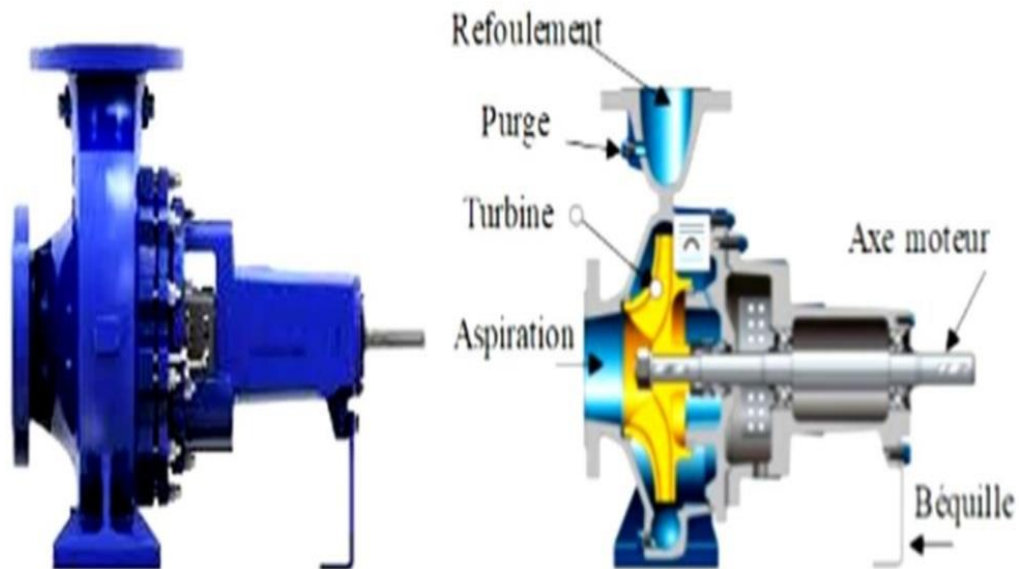


Figure II.11: Pompe centrifuge.

### II.9.1. La Hauteur Manométrique HMT

Est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

$$\text{HMT} = \Delta P = H_g + P_c \quad \text{II.40}$$

$$H_g = N_e + H_r \quad \text{II.41}$$

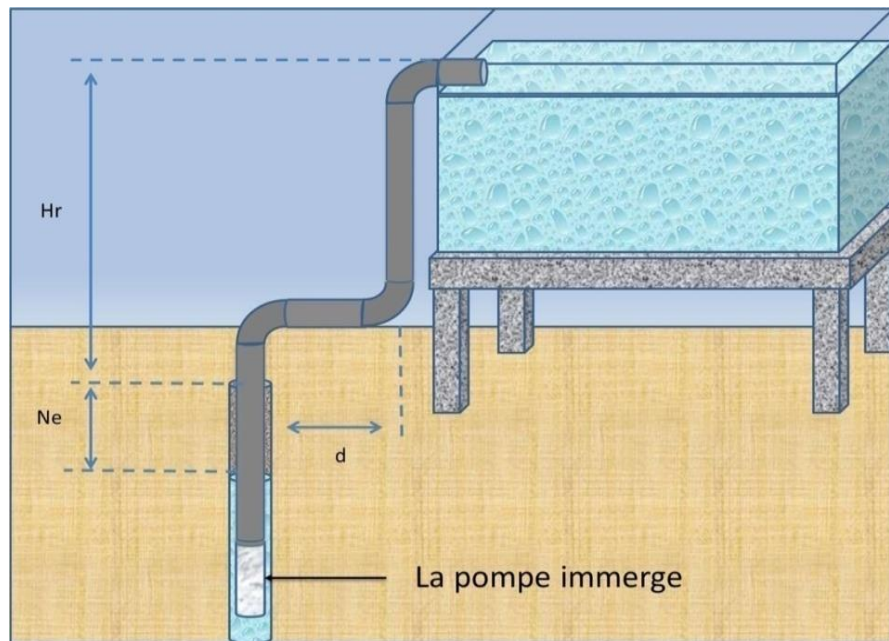
$H_g$  : hauteur géométrique entre le point dynamique d'aspiration et la hauteur de refoulement.

$N_e$ : niveau d'eau.

$H_r$  : la hauteur de refoulement.

$d$  : la distance entre le réservoir et le puits.

$P_c$ : pertes de charg



**Figure II.12:** Pompage d'eau dans un réservoir.

$$P_c = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad \text{II.42}$$

$\Delta H_1$ : les pertes de charges linéaires.

$\Delta H_2$ : les pertes de charges singulières.

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L V^2}{D 2g} \quad \text{II.43}$$

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad \text{II.44}$$

Donc :

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \right) \quad \text{II.45}$$

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{V^2}{2g} = \varepsilon \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \right) \quad \text{II.46}$$

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{V^2}{2g} = \varepsilon \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \right) \quad \text{II.47}$$

Alors :

$$P_C = \left( \lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^5 g} \right) = K_{fr} Q^2 \quad \text{II.48}$$

$\lambda$  : Coefficient de pertes de charges linéaires.

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

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

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

$v$  : Vitesse moyenne du fluide ( $m/s$ ).

$\varepsilon$  : Coefficient de pertes de charges locales.

$K_{fr}$  : Constante de la canalisation.

### II.9.2. Puissance Hydraulique

L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit [42] :

$$P_h = \frac{g \cdot \rho \cdot HMT \cdot Q}{3600} \quad \text{II.49}$$

$\rho$  : La masse volumique de l'eau étant de  $1000 \text{ Kg}/m^3$ .

### II.9.3. Rendement

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{ele}} \quad \text{II.50}$$

### II.9.4. Couple résistant

$$C_r = A \omega_r^2 \quad \text{II.51}$$

Avec :

A un coefficient de proportionnalité [ $(Nm / (rad \cdot S^{-1}))^2$ ] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$A = \frac{P_2}{\omega_n^2} \quad \text{II.52}$$

## **II.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous modélisons chaque composant de ce système qui est représenté dans (champ PV, convertisseurs (DC/DC, DC/AC)), moteur asynchrone ; pompe centrifuge). Et c'est en trouvant le modèle mathématique approprié pour chaque composant, cela nous permet d'étudier plus facilement ce système .

# **Chapitre III**

## **Dimensionnement et Résultats de simulation du système de pompage photovoltaïque**

### III.1.Introduction

Bien qu'il soit assez complexe de prédire le rendement précis d'une pompe solaire pour des conditions de fonctionnement variables, nous présentons ici une méthode simplifiée qui permettra de dimensionner le système de pompage photovoltaïque avec un degré de précision acceptable .

La modélisation et la simulation sont cruciales pour l'analyse, il est devenu possible de simuler le fonctionnement et le comportement de tout système, ce qui permet de gagner énormément de temps lors de la vérification et des tests des conceptions, ainsi que dans l'évaluation des performances et des limites des réalisations. Le logiciel utilisé est MATLAB/SIMULINK, car il permet de représenter facilement les systèmes dynamiques à l'aide de blocs accomplissant chacun une fonction prédéterminée.

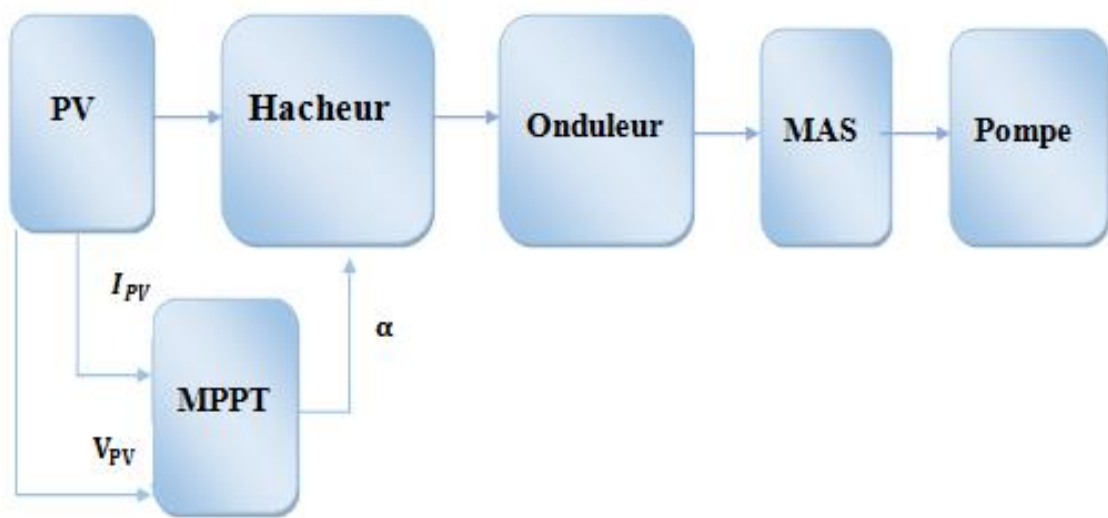


Figure III.1:Schéma d'association des éléments de pompage PV.

### III.2. Méthode de dimensionnement

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont [43] :

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

### III.3. Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau d'une population dépend de son mode de vie. Dans les zones rurales des pays pauvres, on estime 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail par jour. Pour l'irrigation, les besoins varient selon le type de culture et les conditions météorologiques, en se basant sur les pratiques locales. La capacité du réservoir doit refléter les besoins quotidiens et l'autonomie nécessaire du système [43].

### III.4. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

une fois que vous avez défini les besoins en volume d'eau nécessaires pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits, nous pouvons passer au calcul de l'énergie hydraulique nécessaire à partir de la relation [43]:

$$E_h = \frac{g * P_a * V_a * h}{3600} \quad \text{III.1}$$

Où :

$E_h$  : énergie hydraulique (WH/jour)

$h$ : hauteur totale (m)

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

$P_a$ : Densité de l'eau ( $1g/cm^3$ )

$g$  : accélération de la pesanteur ( $9,81m/s^2$ )

Pendant le pompage, le niveau d'eau dans le puits baisse jusqu'à ce que la régénération du puits équilibre la quantité d'eau pompée. La vitesse de cette baisse dépend de facteurs géologiques tels que le type de sol, la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère

La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique :

$$h = h_s + h_d \quad \text{III.2}$$

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

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

Où :

$h_s$  : Niveau statique (m)

$Q_p$  : Débit d'essai ( $m^3/h$ )

$h_d$ : Niveau dynamique (m)

$Q_A$ : Débit apparent ( $m^3/h$ )

La hauteur statique ( $h_s$ ) est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau [44].

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

$$h_d = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad \text{II.4}$$

Ou :

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

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

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

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

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

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

$$h_d = K_{ac} * \frac{V^2}{2g} \quad \text{III.5}$$

Où :

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

### III.5. Détermination de l'énergie solaire disponible

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire [44].

### III.6. Mois de dimensionnement

C'est une approche intelligente. En choisissant le mois le plus défavorable pour le dimensionnement, nous assurons que notre système sera capable de répondre aux besoins même dans des conditions peu favorables. En utilisant l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire de ce mois, nous pouvons concevoir un système robuste adapté à nos besoins spécifiques [ .

### III.7. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standards de mesure, CSM, (éclairage  $G_{ce}=1000 W/m^2$  et température de cellule  $T_c= 25 ^\circ C$ )

Est [44]:

$$P_p = \eta_g * A * G_{ce} \quad \text{III. 6}$$

Où :

$P_p$  : Puissance de sortie sous CSM ( $W$ )

$\eta_g$ : Rendement du générateur à la température de référence ( $25 ^\circ C$ )

$A$  : Surface active du générateur ( $m^2$ )

$G_{ce}$ : Éclairement dans les CSM ( $1000 W/m^2$ )

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

$$E_e = \eta_{pv} G_{dm}(\beta) \quad \text{III.7}$$

Où :

$\eta_{pv}$  : Rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

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

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

$$\eta_{pv} = F_m [1 - \gamma(T_C - T_{C,ref})] \eta_g \quad \text{III.8}$$

Où :

$F_m$  : Facteur de couplage.

$\gamma$ : Coefficient de température des cellules.

$T_C$  : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

$T_{C.ref}$  : Température considérées référence ( $^{\circ}C$ ).

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

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MP}} \quad \text{III.9}$$

Où :

$E_h$ : Énergie hydraulique moyenne mensuelle ( $KWh$ )

$\eta_{MP}$  : Rendement du sous-système moteur-pompe.

En substituant les équations III.6, III.7 et II.8 dans II.5, nous obtenons pour la puissance crête du générateur :

$$P_P = \frac{G_{ce}}{F_M [1 - T_C - T_{C,ref}] G_{dm(\beta)}} \cdot \frac{E_h}{\eta_{MB}} \quad \text{III.10}$$

### III.8. Dimensionnement du moteur

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque. Pour que le moteur électrique fournit une puissance mécanique demandée, il absorbe une puissance électrique à ses bornes [45].

$$\eta_m = \frac{P_{mec}}{P_e} \quad \text{III.11}$$

$$P_e = \frac{P_{mec}}{\eta_m} \quad \text{II.12}$$

$P_e$  : La puissance électrique ( $W$ )

$P_{mec}$  : La puissance mécanique ( $W$ )

$\eta_m$ : Le rendement de MSAP

### III.9. Dimensionnement de la pompe

Le débit crête  $Q$  ( $m^3/h$ ) est calculé par la relation [46] :

$$Q = \frac{3.6 P_h}{gh} \quad \text{III.13}$$

Où :

$P_h$  : Puissance hydraulique nécessaire ( $W$ )

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

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

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

$$P_h = P_e \eta_{MB} \quad \text{III. 14}$$

Où :

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

### III.10. Dimensionnement des tuyauteries

Le choix du diamètre des tuyauteries est un compromis entre les coûts d'installation initiaux et les économies d'énergie dues aux frottements. Un diamètre plus grand réduit les pertes d'énergie mais augmente les coûts d'installation, et vice versa. La formule de Bresse permet de déterminer le diamètre optimal en minimisant la somme des coûts d'installation et des coûts d'énergie. Cette méthode analytique aide les ingénieurs à estimer les diamètres les plus économiques en tenant compte des coûts à court et long terme [47]:

$$D = K\sqrt{Q} \quad \text{II.15}$$

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

$K$  : coefficient qui varie de 0,75 à 1,40

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

L'équation de continuité est:

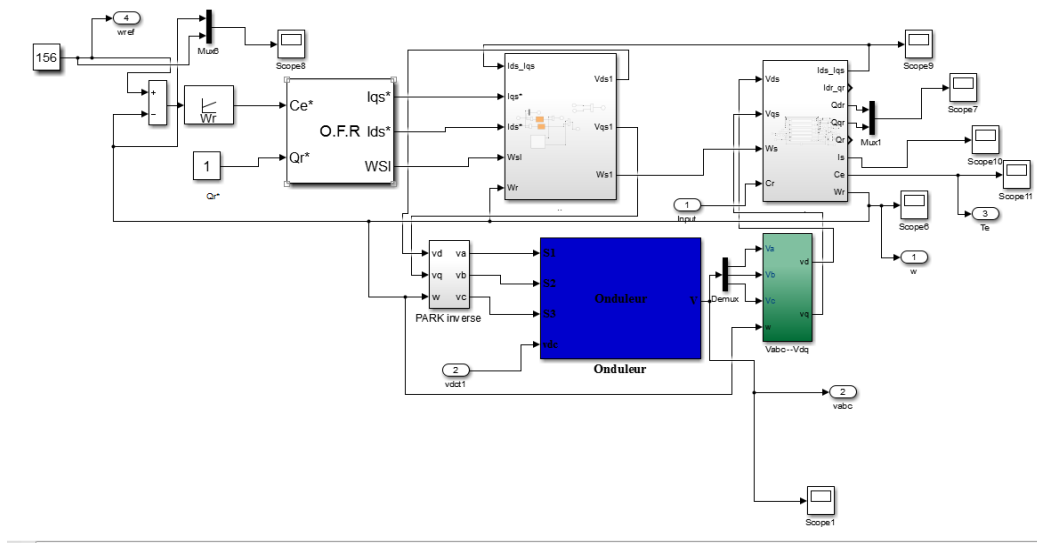
$$Q = \frac{\pi * D^2}{4} V \quad \text{II.16}$$

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

$$V = \frac{4}{\pi * K^2} \quad \text{II.17}$$

Quelque soit la formule employée, les diamètres obtenus diffèrent fréquemment des diamètres commerciaux. Il suffit de prendre la valeur du diamètre commercial le plus proche .

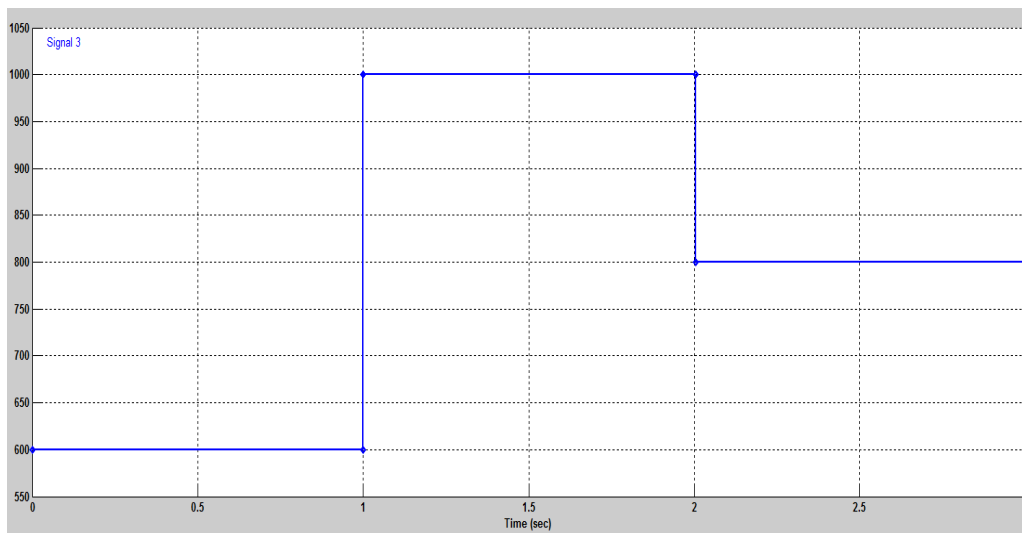




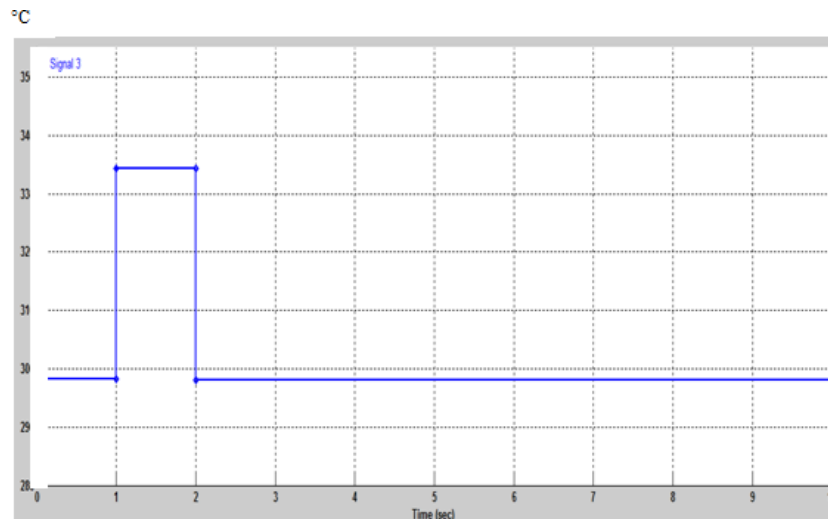
**Figure IV.2:** Schéma bloc de la commande de la MAS.

### III.11. Résultats de simulation

Le but est d'obtenir un débit d'eau stable dans de mauvaises conditions. Après avoir effectué des simulations, nous sommes arrivés à des résultats de débit d'eau stable dans les cas représentés dans les deux courbes suivantes:

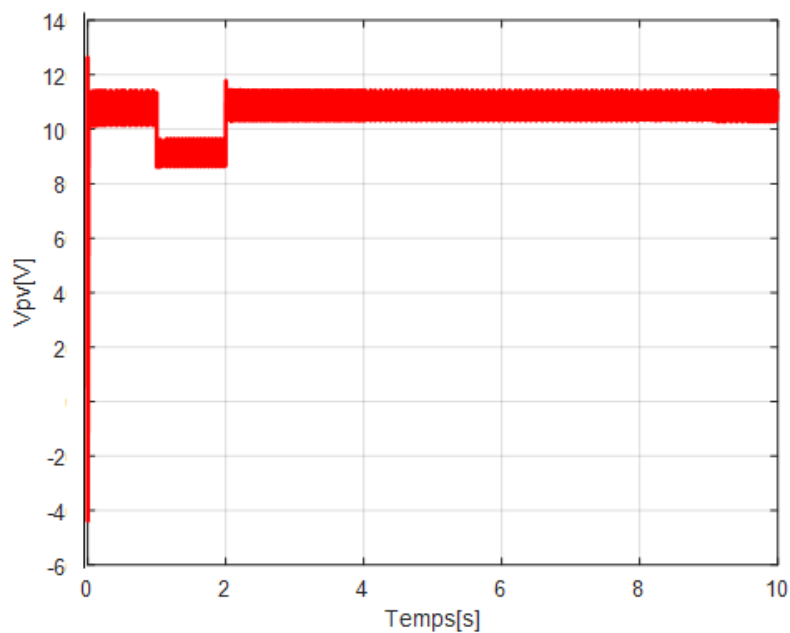


**Figure IV.3:** Courbe de irradiation variable.



**Figure IV.4** : Courbe de température variable.

on remarque sur l'image du changement de température ce qui suit : de 0 à 1 *Secondes* elle reste constante, puis sa valeur. Elle augmente au bout d'une seconde et sa valeur se stabilise entre 1 et 2 *Secondes*, puis diminue immédiatement au bout de deux secondes et reste constante pendant un certain temps. La courbe de rayonnement est également variable. Notez le début de la réception du panneau solaire à environ  $600 \text{ W/m}^2$  d'éclairements dans la plage de temps de 0 à 1 *Secondes*. On remarque alors une augmentation directe de l'irradiation de  $600 \text{ W/m}^2$  à  $1000 \text{ W/m}^2$ , rayonnement lorsqu'un temps de 1 *Secondes* est atteint, alors la valeur de  $1000 \text{ W/m}^2$ , rayonnement demeure constante entre une et deux secondes, puis une descente directe jusqu'à  $800 \text{ W/m}^2$ , rayonnements, et sa stabilité à cette valeur est comprise entre 2 et 3 *Secondes*.



**Figure IV.5**: Courbe de tension de panneau photovoltaïque

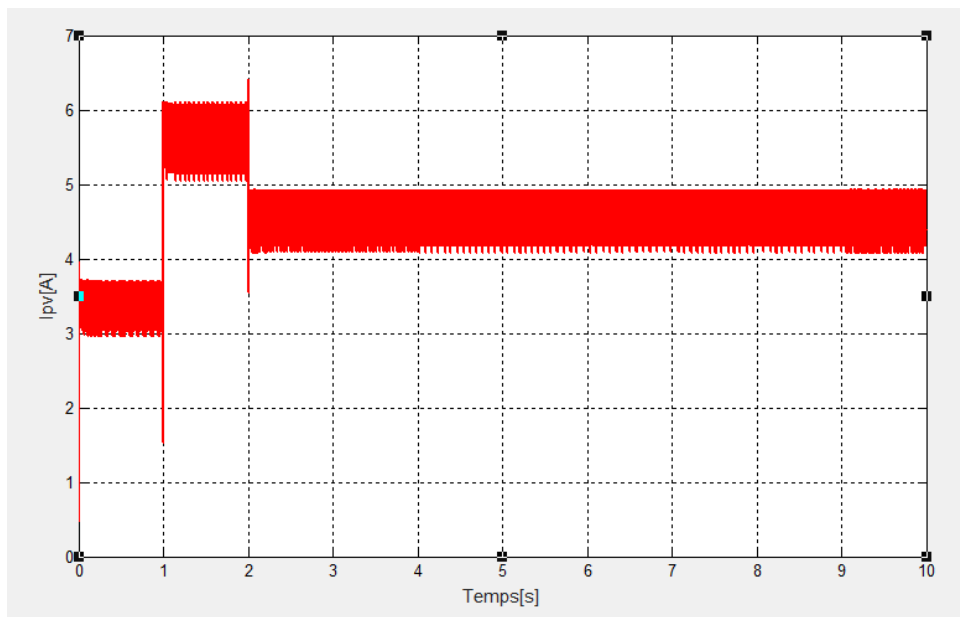


Figure IV.6: Courbe de courant de panneau photovoltaïque .

On remarque dans l'intervalle de temps de 1 à 2 *Secondes* sur **la figure III.5** une diminution de tension et sur **la figure III.6** une augmentation du courant de 3 A à 6 A.

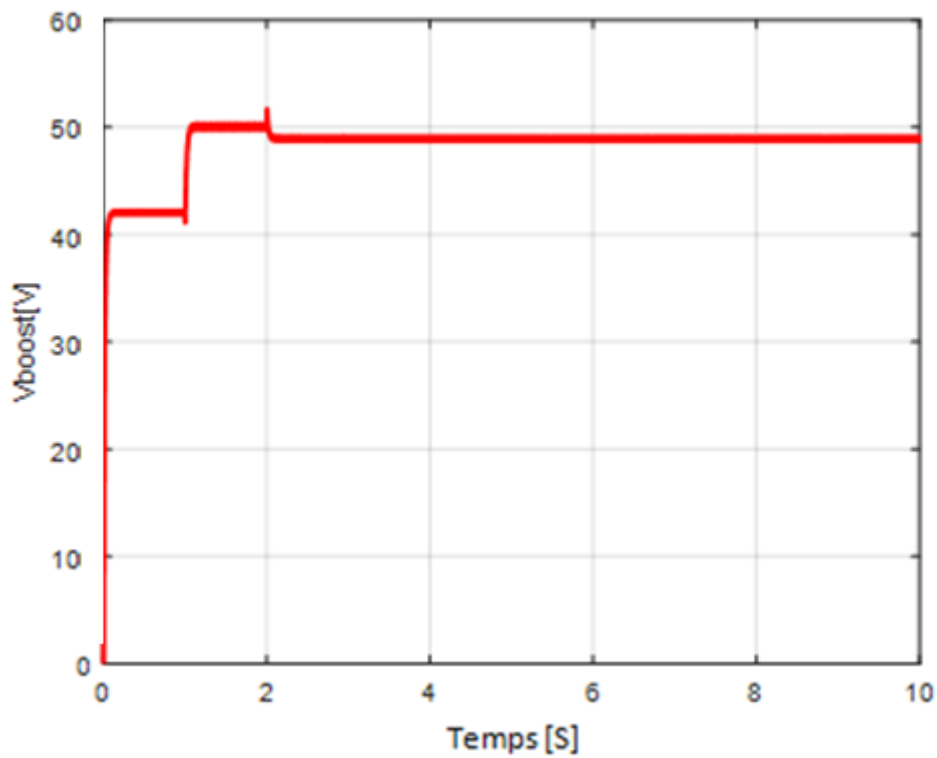


Figure IV.7: Courbe de tension de sortie de survolteur

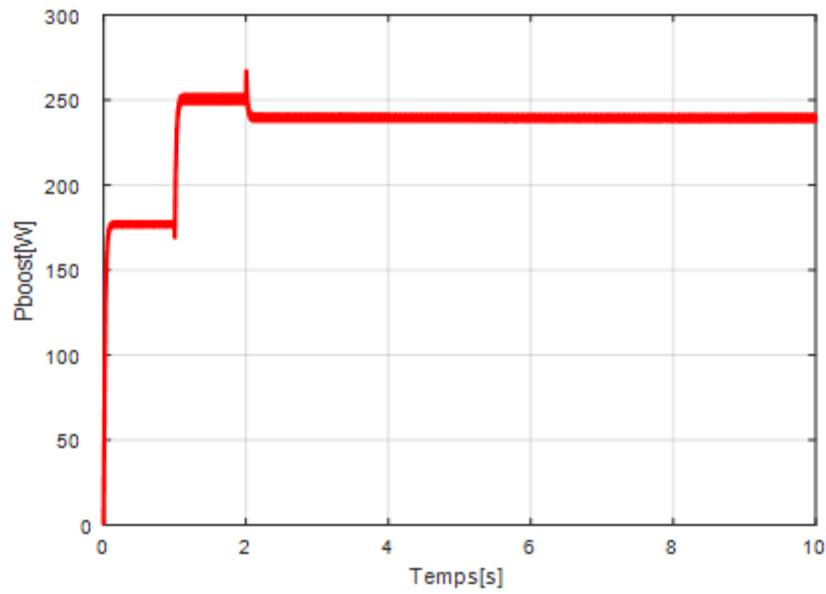


Figure IV.8: Courbe de puissance de sortie de survolteur

La figure III.7 montre une augmentation de tension de 12 V à 50 V sur une période de temps de 0 à 2 Secondes, et cela est dû à l'élément survolteur. Comme on peut le voir sur la figure III.8, dans la même période, une augmentation de puissance à 250 Watts en raison le survolteur augmente cette valeur. Et stabilité a cette valeur.

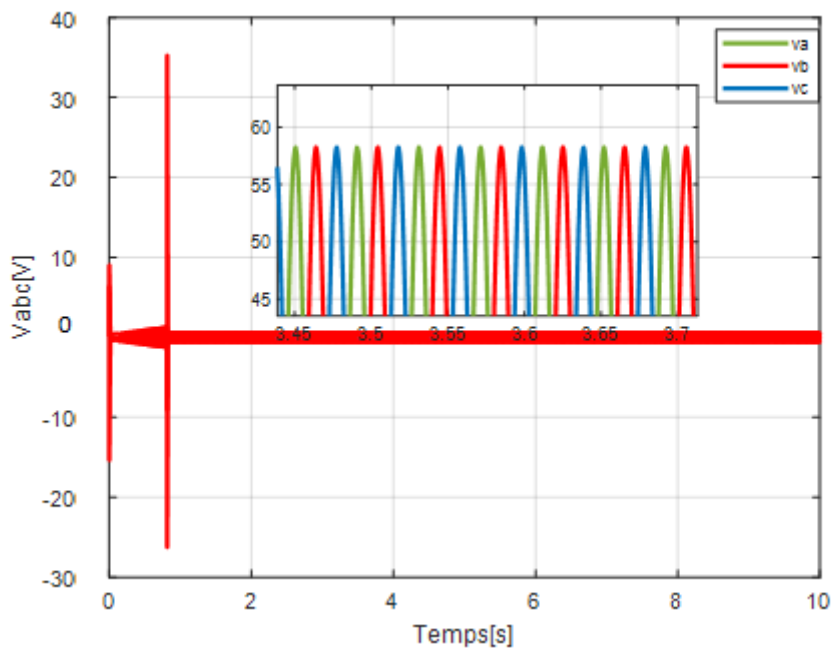
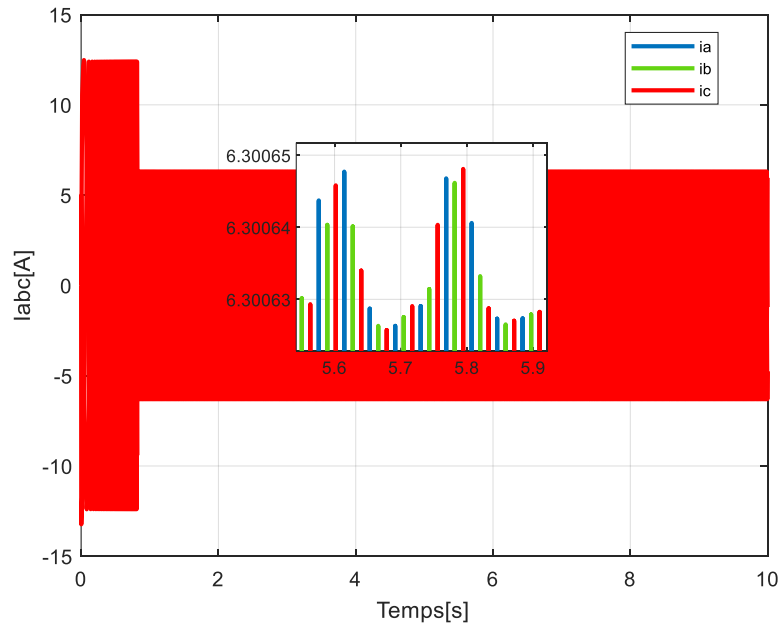
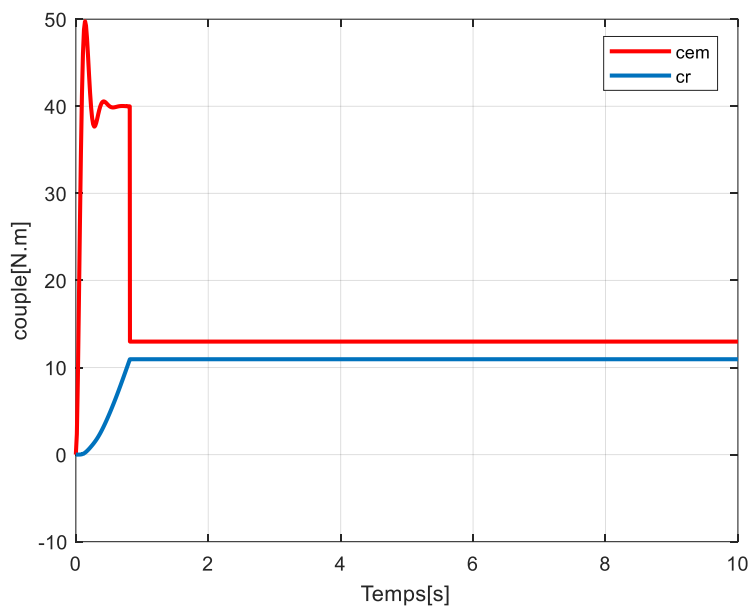


Figure IV.9: Courbe de 3 tension de sortie de l'onduleur



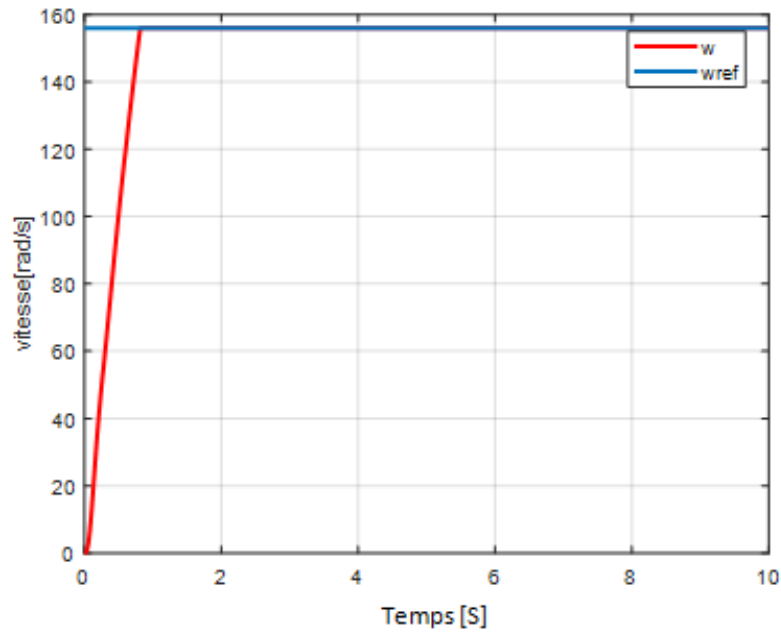
**Figure IV.10:** Courbe de 3 courant de sortie de l'onduleur

Dans les **Figures IV.9** et **IV.10** obtenant trois tensions  $V_a, V_b, V_c$  et trois courants  $I_a, I_b, I_c$ . On remarque également le changement de tension de continue à alternée après avoir ajouté l'élément onduleur.

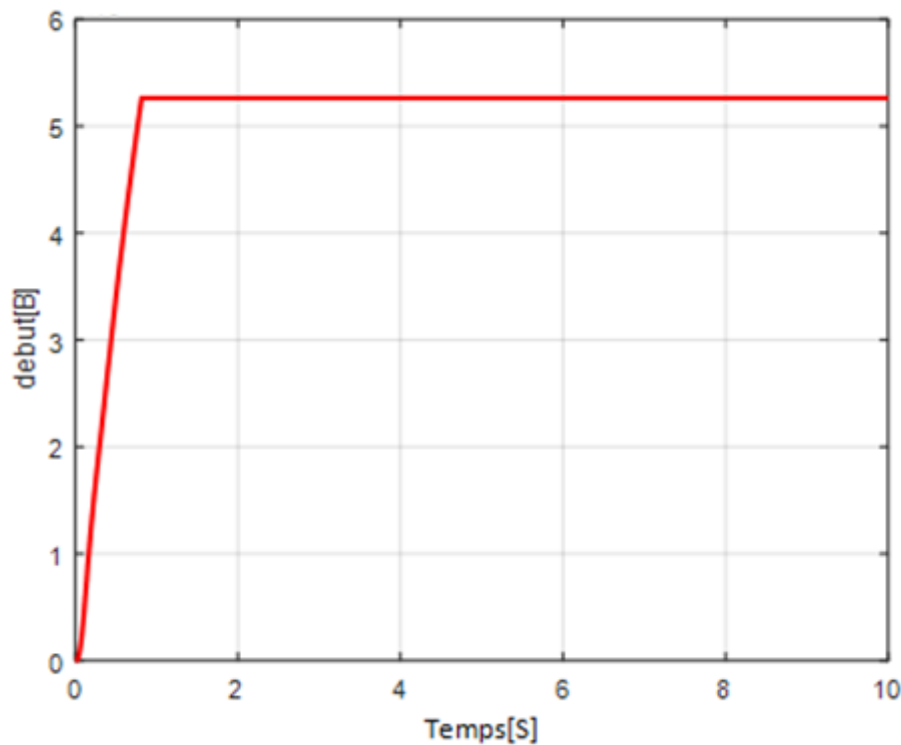


**Figure IV.11:** Courbe de couple électromagnétique et couple résistant

On remarque sur la **Figure IV.11** que le moteur démarre à un  $C_e$  très élevé jusqu'à  $50 \text{ N.m}$ , puis a diminué progressivement jusqu'à  $14 \text{ N.m}$ . On remarque également que  $C_r$  est passé de  $0 \text{ N.m}$  et s'est stabilisé à  $12 \text{ N.m}$ .



**Figure IV.12:** La vitesse référence et la vitesse de moteur



**Figure IV.13:** Courbe de débit de la pompe

Après cela on remarque sur la **Figure IV.12** que le régime moteur est passé de 0 à 156  $rad/s$  et stabilisé à Cette valeur est due au fait qu'il s'agit d'une valeur de référence.

**Figure IV.13** représente le changement du débit d'eau en partant de 0 puis en augmentant progressivement le débit jusqu'à un temps de 1 heure et en atteignant une valeur de 5,3 mètres cubes par heure et en restant constant à cette valeur pour le reste de toutes les heures de travail. Cela est dû à l'utilisation du régulateur PID.

### **III.12.Conclusion**

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

Et nous avons commencé par simuler le fonctionnement du MPPT à l'aide de l'algorithme de conditionnement de puissance P&O, puis une stratégie de contrôle vectoriel dans le sens du flux a été utilisée ici comme solution pour obtenir une séparation neutre du débit et du couple. Ceci nous a permis de conclure que le contrôle par l'algorithme MPPT permet d'optimiser les performances du système de production photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement. Obtention d'un débit d'eau constant grâce à un moteur asynchrone avec régulation PID.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le domaine d'énergies renouvelables, aujourd'hui les chercheurs travaillent sur ce domaine. Le système de pompage photovoltaïque à l'aide d'une machine asynchrone, c'est un sujet intéressé et récent.

Le but de cette adaptation est d'assurer un transfert maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale de générateur. La partie alternative du système étudié dans ce mémoire comporte : un onduleur de tension à deux niveaux, machine asynchrone et une pompe centrifuge et la simulation du fonctionnement de system pv et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension et puissance-tension.

Dans le premier chapitre , nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau .

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons a la modélisation de tous les éléments du système proposée toutes les équations de modélisation sont basées sur la littérature scientifique.

Dans la troisième chapitre , nous avons discuté des équations de base utilisées en dimensionnement.

Afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Cet étage est composé par un survolteur contrôlé par un algorithme dit P&O., nous avons fait une simulation complète du système en utilisant MATLAB/SIMILINK, nous avons présentés les différentes simulations des composants du système de pompage solaire tel que le générateur PV; le convertisseur et le groupe motopompe.

Et l'influence de changement de l'éclairement sur les performance groupe motopompe et l'efficacité de la commande MPPT pour l'adaptation de la puissance, aussi on a utilise la commande vectorielle pour avoir un découplage neutre flux et couple.

Les résultats de ces travaux permettent de déterminer les perspectives suivantes : l'utilisation de techniques d'optimisation telles que le PO pour extraire le maximum d'énergie photovoltaïque, et l'utilisation de l'élément survolteur ont joué un rôle dans l'amélioration de l'efficacité du système électrique lors de la simulations et réaliser une telle stabilisation. L'élément PID a également joué un rôle important dans les simulations, et tous ces éléments ont joué un rôle important pour obtenir un débit d'eau souhaité, obtenir un débit d'eau constant, puis effectuer des tests afin de valider le débit. résultats de simulation et tester l'efficacité de l'algorithme de gestion sur un système réel..

# Annexe

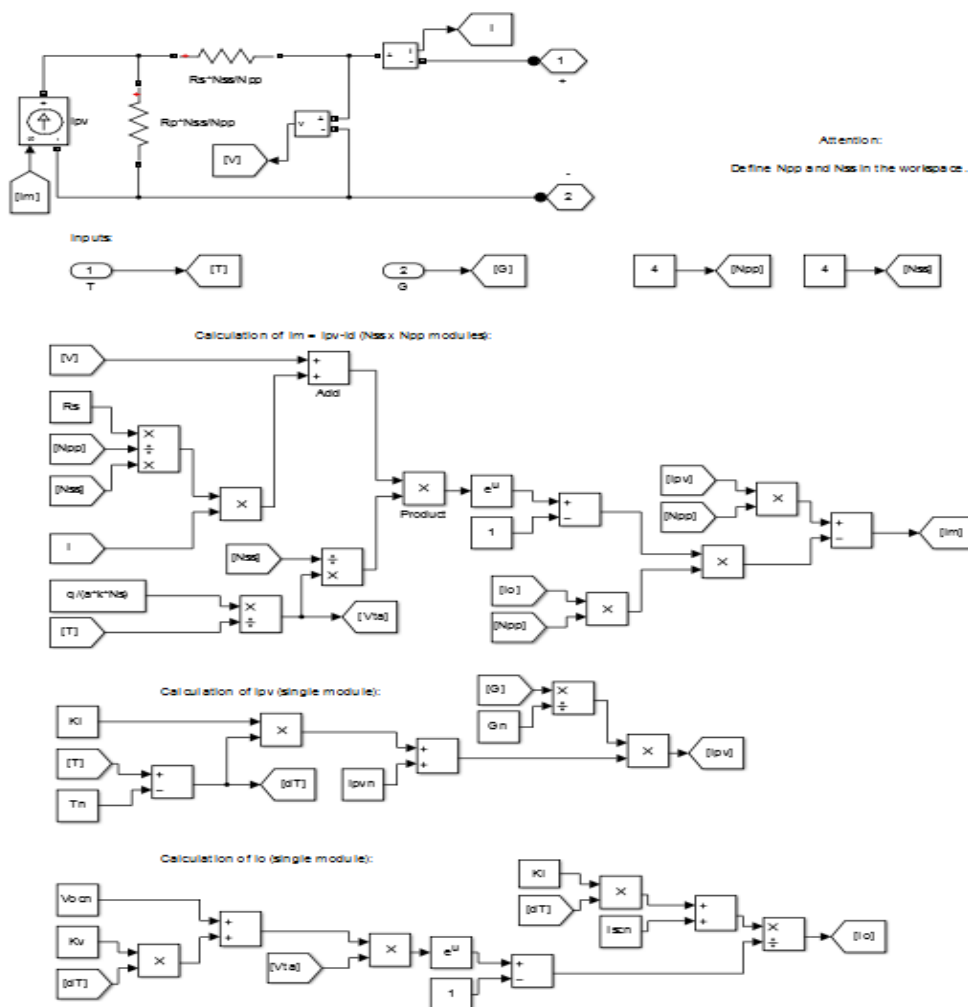
## Annexe

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

### ➤ Les caractéristiques du panneau photovoltaïque

$V_{PV}$	26.3 V
$I_{PV}$	10.6 A
$P_{pv}$	300 W
$T$	25+273.15 K
$N_{SS}$	2
$N_{PP}$	2
$V_{OC}$	32.9V
$R_S$	0.0221 $\Omega$
$N_S$	54
Irradiation	1000 W/m <sup>2</sup>

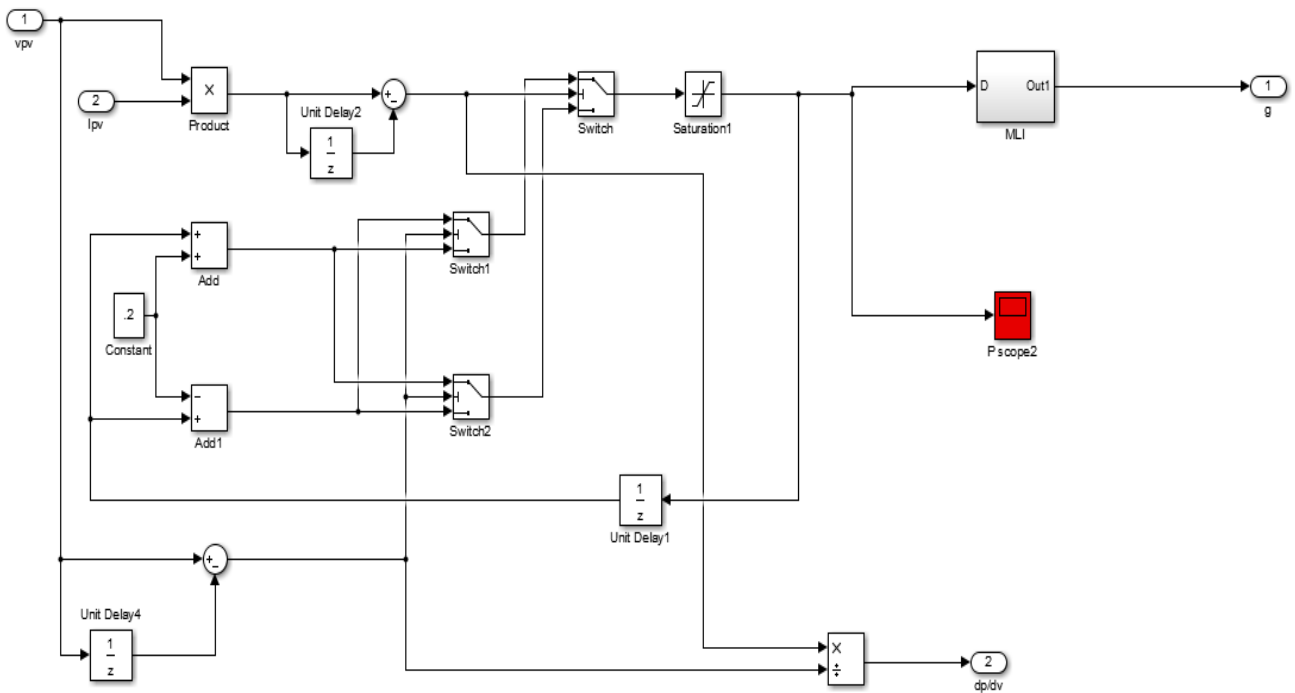
### ➤ Schéma de bloc de PV



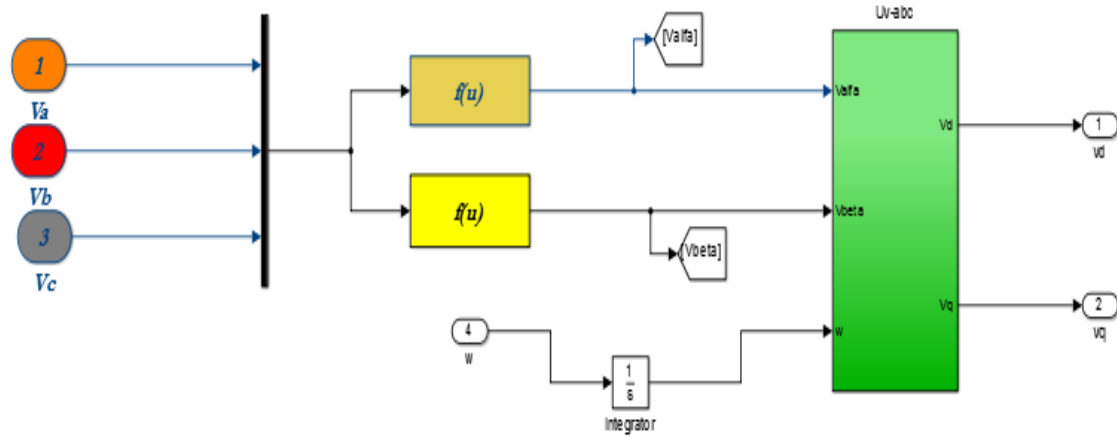
➤ **Les caractéristiques de la machine asynchrone**

Résistance statorique	1.75Ω
Résistance rotorique	1.68KΩ
nombre de paires de pôles	2
Fréquence	50Hz
l'inertie	0.35 Kg.m <sup>2</sup>
coefficient de frottement	0.026 Nm/rad/s
L'inductance statorique	0.295H
L'inductance rotorique	0.165 H
l'inductance mutuelle	0.195H
couple électromagnétique	12N.m
Courant statorique	13A
Vitesse	1500 tr/min

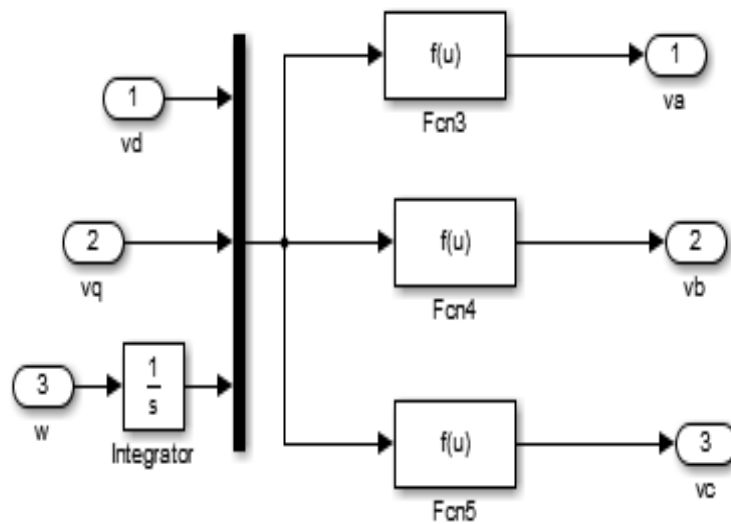
➤ **Schéma de bloc de MPPT**



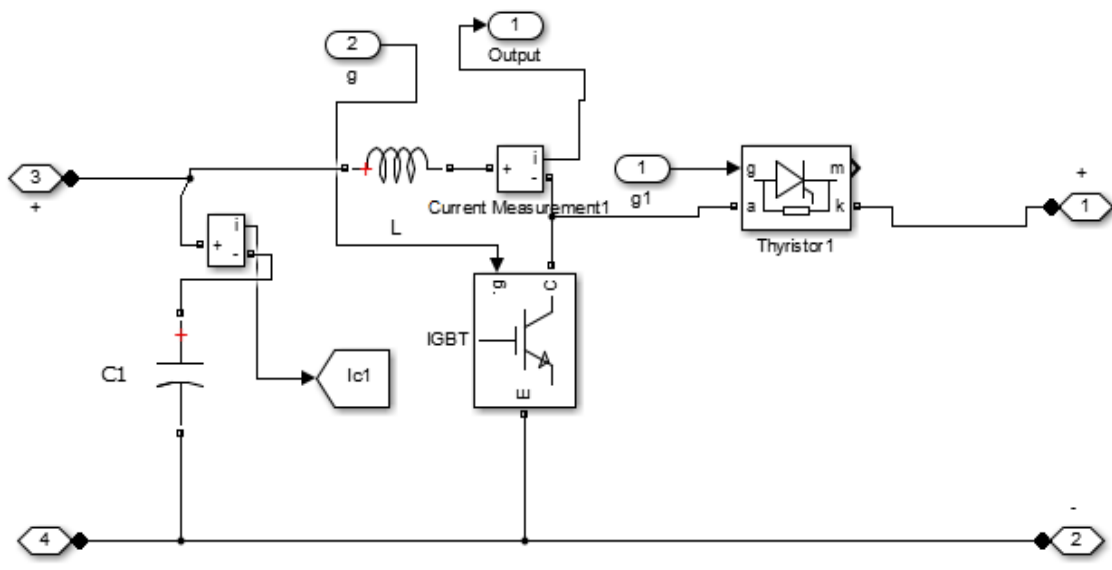
➤ Schéma bloc de Park



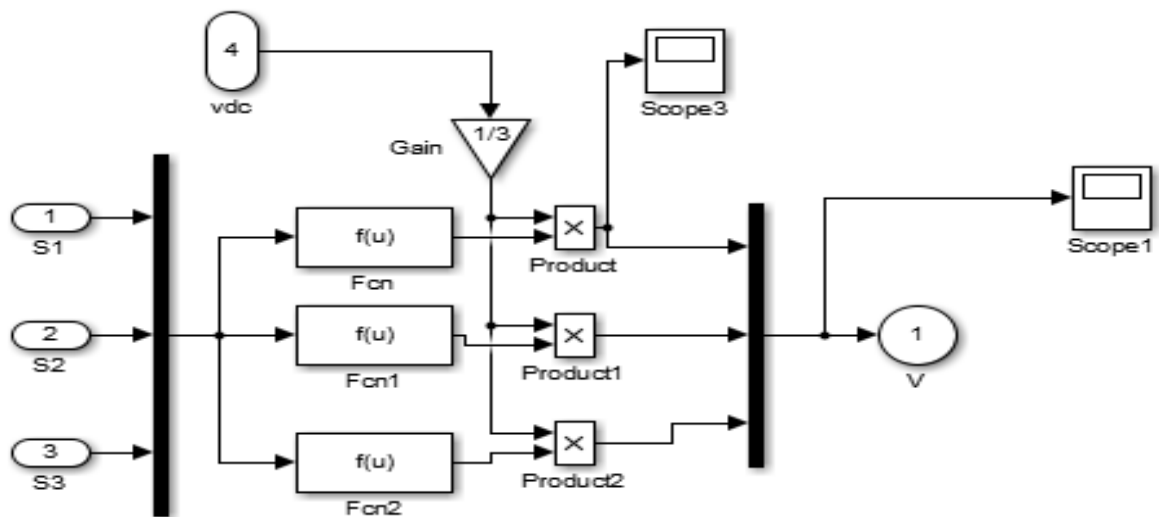
➤ Schéma bloc de Park inverse



➤ Schéma bloc de survolteur



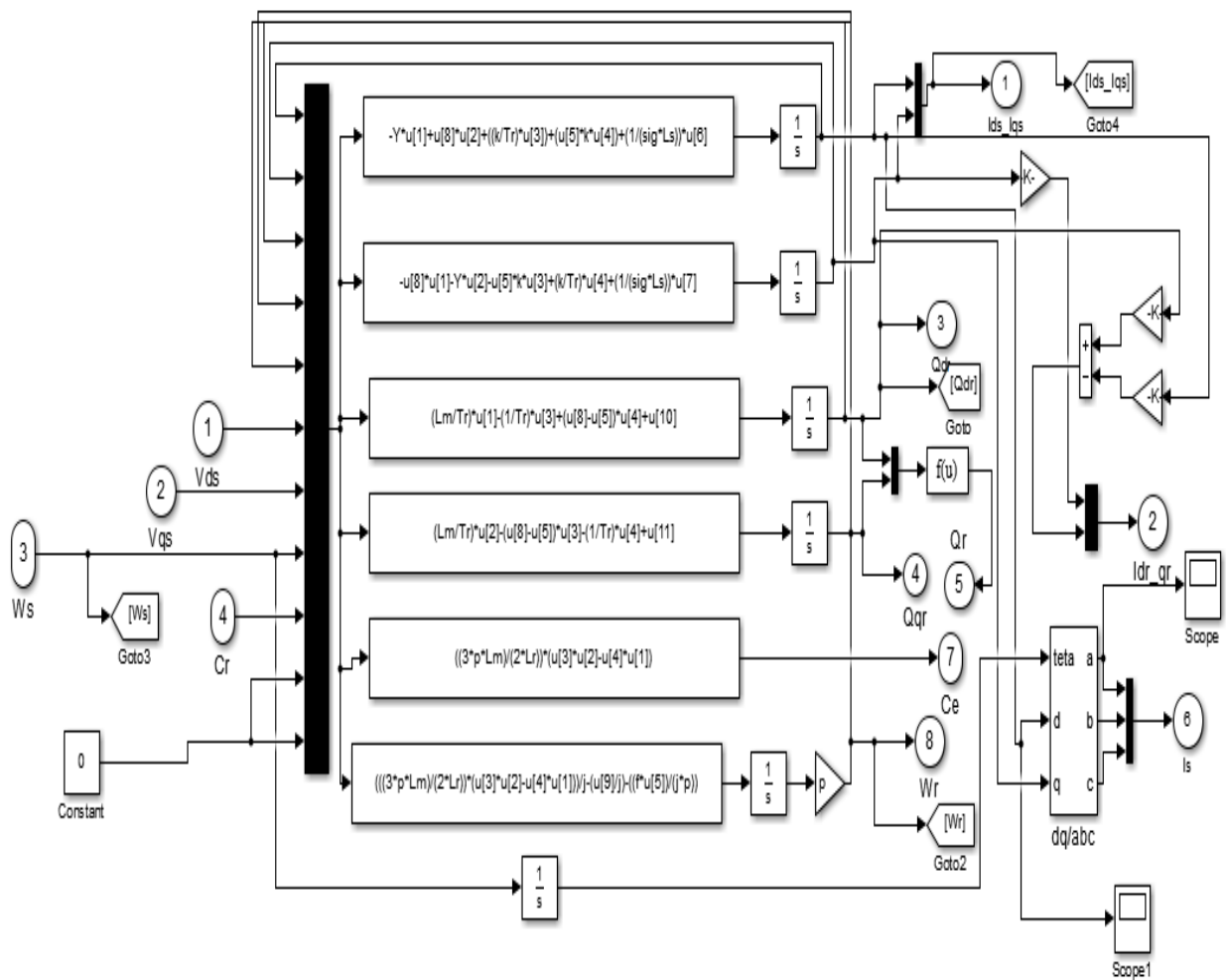
➤ Schéma bloc de l'onduleur



➤ **Les caractéristiques de la pompe centrifuge**

Hauteur géométrique	10m
Diamètre	0.06m
Accélération de la pesanteur	9.81m/s <sup>2</sup>
Longueur	7.4m
Densité d'eau	1 g/cm <sup>3</sup>

➤ **Schéma de bloc de la machine asynchrone**



# Références bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] R. Abahri, O. l'hocine Mezaguer Slimane, and L. Arab, "Etude d'une centrale photovoltaïque," UMMTO.FGEI, Tizi Ouzou, 2005.
- [2] B. Alimarina, Aoua Z., and Mouri, "Etude et conception d'une armoire de commande à démarreur électronique progressif - application à un groupe électropompe d'une station de pompage d'eau potable," UMMTO.FGEI, Tizi Ouzou, 2006.
- [3] K. Bai, V. Sindhu, and A. Haque, "GridIntegration Issues of Photovoltaic Systems and Islanding Detection," IETE Journal of Research, vol. 69, pp. 1-16, Apr. 2023. doi: 10.1080/03772063.2023.2195835.
- [4] P. Barret, Régimes transitoires des machines tournantes électriques, 2nd ed. Paris: Eyrolles, 1987.
- [5] A. Belazougui, "Modélisation et commande d'une machine asynchrone pentaphasée alimentée par onduleur de tension," Thesis, 2020.
- [6] D. BELLALA, "Contribution à l'Optimisation des Systèmes de Conversion d'Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques," doctoral dissertation, Université de Batna 2, 2009.
- [7] A. Cheikh and M. Salah, "Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques," Thesis, 2007.
- [8] A. Diche, K. Ghedamsi, K. Djamila, and O. Fetta, "Commande d'un Système de Pompage Photovoltaïque."
- [9] A. Hamidat, A. Hadj Arab, and M. Boukadoum, "Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie," Rev. Energ. Ren., vol. 8, pp. 157-166, Dec. 2005. doi: 10.54966/jreen.v8i2.859.
- [10] T. Irekti, Bekkou Khalidja, and M. Rachek, "Modélisation et simulation de la machine asynchrone pentaphasée associée à un onduleur de tension," UMMTO.FGEI, Tizi Ouzou, 2007.
- [11] T. La La mamaadyad, D. Abdessemed, Y. Guehrar, and M. R. Razoug, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque."
- [12] J. Laroche, Electronique de puissance Convertisseurs: Cours et exercices corrigés. Dunod, 2005.
- [13] M. L. LOUAZENE, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla," magister dissertation, Université de Batna 2, 2008.

- [14] M. Mokhtar, B. Hamid, and T. M. Naseer, "Etude de l'Energie Photovoltaïque pour le pompage de l'Eau Potable dans les Zones Rurales et l'Eau de Sanitaire des Mosquées."
- [15] A. C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," PhD thesis, INSA de Toulouse, 2006.
- [16] D. G. Tahar, "Etude du Stockage de l'Energie Solaire photovoltaïque sous forme d'air comprimé."
- [17] ع. جعلاب, "Diagnostic des défauts d'un système d'énergie renouvelable basée sur les techniques d'intelligence artificielle: application sur un système photovoltaïque," Thesis, Ziane Achour University of Djelfa, 2020.
- [18] L. Azouagh, Z. Djamila, and M. Dahmani, "Onduleur | Pompe."
- [19] A. Tizzaoui, N. Khemchane, and Z. Azez, "Technique de diagnostic des défauts statorique d'un moteur asynchrone," Thesis, Université de Bejaia, 2017.
- [20] S. Motahhir, A. E. Ghzizal, and A. Derouich, "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM," in Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes, Fès, Morocco, May 2015.
- [21] E. Moussa and B. Belaid, "Modélisation et commande d'un onduleur triphasé multi-niveaux," Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [22] M. T. Boukadoum, A. Hamidat, and N. Ourabia, "Le Pompage Photovoltaïque," Centre de Développement des Energies Renouvelables, Alger, Rev. Energ. Ren.: Zones Arides (2002), pp. 69-73.
- [23] L. Rieul and D. Baudequin, Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation. Cemagref Editions, 1996, p. 102.
- [24] A. Aissa and A. Karim, "Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque," Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [25] M. M. Nadjib and B. Hocine, "Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque," Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [26] K. Amrouche, R. Abdelli, Promoteur, and N.-E. Benhacine, "Etude et dimensionnement d'un système de pompage et multi-sources.," Thesis, Université Abderrahmane Mira, 2018.
- [27] A. Djafour, "ETUDE D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE POUR L'IRRIGATION D'UNE PALMERAIE A OUARGLA," vol. 1.
- [28] K. Hamitouche, Promoteur, D. Issaadi, N. Dairi, M. Larbaa, and co-promoteur, "Etude d'un système de pompage photovoltaïque," Thesis, Université A.MIRA-BEJAIA, 2021.
- [29] S. Belaid, Promotrice, and L. Boudjenah, "Etude d'un système de pompage hybride Eolien photovoltaïque," Thesis, Université Abderrahmane Mira Béjaia, 2013..

- [30] A. Hadj Arab, M. Benghanem, and A. Gharbi, "Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque," *J. Ren. Energies*, vol. 8, no. 1, pp. 19-26, Jun. 2005. doi: 10.54966/jreen.v8i1.846.
- [31] A. Beloui, S. Belaid, and F. Attia, "Amélioration de la qualité d'énergie d'un système photovoltaïque connecté au réseau," Thesis, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2019.
- [32] A. Mefti, Y. Bouroubi, and A. Khellaf, "Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie," *J. Ren. Energies*, vol. 2, no. 2, pp. 69-85, Dec. 1999. doi: 10.54966/jreen.v2i2.931.
- [33] D.-R. Chouiter, "Conception et réalisation d'une commande robuste de machine asynchrone," 1997.
- [34] S. MAKHLOUFI, "CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES PAR DES COMMANDES INTELLIGENTES," doctoral dissertation, Université de Batna 2, 2013.
- [35] S. Latreche and K. Eddine Bouzid, "Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino uno," Oct. 2016.
- [36] D. Saheb-Koussa and M. Haddadi, "Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement « Matlab »,," 2007.
- [37] A. Bouden, "Modélisation de système de pompage photovoltaïque optimisé," 2013.
- [38] L. Baghli, "Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone," 2020.
- [39] F. Hananou and A. Rouabah, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque," 2020.
- [40] A. B. Learreta, A. C. Pastor, C. Alonso, et C. Cabal, "Réalisation de Commandes MPPT Numériques," 2006.
- [41] R. Hammoud, K. Mabrouk, K. D. Eddine, H. Mabrouk, et H. M. Naguib, "Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone," 2007.
- [42] A. Ait laachir, T. Jarou, M. Sedra, et A. Kachani, "Contrôleur flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un champ Photovoltaïque," 2014.
- [43] S. Belaid, promoteur, S. Bedjou, et R. Amrouche, "Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque," Thesis, Université Abderrahmane Mira- Bejaia, 2016.
- [44] D. Rekioua, promotrice, S. Mouloudji, et M. Mezzai, "Contribution à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque," Thesis, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2014.
- [45] B. S., Promoteur, S. Sali, et A. Ouakli, "Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque," Thesis, Université de Bejaia, 2017.

- [46] Dominique Bareille and Jean-Pierre Daunis, *Électrotechnique: Transformateurs et machines tournantes*. Amazon.fr.
- [47] Ahlam, B. A. A. D. J. I., & Imane, C. H. E. R. G. U. I., "Extraction des Paramètres du Module Photovoltaïque," Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAFM'SILA, 2019.

## ملخص

يعد استخدام الطاقة الشمسية في المواقع المعزولة لتطبيقات مختلفة، مثل ضخ المياه، ذا أهمية أساسية للإنسان خصوصا في الصحراء الجزائرية مع امتلاكها كميات هائلة من الطاقة الشمسية.

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بالتحجيم و النمذجة و محاكاة نظام الضخ الكهروضوئي . يتكون هذا النظام من مجموعة من العناصر المتفاعلة ؛ و هي الألواح الكهروضوئية ، و MPPT، و عاكس الجهد ، و المحرك غير المتزامن ثلاثي الأطوار ، و مضخة الطرد المركزي ، و الدائرة الهيدروليكية.

## كلمات مفتاحية:

لوحة الضوئية ؛ ضخ بالطاقة الشمسية ; محول مستمر /مستمر ,تتبع نقطة القوة القصوى.

## Résumé

L'utilisation de l'énergie solaire dans des sites isolés pour diverses applications, comme le pompage de l'eau, est d'une importance fondamentale pour les populations, en particulier dans le désert algérien, avec sa possession d'énormes quantités d'énergie solaire.

Les travaux présentés dans ce mémoire, concernent le dimensionnement, la modélisation, la simulation d'un système de pompage photoélectrique. Ce système se compose d'un groupe d'éléments en interaction; Ce sont des panneaux photoélectriques, MPPT, inverseur, moteur asynchrone triphasé, pompe centrifuge et circuit hydraulique.

## Mots clés:

Panneau photovoltaïque; pompage solaire; convertisseur DC/DC; Moteur MPPT perturbe & observe.

## Abstract

The use of solar energy in isolated sites for various applications, such as pumping water, is of fundamental importance to populations, especially in the Algerian desert, with its possession of huge amounts of solar energy.

The work presented in this thesis concerns the sizing, modeling, simulation of a photoelectric pumping system. This system is made up of a group of interacting elements; these are photoelectric panels, MPPT, inverter, three-phase asynchronous motor, centrifugal pump and hydraulic circuit.

## Keywords:

Solar panel; solar pumping; DC/DC converter ; MPPT engine disturbs & observes