

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :  
**Électrotechnique**  
*Option : Énergie renouvelable en électrotechnique*

Intitulé :

---

# COMMANDE D'UN SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE À BASE D'UN MOTEUR SYNCHROME A AIMANTS PERMANENTS

---

Présenté par :

- FATHI Abdelbaqi
- ACHEM Mohammed Yassine
- DELBAZ Sofien

*Soutenu le : 07/07/2021 Devant le Jury :*

*M. HABCHI Yassine*

*MCB Centre Universitaire Naâma*

*Président*

*M. BENMOHAMED Fayçal*

*MCB Centre Universitaire Naâma*

*Encadreur*

*M. RAHIMI Mohammed*

*MCB Centre Universitaire Naâma*

*Examineur*

Naama – Algérie - 2021

## *Remerciements*

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier le puissant dieu  
Pour son aide et sa bénédiction qui nous a donné la santé et le courage  
afin d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements à notre encadreur  
Monsieur **BENMAMHAMAD Fayçal** « maitre de conférence classe B »  
pour son aide et son encouragement tout au long de la recherche.*

*Nous remercions aussi les membres du jury  
Mr. **HABCHI Yassine** « maitre de conférence classe B »,  
Mr. **BRAHIMI Mohammed** « maitre de conférence classe B »  
d'avoir accepté ce travail.*

*Nous voudrions exprimer également notre profonde gratitude à nos  
professeurs du département du Sciences et Technologies au centre  
universitaire **SALHI Ahmed de Naama**, qui nous ont accompagnées tout  
au long de notre cursus universitaire.*

*Tous nos remerciements vont au toute la promotion Master à Naama.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience. A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.*

- *Mes chers Parents.*
- *Mes Frères.*
- *Mes Sœur.*
- *Ma Famille et tous mes Proches.*
- *Et à tous qui me connaît et compte sur moi...*
- *Tous mes Amis(es)*

Remerciement .....	I
Dédicace .....	II
Sommaire .....	III
Liste des figures .....	VII
Notation et symboles .....	IX
Introduction générale.....	02

## *Chapitre I*

### *Etat de l'art des systèmes de pompage photovoltaïque*

I.1 Introduction.....	05
I.2 Rayonnement solaire.....	05
I.3 Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque .....	09
I.4 Technologies des cellules photovoltaïques .....	10
I.4.1 Les cellules au silicium cristallin, .....	10
I.4.2 Les cellules à base de couches minces .....	10
I.4.3 Les cellules à base de photovoltaïque organique, .....	11
I.5 Les avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	11
I.5.1 Avantages .....	11
I.5.2 Inconvénients.....	12
I.6 Classification des systèmes photovoltaïques .....	13
I.6.1 Les systèmes photovoltaïques autonomes .....	13
I.6.2 Les systèmes photovoltaïques hybrides.....	13
I.6.3 Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau .....	13
I.6.4 Les systèmes de Pompage photovoltaïque .....	14
I.6.4.1 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque.....	15
a- Systèmes de petite puissance (50-400W). .....	15
b- Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W) .....	16
I.6.4.2 Technologie des moteurs .....	17

a- Moteur à courant continu .....	17
b- Moteur à courant continu sans balais .....	18
c- Moteur a courant alternatif .....	19
I.7 Conclusion .....	21

## **CHAPITRE II**

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

II Introduction .....	23
II.1 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent triphasée .....	23
II.1.1 Présentation de la machine synchrone à aimant permanent triphasée .....	23
II.1.1.1 Stator.....	23
II.1.1.2 Rotor .....	24
a- Aimants en surface .....	25
b- Aimants insérées .....	25
c- Aimants enterrés .....	25
d- Aimants à concentration de flux.....	25
II.1.2 Autopilotage de la machine synchrone à aimant permanent triphasée .....	26
II.1.3 Analyse du fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent .....	26
II.1.4 Avantages du moteur synchrone à aimant permanent.....	27
II.1.5 Inconvénients du moteur synchrone à aimant permanent .....	27
II.1.6 Domaines d'application du moteur synchrone à aimant permanent .....	28
II.1.7 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent triphasée .....	28
II.1.7.1 Equations électriques .....	28
II.1.7.2 Equation Mécanique .....	30
II.1.8 Simulation et validation du modèle de la MSAP .....	31
II.2 Modélisation d'onduleur .....	31
II.2.2 Types d'onduleurs et leurs applications .....	32
II.2.2.1 L'onduleur autonome.....	32

---

II.2.2.2 L'onduleur non autonome (ou assisté) .....	33
II.2.2.3 L'onduleur de tension .....	33
II.2.2.4 L'onduleur de courant.....	35
II.2.3 Stratégie de commande MLI Sinusoïdale .....	36
II.2.4 Simulation de la commande MLI Sinus – Triangle .....	37
II.3 Modélisation de la pompe centrifuge .....	39
II.3.1 La pompe centrifuge .....	39
II.3.2 Constitution de la pompe centrifuge .....	39
II.3.3 Fonctionnement de la pompe centrifuge .....	40
II.3.4 Caractéristiques de la pompe centrifuge .....	40
II.3.4.1 La courbe débit-hauteur.....	40
II.3.4.2 Courbe du rendement.....	41
II.3.5 Schéma bloc de la pompe centrifuge .....	42
II.4 Modélisation du générateur photovoltaïque .....	42
II.4.1 Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	42
II.4.1.1 Modèle idéale .....	42
II.4.1.2 Modèle réelle .....	43
II.4.2 Influence de température et l'éclairement sur la caractéristique de la cellule PV .....	44
II.4.2.1 Influence de la température .....	44
II.4.2.2 Influence d'éclairement .....	45
II.5 Résultats de simulation.....	47
II.5.1 Interprétation des résultats .....	48
II.6 Conclusion .....	48

---

**CHAPITRE III*****Commande du système de pompage photovoltaïque***

III.1 Introduction .....	50
III.2. Principe de la commande vectorielle .....	51
III.3. Schéma Bloc.....	55
III.3.1. Résultats et abusions .....	56
III.4 Conclusion.....	58
Conclusion générale .....	60
Références bibliographies .....	62

**Liste des figures**

Figure I.1 : Le soleil. ....	05
Figure I.2 : L'atmosphère du rayonnement solaire traversé. ....	06
Figure I.3 : Les étapes d'absorber les rayonnements solaires par la terre. ....	07
Figure I.4 : Le flux énergétique du rayonnement solaire absorbé.....	08
Figure I.5 : Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air masse AM. ....	08
Figure I.6 : Puissance solaire pour différents ciels. ....	09
Figure I.7 : Constitution d'une cellule photovoltaïque ....	10
Figure I.8 : Classification des principales technologies de cellules solaires PV.....	11
Figure I.9 : Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau .....	14
Figure I.10 : Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque.....	15
Figure I.11 : Systèmes de petite puissance. ....	16
Figure I.12 : Les systèmes de moyenne puissance.....	17
Figure II.1 : Différentes structures des rotors des MSAP .....	24
Figure II.2 : Schéma de principe d'autopilotage de MSAP. ....	26
Figure II.3 : Caractéristique du couple-angle électrique. ....	27
Figure II.4 : Commande de MSAP en boucle ouverte.....	31
Figure II.5 : Schéma de principe de l'onduleur. ....	32
Figure II.6 : Alimentation sans coupure. ....	32
Figure II.7 : Convertisseur de fréquence. ....	33
Figure II.8 : Représentation schématique d'un onduleur de tension. ....	33
Figure II.9 : Onduleur de tension en triphasé à thyristors. ....	34
Figure II.10 : Représentation schématique d'un onduleur de courant. ....	35
Figure II.11 : Onduleur de courant en pont triphasé à thyristors. ....	35

Figure II.12 : Principe de la commande MLI-ST. ....	36
Figure II.13 : Simulation de la commande MLI-ST pour $r = 0.8$ et $m = 6$ .....	37
Figure II.14 : Simulation de la commande MLI-ST pour $r = 0.8$ et $m = 18$ . ....	38
Figure II.15 : Vue en face d'une pompe centrifuge. ....	39
Figure II.16 : Courbe Q-H pour différentes hauteurs et vitesses.....	41
Figure II.17 : Rendement de la pompe centrifuge. ....	41
Figure II.18 : Schéma bloc de la pompe centrifuge. ....	42
Figure II.19 Circuit équivalent du modèle idéal. ....	43
Figure II.20 Circuit équivalent du modèle à cinq paramètres. ....	43
Figure II.21. Influence de température sur la caractéristique I(V) .....	44
Figure II.22. Influence de température sur la caractéristique P(V) .....	45
Figure II.23. Influence d'éclairement sur la caractéristique P(V) .....	45
Figure II.24. Influence d'éclairement sur la caractéristique I(V) .....	45
Figure II.25. Schéma bloc de GPV.....	46
Figure II.26 : Comportement dynamique de la pompe centrifuge alimentée par onduleur parfait. ....	47
Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle maintenant $i_{ds}$ nul. ....	50
Figure III.2 : Structure de découplage avec réglage du courant $i_{ds}$ .....	52
Figure III.3 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte avec régulation du courant .....	52
Figure III.4 : Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse .....	53
Figure III.5 : Boucle de régulation du courant $i_{ds}$ .....	54
Figure III.6 : Schéma bloc de commande vectorielle de la MSAP .....	55
Figure II.7 : Réglage de débit de la pompe centrifuge par la commande vectorielle indirecte avec un onduleur parfait. ....	56
Figure II.8 : Réglage de débit de la pompe centrifuge par la commande vectorielle indirecte avec un onduleur MLI associée à un GPV. ....	57

- *Sigles et acronymes*

**MSAP** : La machine synchrone a aimant permanent.

**FTBO** : Fonction de Transfert en Boucle Ouvert.

**FTBF** : Fonction de Transfert en Boucle Fermé.

**f.e.m** : Force électromotrice.

**FMM** : Force magnétomotrice.

- *Paramètres de modélisation de la machine*

- $V_{abc}$ : Résistance d'une phase statorique.
- $R$  : Flux des phases statoriques.
- $i_{abc}$ : Courants des phases statoriques.
- $\Phi_a$ : Flux induit par les aimants.
- $L_{s\sigma}$ : Inductance de fuite.
- $L_m$ : Inductance de magnétisation.
- $\omega_r$ : vitesse mécanique de rotation.
- $c_r$ : Couple résistant.
- $C_e$ : Couple électromagnétique.
- $J$ : Moment d'inertie des masses en rotor.
- $p$ : Nombre de paires de pôles.
- $\omega$ : Vitesse électrique du rotor.
- $f$ : Coefficient de frottement.
- $[T_\theta]$ : Matrice de transformation de PARK.
- $(d, q)$ : Référentiel lié au champ tournant.
- $L_d, L_q$  : Inductances cycliques directe et en quadrature.
- $W_{ref}$ : Vitesse de référence
- $V$  : Fonction de Lyapunov
- $S$ : Surface de glissement
- $e$ : Erreur de suivi

- *Repère*

**sa, sb, sc** : Axes magnétique liés aux enroulements triphasés statorique.

**ra, rb, rc** : Axes magnétique liés aux enroulements triphasés rotorique.

**( $\alpha, \beta$ )** : Axes de référentiel de Concordia.

**(d, q)** : Axes de référentiel de Park.

$(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  : Repère lié au champ au rotor.

$\theta$  : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

$\theta_r$  : Position angulaire du rotor par rapport à l'axe d.

$\theta_s$  : Position angulaire du stator par rapport à l'axe d.

- ***Grandeurs électriques***

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions statoriques des phases a, b et c ;

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : Tensions rotoriques des phases a, b et c ;

$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$  : Tensions statoriques des phases  $\alpha, \beta$  ;

$V_{r\alpha}, V_{r\beta}$  : Tensions rotoriques des phases  $\alpha, \beta$  ;

$V_{sd}, V_{sq}$  : Tensions statoriques des phases  $d, q$  ;

$V_{rd}, V_{rq}$  : Tensions rotoriques des phases  $d, q$  ;

$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  : Courants statoriques des phases a, b et c ;

$I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$  : Courants rotoriques des phases a, b et c ;

$I_{s\alpha}, I_{s\beta}$  : Tensions statoriques des phases  $\alpha, \beta$  ;

$I_{r\alpha}, I_{r\beta}$  : Tensions rotoriques des phases  $\alpha, \beta$  ;

$I_{sd}, I_{sq}$  : Tensions statoriques des phases  $d, q$  ;

$I_{rd}, I_{rq}$  : Tensions rotoriques des phases  $d, q$ .

- ***Grandeurs magnétiques***

$\Omega$  : Vitesse mécanique de rotation ;

$\omega_r$  : La pulsation électrique correspondant à la vitesse de rotation ;

$\omega_r$  : La pulsation électrique des grandeurs statorique.

o Grandeurs de commande et de l'observateur

$\omega^*$  : La valeur de référence de la vitesse de rotation ;

$K_p$  : La composante proportionnelle du correcteur PI ;

$K_i$  : La composante Intégrale du correcteur PI ;

$\hat{\omega}$  : Estimation de la vitesse de rotation électrique ;

$\hat{I}, \hat{I}_{S\beta}$  : Estimation du courant dans le repère  $\alpha, \beta$  ;

$K_{pwr}$  et  $K_{iwr}$  : gain des contrôleurs PI.

# **Introduction générale**

*Introduction générale*

Les sources naturelles telles que le soleil, l'eau, le vent et la chaleur de la terre, appelées aussi énergies renouvelables, ont assuré le développement de l'humanité, l'eau et le soleil sont les éléments de notre quotidien, ils sont importants surtout dans les régions éloignées, désertique ou montagneuses comme le sud de l'Algérie, l'augmentation de la demande en eau pour ces régions est donc une problématique de développement durable. Les applications des énergies renouvelables, solaire (thermique ou photovoltaïque), représentent une solution excellente pour le problème, l'utilisation de ce type d'énergie pour le pompage d'eau, surtout dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec où c'est justement le moment où l'on a accès au maximum d'énergie solaire. [1]

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

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. Mais le système qu'on a choisi est au fil du soleil ce procédé consiste à pomper l'eau tant que le soleil est présent vers un réservoir qui assure la régulation de la consommation. Ainsi, le consommateur peut être alimenté même la nuit et pendant les journées nuageuses. L'eau pompée peut être employée dans beaucoup d'applications, telles que l'utilisation domestique et l'irrigation.

Des nombreux types de moteurs sont disponibles pour une utilisation dans les systèmes de pompage photovoltaïque. Au début, les moteurs à courant continu à balais étaient largement utilisés pour entraîner les pompes à eau et continuent à être utilisés. Après cela, il s'est avéré que la fiabilité des systèmes de pompage photovoltaïque pouvait être améliorée en utilisant des moteurs à courant continu sans balais et des moteurs à réluctance commutée. Pour une puissance élevée avec une haute fiabilité, les moteurs synchrones à aimant permanent semblent être l'alternative adéquate par rapport aux moteurs cités précédemment.

Le document a été divisé en trois chapitres dont le contenu est résumé ci-dessous :

- Le premier chapitre donne une description générale des systèmes photovoltaïques, ainsi que des notions sur les différents systèmes PV.
  - Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons un modèle d'une pompe centrifuge immergée est proposé et ces caractéristiques seront présentées. Considéré le couplage du moteur/pompe avec un onduleur triphasé. Une étude comparative par simulation sera présentée et commentée.
- Le troisième chapitre est dédié à l'étude de sa commande vectorielle appliqué sur le système de pompage qui jouera le rôle d'un adaptateur. Une étude comparative par simulation sera présentée et commentée.
- Enfin on terminera notre travail par une conclusion générale, dans laquelle, nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

# CHAPITRE I

*Etat de l'art sur les systèmes de  
pompage photovoltaïque*

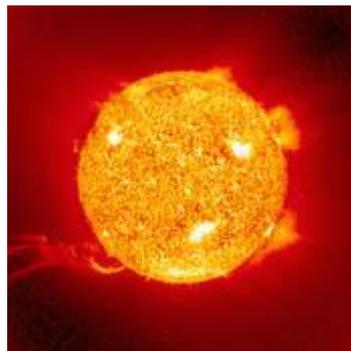
## I.1 Introduction

Le scientifique français, Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Becquerel a observé le comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide conducteur exposé à la lumière [3]. Par la suite en 1905, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. Ce n'est qu'en 1954 que les premières piles solaires produisant de l'électricité firent leur apparition, grâce aux travaux de Bell Laboratories aux États-Unis. De l'effet photoélectrique à la conception de la cellule photovoltaïque, il a donc fallu attendre un siècle. L'énergie photovoltaïque eut un regain d'intérêt dans les années 1960 lors des premiers lancements spatiaux de satellites puis lors des missions lunaires. Les crises économiques des années 1970, puis les accidents de centrales nucléaires renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables, et en particulier l'énergie photovoltaïque qui s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses [4].

## I.2 Rayonnement solaire

En tant que source d'énergie, l'ensoleillement est un facteur climatique dont on a intérêt à tirer parti (de manière passive, via les ouvertures vitrées, et/ou de manière active pour produire de l'énergie) mais dont on doit aussi parfois se protéger pour éviter les surchauffes en été.

La maîtrise de l'énergie solaire nécessite donc de connaître la position correcte du soleil (hauteur et azimut) ainsi que l'intensité du rayonnement à tout moment.



*Figure I.1 : Le soleil.*

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années. Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à 63 500 kW/m<sup>2</sup>). Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace à la vitesse constante de 300 000 km à la seconde, dénommée vitesse de la lumière.

Après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre avec une puissance d'environ 1 367 W/m<sup>2</sup>. C'est ce qu'on appelle la constante solaire. La Terre, une petite boule comparée au Soleil, intercepte une si faible partie de l'énergie radiante du soleil que les rayons du soleil ainsi stoppés paraissent constituer un faisceau parallèle.

Énergie la plus abondante sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse, elle-même à l'origine des énergies fossiles. C'est l'ensemble de la vie sur Terre qui dépend de cette source énergétique. Heureusement pour l'humanité, selon les astronomes, le soleil ne devrait pas s'éteindre avant 5 autres milliards d'années.

Une énergie de flux, diffuse et intermittente

Les théories actuelles présentent le rayonnement solaire comme une émission de particules. Ce flux de particules, appelées photons, atteint la terre avec différentes longueurs d'ondes à la quelle correspond une énergie spécifique décrite par la relation :

$$E[J] = hv = h * c / \lambda \quad (I.1)$$

Avec,

$\lambda$  : longueur d'onde [m].

$v$  : fréquence [Hz].

$c$  : vitesse de la lumière [m/s].

La répartition énergétique des différentes longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique du Soleil est appelé spectre solaire.

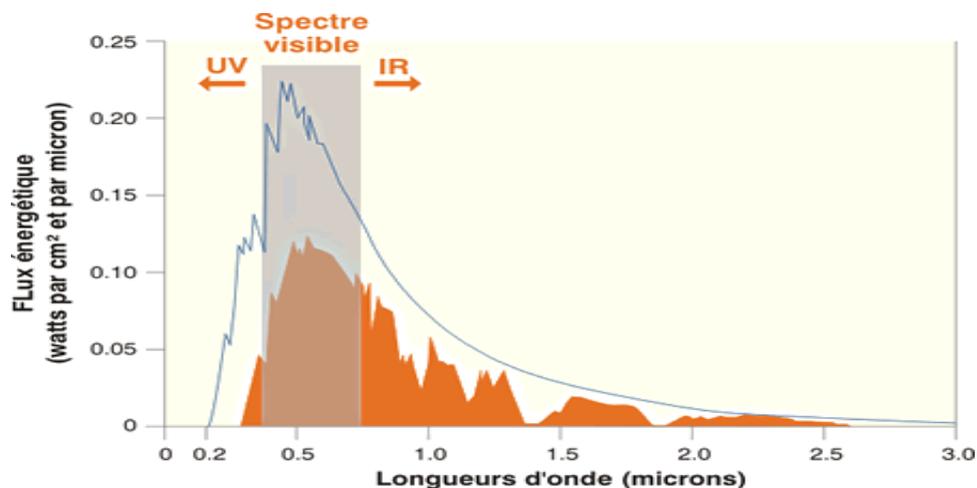
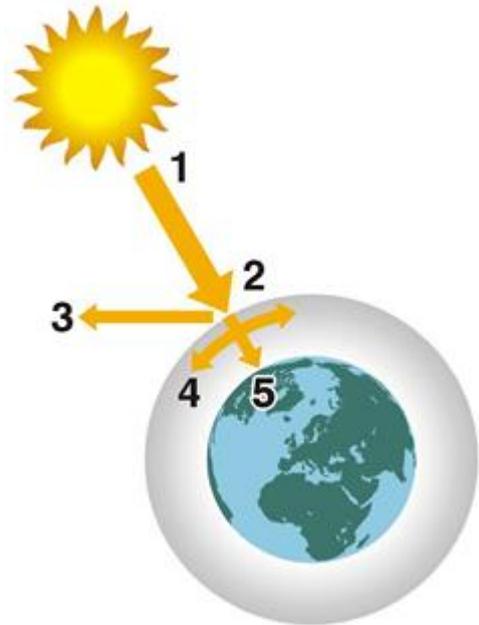


Figure I.2 : l'atmosphère du rayonnement solaire traversé.

Avec sa température d'émission de 5 500°C, le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences (courtes longueurs d'onde).

La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale émise par le soleil. 49 % du rayonnement énergétique émis par le soleil se situe au-delà du rouge visible, dans l'infrarouge. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement solaire, l'ultraviolet, représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible.

1. Puissance émise par le soleil : 63 500 kW/m<sup>2</sup>.
2. Constante solaire : 1 370 W/m<sup>2</sup>.
3. Rayonnement réfléchi.
4. Rayonnement absorbé et diffusé.
5. Rayonnement solaire à la surface de la Terre (max : 1 000 W/m<sup>2</sup>).



**Figure I.3 : Les étapes d'absorber les rayonnements solaire par la terre.**

Au moins 35 % du rayonnement solaire intercepté par la Terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace. Une partie du rayonnement qui atteint la Terre a été diffusée dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière (c'est ce rayonnement diffus, appartenant notamment à la frange bleue du spectre visible qui est responsable de la couleur bleue du ciel clair). D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à 15 % du rayonnement solaire. Le reste du rayonnement atteint directement la surface.

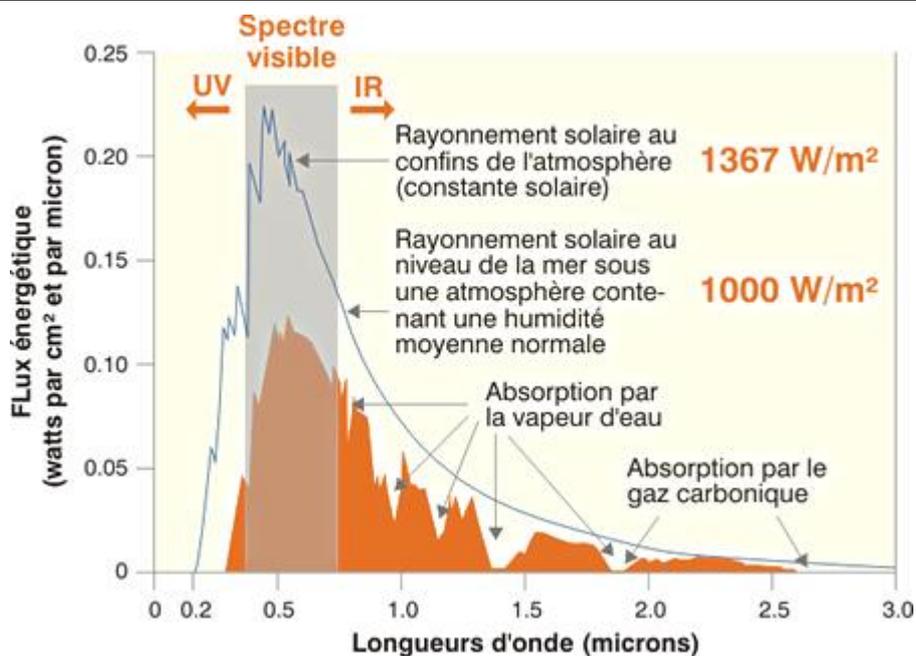


Figure I.4 : Le flux énergétique du rayonnement solaire absorbé.

Outre la composition de l'atmosphère, le facteur le plus important pour évaluer la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est l'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement doit traverser.

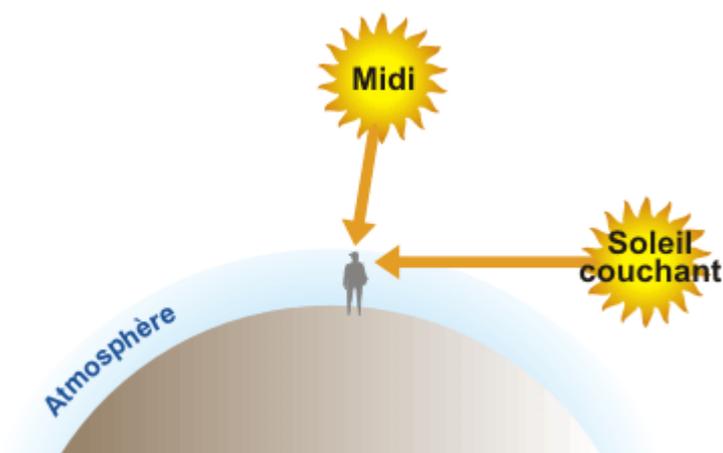


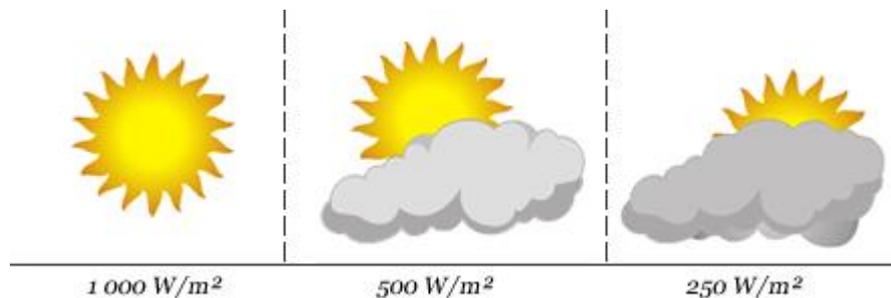
Figure I.5 : Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air masse AM.

Au milieu du jour, le Soleil est au-dessus de nos têtes, et ses rayons ont à traverser une épaisseur d'air moindre avant d'arriver sur Terre. Mais au début et à la fin de la journée, le Soleil est bas sur l'horizon ; la traversée de l'atmosphère se fait alors plus longue. L'atmosphère absorbe et diffuse d'autant plus de particules de lumière qu'elle est plus épaisse et plus dense. Ainsi, au coucher du Soleil, les rayons sont suffisamment affaiblis pour permettre à l'œil humain de fixer le Soleil sans trop d'éblouissement. Par contre, lorsque l'altitude augmente, la couche d'atmosphère

à traverser est plus réduite : dans les sites de montagnes, l'intensité du rayonnement augmente sensiblement.

L'épaisseur d'atmosphère traversée influence donc le spectre lumineux reçu. Les normes internationales définissent différents types de spectre : AM1 (pour air mass 1, lorsque le rayonnement a traversé une épaisseur d'atmosphère), AM0 (spectre à la surface externe de l'atmosphère), AM1.5 (spectre utilisé pour les tests standardisés des panneaux solaires correspondant à la traversée d'une atmosphère et demie).

Le rayonnement solaire reçu sur une surface varie donc au cours du temps en fonction de la position du Soleil et de la couverture nuageuse. La puissance solaire maximale à la surface de la Terre est d'environ  $1\,000\text{ W/m}^2$  pour une surface perpendiculaire aux rayons [5].



*Figure I.6 : Puissance solaire pour différents ciels.*

### I.3 Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi

créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. [4]

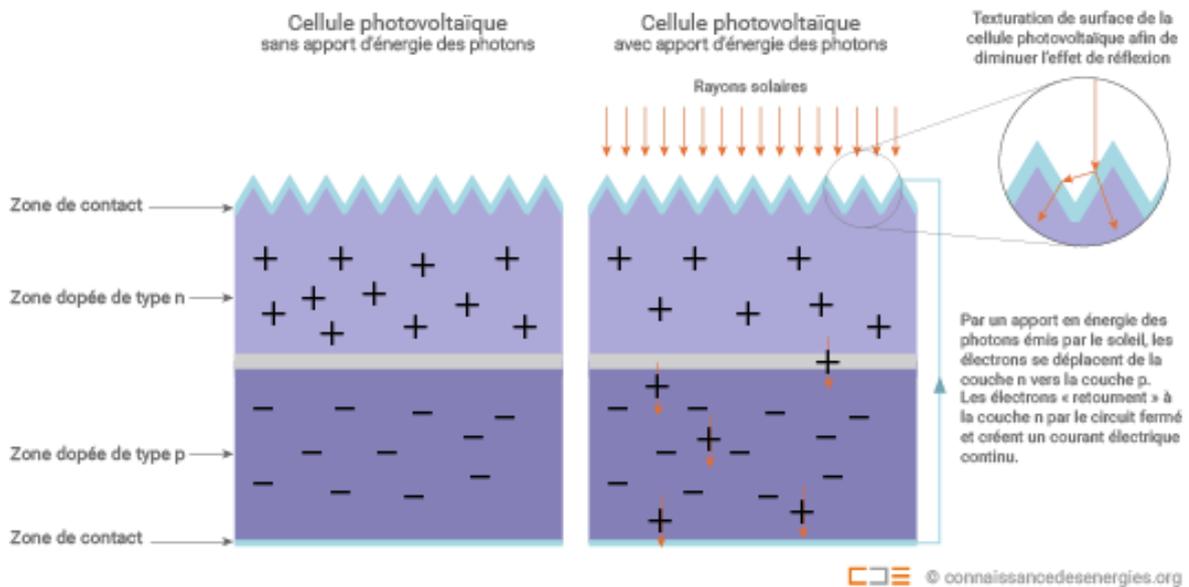


Figure I.7 : Constitution d'une cellule photovoltaïque

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité [6].

## I.4 Technologies des cellules photovoltaïques

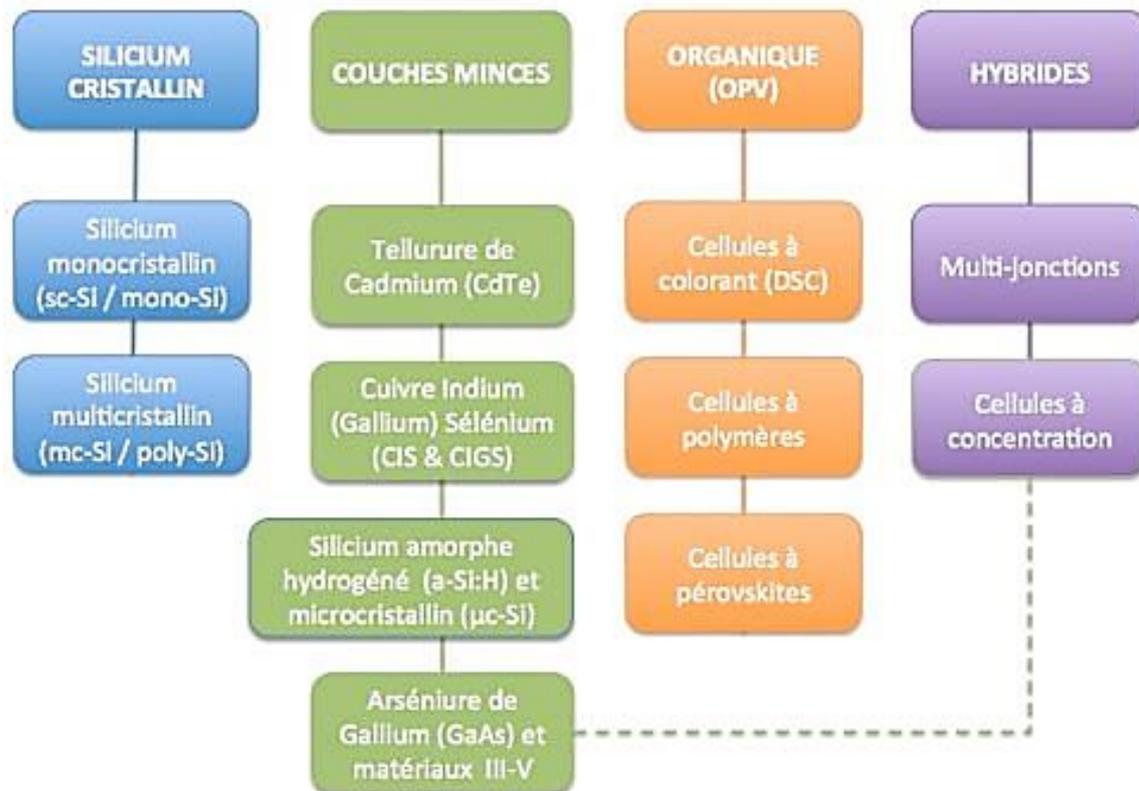
On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques.

**I.4.1 Les cellules au silicium cristallin**, pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 20 % pour une durée de vie de 30 ans environ) ainsi que des investissements importants qui lui ont été destinés, que ce soit pour la transformation du silicium, l'élaboration des cellules ou l'assemblage des modules.

**I.4.2 Les cellules à base de couches minces** qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semi-conducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable : ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000 [7].

**1.4.3 Les cellules à base de photovoltaïque organique**, segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

Enfin, la famille des hybrides présentée sur l'illustration ci-dessous rassemble les cellules mettant en présence des technologies de natures différentes pour atteindre des rendements optimisés [7].



*Figure 1.8 : Classification des principales technologies de cellules solaires PV*

## I.5 Les avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

### I.5.1 Avantages

- Le panneau solaire photovoltaïque contribue à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, à la réduction des rejets polluants et à la préservation des ressources naturelles.
- Le panneau solaire photovoltaïque contribue à l'évolution des consciences vers la préservation de la nature.
- Les panneaux solaires photovoltaïques sont recyclables.
- Une très bonne rentabilité et un amortissement rapide. (du fait de la baisse du prix des installations photovoltaïque divisé par 2 en 5 ans).

- Une prévision sûre à long terme de l'investissement et du rendement (que ce soit pour l'autoconsommation avec ou pas vente de surplus ou tout simplement vente totale de l'électricité).
- L'autoconsommation énergétique en fort développement depuis 2016 qui se confirme réellement en 2021. (représentant environ 95 % du marché actuel des particuliers),
- Un prix de l'électricité en très forte augmentation en 2021 : + 7 % => avantage économique de plus en plus important en 2021 pour l'autoconsommation électrique via des panneaux solaires photovoltaïque.
- Des systèmes de panneaux solaires photovoltaïques simples et rapides à installer.
- aucune obligation maintenant d'intégrer les panneaux solaires au bâti (possibilité d'installer les panneaux au-dessus du toit) => plus facile à installer et surtout plus économique et sans risque d'infiltration de l'eau...)
- Des installations de panneaux solaires photovoltaïques robustes et nécessitant très peu de maintenance (peu de mouvement => peu d'usure).
- Des systèmes fiables et stables (résistance aux intempéries, aux rayonnements UV et aux variations de température).
- Une évolution technique importante depuis + de 5ans (micro-onduleur, domotique, suivi production, système de batteries de plus en plus fiable et la nouveauté des batteries virtuelles...) ainsi que des panneaux mixtes (production électricité avec chauffe-eau et chauffage solaire)
- Des systèmes intelligents et des progrès techniques impressionnant pour l'auto-consommation énergétique 2021.
- Une rentabilité accrue : le photovoltaïque pour l'auto-consommation avec vente de surplus de l'électricité représente (maintenant en 2021) 90 % des demandes de renseignements des internautes [8].

### **I.5.2 Inconvénients**

- Un investissement important lors de leur installation. Exemple : 14 000 € pour des panneaux de 3 000 watts.
- Depuis la suppression du crédit d'impôt, le retour sur investissement est rallongé de 9 à 18 mois.
- L'onduleur doit être remplacé au bout de 10 ans et les panneaux au bout de 25 à 35 ans.

- Les démarches administratives pour installer des panneaux photovoltaïques sont longues, environ 2 à 6 mois et même un an en cas de difficultés de raccordement.
- En métropole, la production d'électricité se limite à 1 300 heures par an [6].

## **I.6 Classification des systèmes photovoltaïques**

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type que vous choisissez dépendra de vos besoins, de votre emplacement et de votre budget.

### **I.6.1 Les systèmes photovoltaïques autonomes**

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.

### **I.6.2 Les systèmes photovoltaïques hybrides**

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes photovoltaïques sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si votre budget est limité.

### **I.6.3 Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau**

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans certains cas, le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique [9].

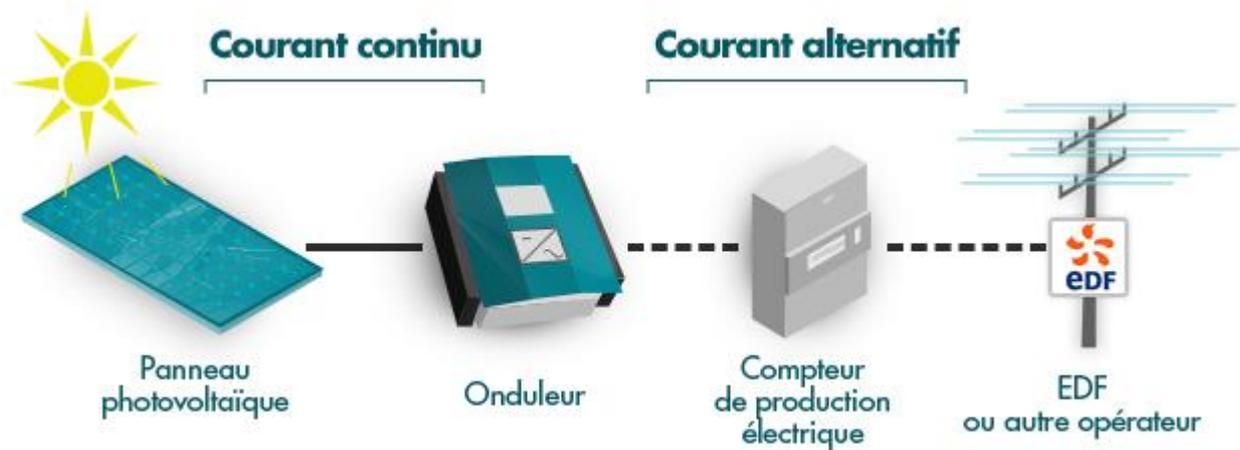
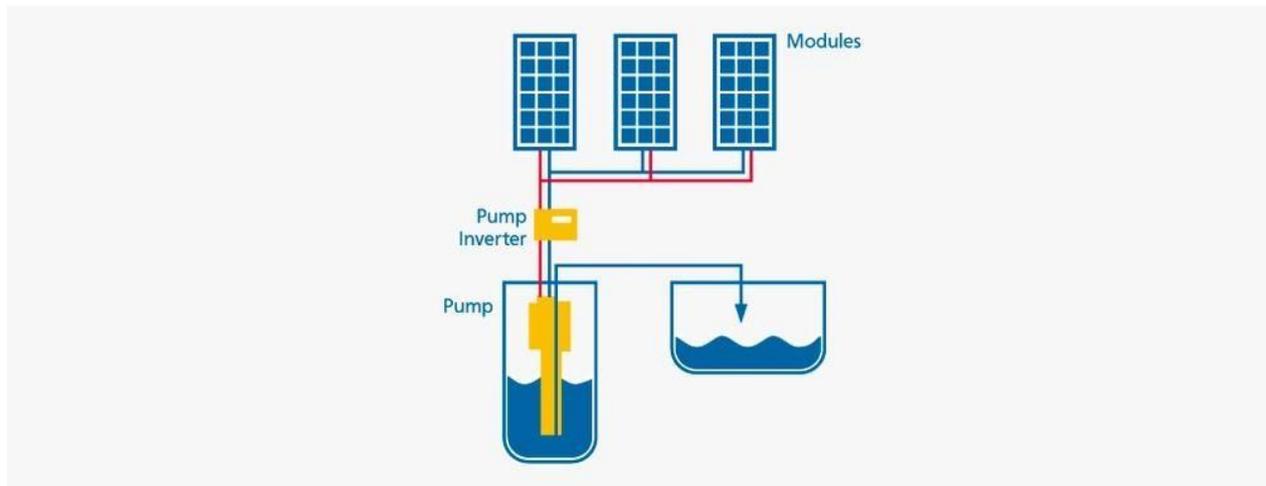


Figure I.9 : Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

#### I.6.4 Systèmes de Pompage photovoltaïque

Dans les régions éloignées, désertiques ou montagneuses, l'alimentation en eau potable et d'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations. Le pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et cette énergie a l'avantage d'être présente et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels. Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur du courant électrique qui peut être un convertisseur DC/AC pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour un moteur à courant continu et d'un groupe motopompe. Ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Ce type de stockage de l'eau est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans des batteries. Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules photovoltaïques reliés en série et en parallèle selon la puissance requise. La figure I.9 présente les différents éléments constitutifs d'une installation solaire de pompage d'eau [10].



*Figure I.10 : Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque*

#### **I.6.4.1 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque**

Les éléments d'un système de pompage photovoltaïque doivent être conçus pour fonctionner comme un seul ensemble pour la maximisation des performances globales du système. Différentes solutions peuvent être adoptées pour pomper un certain volume d'eau à une certaine hauteur en fonction des plages de puissance nécessaire dans une application spécifique. Bien que les pompes sont installées en surface ou bien flottante, la configuration la plus commune est une pompe immergée installé dans un trou de forage.

La configuration d'un système de pompage PV est déterminée par la définition du type de générateur photovoltaïque, le type de pompe et de type moteur ; ainsi que le type de conditionnement de puissance. On peut distinguer les types de systèmes de pompage photovoltaïques suivants :

##### **a- Systèmes de petite puissance (50-400W).**

Dans ce type de systèmes, il est utilisé principalement un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge ou à déplacement positif [9]. Entre le générateur PV et le moteur/pompe on intercale un convertisseur DC/DC pour améliorer son adaptation [10]. Les applications de cette configuration est généralement destinée au pompage des volumes d'eau pouvant atteindre jusqu'à 150m<sup>3</sup>/Jour.

Les principaux constituants de ces systèmes sont :

- Le générateur photovoltaïque
- le convertisseur DC/DC (facultatif)
- Moteur à courant continu

- Pompe
- Entrepôt de stockage (facultatif)

Le système de pompage PV à moteur courant continu constitué d'un DC moteur et une pompe. Les types de moteurs à courant continu sont classés selon le champ d'excitation : excitation séparée (aimant permanent), des séries et des moteurs de dérivation. Le choix d'un moteur à courant continu pour un système de propulsion PV est économique parce que le pouvoir des panneaux photovoltaïques en courant continu. En outre, les modules photovoltaïques produisent du courant continu, donc l'utilisation DC moteurs élimine le besoin de convertisseurs de puissance. [13], [14]

La figure I.11 montre le schéma simplifié d'un système de pompage utilisant le moteur à courant continu. Le couplage est direct (sans stockage électrique) avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique. L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu : un entretien régulier.

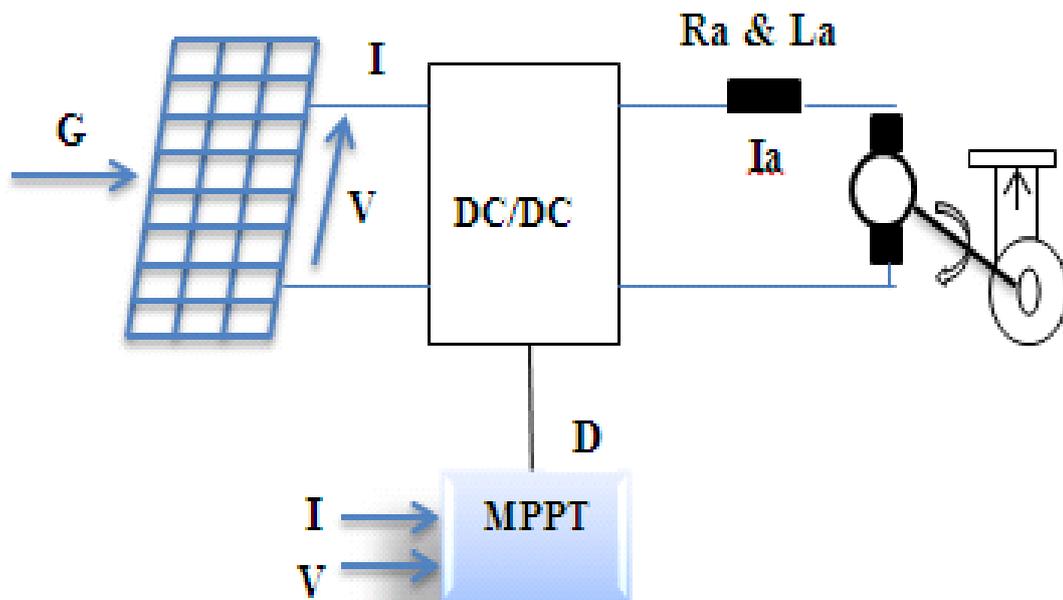
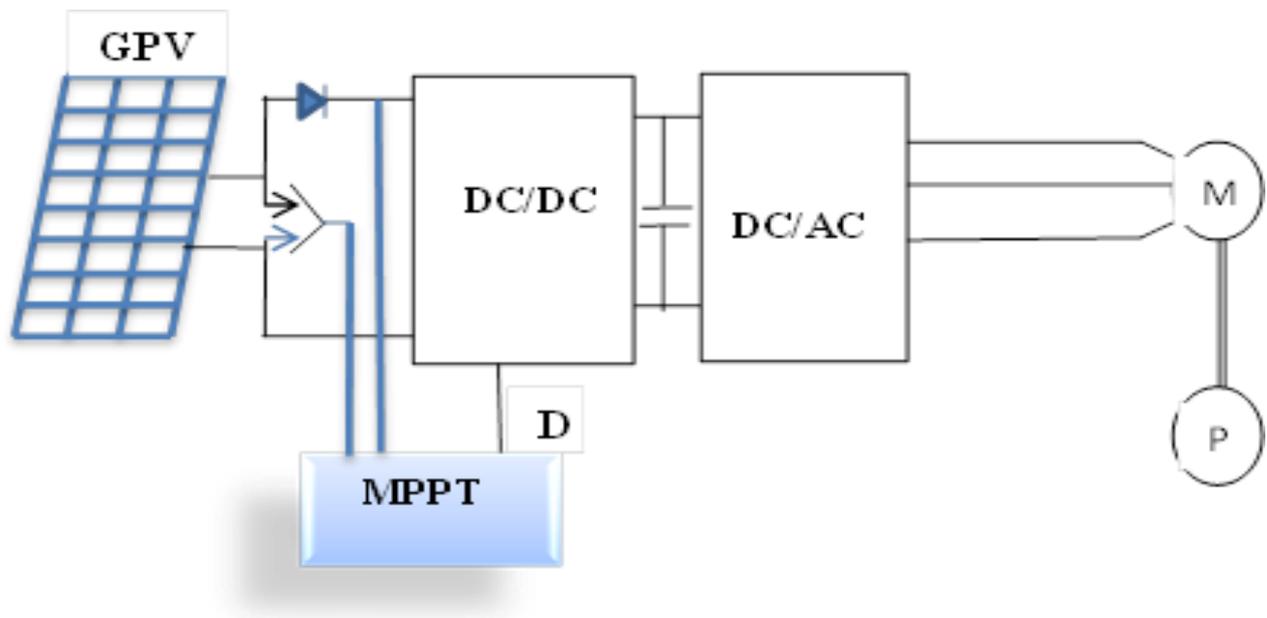


Figure I.11 : Systèmes de petite puissance.

#### b- Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W)

Composé essentiellement d'une pompe immergée centrifuge entraînée par un moteur à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable, comme le montre la figure ci-dessous. Un convertisseur DC/DC est généralement intercalé entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC pour l'adaptation d'impédance et la recherche du point de puissance maximale (MPPT) [15]. Ces types de systèmes sont caractérisés par leur haute fiabilité ainsi que de leur large utilisation depuis les premières installations de pompage photovoltaïque. Les volumes d'eau pouvant être pompés varient entre 150 jusqu'à 1500 m<sup>3</sup>/Jour.



*Figure I.12 : Les systèmes de moyenne puissance*

Les éléments clés de ces types de systèmes sont :

- Générateur photovoltaïque
- Le convertisseur DC/DC (MPPT)
- Le convertisseur DC/ AC
- Moteur AC
- Pompe immergée
- Entrepôt de stockage (facultatif)

#### **I.6.4.2 Technologie des moteurs**

On ce qui concerne la technologie des moteur, il y a trois types de moteur actuellement utilisés pour des applications de pompage photovoltaïques.

- Moteur à courant continue
- Moteur à courant continu à aiment permanent sans balais.
- Moteur à courant alternatif.

##### **a- Moteur à courant continu**

En termes de simplicité le moteur à courant continu est une option attractive parce que le générateur photovoltaïque produit du courant continu, et moins d'équipement spécialisé sont nécessaire pour traitement de puissance.

Pour un moteur à courant continu conventionnel les pertes d'énergie qui se produisant dans les enroulements est élevé, par conséquence le rendement global est faible. Si des aimants permanents sont utilisés pour produire le champ magnétique, aucune puissance n'est consommée dans les bobines d'excitation et par conséquent des rendements plus élevés seront obtenus. Cette augmentation de rendement est très appropriée aux systèmes de pompage photovoltaïques. Le problème avec le moteur à courant continu c'est qu'il a besoin des balais pour la commutation. Les balais se détériorent avec le temps et doivent être remplacés après approximativement 1000 heures de l'opération [16], ce qui est très inconfortable parce que ceci signifie un supplément d'entretien et des coûts.

Plusieurs travaux ont été réalisés dont on peut citer quelques-uns : Appelbaum et Sarm ont examiné le démarrage d'un moteur à courant continu couplé avec une pompe et alimenté par des modules photovoltaïques avec et sans suiveur de point de puissance maximum. Alghuwainem [17] a étudié le fonctionnement, en régime permanent, du moteur à excitation séparé avec un convertisseur élévateur fonctionnant comme un suiveur de point de puissance maximal (MPPT). Anis et al [18] ont trouvé que la charge se compose du moteur à courant continu couplé avec une pompe à volume constant considéré comme une charge non assortie pour les modules photovoltaïques. Weigner et Al [19] ont étudié l'optimisation du rendement global d'un système de pompage photovoltaïque basé sur un moteur à courant continu. Dans [20], Langridge et al ont étudié le fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque direct basé sur un moteur à courant continu sans balais conduisant une pompe à rotor hélicoïdal et la puissance maximale des modules est rendue disponible par une commande appropriée. La tension de référence des modules est basée sur une fraction de la tension à circuit-ouvert. Les performances dynamiques d'un moteur à aimant permanent sans balais alimenté par des modules photovoltaïques, ont été étudiées par Swamy et al [21]. La conception et la réalisation d'un moteur sans balais pour les applications solaires, ont été étudiées par Azoui [22].

### **b- Moteur à courant continu sans balais**

Ces dernières années, il y a eu une croissance rapide de l'utilisation du moteur à courant continu sans balais en tant que machine rotative pour les systèmes de pompage photovoltaïques.

Un moteur à courant continu sans balais est une machine électrique tournante où le stator est un stator classique triphasé comme celui d'un moteur asynchrone et le rotor a les aimants permanents montés extérieurs. À cet égard, le moteur à courant continu sans balais est équivalent à un moteur à courant continu avec le commutateur inversé où l'aimant tourne tandis que les conducteurs restent stationnaires.

Dans les moteurs à courant continu avec commutateur, la polarité du courant est changé par les commutateurs est les balais. Par contre, dans le moteur à courant continu sans balais l'inversion de polarité est assurée par les transistors de puissance commutant en synchronisation avec la position de rotor. Donc, les moteurs à courant continu sans balais incorporent souvent les sondes de position internes ou externes pour sensé la position réelle du rotor.

Le moteur à courant continu sans balais nécessite une excitation avec un onduleur triphasé de fréquence et amplitude variable. L'onduleur est généralement pour assurer la commutation électronique et la régulation du courant [23].

#### **I.6.4.2.3 Moteur a courant alternatif**

Les moteurs a courant alternatif comme le moteur asynchrone ; sont des moteurs sans balais avec un rotor de construction robuste qui permet le fonctionnement fiable et sans entretien. La simplicité de la construction du rotor a également comme conséquence la basedu prix du moteur et un rapport puissance /poids plus élevé. C'est l'avantage principal des moteurs asynchrone sur les moteurs à courant continu et l'un des raisons pour lesquelles ce type de moteur est le plus utilisé dans les systèmes de pompage photovoltaïques.

Néanmoins, le moteur à induction sous sa forme standard, contrairement au moteur à courant continu, sont inconvenant majeur est d'être inflexible dans la variation de vitesse. Ce type de moteur à courant alternatif tourne à une vitesse l'égerment inférieur à la vitesse de synchronisme et sa vitesse est déterminée par la fréquence de source d'alimentation et le nombre de pôles du stator. Donc une gamme de variation de la vitesse du moteur asynchrone et seulement possible lorsque la fréquence de la source d'alimentation est possible. Cela signifie que l'utilisation du moteur asynchrone dans les applications photovoltaïque de pompage nécessite un circuit électronique de commande à fréquence variable (onduleur) pour commander la vitesse, et ceci ajoute un coût de plus au système. L'inclusion de l'onduleur dans le système permet des performances excellentes à la vitesse de rotation du moteur.

Plusieurs systèmes de pompage photovoltaïques basés sur le moteur à induction alimentés, soit par une source de tension ou source de courant ont été proposés: Altas et Sharaf ont appliqué la commande de la logique floue avec succès, pour rechercher le point de puissance maximale dans les systèmes de conversion d'énergie PV, et pour transférer le maximum de puissance disponible à partir d'un GPV à un moteur à induction triphasé alimenté par l'intermédiaire d'un onduleur PWM. Les réseaux de neurones ont été utilisés également pour rechercher la puissance maximale du GPV. Akihiro Oi ont présenté une étude permettant de montrer l'effet de la MPPT sur l'amélioration du rendement global du système de pompage photovoltaïque, en utilisant divers algorithmes de MPPT et les méthodesde contrôle [23].

Benlarbi [24] a montré l'efficacité des techniques d'intelligence artificielle comparativement aux méthodes classiques, en optimisant un système de pompage de l'eau entraîné par des moteurs à courant alternatif AC et continu DC.

Le tableau I.1 présente quelques avantages et inconvénients des moteurs électriques [25] :

**Tableau I.1** : résume les avantages et les inconvénients des moteurs mentionner ci-dessus.

Type de moteurs	Les avantages	Les inconvénients
<b>Moteur à courant continu</b>	-Simple et efficace pour les faibles charges. -Ne nécessitant pas un circuit de commande compliqué	Les balais doivent être Remplacé périodiquement
<b>Moteur à courant continu sans balais</b>	Un bon rendement Ne demande pas de maintenance	La commutation électronique ajoute des dépenses de plus et avec le risque de défaillance
<b>Moteur à courant alternatif</b>	- De larges gammes disponibles pour de larges gammes de charge -Moins cher que le moteur à courant continu	-Moins efficace que le moteur à courant continu -Nécessités un onduleur

**I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les fondements de bases de l'énergie solaire photovoltaïque en passant en revue la cellule photovoltaïque qui est à la base de la conversion de l'énergie rayonnée par le soleil en électricité. On a présenté également les principales applications des systèmes photovoltaïques à savoir : les systèmes autonomes, les systèmes connectés au réseau et enfin les systèmes de pompage photovoltaïque. Les schémas de principes de chaque type de systèmes est donnée pour distinguer le principe de fonctionnement de chaque configuration.

Notre intérêt c'est porté sur les systèmes de pompage où nous avons passé en revue les configurations adoptées afin de nous guider ultérieurement dans l'étude que nous projetions de mener dans ce mémoire. Une revue bibliographique sur les types des moteurs et de pompes est également reportée dans ce chapitre pour comprendre leurs fonctionnements dans un système de pompage photovoltaïque.

## **Chapitre II**

# **Modélisation du système du pompage photovoltaïque**

## II) Introduction

Les (MSAP) sont commencées à être utilisées dans les applications nécessitant des performances dynamiques et statiques très élevée. Ceci est dû particulièrement à l'évolution des aimants permanents qui constituent l'inducteur (rotor) dans ce type de machines. Cette évolution permet d'obtenir des machines à rendement élevé (à cause de l'absence des pertes Joule au niveau de l'inducteur).

Dans ce qui suit nous allons présenter la modélisation et la simulation de la MSAP associée à la pompe centrifuge et à un onduleur deux niveaux. Une représentation sous forme d'état est élaborée à partir des lois physiques qui régissent son fonctionnement en alimentant notre machine. Par la suite, nous présenterons le modèle de la pompe centrifuge. Ainsi, nous aborderons la commande MLI de l'onduleur de tension à deux niveaux ainsi que la modélisation d'un générateur photovoltaïque.

### II.1 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent triphasée

#### II.1.1 Présentation de la machine synchrone à aimant permanent triphasée

La MSAP est un dispositif électromécanique qui constitué de deux parties, une partie fixe (stator) et une partie mobile (rotor).

La machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation.

La position du champ magnétique rotorique est alors fixée par rapport au rotor, ce qui impose le synchronisme entre le champ tournant statorique et le champ rotorique.

##### II.1.1.1 Stator

La machine synchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile de l'axe de symétrie de la machine. Dans les encoches régulièrement part sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à  $p$  paires de pôles leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à  $2\pi/3$

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. On note :

$\omega$  : La pulsation des courants statoriques.

$p$  : Le nombre de paires de pôles de la machine.  $\Omega$  ou  $\omega_r$  : La vitesse de rotation de la machine [26].

Soit :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II.1})$$

### II.1.1.2 Rotor

Le rotor se compose à des aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique. Il existe de nombreuses façons de disposer les aimants au rotor (Figure.II.1). Les aimants sont montés sur la surface du rotor en utilisant des matériaux adhésifs à haute résistance. Ils offrent un entrefer homogène, le moteur est le plus souvent à pôles lisses. Ses inductances ne dépendent pas de la position du rotor (Figure.II.1). L'inductance de l'axe d est égale à celle de l'axe q. Cette configuration du rotor est simple à réaliser. Ce type du rotor est le plus utilisé. Par contre, les aimants sont exposés aux champs d'magnétisant. De plus, ils sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor.

Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs de configuration rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est le suivant [24] :

- ✓ Aimant sen surface (Surface maget type)
- ✓ Aimants insérés (Inset magnet type)
- ✓ Aimants enterrés (Ierior magnet type)
- ✓ Aimants à concentration de flux (Burried magnet type)

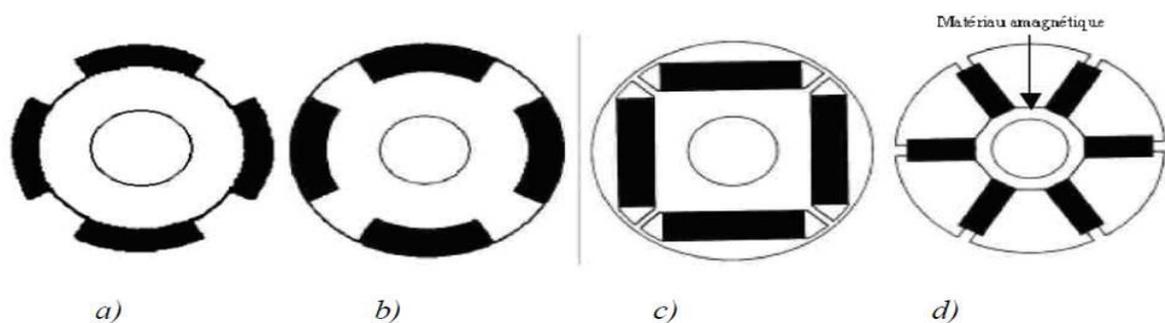


Figure II.1 : Différentes structures des rotors des MSAP

### *a- Aimants en surface*

Pour ces types de machines, les aimants sont placés sur du rotor, ils sont aimantés radialement, comme montré sur la figure (a). Cette configuration du rotor est la plus utilisée. Le principal avantage de la machine avec des aimants en surface est sa simplicité donc faible cout de fabrication par rapport à d'autre machines à aimant. L'inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant

De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur d'détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Il protège les aimants permanents de la d'désaimantation, de la réaction de l'induit et des forces centrifuges. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone et agir comme un amortisseur. Dans le cas des aimants du type terres rares la réactance synchrone dans l'axe d et l'axe q sont pratiquement les mêmes.

### *b- Aimants insérées*

Comme des machines avec des aimants en surface, les aimants du type insères sont aussi montés sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure (b). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réluctant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe q est légèrement supérieure à celle dans l'axe d.

### *c- Aimants enterrés*

Les machines à aimants enterres sont des machines avec des aimants intègres dans le rotor figure (c) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe d est plus petite que celle de l'axe q. Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses.

### *d- Aimants à concentration de flux*

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor est de les enterres profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimants dans le sens de la circonférence figure (d). Les pôles magnétiques se forment alors à niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents [26].

L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux généré par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants permanents intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe  $q$  est plus grande que celle de l'axe  $d$ .

### II.1.2 Autopilotage de la machine synchrone à aimant permanent triphasée

Un moteur synchrone fonctionnant en mode non autopiloté est fortement instable. La fréquence des courants au stator est asservie à la rotation du rotor de manière à maintenir le synchronisme entre le champ créé par les courants du stator et le moment magnétique du rotor. Il en découle que le champ statorique tourne à la vitesse du rotor. À l'arrêt du rotor, le champ statorique est immobile, et donc réalisé la condition de synchronisme quel que soit la vitesse de stator.

Pour pouvoir piloter correctement le champ magnétique, la position de rotor sera récupérée à l'aide d'une chaîne d'acquisition (codeur incrémental) et à l'aide d'un onduleur commande, nous pourrons ajuster l'angle entre les courants du stator et la fréquence qui alimentera la machine synchrone.

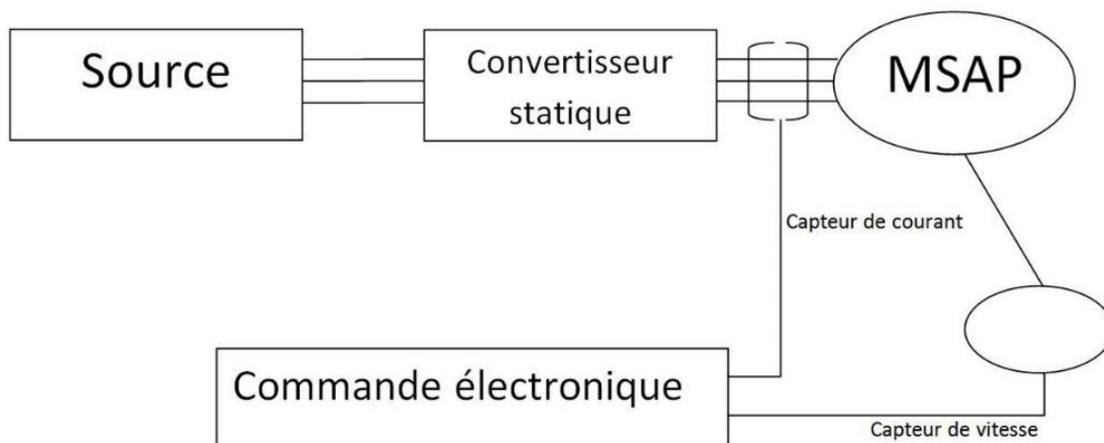


Figure II.2 : Schéma de principe d'autopilotage de MSAP.

### II.1.3 Analyse du fonctionnement de la Machine Synchrone à Aimant Permanent triphasée

Dans notre cas la machine étudiée est un moteur, il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. Plus le couple sur l'arbre est élevé plus l'angle de décalage polaire est plus grand. Le rotor décroche du flux tournant dès que cet angle dépasse  $90^\circ$ . La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator. La caractéristique du couple-angle électrique est illustrée dans la figure suivante [26] :

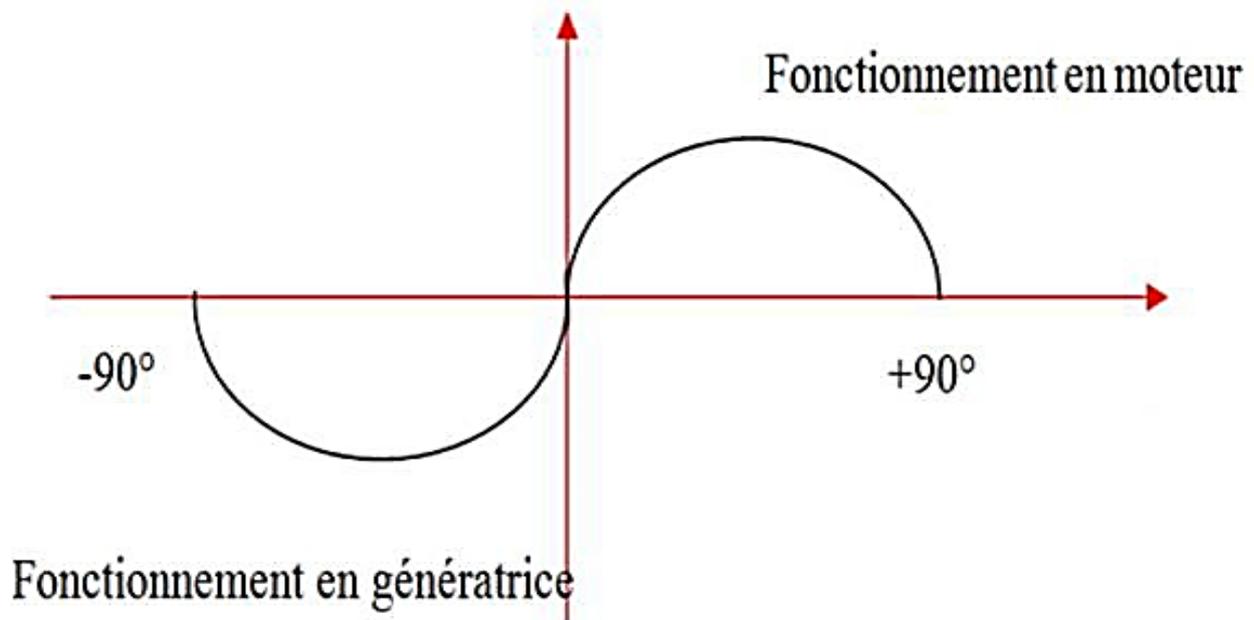


Figure II.3 : Caractéristique du couple-angle électrique.

#### II.1.4 Avantages du moteur synchrone à aimant permanent

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines :

- ✓ Puissances massiques importantes et élevées.
- ✓ Absence de contacts glissants.
- ✓ Pas des pertes résistives au rotor, ce qui facilite l'évaluation de la chaleur des eaux pertes dans la machine. Ainsi, Ilya suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- ✓ Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité à cause de l'absence de contacts bague-balais dans ces machines, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- ✓ Très bon rendement
- ✓ Fonctionnement en survitesse.

#### II.1.5 Inconvénients du moteur synchrone à aimant permanent

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- ✓ Cout élevé (à cause du prix des aimants).
- ✓ Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit
- ✓ Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- ✓ Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps [26].

### II.1.6 Domaines d'application du moteur synchrone à aimant permanent

C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme les automobiles, les électroménagers, les applications de l'énergie de l'éolienne, des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction et plusieurs autre application, en essaie de noter certain applications :

- ✓ Les équipements domestiques (machine à laver...etc.),
- ✓ Les automobiles,
- ✓ Les applications de l'énergie de l'éolienne.
- ✓ Les outils électriques, jouets, système de vision et se équipements.
- ✓ Les applications robotiques.
- ✓ Les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste).
- ✓ Les servomoteurs.
- ✓ La production d'électricité
- ✓ La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins
- ✓ Les machines-outils.

### II.1.7 Modélisation de la machine synchrone a aimant permanent triphasée

Nous considérons une MSAP triphasée, équilibrée dont les aimants sont disposés sur la surface du rotor. Afin d'élaborer le modèle de la MSAP, on adopte certaines hypothèses simplificatrices :

- ✓ Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'activer les relations linéaires entre le flux et les courants.
- ✓ Les réactances de fuite sont indépendantes de la position du rotor.
- ✓ La distribution de la force magnétique dans l'entrefer est sinusoïdale.
- ✓ On néglige l'effet d'hystérésis et les courants de Foucault dans le rotor.

#### II.1.7.1 Equations électriques

Le modèle de la machine synchrone à pôles lisses en fonctionnement moteur est défini par le système d'équations matricielles suivantes [26] :

$$V = R \cdot I + \frac{d}{dt}(L \cdot I) \quad (II.2)$$

Avec :

$$V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_f \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_f \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{so} + L'_s \cos(2\theta) & M_{so} + L'_s \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{so} + L'_s \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_f \cos(\theta) \\ M_{so} + L'_s \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{so} + L'_s \cos(2\theta) & M_{so} + L'_s \cos(2\theta) & M_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{so} + L'_s \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{so} + L'_s \cos(2\theta) & L_{so} + L'_s \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_f \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_f \cos(\theta) & M_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_f \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_f \end{bmatrix}$$

Où :

$L_{so}$  : Inductance propre d'un enroulement statorique ;

$M_f$  : Inductance mutuelle entre bobinage rotorique et statorique ;

$M_{so}$  : Inductance mutuelle entre deux bobinages statoriques ;

$L'_s$  : Inductance exprimant l'effet de saillance du rotor ;

$L_f$  : Inductance propre d'un enroulement rotorique.

Les hypothèses sus citées nous permettent d'écrire la relation des flux suivante [24] :

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{so} - M_{so} & 0 & 0 \\ 0 & L_{so} - M_{so} & 0 \\ 0 & 0 & L_{so} - M_{so} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \phi_t \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements triphasés de la machine en des enroulements diagonaux (d, q) fictifs. Cette transformation est donnée par [3, 4, 6, 19] :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Où  $x$  représente soit une tension, un courant ou un flux. Les indices d et q représentent les nouvelles variables dans le référentiel de Park. La transformation inverse est donnée par [26] :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

En appliquant la transformation de Park l'équation II.2 devient :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_d \cdot \frac{di_{ds}}{dt} - \omega \cdot L_q \cdot i_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega \cdot L_d \cdot i_{ds} + \phi_f \cdot \omega \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

La connaissance de le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ) de la machine est essentielle pour sa commande. Nous développons sur la base de l'équation de la puissance instantanée P(t), qui s'écrit dans le repère (d-q) pour le stator comme suit :

$$p(t) = v_{ds} \cdot i_{qs} + v_{qs} \cdot i_{ds} \quad (\text{II.7})$$

La puissance électrique absorbée s'exprime comme suit :

$$P(t) = R_s \cdot (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + L_d \cdot i_{ds} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_q \cdot i_{qs} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \omega \cdot \phi_f \cdot i_{qs} \quad (\text{II.8})$$

Nous déduisons l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \left[ (L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} + \phi_f \cdot i_{qs} \right] \quad (\text{II.9})$$

### II.1.7.2 Equation Mécanique

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \cdot \omega \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$J$ : Moment d'inertie

$C_r$ : Couple résistive

$f_c$ : Coefficient de frottement.

En regroupant les équations de tensions, du couple électromagnétique et l'équation mécanique on obtient l'ensemble des équations qui représente le modèle de la MSAP [26] :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_d \cdot \frac{di_{ds}}{dt} - \omega \cdot L_q \cdot i_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_q \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \omega \cdot L_d \cdot i_{ds} + \phi_f \cdot \omega \\ J \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \\ C_{em} = p \frac{3}{2} \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} + \phi_f \cdot i_{qs}] \end{cases} \quad (II.11)$$

### II.1.8 Simulation et validation du modèle de la MSAP

Le schéma de simulation de la machine dont les paramètres sont donnés en annexe est présenté sur la figure (II.4). La machine ne pouvant être alimenté directement du réseau 220/50Hz est synchronisé selon une méthode tel que le rapport (V/f) soit toujours gardé fixe jusqu'à la tension et la fréquence nominale du réseau [26].

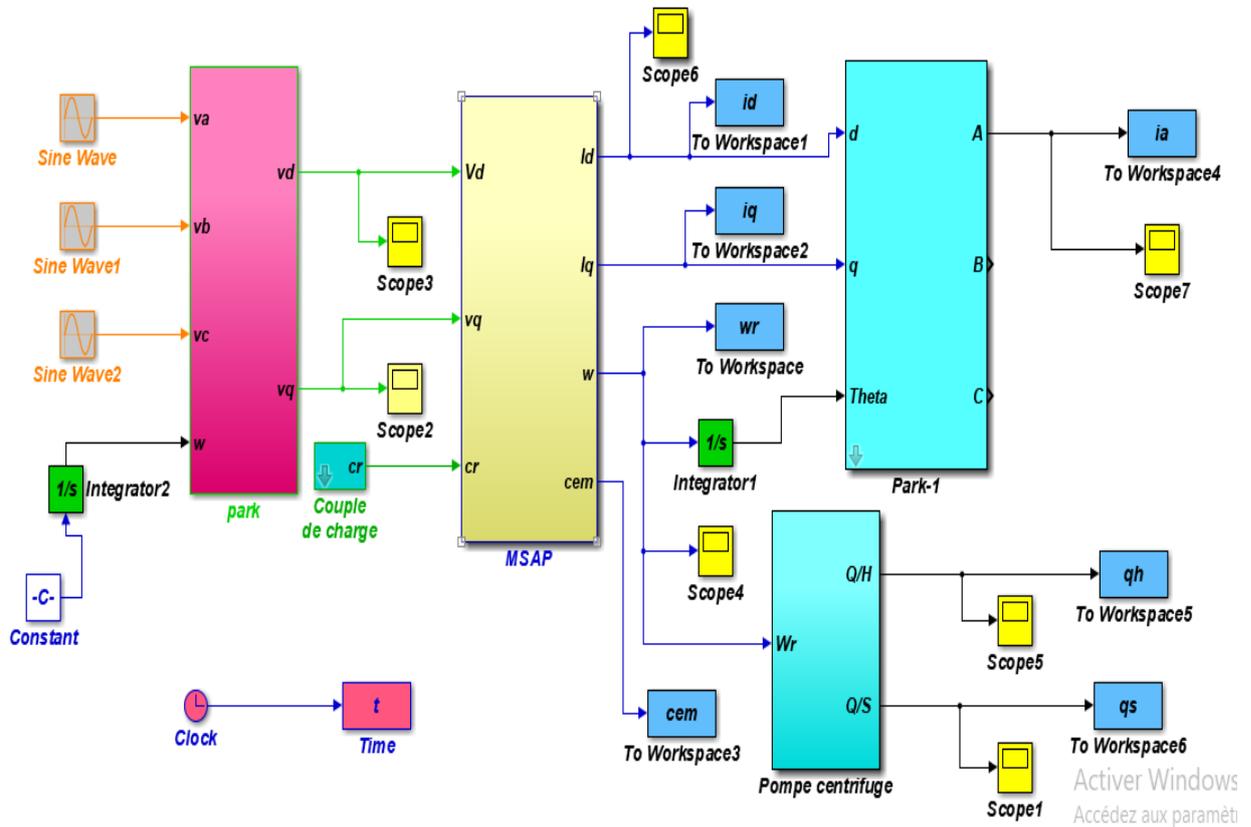


Figure II.4 : Commande de MSAP en boucle ouverte

### II.2 Modélisation d'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue – alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie. L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques

(micro-ordinateur, station de télécommunication..) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,..) [27]. La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure (II.5):

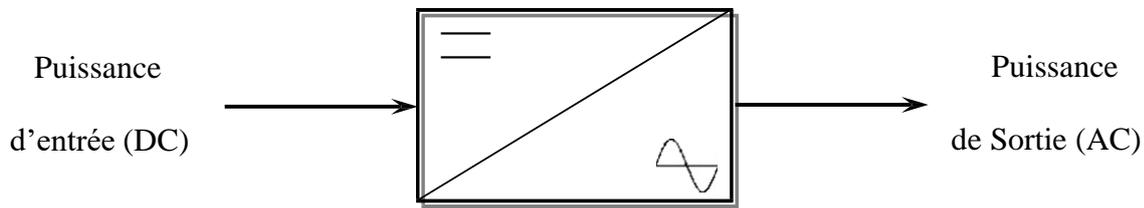


Figure II.5 : Schéma de principe de l'onduleur.

## II.2.2 Types d'onduleurs et leurs applications

Les onduleurs sont classés selon le type d'application et les performances désirées, en deux catégories : les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes (ou assistés).

### II.2.2.1 L'onduleur autonome

Un onduleur autonome est un système de commutation à transistors ou à thyristors, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes. La fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie sont imposées à la charge, c'est-à-dire elles sont propres à l'onduleur. L'onduleur autonome peut être :

- ✓ A fréquence fixe : utilisé comme source de secours ou alimentation sans coupure, Il est alimenté le plus souvent à partir d'une batterie d'accumulateurs (cas de PC, salles d'informatique,..) comme il est montré sur la figure (II.6), [28] :

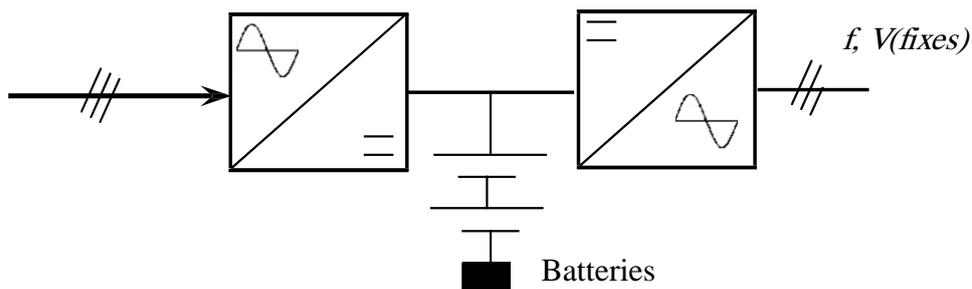


Figure II.6 : Alimentation sans coupure.

Il est utilisé aussi pour l'alimentation des charges inductives (fours à induction, ...) mais dans ce cas tous les onduleurs sont monophasés.

- ✓ A fréquence variable : dans ce cas il est utilisé pour la variation de vitesse des moteurs asynchrones triphasés, figure (II.7) :

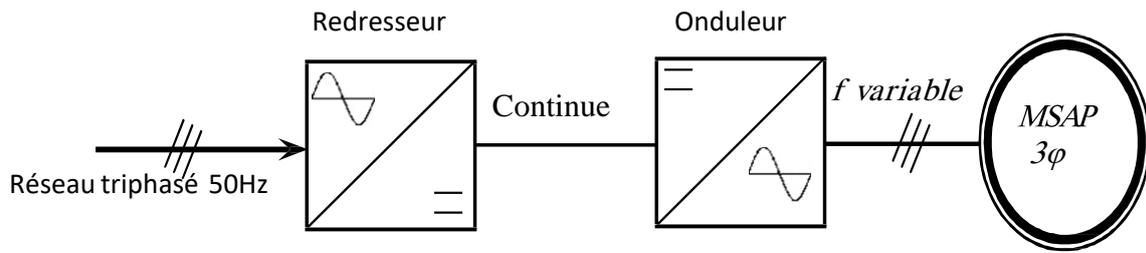


Figure II.7 : Convertisseur de fréquence.

### II.2.2.2 L'onduleur non autonome (ou assisté)

Un onduleur non autonome ou assisté est un système de commutation à thyristors, dont les instants de commutation sont imposés par la charge, [28]. Dans ce cas, la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie sont imposées par le réseau alternatif sur lequel débite l'onduleur. Ce type d'onduleur est utilisé pour :

- Le transport d'énergie en courant continu, on peut transporter de grandes puissances à très haute tension (de l'ordre du million de volts) par lignes aériennes sur des distances élevées (500- 000 Km) pour lesquelles, les lignes à courant alternatif posent des problèmes délicats (stabilité, pertes, etc...). De plus, le transport sur des plus faibles distances par câbles souterrains dont la capacité très élevée, limite leur emploi en courant alternatif, [29].
- Le freinage par récupération : pendant le freinage de la machine à courant continu qui peut fonctionner en génératrice, l'énergie fournie dans ce cas peut être récupérée et transférée au réseau alternatif par un onduleur assisté (domaine de la traction électrique), [30].

Selon la nature de la source continue alimentant l'onduleur, on distingue l'onduleur de tension et celui de courant.

### II.2.2.3 L'onduleur de tension

C'est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, d'impédance interne négligeable. Sa tension n'est pas affectée par la variation du courant qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie, figure (II.8) :

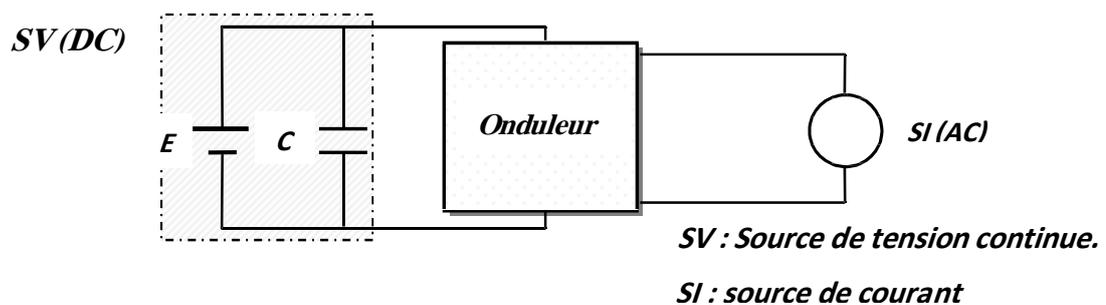


Figure II.8 : Représentation schématique d'un onduleur de tension [30].

L'onduleur de tension est autonome si la fréquence de la tension de sortie est indépendante du réseau alternatif, il est non autonome (assisté) si la fréquence est imposée par le réseau alternatif. Selon le choix des interrupteurs commandés, les onduleurs présentent des avantages les uns par rapport aux autres. C'est pourquoi un onduleur de tension à transistors présente des avantages par rapport à celui à thyristors :

- Facilité de commande (le transistor est commandé à l'ouverture et à la fermeture),
- Élimination du circuit de commutation forcée,
- Faibles pertes de commutation,
- Possibilité de fonctionnement à des fréquences plus élevées.

Le circuit de puissance d'un onduleur de tension prend comme exemple d'un onduleur de tension, le montage d'un pont triphasé à thyristors, figure (II.9) :

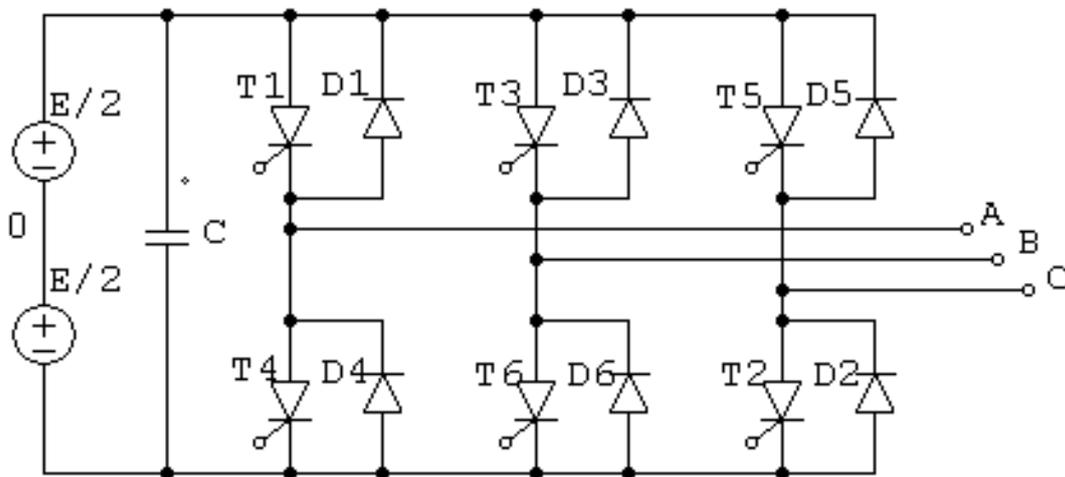


Figure II.9 : Onduleur de tension en pont triphasé à thyristors [30].

Les diodes en tête-bêche sur les interrupteurs commandés du circuit de puissance jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'onduleur en assurant essentiellement trois fonctions :

- Faciliter l'extinction des interrupteurs commandés en les polarisant en inverse lorsqu'il s'agit de thyristors,
- Autoriser la démagnétisation de la self de la charge inductive au moment de l'ouverture des interrupteurs,
- Assurer le redressement des courants débits par la charge (cas de la machine asynchrone) lorsqu'elle fonctionne en génératrice.

## II.2.2.4 L'onduleur de courant

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu (Figure (II.10)), d'impédance interne si grande pour que le courant qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension à ses bornes. La source continue impose le courant à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

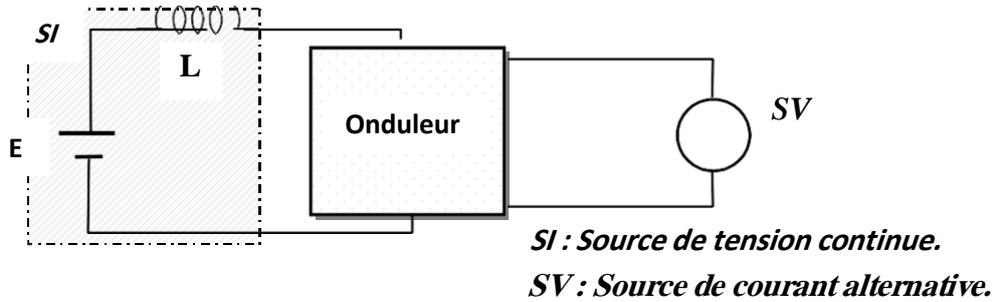


Figure II.10 : Représentation schématique d'un onduleur de courant [30].

Le circuit de puissance d'un onduleur de courant prend comme exemple d'un onduleur de courant, le montage d'un pont triphasé à thyristors, figure (II.11) :

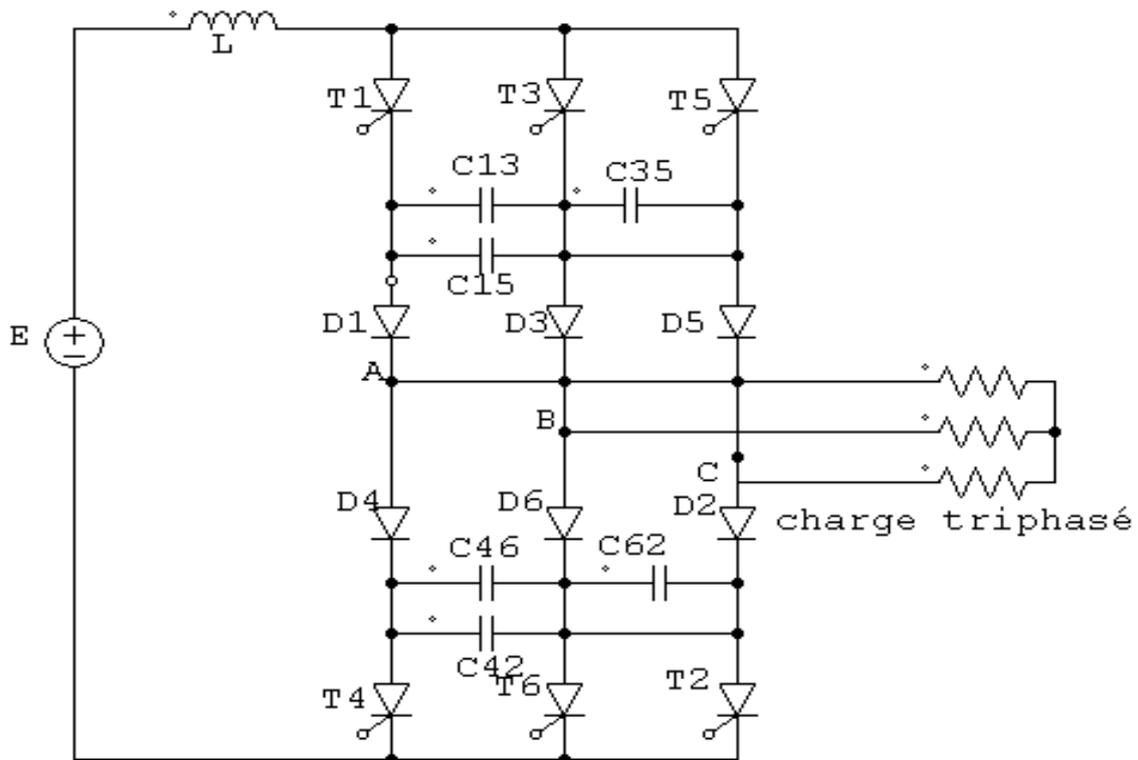


Figure II.11 : Onduleur de courant en pont triphasé à thyristors [30].

### II.2.3 Stratégie de commande MLI Sinusoïdale :

La technique de Modulation de Largeur d'impulsion (MLI ou PWM : Pulse Width Modulation) ou de Modulation d'Impulsions en Durée (MID), proposé pour la première fois en 1981, par N. Akira. [32] Le principe général consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs. La commande MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants :
- L'indice de modulation ( $m$ ) égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence ( $m = f_p / f$ ).
- Le coefficient de réglage en tension ( $r$ ) égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation ( $r = V_m / V_{pm}$ ), [33].

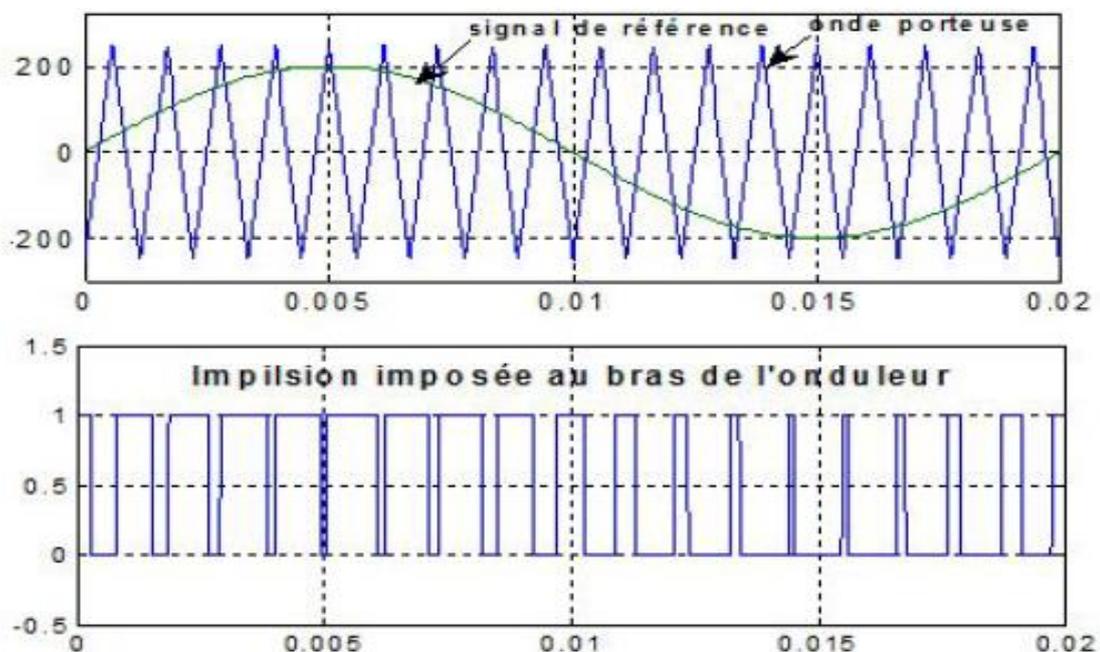


Figure II.12 : principe de la commande MLI-ST.

## II.2.4 Simulation de la commande MLI Sinus – Triangle :

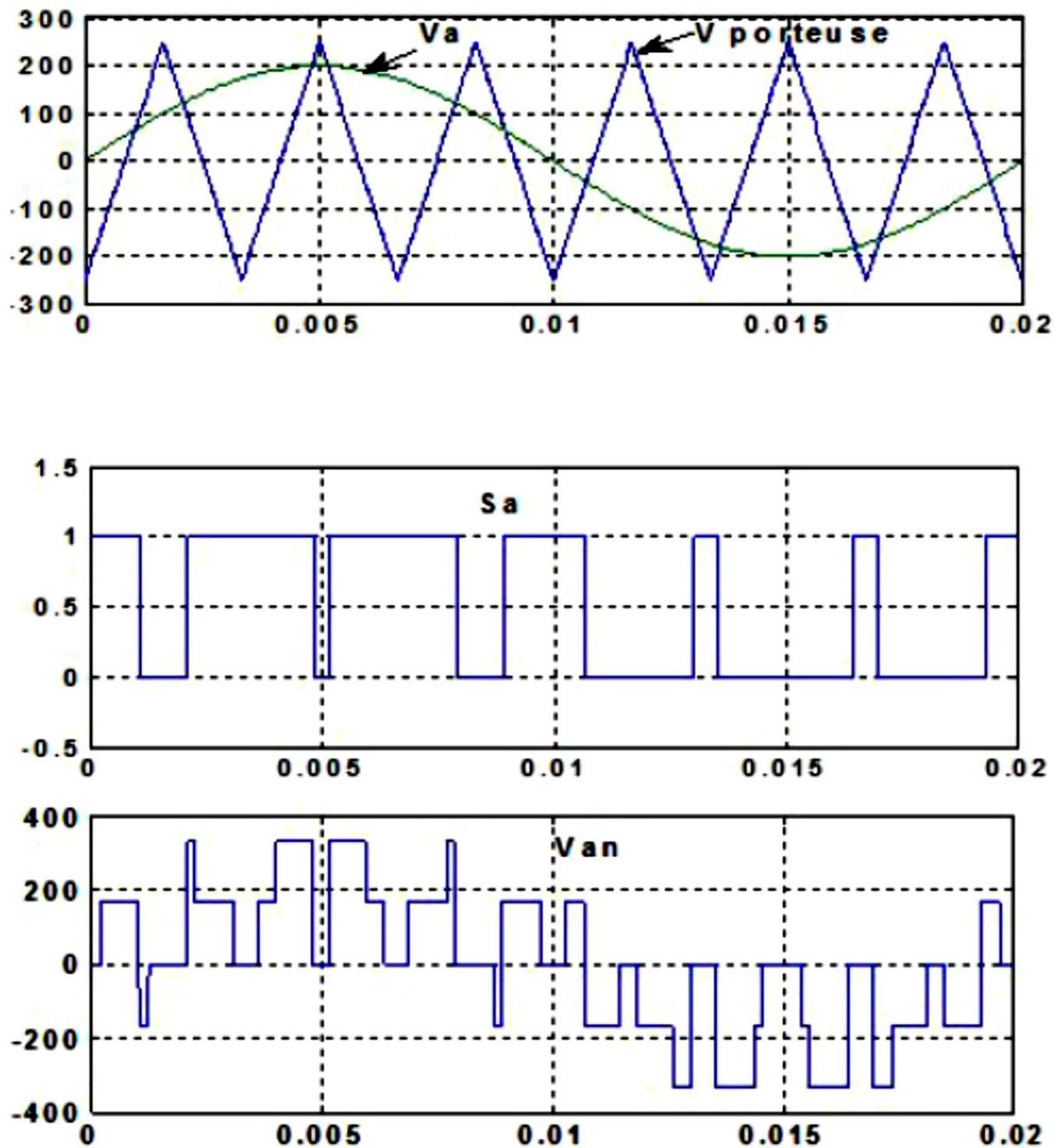


Figure II.13 : Simulation de la commande MLI-ST pour  $r = 0.8$  et  $m = 6$

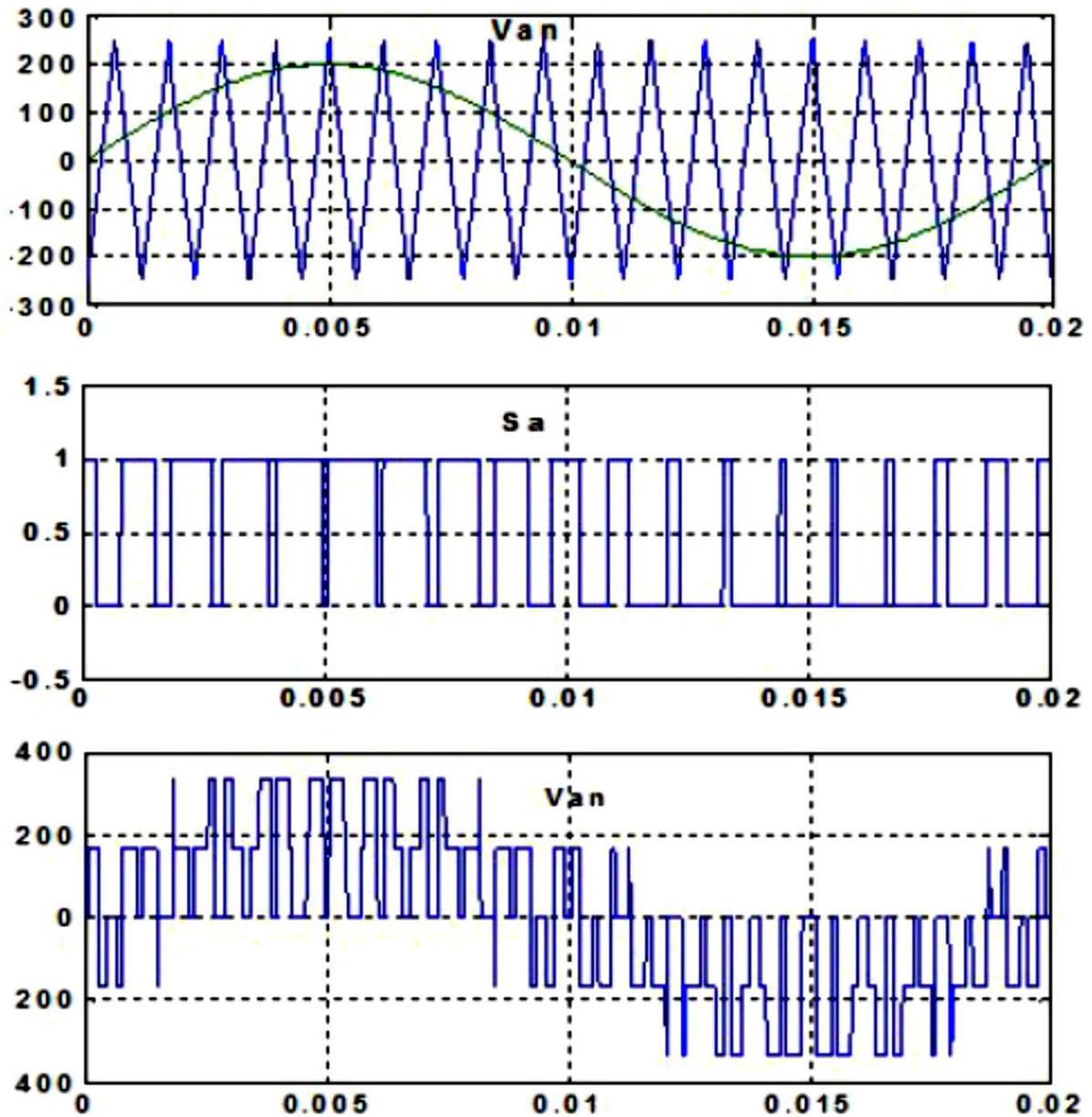


Figure II.14 : Simulation de la commande MLI-ST pour  $r = 0.8$  et  $m = 18$ .

## II.3 Modélisation de la pompe centrifuge

### II.3.1 La pompe centrifuge

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

La puissance consommée, proportionnelle à  $Q * HMT$ , variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).

### II.3.2 Constitution de la pompe centrifuge :

La pompe se compose de deux éléments essentiels : Une roue qui impose au liquide un mouvement de rotation. Celle-ci est montée sur un arbre porté par des paliers et entraîné par un moteur. Un corps de pompe qui dirige l'écoulement vers la roue et l'en éloigne à nouveau sous plus haute pression. Le corps de pompe comprend une tubulure d'aspiration et une tubulure de refoulement, supporte les paliers et l'ensemble du rotor.

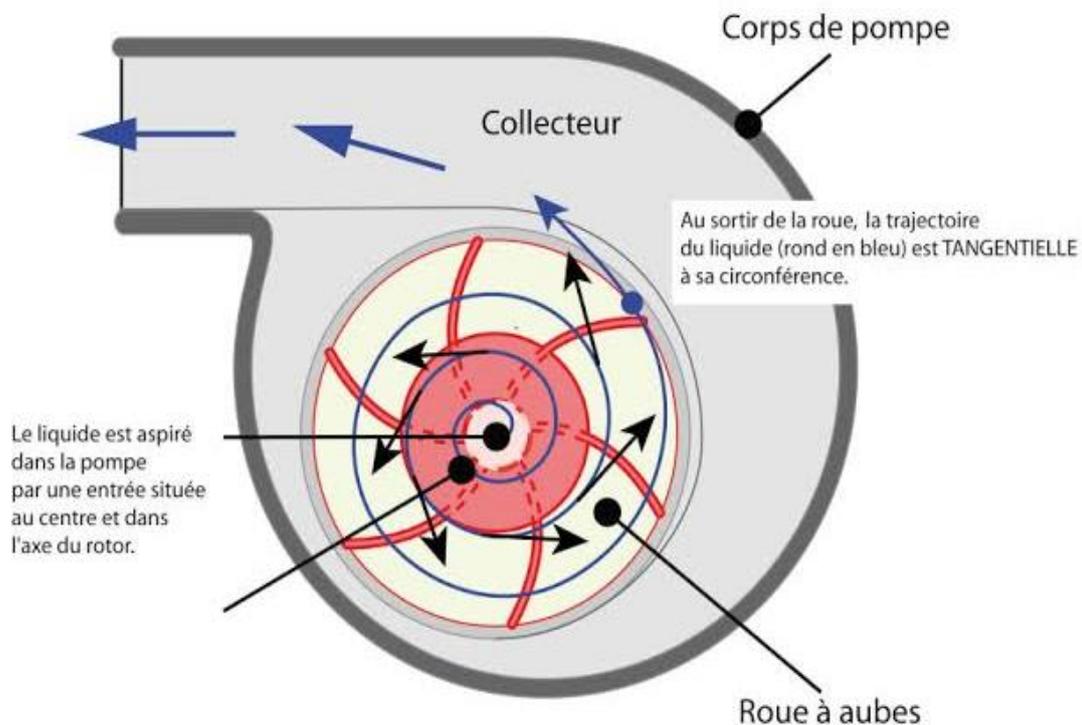


Figure II.15 : Vue en face d'une pompe centrifuge [37].

### II.3.3 Fonctionnement de la pompe centrifuge :

La théorie des fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmenté, cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique, cette dernière est transformée en énergie de pression par ralentissement progressif qui est obtenue dans une pièce placés à l'intérieur de la roue appelle limacon, celle-ci se termine par une cône divergente [37].

### II.3.4 Caractéristiques de la pompe centrifuge

#### II.3.4.1 La courbe débit-hauteur

La courbe débit hauteur, ou courbe  $Q-H$ , exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction du débit. Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois (03) paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse :

En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN ", [34].

$$H = C_1 \omega^2 - C_2 \omega Q - C_3 Q^2 \quad (\text{II.13})$$

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique en Watt est donnée comme suit [35] :

$$P_H = \rho \times g \times Q \times H \quad (\text{II.14})$$

L'autre expression à considérer est celle de la puissance en Watt absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprimée par :

$$P = 9.81 \times Q \times H / \eta_p \quad (\text{II.15})$$

Où  $\eta_p$  : est le rendement de la pompe et  $\rho$  la masse volumique de l'eau ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

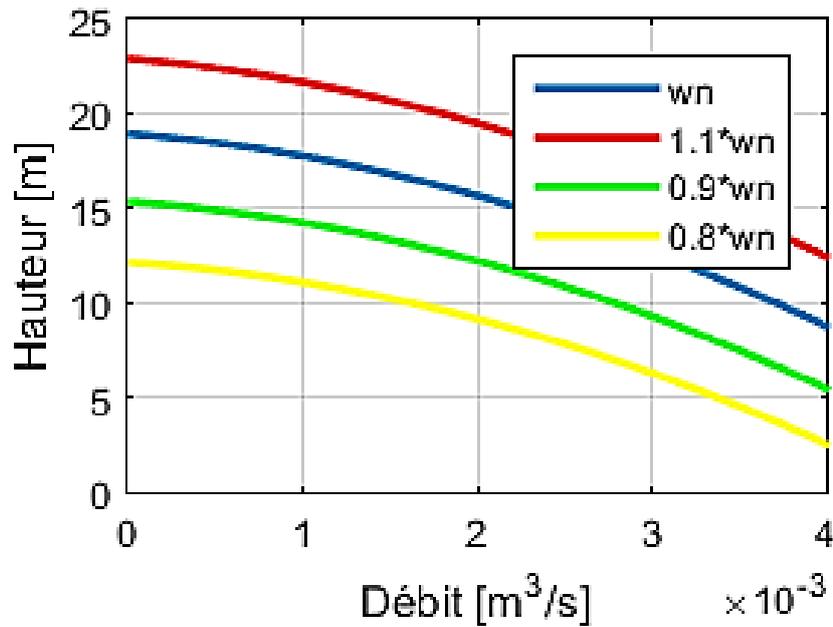


Figure II.16 : courbe Q-H pour différentes hauteurs et vitesses

### II.3.4.2 Courbe du rendement

Pour les groupes électropompes (pompe + moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement global, comme on peut tracer la courbe de rendement hydraulique en utilisant la formule :

$$\eta = \frac{P_{\text{hydraulique}}}{P_{\text{arbre}}} \quad (\text{II.16})$$

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 70 %.

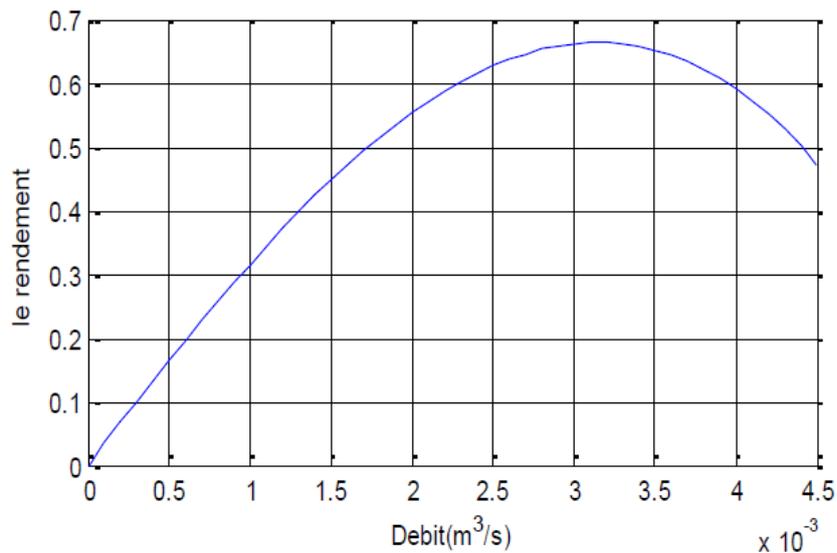


Figure II.17 : Rendement de la pompe centrifuge.

### II.3.5 Schéma bloc de la pompe centrifuge

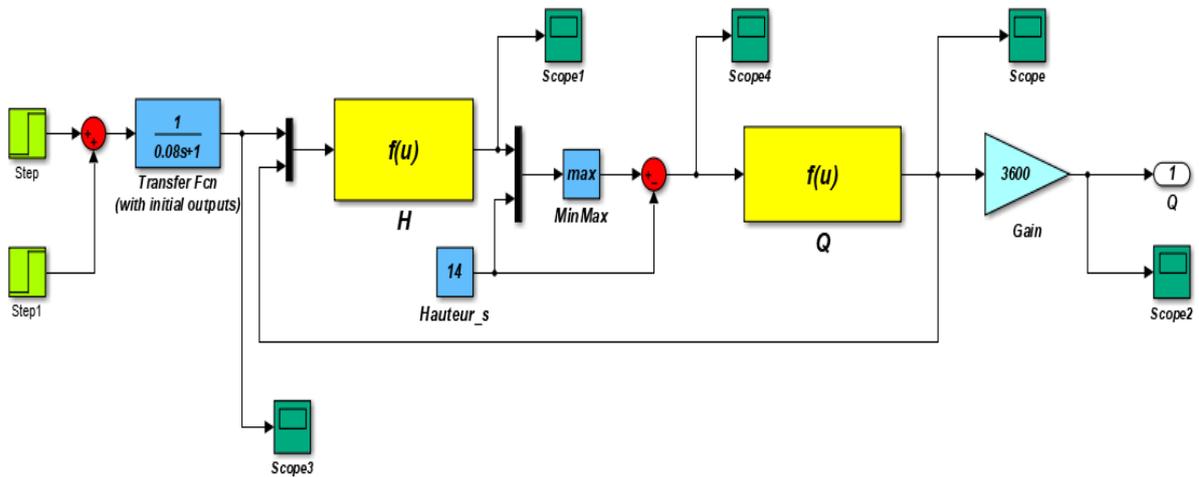


Figure II.18 : Schéma bloc de la pompe centrifuge.

## II.4 Modélisation du générateur photovoltaïque

### II.4.1 Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque

#### II.4.1.1 Modèle idéale :

Dans le cas idéal, la jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode, délivrant un courant selon la figure (II-19), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale. L'équation décrivant ce modèle est donnée par [27].

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (II.1)$$

$$I_D = -I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (II.2)$$

En circuit ouvert, la charge tend vers l'infini et  $V \rightarrow V_{oc}$ , qui est la tension en circuit ouvert

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{nKT}\right) - 1 \right] - I_{ph} = 0 \quad (II.3)$$

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (II.4)$$

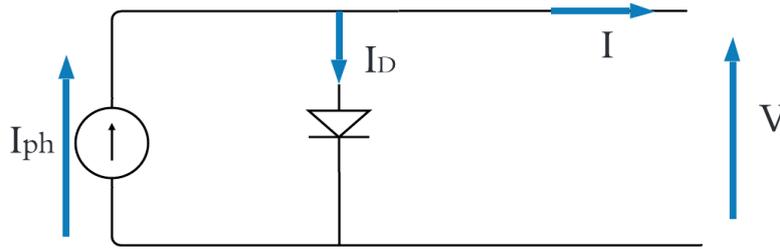


Figure II.19 Circuit équivalent du modèle idéal.

### II.4.1.2 Modèle réelle

Le modèle le plus courant et le plus utilisé dans la communauté scientifique est le modèle basé sur le schéma de circuit équivalent de la cellule PV. Le modèle électrique réel d'une cellule solaire, ce modèle à cinq paramètres est constitué d'une source de courant  $I_{ph}$  proportionnelle à l'irradiance et qui est linéaire en fonction de la température de la cellule PV, d'une diode  $D1$  en parallèle, d'une résistance série  $R_s$ , qui modélise la résistance de la grille et les pertes résistives dans la base et l'émetteur, et d'une résistance parallèle  $R_{sh}$  qui prend en compte les pertes et les courants de fuites dans l'émetteur et la base.

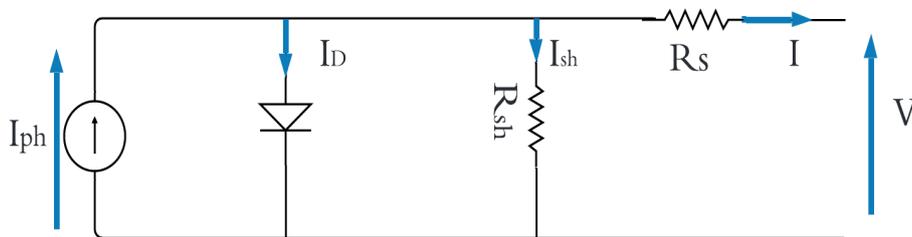


Figure II.20 Circuit équivalent du modèle à cinq paramètres.

Dans le cas idéal, on a  $R_s = 0$  et  $R_{sh}$ , ces résistances donnent  $R_{sh} \rightarrow \infty$ , dans le cas réel une évaluation des imperfections de la diode ; en considérant que  $R_s$  présente une valeur faible et que  $R_s \ll R_{sh}$  ; 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.

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II-5})$$

Le courant de résistance de shunte  $I_{sh}$  [27] :

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

Le courant de diode  $I_D$  :

$$I_D = I_s \cdot \left[ e^{\left( \frac{q(V+I.R_s)}{n.K.Ns.T} \right)} - 1 \right] \quad (\text{II-7})$$

Avec  $I_s$  Le courant de saturation donné par :

$$I_s = I_{rs} \cdot \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 \cdot e^{q.E.g \frac{1}{nk} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)} \quad (\text{II-8})$$

$I_{rs}$  Le courant de saturation inverse donné par :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left( \frac{q.V_{oc}}{n.K.Ns.T} \right)} - 1} \quad (\text{II-9})$$

Courant de photonique  $I_{ph}$  :

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 :

$$I_{ph} = [I_{cc} + k_i \cdot (T - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (\text{II-10})$$

## II.4.2 Influence de température et l'éclairement sur la caractéristique de la cellule PV

### II.4.2.1 Influence de la température

La figure (II.21) et figure (II.22) représentent une variation de température de 0°C jusqu'à 50°C à un éclairement constant  $E=1000\text{w/m}^2$ . On remarque que la tension en circuit ouvert diminue avec l'augmentation de température, Par contre cette dernière à une influence négligeable sur le courant de court-circuit et donc une diminution de puissance maximale.

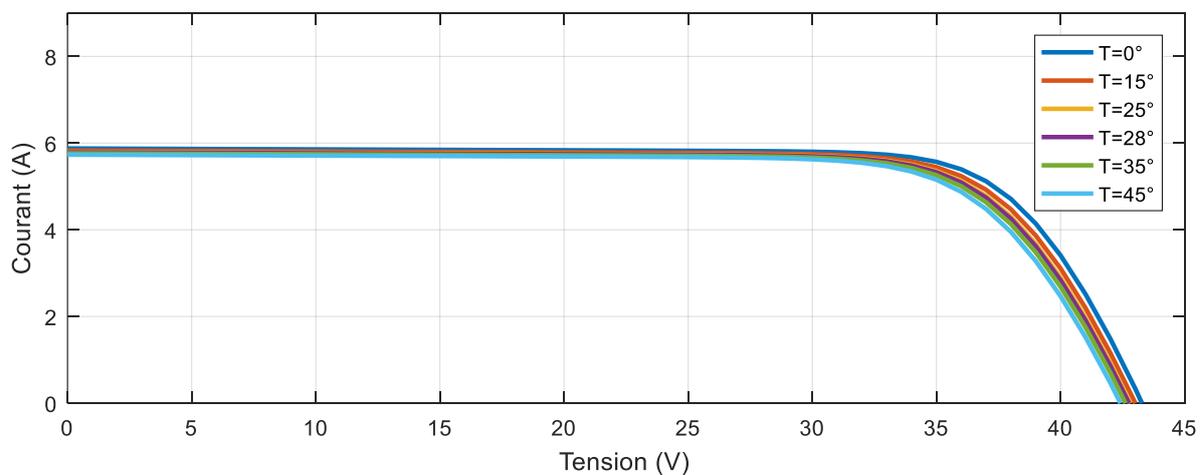


Figure II.21. Influence de température sur la caractéristique  $I(V)$  [27].

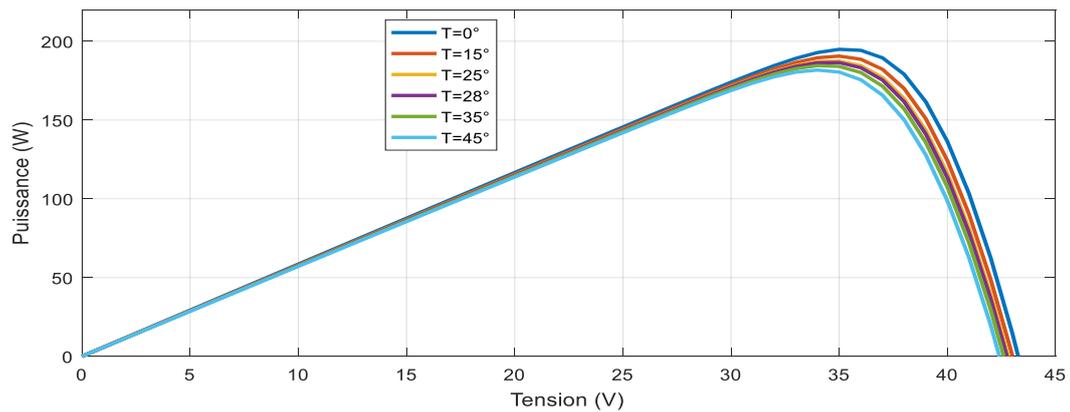


Figure II.22. Influence de température sur la caractéristique  $P(V)$

#### II.4.2.2 Influence d'éclairement

La figure (II.23) et figure (II.24) représentent une variation d'éclairement de  $400\text{w/m}^2$  jusqu'à  $1000\text{w/m}^2$  à une température constant  $T=25^\circ\text{C}$ . On remarque que le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident, contrairement à la tension de circuit ouvert qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement

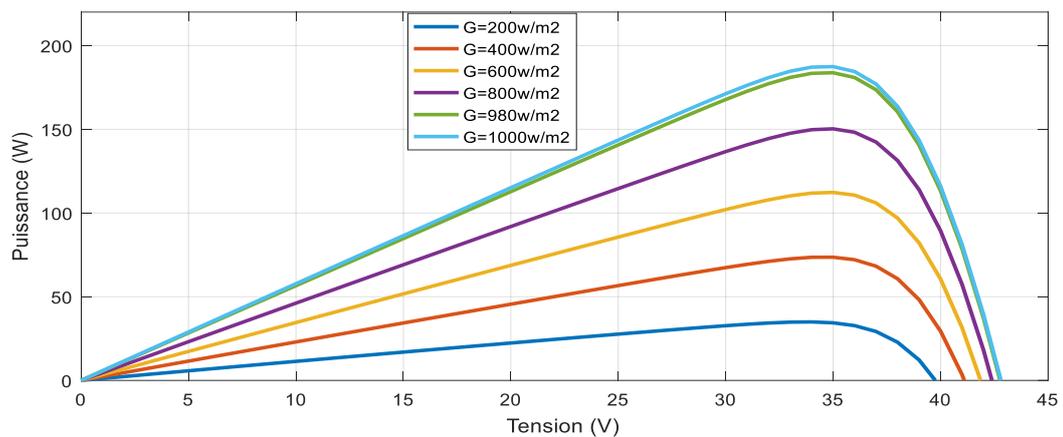


Figure II.23. Influence d'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$

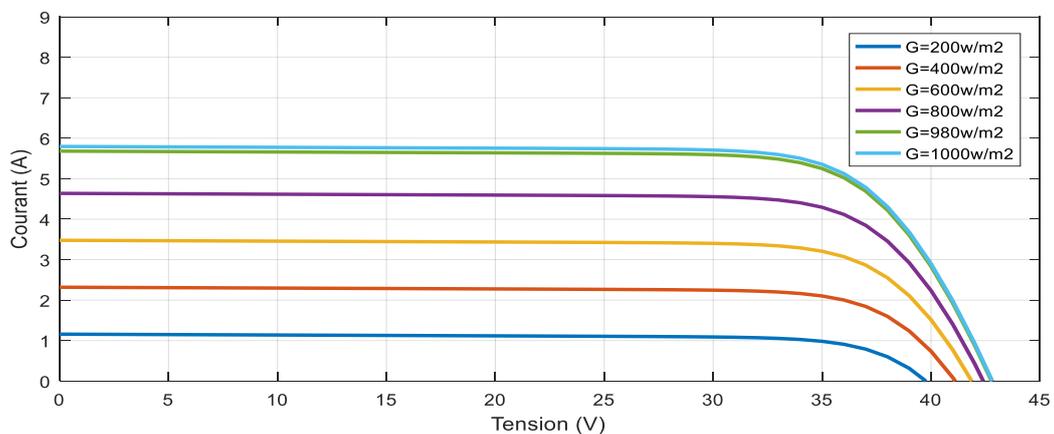


Figure II.24. Influence d'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$  [27].

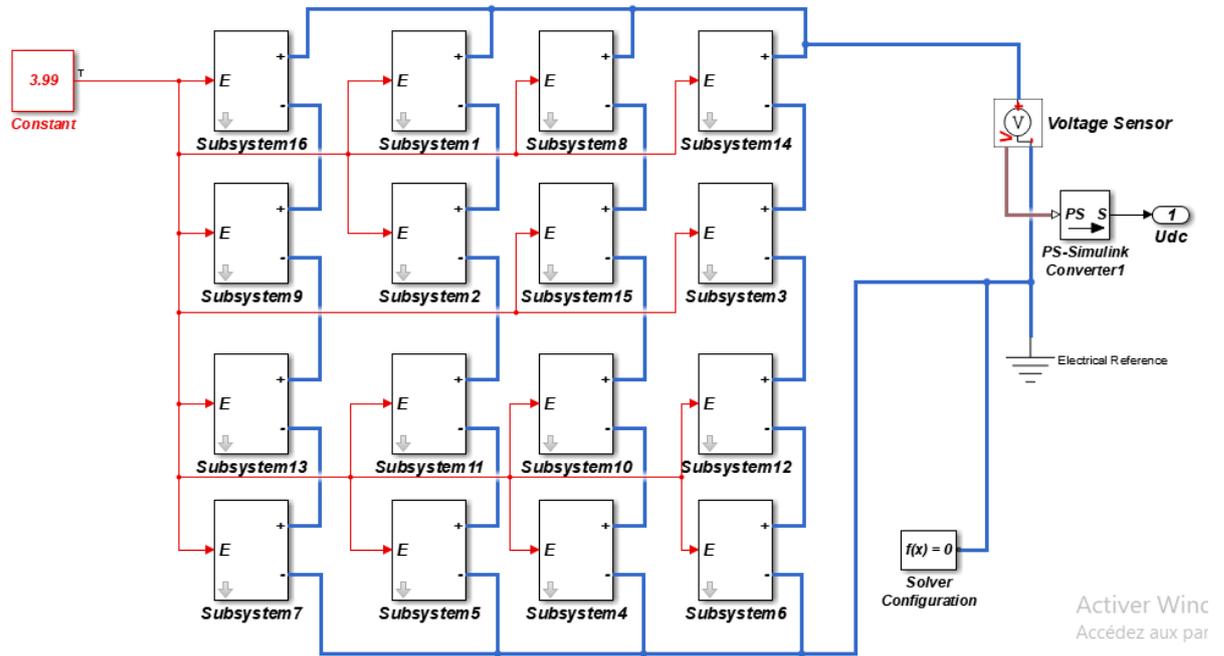


Figure II.25. Schéma bloc de GPV

## II.5 Résultats de simulation :

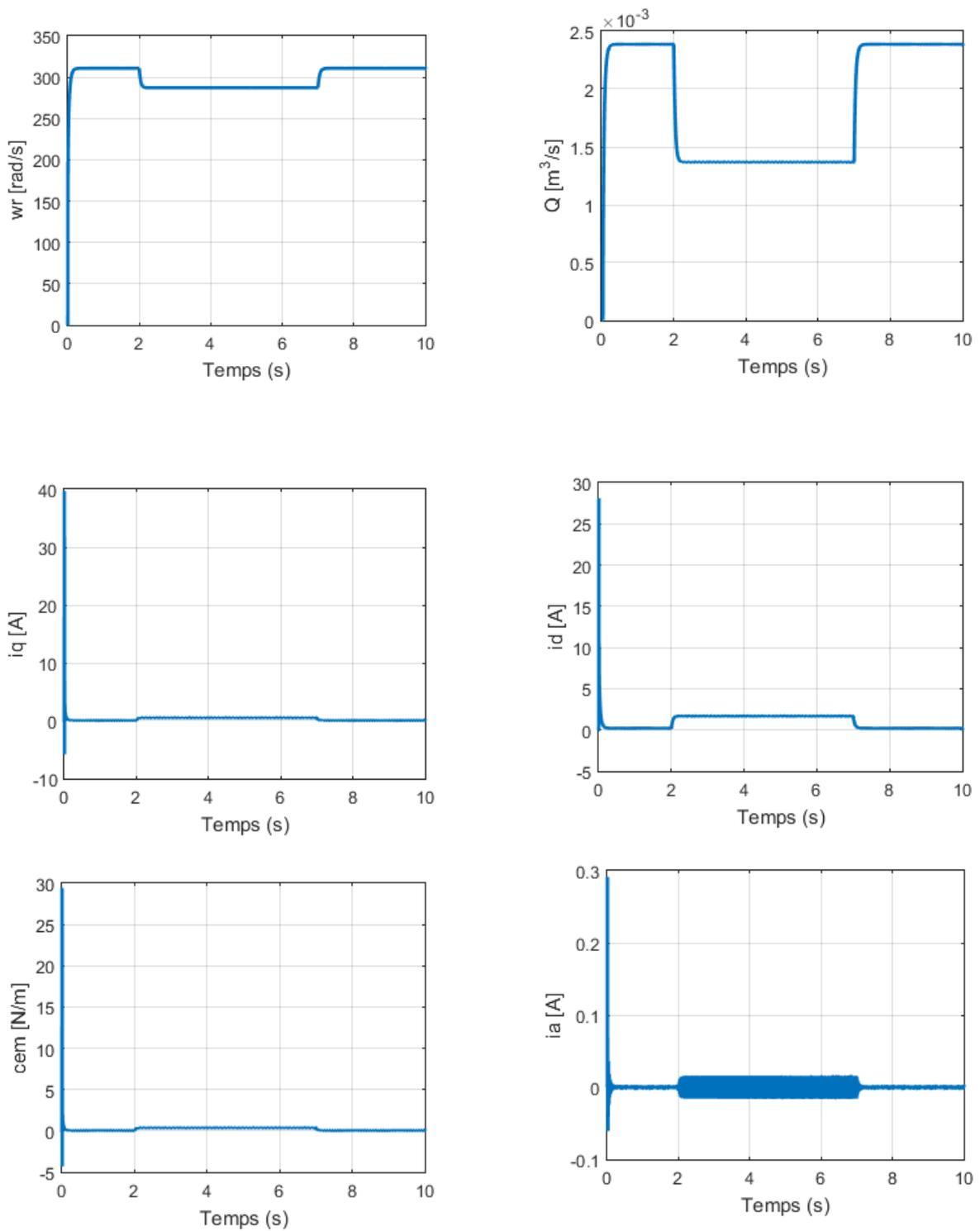


Figure II.26 : Comportement dynamique de la pompe centrifuge alimentée par onduleur parfait.

### II.5.1 Interprétation des résultats :

Pour valider le modèle mathématique du système de pompage photovoltaïque, nous avons simulé le fonctionnement du modèle obtenu en boucle ouverte alimentée par un onduleur parfait. La simulation de la pompe centrifuge a été faite sous les conditions suivantes :

- Démarrage à vide de la pompe centrifuge ;
- A l'instant  $t = 2s$ , application d'une charge de  $1 \text{ Nm}$  ;
- A l'instant  $t = 8s$ , élimination de la charge ;

On remarque que le régime transitoire dure  $0,2 \text{ s}$ , et que la vitesse et le débit de la pompe se diminue avec l'augmentation de la charge et puis elle augmente avec sa diminution, d'autre part le couple électromagnétique  $C_{em}$  suit la valeur du couple résistant. On note aussi une forte oscillation au niveau du courant  $i_a$  qui a une variation proportionnelle au changement de la charge et une forme sinusoïdale.

### II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé en vue de simulation chaque élément du système de pompage photovoltaïque. Cette modélisation nous a permis de donner un modèle complet pour le moteur synchrone à aimant permanent et de le simuler afin de visualiser l'influence de couple de charge sur le comportement dynamique du moteur. Le prochain chapitre sera consacré pour la commande vectorielle du système de pompage photovoltaïque.

# **CHAPITRE III**

## **Commande du système de pompage photovoltaïque**

### III.1 Introduction

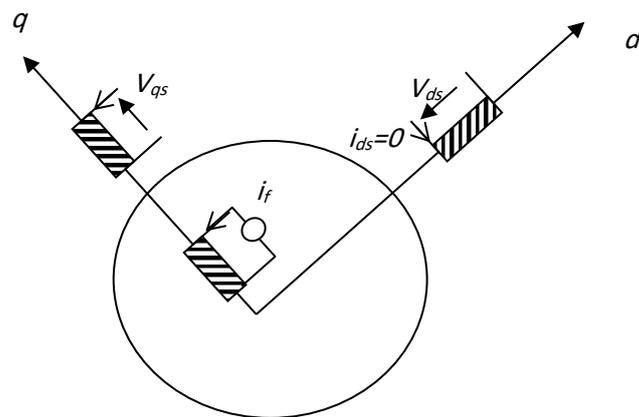
La difficulté pour commander une machine synchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage complexe entre les variables d'entrée, de sortie et les variables internes.

La commande d'une machine synchrone MSAP implique le contrôle du couple. Le couple électromagnétique dépend des courants  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  donc de la commande de ces courants. Plusieurs stratégies de commande peuvent être considérées, elles se différencient par le choix de la relation liant les courants  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ . Ces commandes sont rassemblées sous le vocable de commande vectorielle ou commande par orientation du flux.

De plus la commande vectorielle permet de séparer le contrôle du flux dans la machine du courant générant le couple ce qui va permettre l'obtention des performances considérables relatives à la réponse du système en régime dynamique semblables à celles des machines à courant continu. Nous allons présenter maintenant le principe et la mise en œuvre de la commande vectorielle des MSAP alimentées par une source de tension triphasée parfaite.

### III.2. Principe de la commande vectorielle

L'objectif de la commande vectorielle des MSAP est d'améliorer leur comportement dynamique [5, 6]. La stratégie la plus souvent utilisée consiste à maintenir le courant  $i_{ds}$  nul et réguler la vitesse ou la position par  $i_{qs}$  ou  $V_{qs}$ . Physiquement cette stratégie revient à maintenir le courant statorique en quadrature avec le flux rotorique (figure III.1).



**Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle maintenant  $i_{ds}$  nul.**

Généralement le couple électromagnétique développé par une MSAP est donnée par

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot [\phi_f + (L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs}] \cdot i_{qs} \quad (\text{III.1})$$

Si le courant  $i_{ds}$  est maintenu nul, alors l'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \phi_f \cdot i_{qs} \quad (\text{III.2})$$

Dans ce qui suit nous allons présenter la commande vectorielle indirecte.

### III.2.1. Commande vectorielle indirecte

Cette approche est basée sur le contrôle des courants dans le référentiel dq. Les régulateurs de courant sont construits dans ce cas à partir du modèle de Park de la machine. Le courant  $i_{qs}$  est contrôlé par la tension  $V_{qs}$ , le courant  $i_{ds}$  par  $V_{ds}$  et à travers  $i_{qs}$  on contrôle la vitesse ou la position, dans un premier lieu et afin de réduire relativement la complexité de l'algorithme de commande, on synthétise la commande avec régulation du courant  $i_{ds}$  seul, puis on traite le cas du réglage des deux courants.

Cette stratégie permet la synthèse de la structure de commande à partir du modèle découplé de la machine. En effet pour pouvoir découpler la machine il faut que les tensions de références soient [5, 6] :

$$\begin{cases} V_{ds}^* = -\omega_r \cdot L_q \cdot i_{qs}^* + V_{d0} \\ V_{qs}^* = R_s \cdot i_{qs}^* + L_q \cdot \frac{di_{qs}^*}{dt} + \omega_r \cdot \phi_f \\ V_{d0} = R_s \cdot i_{ds} + L_d \cdot \frac{di_{ds}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

En choisissant la référence du courant  $i_{qs}$ , les commandes  $V_{ds}^*$  et  $V_{qs}^*$  seront calculés par la structure de commande représentée dans la figure (III.2).

La structure de commande vectorielle en boucle fermée avec régulation du courant  $i_{ds}$  est représentée dans la figure (III.3). Le bloc de découplage I.F.O.C (Indirect Field Orientend Control) fournit les tensions statoriques de référence assurant le contrôle de  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ . Le passage aux grandeurs réelles se fait par le biais d'une transformation de coordonnées ( $dq/abc$ ).

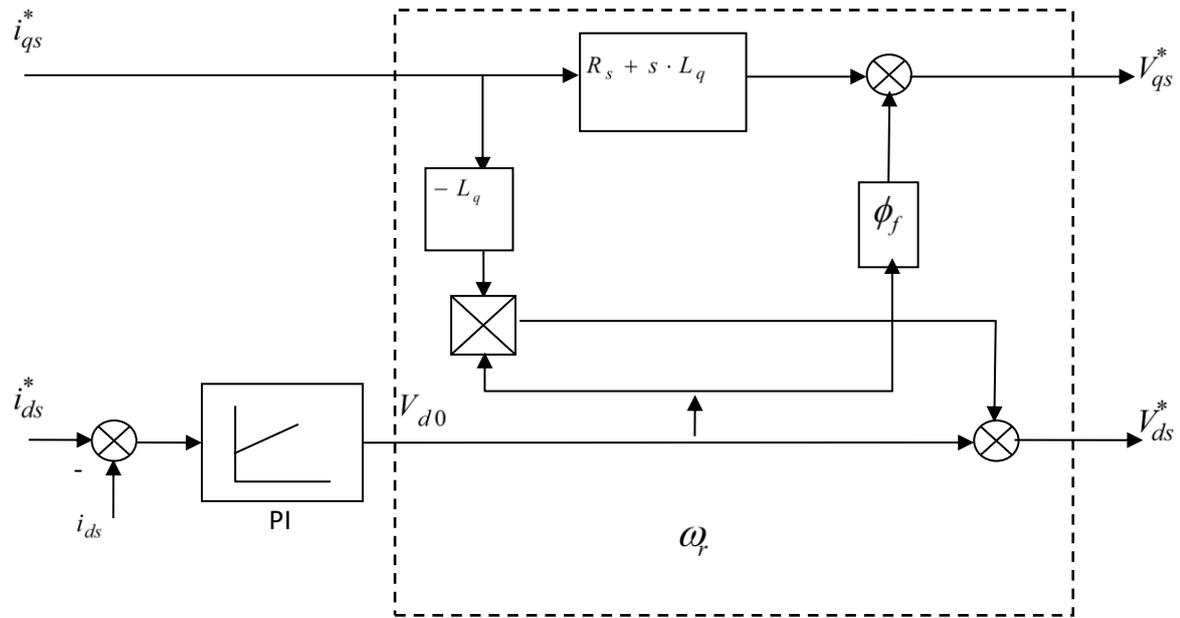


Figure III.2 : Structure de découplage avec réglage du courant  $i_{ds}$  [26].

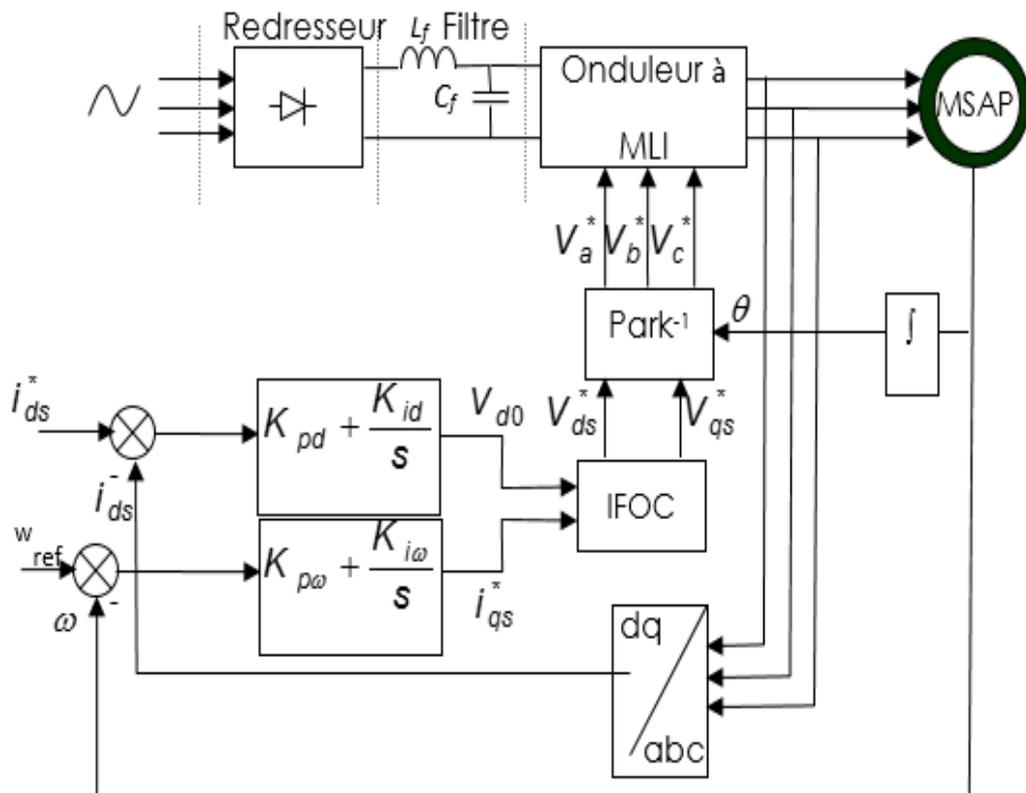


Figure III.3 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte avec régulation du courant [26].

### Calcul du régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence afin de maintenir la vitesse correspondante. L'équation mécanique donne :

$$\frac{w(s)}{c_{em}} = \frac{p}{f + M \cdot s} \quad (III.4)$$

En associant à cette fonction de transfert un régulateur PI, on obtient le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse (figure III.4).

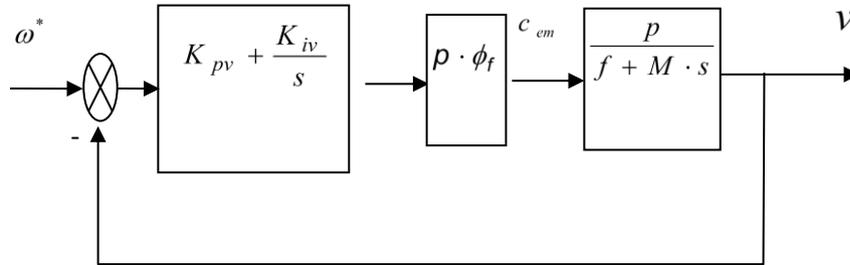


Figure III.4 : Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse

La fonction de transfert en boucle fermée calculée à partir du schéma précédent est donnée comme suit :

$$\frac{w(s)}{w^*(s)} = \frac{(K_{pv} \cdot s + K_{iv}) \cdot \frac{p^2 \cdot \phi_f}{M}}{D(s)} \quad (III.5)$$

L'équation caractéristique  $D(s)$  est :

$$D(s) = s^2 + \frac{f + K_{pv} \cdot p^2 \cdot \phi_f}{M} \cdot s + \frac{K_{iv} \cdot p^2 \cdot \phi_f}{M} = 0 \quad (III.6)$$

En imposant deux pôles complexes conjugués  $s_{1,2} = \rho_\omega \cdot (-1 \pm j)$  en boucle fermée et par identification avec la nouvelle équation caractéristique désirée nous obtenons :

$$\begin{cases} K_{p\omega} = \frac{2 \cdot \rho_\omega \cdot M - f}{p^2 \cdot \phi_f} \\ K_{i\omega} = \frac{2 \cdot M \cdot \rho_\omega^2}{p^2 \cdot \phi_f} \end{cases} \quad (III.7)$$

### Calcul du régulateur du courant $i_{ds}$

Le schéma de la boucle de régulation du courant  $i_{ds}$  est donné par la figure III.5. La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{i_{ds}^*(s)}{i_{ds}(s)} = \frac{K_{pd} \cdot s + K_{id}}{L_d \cdot s^2 + (R_s + K_{pd}) \cdot s + K_{id}} \quad (III.8)$$

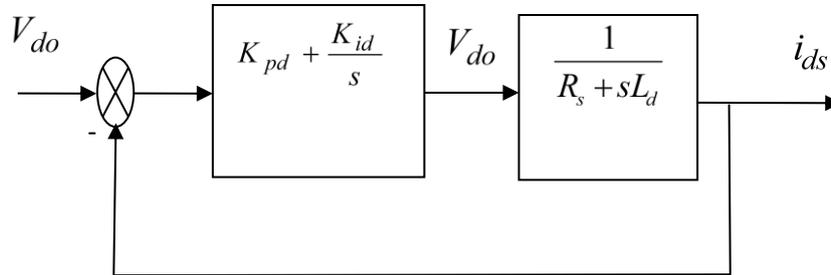


Figure III.5 : Boucle de régulation du courant  $i_{ds}$

Son équation caractéristique est donnée par :

$$D(s) = L_d \cdot s^2 + (R_s + K_{pd}) \cdot s + K_{id} \quad (III.9)$$

En imposant deux pôles complexes conjugués  $s_{1,2} = \rho_d \cdot (-1 \pm j)$  en boucle fermée et par identification avec la nouvelle équation caractéristique désirée nous obtenons :

$$\begin{cases} K_{pd} = 2 \cdot L_d \cdot \rho_d - R_s \\ K_{id} = 2 \cdot L_d \cdot \rho_d^2 \end{cases} \quad (III.10)$$

A cause du changement brutal dû à la variation de l'échelon de référence de la vitesse ou de position le régulateur PI se trouve soumis à un écart de réglage très important. La réaction de l'action proportionnelle dans le but est de réduire l'écart risque de provoquer un grand dépassement. Le dépassement peut être amorti, soit en diminuant la rapidité de réglage par action sur le placement de pôles et on perd la robustesse vis-à-vis la perturbation soit en introduisant un filtre correcteur pour la grandeur de consigne afin d'atténuer l'impact de la variation brusque de vitesse.



III.3.1. Résultats de simulations

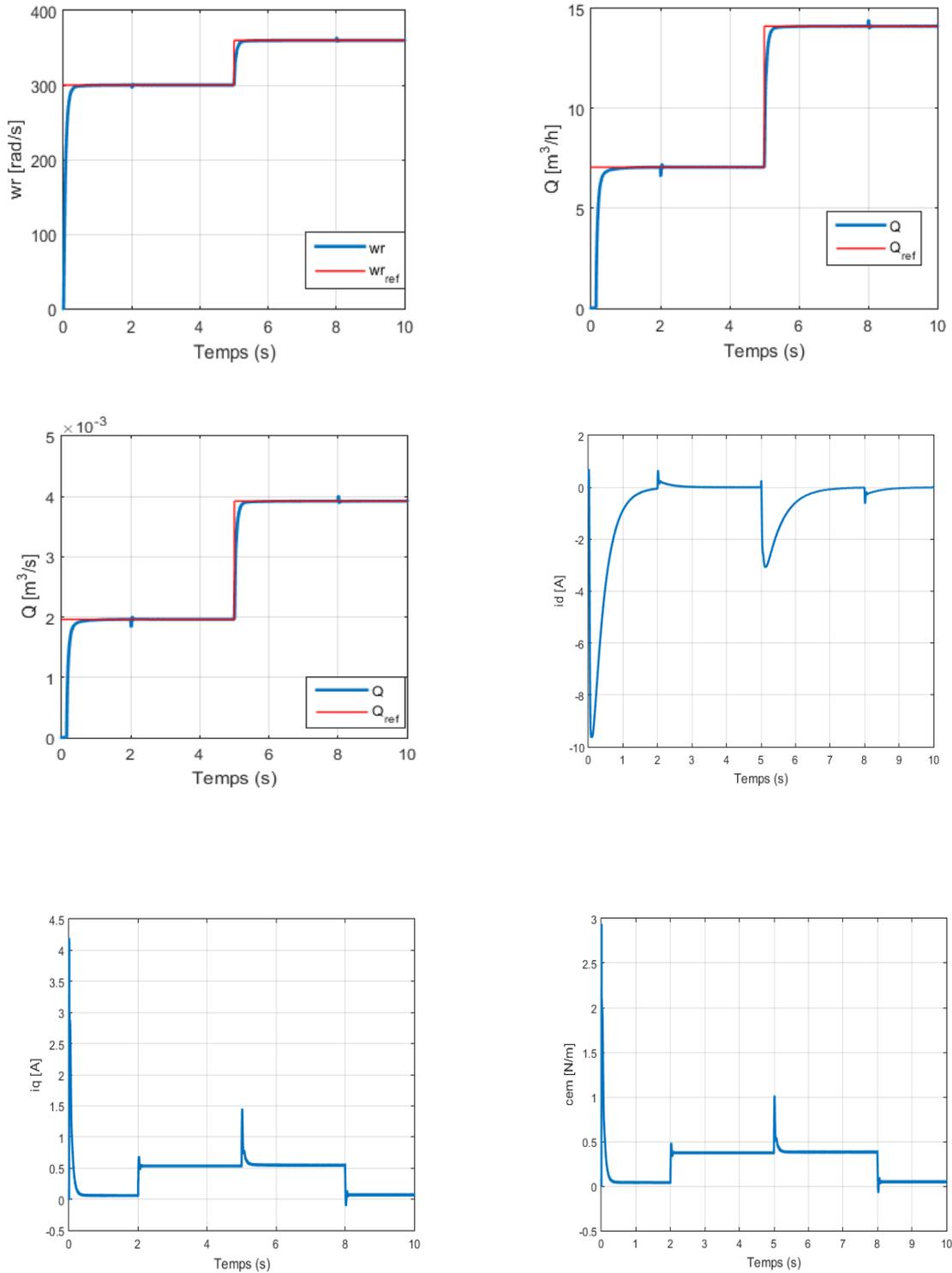


Figure II.7 : Réglage de débit de la pompe centrifuge par la commande vectorielle indirecte avec un onduleur parfait.

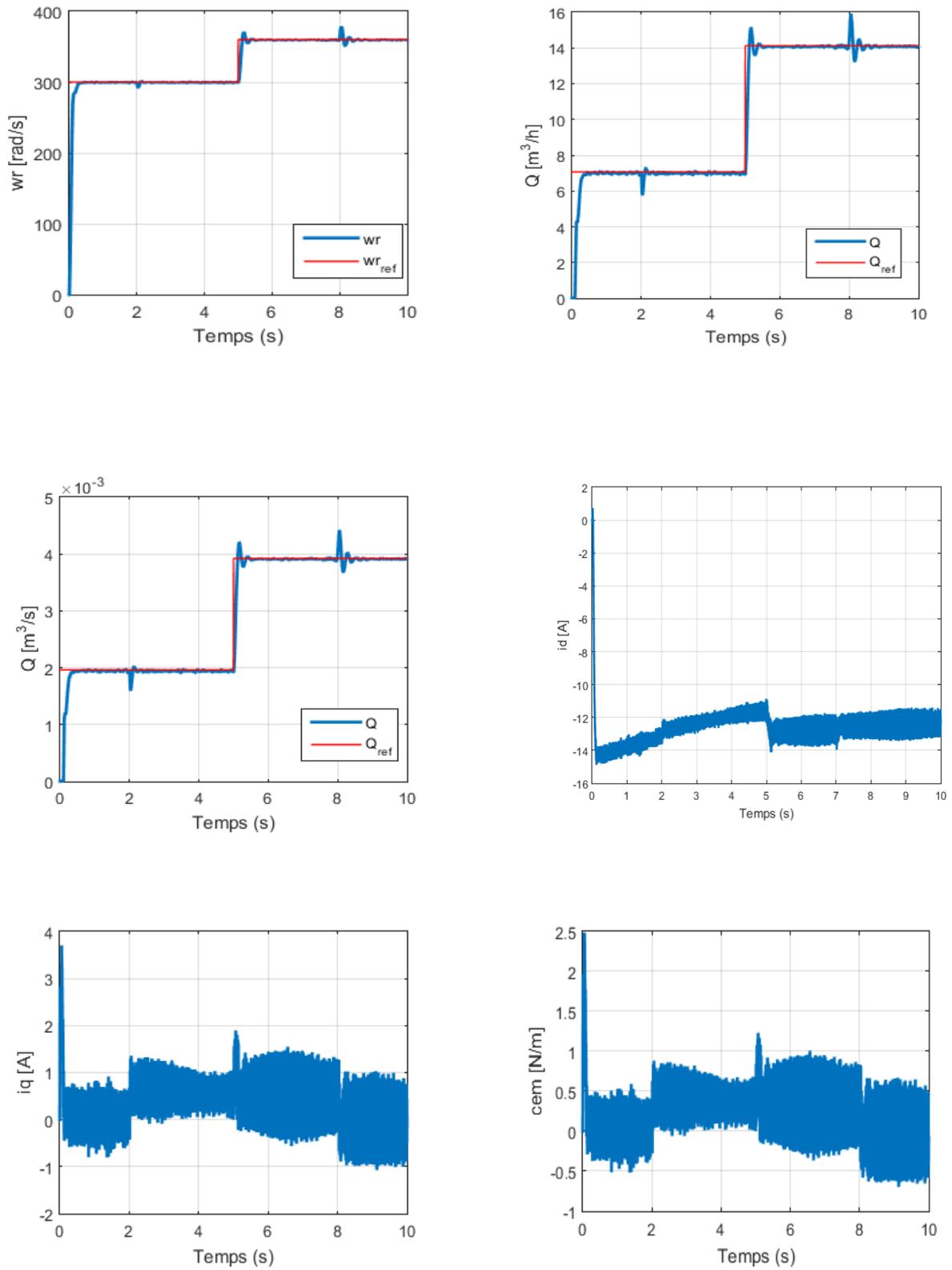


Figure II.8 : Réglage de débit de la pompe centrifuge par la commande vectorielle indirecte avec un onduleur MLI associée à un GPV.

### III.3.1.1 Interprétation des résultats :

Pour évaluer les performances de la commande vectorielle directe en vitesse de la pompe centrifuge, nous avons effectués des simulations numériques sous les conditions suivantes (Figure III.7) :

- Démarrage à vide avec application d'un échelon de vitesse de 300 rad/s.
- Application d'un couple de charge nominale à l'instant  $t = 2\text{s}$ , et puis la charge est éliminée à l'instant  $t = 8\text{s}$ .
- Augmentation de l'échelon de vitesse de 300 rad/s à 360 rad/s à l'instant  $t = 5\text{s}$

La figure III.8 montre que le réglage par un régulateur PI donne des résultats satisfaisants : La vitesse suit la vitesse de référence. Le courant est bien limité à sa valeur admissible. Le découplage est obtenu entre les courants ( $i_d$  et  $i_q$ ) et le couple électromagnétique sont maintenus à leurs valeurs désirées, impliquant ainsi un bon découplage. Lors de l'application d'une perturbation de couple de charge la régulation de débit répond rapidement avec une stabilité satisfaisante.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode de la commande vectorielle a été présentée. L'application de cette méthode a apporté bonnes performances lorsque le découplage est parfaitement réalisé. En toute rigueur, l'orientation du flux rotorique repose essentiellement sur la connaissance exacte du modèle et des paramètres électriques de la machine synchrone à aimant permanent. Ceci diminue la robustesse et provoque une perte de découplage entre le courant et le couple. D'autre part, la commande vectorielle indirecte a témoigné de meilleures performances, en matière de dépassement, temps de réponse et rejet de perturbation.

# **Conclusion générale**

## *Conclusion générale*

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque à base d'un groupe motopompe (moteur synchrone à aimant permanent MSAP) entraîné à travers d'un convertisseur d'énergies (hacheur Boost) contrôlé par la commande vectorielle associée à un Onduleur de tension DC/AC.

Dans ce travail, nous avons procédé en premier temps à définir et étudier les différents éléments constitués la chaîne de pompage photovoltaïque, L'étape suivante a été consacrée à la modélisation de l'ensemble moteur-convertisseur statistique et leur commande afin de révéler le comportement de la machine MSAP.

Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau PV.

L'objectif est la simulation de fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension. A l'issue des simulations effectuées, nous avons constaté une dépendance des performances du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du champ photovoltaïque.

D'après les résultats obtenus, sont bien meilleures en termes de réponse temporelle, sans perturbation et efficacité dynamique. La commande vectorielle est appliquée pour ce système de pompage d'eau solaire. Les résultats valident cette commande et peuvent être utilisés pour la recherche dans les systèmes de pompage photovoltaïque à basse des moteurs synchrones à aimant permanent.

# **Références bibliographie**

**Références bibliographies**

- [1] A. BELHOCINE et S.ZAIDI, « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » ; Mémoire de master, Université de Bejaïa, 2012.
- [2] Nations Unies, commission économique pour l'Afrique, « le secteur des énergies renouvelables dans l'Afrique du nord » ; Septembre 2012 B.P. 2062 Rabat Riad, Maroc, Site web : <https://www.uneca.org>.
- [3] A. Labouret, M. Viloz : « Energie solaire photovoltaïque ». Edition le Moniteur, Dunod, 2ème Edition, 2005.
- [4] A. Labouret et al : « Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque », Collection : ETSF, ETSF, 5ème Edition, 2010.
- [5] <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/> 18/10/2019.
- [6] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque.21/03/2017>.
- [7] <https://www.photovoltaïque.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-ateriel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaïques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques/> 08/01/2020.
- [8]. <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaïque/avantages-panneau-solaire-photovoltaïque/>. 01/01/2021.
- [9] <http://conseilsolaire.online/systemes-photovoltaïques>. 11/02/2019.
- [10] Q. Kou, S.A. Klein, W.A. Beckman: « A method for estimating the long-term performance of direct-Coupled PV pumping systems », Solar Energy, Volume 64, Issues 1–3, September 1998.
- [11] M. Akbaba, and al: « Matching Of Separately Excited Doc Motors To Photovoltaic Generators For Maximum Power Output», Solar Energy.
- [12] V. C. Mummadi: « Steady State And Dynamic Performances Analysis Of PV Supplied DC Motors Fed From Intermediate Power Converter », Solar Energy Materials & Solar Cells, 2000.
- [13] A.A. Ghoneim: « Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems». Energy Conversion and Management 47 (2006).
- [14] M. A. Elgendy, B. Zahawi, Senior Member, IEEE, and D. J. Atkinson: « Comparison of Directly Connected and Constant Voltage Controlled Photovoltaic Pumping Systems». IEEE Transactions on sustainable energy, October 2010.
- [15] J. R. Potebaum: « Optimal Characteristics Of A Variable Frequency Centrifugal Pump Motor Drive», IEEE Trans. Ind. Feb. 1984.

- [16] J. Appelbaum, M.S. Sarma: « The operation of a permanent magnet DC motors powered by a common source solar cells», IEEE Trans. On energy 1989.
- [17] W.R Anis et al, «Coupling of a volumetric pump to a photovoltaic array», Solar cells, 1985.
- [18] D. Weigner and at Levinson: «Watt pumping optimal operation », Electrical Machines and power system, Electric machines and components, 1996.
- [19] D. Langrigge et Al: « Development of a photovoltaic pumping system using brushless DC motor and helical rotor pump », Solar energy 1996.
- [20] Swamy, C.L.P: «Dynamic performance of permanent magnet brushless DC motor powered by a PV array for water pumping». Solar. Energy. Mater, 1995.
- [21] B. Azoui: «Concept and realization of a three-phase brushless DC motor for solar application», Doctor d'états Es'-Science, University of Batna 2002.
- [22] A. Saliha : «Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque», Thèse de Magister Option : Commande Electrique UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF-1 2014.
- [23] K. Benlarbi, L. Mokrani, M.S. Nait-said: « A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system ». Solar Energy 77 (2004).
- [24] M. Arrouf : « Optimisation d l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [25] A.Chouder, A. Malek et F. Krim, Modèle de Simulation d'une Commande en Temps Réel d'un Onduleur de Tension Triphasé ; Laboratoire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Université Ferhat Abbas, Sétif, 1999.
- [26] FATHI Abdelbaqi «contrôle d'un MSAP par la commande vectorielle» Centre universitaire SALHI AHMED –Naâma- 2018.
- [27] G. Pinson, Physique appliquée : Onduleurs.
- [28] Francis MILSANT, Electrotechnique, Electronique de puissance : Cours et problèmes. Ellipses, 1993.
- [29] S. Bendaikha & A. Djermane, Etude sur la commande des onduleurs en pont triphasés, Mémoire d'ingénieur, Centre Universitaire d'Oum El-Bouaghi, 2005.
- [30] Mr C.Said, «Etude des stratégies de commande de l'onduleur», mémoire d'ingénieur ; université de Beskra ; 2008.

- [31] B.Hosseini, «Prototypage rapide à base de FPGA d'un algorithme de contrôle avancé pour le moteur à induction», Université de Québec a trois rivières, Canada. 2010.
- [32] A.Meroufel, «Contrôle de la machine asynchrone» Recueil, Université Djilali Liabés Sidi Bel Abbes, Algérie 2009.
- [32] A. Hamidat, et all: « performances costs of the Centrifugal and displacement pumps ». 1954, WREC1998.
- [33] D. Weiner and. A. Levinson. "An optimal operation design of a photovoltaic dc motor Coupled water pumping system» Electric.
- [34] M.Djeroui Salim « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » université Abbes Farhat de Sétif 2011.
- [35] M. BESSEM Abdelghani «Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque» Université Badji Mokhtar- Annaba 2018.
- [36] T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en développement », Manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, (AFME), 1982.
- [37] [www.solarelectripower.org](http://www.solarelectripower.org).
- [38] A.Betka, « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », Thèse de Magister, Centre universitaire Biskra, 1997.
- [39] Dirk.Sauer, « Electrochemical Storage for Photovoltaics », Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004.
- [40] Bilal Hamdaoui Et Ismail Bourdji « Étude d'un système de pompage photovoltaïque au fil soleil» Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2016.
- [41] DIEDHIOE Tidjini, << Estimation de la Vitesse et des Résistances statorique et rotorique pour la Commande par Orientation du Flux d'une Machine Asynchrone >>, université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- [42] BECHOUCHE Ali, << Implémentation de la Commande Vectorielle à Flux Orienté de la Machine Asynchrone avec Observation du Flux >>, Université Tizi-Ouzou, décembre 2009.
- [43] Wikipédia, << [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur\\_PID](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur_PID) >>, régulateurs PID.

## Résumé

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'industrie grandissante de fabrication des cellules solaires soutenue par les tendances actuelles de développement durable et à la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

Dans le présent travail nous proposons l'étude, la modélisation et la commande de l'ensemble des sous-systèmes faisant partie d'un système de pompage photovoltaïque par l'utilisation d'un MSAP. Pour assurer un fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, on utilise un étage de conversion DC/AC. Un MSAP commandé par une commande vectorielle raccorder avec une pompe centrifuge on se focalisant sur les performances électriques (source PV), mécaniques (moteur) et hydraulique (débit d'eau).

Les résultats de simulation menés dans l'environnement Matlab/Simulink ont montrés l'efficacité de l'algorithme flou quant à l'amélioration des performances de l'ensemble du système de pompage photovoltaïque et à l'amélioration du débit d'eau pompé.

**Mots clés : Pompage solaire, Photovoltaïque, MSAP, Commande vectorielle, Pompe centrifuge**

## Abstract

Photovoltaic pumping is one of the promising applications of the growing solar cell manufacturing industry supported by current trends in sustainability and reducing greenhouse gas emissions.

In the present work we propose the study, the modeling and the control of all the subsystems forming part of a photovoltaic pumping system by the use of an MSAP. To ensure optimal operation of the photovoltaic generator, a DC / AC conversion stage is used. An MSAP controlled by a vector control connected with a centrifugal pump focusing on electrical (PV source), mechanical (motor) and hydraulic (water flow) performance.

The simulation results conducted in the MATLAB/Simulink environment demonstrated the effectiveness of the fuzzy algorithm in improving the performance of the entire photovoltaic pumping system and improving the pumped water flow rate.

**Key words: Solar pumping, Photovoltaic, MSAP, Vector control, Centrifugal pump**

## ملخص

يعد الضخ الكهروضوئي أحد التطبيقات الواعدة لصناعة الخلايا الشمسية المتنامية المدعومة بالاتجاهات الحالية في الاستدامة وتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري.

في العمل الحالي نقترح الدراسة والنمذجة والتحكم في جميع الأنظمة الفرعية التي تشكل جزءاً من نظام الضخ الكهروضوئي باستخدام محرك متزامن مع مغناطيس دائم. لضمان التشغيل الأمثل للمولد الكهروضوئي، يتم استخدام مرحلة تحويل التيار المستمر / التيار المتردد. يتم التحكم في محرك متزامن مع مغناطيس دائم بواسطة تحكم ناقل متصل بمضخة طرد مركزي تركز على الأداء الكهربائي (المصدر الكهروضوئي) والميكانيكي (المحرك) والهيدروليكي (تدفق المياه).

أظهرت نتائج المحاكاة التي أجريت في بيئة Matlab/Simulink فعالية الخوارزمية الضبابية في تحسين أداء نظام الضخ الكهروضوئي بأكمله وتحسين معدل تدفق المياه التي يتم ضخها.

**الكلمات المفتاحية: الضخ الشمسي ، الكهروضوئية ، MSAP ، التحكم في النواقل ، مضخة الطرد المركزي**