

الجامعة الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

**En :** Électrotechnique

**Spécialité :** Électrotechnique Industrielle

**Par :** HAKMI Abdelkader et ZAOUI Mohammed El Amin

### Sujet

**Modélisation d'un système solaire photovoltaïque à puissance maximale.**

**Application : système de pompage à boucle fermée.**

Soutenu publiquement en .../ 06 / 2022 devant le jury composé de :

**Mlle CHERIFI Djamil**

Univ. Saida

Président

**Mr MILOUD Yahia**

Univ. Saida

Rapporteur

**Mr MILOUDI Abdallah**

Univ. Saida

Examinateur

Année universitaire 2021/2022

## *Remerciements*

*Avant toute chose, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la vie et le courage pour terminer nos études.*

*Nous réservons une pensée toute particulière à nos chers parents qui nous ont toujours soutenus et guidés tout au long de nos études. Qu'ils trouvent ici, le témoignage de notre profonde reconnaissance.*

*Nos remerciements les plus particuliers vont à notre encadreur Monsieur Pr. MILOUD YAHIA pour son rôle majeur dans l'élaboration de ce travail par ses remarques constructives et ses suggestions pertinentes, qu'il trouve ici notre vif témoignage de reconnaissance pour son rôle important dans l'amélioration de la rédaction de ce mémoire.*

*Enfin, Nous tenons à remercier les membres du jury Pr. CHERIFI Djamila, Dr. MILOUDI Abdallah qui ont accepté de juger notre travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ontendurés.*

*A mes*

*frères*

*Med*

*morade*

*Ali*

*A toutes familles hakmi chers*

*mes amis*

*A tous ce que j'aime et qui et  
m'aiment*

*A tous mes collègues d'études.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ontendurés.*

*A mes*

*frères*

*ABDO*

*HOSSAME*

*MOSTAFA*

*A toutes familles zaoui chers*

*mes amis*

*A tous ce que j'aime et qui et  
m'aiment*

*A tous mes collègues d'études.*

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b><i>Chapitre 01 : Le système photovoltaïque</i></b>	
<b>1.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Définition de photovoltaïque.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. Historique de la photovoltaïque .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 L'énergie solaire en Algérie.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5. Cellules photovoltaïques .....</b>	<b>7</b>
<b>1.5.1 Structure de la cellule photovoltaïque .....</b>	<b>7</b>
<b>1.5.2. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque .....</b>	<b>8</b>
<b>1.6. Les différentes générations des cellules solaires.....</b>	<b>8</b>
<b>1.6.1. Première génération : Silicium cristallin (mono et poly) .....</b>	<b>9</b>
<b>1.6.1.1. Les cellules monocristallines .....</b>	<b>9</b>
<b>1.6.1.2. Les cellules poly-cristallines .....</b>	<b>9</b>
<b>1.6.2. Deuxième génération :( couches minces "thin films") .....</b>	<b>10</b>
<b>1.6.2.1. Les cellule au Telluride de Cadmium (CdTe) .....</b>	<b>10</b>
<b>1.6.2.2. Les cellule au silicium amorphe (a-Si).....</b>	<b>10</b>
<b>1.6.3. Troisième génération :( Pérovskites, multijonction, concentration) .....</b>	<b>11</b>
<b>1.6.3.1. Les Cellules Pérovskites.....</b>	<b>11</b>
<b>1.6.3.2. Les Cellules multi-jonction .....</b>	<b>11</b>
<b>1.6.3.3. Les Cellules à concentration .....</b>	<b>12</b>
<b>1.7. Le rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques .....</b>	<b>12</b>
<b>1.8. Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....</b>	<b>13</b>
<b>1.9. Module photovoltaïque .....</b>	<b>14</b>
<b>1.10. Association des modules photovoltaïques.....</b>	<b>15</b>
<b>1.10.1. Association en série.....</b>	<b>15</b>
<b>1.10.2 Association en parallèle .....</b>	<b>15</b>

1.11. Les caractéristiques électriques du module .....	16
1.12. Générateur photovoltaïque .....	18
1.13. Simulation d'un générateur photovoltaïque.....	18
1.13.1. Modèle de simulation.....	18
1.13.2-Effets de l'irradiation et de la température .....	19
1.13.2.1. Influence de l'irradiation.....	19
1.13.2.2. Influence de la température .....	20
1.14 Avenages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	20
1.15 Conclusion.....	21

## ***Chapitre 02 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT(P&O)***

2.1. Introduction .....	23
2.2. Convertisseur DC-DC .....	23
2.2.1. Hacheur élévateur (Boost).....	23
2.2.1.1 Principe de Fonctionnement.....	24
2.2.1.2 .Les paramètres d'élévateur .....	25
2.3. Le point de puissance maximum (MPP).....	27
2.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	27
2.5. Les Techniques MPPT .....	28
2.5.1. La Technique Perturbation et Observation .....	28
2.6 Ombrage.....	29
2.6.1 Les différents types d'ombrages.....	30
2.7. Simulation et interprétation.....	30
2.8. Conclusion.....	34

## **Chapitre 03 : La commande vectorielle indirecte d'une machine asynchrone**

3.1. Introduction.....	36
3.2. Principe de l'onduleur de tension triphasé.....	36
3.3. Technique de commande MLI sinus-triangle.....	37
3.3.1 Caractéristiques de la MLI sinus-triangle.....	38
3.3.2 Equation de porteuse.....	38
3.3.3 Équations des tensions de référence .....	39
3.3.4.Équations des états des interrupteurs.....	39
3.3.5 Simulation de la commande MLI sinus-triangle .....	40
3.4. Principes et objective de la commande vectorielle .....	40
3.4.1. Orientation du flux rotorique.....	41
3.5 Types de la commande vectorielle .....	42
3.5.1. Commande vectorielle indirecte .....	43
3.6 Mise en œuvre de la commande vectorielle de la MAS.....	44
3.6.1 Mise en évidence du découplage entre les axes.....	44
3.6.2. Commande vectorielle avec découplage .....	45
3.6.3. Schéma bloc de la régulation .....	46
3.7. Schéma globale de la commande .....	47
3.8 Synthèse des correcteurs .....	47
3.8.1. Correcteur du courant $i_{sd}$ .....	47
3.8.2. Correcteur du courant $i_{sq}$ .....	49
3.8.3. Correcteur de la vitesse rotorique $\omega$ .....	50
3.8.3.1 Régulation Intégrale-Proportionnelle (IP).....	50
3.8.3.2 Régulation Proportionnelle-Intégrale avec Anti-Windup (PIAW).....	51
3.9 Conclusion.....	52

**Chapitre 04: Dimensionnement de l'installation de pompage.**

4.1. Introduction.....	54
4.2 Les pompes centrifuges.....	54
4.2.1 Le principe de fonctionnement.....	55
4.2.2. Avantages et inconvénients .....	55
4.3 Puissance Hydraulique .....	55
4.4. Dimensionnement de l'installation de pompage .....	56
4.4.1. La puissance crête du générateur photovoltaïque .....	57
4.4.2. Le nombre de modules photovoltaïques.....	57
4.5. Structure générale de la simulation.....	58
4.6. Résultats de simulation et interprétation.....	58
4.7. Conclusion.....	67
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>68</b>
<b>Annexe A.....</b>	<b>70</b>
<b>Annexe B .....</b>	<b>77</b>
<b>Référence bibliographie .....</b>	<b>78</b>

## RÉSUMÉ

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications telles que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès à l'eau potable d'une part et d'autre part l'indisponibilité du réseau électrique. La solution idéale pour ces sites isolés est d'installer des générateurs photovoltaïques pour subvenir à leur besoin.

Pour qu'un générateur photovoltaïque soit plus performant en terme de puissance, une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge est indispensable. Dans ce travail, cette adaptation est constituée d'un MPPT à base de P&O pour extraire le maximum de puissance. Le hacheur boost est utilisé pour transférer cette puissance au reste du système. Ce dernier est en boucle fermée pour obtenir le débit désiré utilisant la commande vectorielle, il est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir : les panneaux photovoltaïques, le hacheur boost, l'onduleur de tension, le moteur asynchrone et la pompe centrifuge. Le système de pompage a été simulé et les relevées du débit ainsi que la puissance hydraulique ont été effectués pour une irradiance maximale ( $1000W/m^2$ ) et ensuite en tenant compte de l'ombrage total afin de voir l'effet sur ce débit et la puissance hydraulique. Les résultats obtenus s'accordent parfaitement avec la théorie soit côté pompe, onduleur, hacheur boost et générateur photovoltaïque.

## ABSTRACT

The use of solar energy in isolated sites for different applications such as that pumping water is of paramount interest to the population of developing countries, which does not have access to drinking water on the one hand and on the other hand the unavailability of the electricity network. The ideal solution for these isolated sites is to install photovoltaic generators to meet their needs.

For a photovoltaic generator to be more efficient in terms of power, adequate adaptation between the solar generator and the load is essential.

In this work, this adaptation consists of a P&O-based MPPT to extract the maximum power. The boost chopper is used to transfer this power to the rest of the system. The latter is in a closed loop to obtain the desired flow rate using vector control, it is made up of a set of interacting elements; at

namely: the photovoltaic panels, the boost chopper, the voltage inverter, the asynchronous motor and the centrifugal pump. The pumping system was simulated and the readings of the flow rate as well as the hydraulic power were carried out for a maximum irradiance (1000W/m<sup>2</sup>) and then taking into account the total shading in order to see the effect on this flow rate and the hydraulic power. The results obtained agree perfectly with the theory on the pump, inverter, boost chopper and photovoltaic generator side.

## الملخص

استخدام الطاقة الشمسية في الواقع المعازولة لتطبيقات مختلفة مثل أن صخ المياه يمثل أهمية حيوية لسكان البلدان النامية التنمية التي لا تصلها مياه الشرب من جهة وعدم توفر شبكة الكهرباء من جهة أخرى. الحل الأمثل لهذه الواقع المعازولة هو تركيب مولدات كهروضوئية لتلبية احتياجاتهم.

لكي يكون المولد الكهروضوئي أكثر كفاءة من حيث الطاقة ، فإن التكيف المناسب بين المولد الشمسي والحمل لاستخراج الطاقة القصوى. تستخدم MPPT P & O القائم على ضروري في هذا العمل ، يتكون هذا التكيف من قطاعه التعزيز لنقل هذه القوة إلى باقي النظام. الأخير في حلقة مغلقة للحصول على معدل التدفق المطلوب باستخدام التحكم في المتجهات ، ويكون من مجموعة من العناصر المترادفة ؛ إلى وهي: الألواح الكهروضوئية ، وموروحة التعزيز ، وعاكس الجهد ، والمحرك غير المتزامن ومضخة الطرد المركزي. تمت محاكاة نظام الضخ وتم إجراء قراءات معدل التدفق وكذلك القدرة الهيدروليكيية لأقصى إشعاع (1000 واط / م<sup>2</sup>) ثم أخذ التظليل الكلي في الاعتبار لمعرفة التأثير على معدل التدفق هذا و الطاقة الهيدروليكيه. النتائج التي تم الحصول عليها تتفق تماما مع النظرية الخاصة بالمضخة ، العاكس ، قاطع التعزيز ، جانب المولد الكهروضوئي.

# LISTE DES FIGURES

## **Chapitre 1 : le système photovoltaïque.**

Fig. 1.1 Zones climatiques de l'Algérie.....	6
Fig.(1.2) : Cellule photovoltaïque.....	7
Fig. (1.3) : La structure de la cellule photovoltaïque.....	8
Fig. (1.4) : Principe de fonctionnement de cellule.....	8
Fig. (1.5) : Cellule monocristalline.....	9
Fig. (1.6) : Cellule poly cristalline.....	9
Fig. (1.7) : Cellule au Telluride de Cadmium.....	10
Fig. (1.8) : Cellule au silicium amorphe.....	11
Fig. (1.9) : Cellule Pérokskites.....	11
Fig. (1.10) : Cellule multi jonction.....	12
Fig. 1.11. Cellule à concentration.....	12
Fig. 1.12. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	13
Fig. 1.13. Modules photovoltaïques.....	15
Fig. 1.14. Association série deux modules solaires.....	15
Fig. 1.15 : Caractéristiques IV des modules en série aux conditions.....	15
Fig. 1.16. Association parallèle deux modules solaires.....	16
Fig.1.17. Caractéristiques IV des modules en parallèle aux conditions standards.....	16
Fig. 1.18. Caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque.....	17
Fig. 1.19. Champ photovoltaïque.....	18
Fig. 1.20. Modèle de simulation d'un générateur PV.....	19
Fig. 1.21 Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du générateur en fonction de l'irradiation (T = 25 ° C).....	19
Fig. 1.22. Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du générateur en fonction de la température....	20

## **Chapitre 2 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O).**

Fig. 2.1. Circuit électrique de base du hacheur élévateur.....	24
Fig. 2.2. Circuit équivalent du convertisseur Boost pour $s_{on}$ .....	24
Fig. 2.3. Circuit équivalent du convertisseur Boost pour $s_{off}$ .....	25
Fig. 2.4. Tension d'entrée et de sortie du convertisseur élévateur.....	27
Fig. 2.5. Schéma fonctionnel à conversion photovoltaïque.....	27
Fig. 2.6. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	28
Fig. 2.7 Organigramme de l'algorithme perturbé et observé .....	29
Fig. 2.8. Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbation et Observation .....	29

Fig.2.9. Modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé par MPPT..	31
Fig. 2.10. Les points de puissance maximale simulés par (P & O).....	31
Fig. 2.11. Puissance du générateur photovoltaïque obtenue par la technique (P& O).....	32
Fig.2.12. La variation d'irradiation.....	32
Fig.2.13. L'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable.....	33
Fig. 2.14. La variation de température (C°).....	33
Fig. 2.15. L'évolution de la puissance PV pour une température variable.....	34

### **Chapitre 3: La commande vectorielle indirecte d'une machine asynchrone**

Fig 3.1: Schéma simplifié d'un onduleur de tension triphasé.....	37
Fig 3.2 : Principe de la commande à MLI sinus-triangle.....	39
Fig 3.3 : Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle. ....	40
Fig 3.4: Principe d'orientation du flux rotorique. ....	41
Fig 3.5 : Méthode de la commande vectorielle indirecte.....	43
Fig 3.6 : mise en évidence du couplage entre les axes .....	44
Fig 3.7: Modèle réduit de la machine asynchrone. ....	46
Fig 3.8 : Découplage par addition des termes de compensation. ....	46
Fig 3.9 : Boucle de régulation du courant après découplage.....	46
Fig 3.10 : Boucle de régulation du courant après découplage. ....	46
Fig 3.11 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte. ....	48
Fig 3.12 : Schéma bloc de régulation du courant .....	49
Fig 3.13 : Schéma bloc de régulation du courant .....	49
Fig 3.14 : Schéma bloc de régulation de la vitesse.....	50
Fig. 3.15. Contrôleur IP avec boucle anti-Windup.....	51

### **Chapitre 4 : Dimensionnement de l'installation de pompage**

Figure 4.1 :(a) Pompe centrifuge accouplée MAS, (b) coupe longitudinale. ....	54
Figure 4.2 : Structure générale de la simulation du système de pompage photovoltaïque en boucle fermée. ....	58
Figure 4.3 : Allure de $P_{pv}$ sans changement d'éclairement. ....	59
Figure 4.4 : Allure de $V_{pv}$ sans changement d'éclairement. ....	59
Figure 4.5 : Allure de $I_{pv}$ sans changement d'éclairement. ....	60
Fig.4.6 La variation de l'irradiation. ....	60
Figure 4.7 : Allure de $I_{pv}$ avec changement d'éclairement. ....	61
Figure 4.8 : Allure de $V_{pv}$ avec changement d'éclairement.....	61

Figure 4.9 : Allure de $I_{pv}$ avec changement d'éclairement. ....	61
Figure 4.10: Allure de la tension continue $V_{dc}$ sans changement d'éclairement. ....	62
Figure 4.11 : Allure de $V_{dc}$ avec changement d'éclairement .....	62
Figure 4.12 : Allure de la vitesse sans changement d'irradiation. ....	63
Figure 4.13 : Allure de la vitesse avec changement d'irradiation. ....	63
Figure 4.14 : Allure du débit de la pompe sans changement d'irradiation. ....	64
Figure 4.15 : Allure de débit de la pompe avec changement d'irradiation. ....	64
Figure 4.16 : Allure de La puissance hydraulique sans changement d'irradiation. ....	64
Figure 4.17 : Allure de La puissance hydraulique avec changement d'irradiation. ....	64
Figure 4.18 : Allure de la HMT en fonction du tempssans changement d'irradiation. ....	65
Figure 4.19 : Allure de la HMT en fonction du temps avec changement d'irradiation. ....	65
Figure 4.20 : Allure du courant en fonction du temps sans changement d'irradiation. ....	65
Figure 4.21 : Allure du courant en fonction du temps avec changement d'irradiation. ....	65
Figure 4.22 : Allure du couple électromagnétique et couple résistant en fonction du temps sans changement d'irradiation. ....	66
Figure 4.23 : Allure du couple électromagnétique et couple résistant en fonction du temps avec changement d'irradiation.....	66

## LISTE DES TABLEAUX

### **Chapitre 01 : le système photovoltaïque**

Tableau 1.1. Rendement des différentes technologies.....	13
Tableau .1.2. Caractéristique électrique du panneau dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m <sup>2</sup> .....	18

### **Chapitre 02 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O).**

Chapitre 02 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O). ....	26
Tableau 2.1. Valeurs du convertisseur élévateur(Boost).....	
Tableau 2.2. Caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m <sup>2</sup> .....	30

### **Chapitre 03 : La commande vectorielle indirecte d'une machine asynchrone**

Tableau 3. 1 : Paramètres du correcteur du courant d'axe en direct.....	49
Tableau 3. 2 : Paramètres du correcteur du courant d'axe en quadrature. ....	49
Tableau 3. 3 : Paramètres du correcteur PI de la vitesse. ....	51

### **Chapitre 04: Dimensionnement de l'installation de pompage**

Tableau 4.1 : Irradiations mensuelles de la wilaya de Saida.....	56
Tableau 4.2 : les résultats obtenus avant et après MPPT. ....	59
Tableau 4.3 Variation du rapport cyclique $\alpha$ en fonction de l'irradiation .....	63
Tableau 4.4 La réponse des paramètres de la pompe selon la variation de l'irradiance. ....	67
Tableau 4.5 La réponse des paramètres de la pompe selon la variation de la hauteur. ....	67

## NOTATIONS & SYMBOLES

$P_m$  : Puissance maximale.

$I_m$ : courant maximal.

$V_m$ : Tension maximale.

FF : Factor de suffisance.

$V_{CC}$  : tension court-circuit.

$V_{oc}$ : Tension circuit-ouvert.

$\eta$  : Le rendement d'un module solaire.

$G$  : Ensoleillement en ( $W/m^2$ )

$A$  : La surface génératrice en  $m^2$ .

$U_L$  : La tension de la bobine en (V).

$V_E$  : Tension d'entrée en (V).

$V_S$  : Tension de sortie en (V).

$I_L$  : Courant d'entrée en (A).

$I_D$  : Le courant de la bobine (A).

$I_S$  : Le courant dans le transistor (A).

$I_D$  : Le courant dans la diode (A).

$L$  : Inducteur (H).

$D$  : le rapport cyclique.

$F$  : Fréquence de commutation en (kHz).

$C$  : Condensateur en (F).

$R$  : Résistance ( $\Omega$ ).

$m$  : Indice de modulation.

$r$  : le taux de modulation.

$f_P$ : fréquences de la modulation (Porteuse)

$f_r$ : Fréquences de la référence (modulante).

$A_m$  : Amplitude de la tension de référence

$A_p$  : Amplitude de la porteuse

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

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

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

$\Omega_r$  : Vitesse rotorique du moteur (tr/mn).

$F$  : Fréquences de rotation.

$K$  : Constante Boltzmann (1.38.10-23 (J/0K)).

$\omega_s$  : Vitesse de synchronisme

$\omega_r$  : Vitesse rotorique

$V_{ds}$  ;  $V_{qs}$  : Tensions directe et quadratique

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

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

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

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

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

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

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

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

$K_r$  : un coefficient de proportionnalité [(Nm/ (rad.s-1)).

$c_h$  : constante hydraulique.

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

$T_{pom}$  : Le temps de pompage pendant une journée.

$V_{res}$  : Volume réservoir.

$E_{elec}$  : L'énergie électrique.

### ***Les abréviations***

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

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

MAS : Machine asynchrone.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

PPM : Point de Puissance Maximale

# *INTRODUCTION*

## *GENERALE*

---

## INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières années, le monde a connu une importante croissance de la demande d'énergie dans tous les domaines de la vie, en particulier l'électricité qui provient malheureusement en grande partie de l'énergie fossile sources, qui ont un impact très nocif sur l'environnement. La solution repose sur l'utilisation des énergies renouvelables. Dans ce contexte, de nombreux pays ont fait d'énormes investissements et donc semblent être sur la bonne voie pour relever le défi de combiner la production et la consommation d'énergie d'une part et maintenir l'équilibre écologique de la planète d'autre part. [1]

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie solaire est la plus dominante et l'une des plus exploitables. Elle donne à l'usager la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est bien adaptée dans l'Algérie en raison de l'existence d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond, et elle dispose un gisement solaire le plus élevé au monde telle que la durée d'ensoleillement peut atteindre les 3900 heures par an sur le Sahara et la moyenne annuelle d'ensoleillement solaire quotidienne varie de 5 à 7 KWh/m<sup>2</sup>. Le pompage photovoltaïque est en développement et caractérisé par un coût graduellement en baisse. Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée "pompe au fil du soleil", utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Les inconvénients majeurs du module solaire sont relativement coût élevés de fabrication et faible rendement. Ainsi, il est nécessaire de faire fonctionner le système solaire au point de puissance maximale (MPP) dans des conditions environnementales variables. Convertisseurs DC-DC et leurs algorithmes de contrôle sont intégrés au système PV pour extraire la puissance maximale en continu sous n'importe quelle circonstance [2]. Parmi les nombreux algorithmes du point de puissance maximale (MPPT), La technique des perturbations et des observations est l'une des des techniques réputées qui peuvent garantir de bonnes performances. [3]

Les moteurs des pompes solaires de petite puissance (petite HMT et faible débit journalier) sont généralement en courant continu. Cependant, ces dernières années, le moteur asynchrone

---

est de plus en plus utilisé pour les applications de pompages solaires à cause de la diminution du coût de l'onduleur, sa simplicité, sa robustesse et son faible coût.

Dans notre étude nous sommes intéressés au dimensionnement et simulation d'un système de pompage photovoltaïque en boucle fermée utilisant la commande vectorielle indirect pour réguler le débit de la pompe, ce système fonctionne au fil du soleil basé sur un moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge qui aspire l'eau d'un puits et le refoule (stockage) dans un réservoir.

Nous avons structuré notre travail en 4 chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu théorique le système photovoltaïque où l'on présentera un modèle de la cellule photovoltaïque. Les influences des différents paramètres électriques et climatiques sur le comportement du générateur PV, y sont présentes.

Le second chapitre donne un aperçu sur le hacheur Boost et la technique de poursuite MPPT (P&O).

Dans le troisième chapitre, nous allons nous intéresser à la commande vectorielle indirecte.

Dans le quatrième chapitre, le système de pompage photovoltaïque en boucle fermée est étudié ensuite suivi par des simulations extensives.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale et une proposition comme perspective pour la continuité de ce travail.

## *Chapitre 1 :*

# Le système photovoltaïque

## 1.1. Introduction :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électrique » [4].

## 1.2. Définition de photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » se compose de deux mots : photo, un mot grec pour lumière, et voltaïque, qui définit la valeur de mesure par laquelle l'activité du champ électrique est exprimée, c'est-à-dire la différence de potentiel. Donc, la définition de la conversion photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil [6.7].

## 1.3. Historique de la photovoltaïque

L'effet photovoltaïque (PV), a été découvert en 1839 par un physicien français, Alexandre Edmond Becquerel (en irradiant une électrode en argent dans un électrolyte, il obtint une tension électrique [8].

En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts,mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation [9].

Seulement, le phénomène est encore considéré comme anecdotique jusqu'à la seconde guerre mondiale. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium.

Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone.

On entrevoit alors la possibilité de fournir de l'électricité grâce à ces cellules. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites [6].

C'est en 1958, que les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point [10].

Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque. En effet, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. Et en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware [5].

Ainsi, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. En 1983 la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4 000 km en Australie [5].

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

En 2002, le total des installations photovoltaïques installées dans le monde atteint 2 000 MW. Il a fallu 25 ans pour atteindre les 1000 premiers MW et seulement 3 ans pour le doubler ; la production de cellules de silicium cristallin dépasse 100 MW par an chez Sharp Corp. (Japon). BP Solar cesse la R et D et la production de modules à couches minces a-Si et CdTe aux États-Unis, mettant ainsi fin à plus de 20 ans d'efforts [5].

En 2012, la capacité mondiale en énergie solaire a dépassé la barrière magique de 100 GWp. Entre 1999 et 2012, la capacité photovoltaïque installée a donc augmenté. En d'autres termes, au cours des 13 dernières années, la croissance annuelle moyenne de la capacité photovoltaïque installée a été d'environ 40%. [5].

#### 1.4 L'énergie solaire en Algérie

Les réalisations algériennes dans le domaine des énergies renouvelables sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc d'énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des stades très avancés. L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant cinq décennies d'indépendance, malgré la position géographique stratégique du pays qui dispose de l'un des gisements solaires les plus impor-

tants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud [11-12].

La consommation d'électricité en Algérie par habitant atteignait 1 363 kWh en 2014, soit seulement 45 % de la moyenne mondiale : 3030 kWh, mais 2,4 fois la moyenne africaine : 568 kWh (France : 6 955 kWh; Maroc : 912 kWh). Avec un territoire composé de 86% de désert saharien et par son positionnement géographique, la qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde [13].

Si on devait comparer le solaire au gaz naturel, le potentiel solaire algérien est équivalent à un volume de 37 000 milliards de mètres cubes, soit plus de 8 fois les réserves de gaz naturel du pays, à la différence que le potentiel solaire est renouvelable, contrairement au gaz naturel. Le tableau suivant donne le potentiel solaire algérien en chiffres et selon la localisation [14-15].

Avec un gisement solaire qui dépasse les 5 milliards de GWh, notre pays a mis également en oeuvre des initiatives afin de promouvoir l'électricité solaire, notamment dans le cadre de l'électrification décentralisée. La cartographie ci-après présente le rayonnement solaire

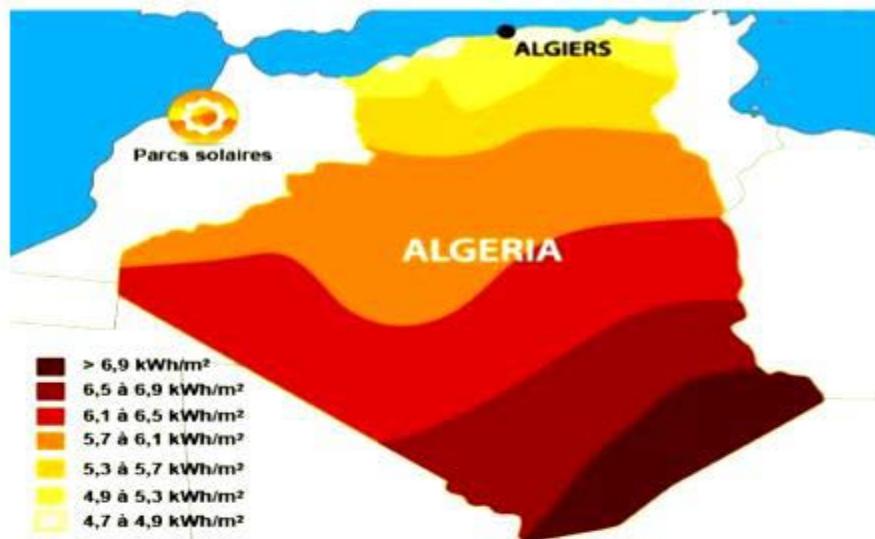


Fig.1.1 Zones climatiques de l'Algérie

### 1.5. Cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs [16]. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [17.18].



Fig.1.2. Cellule photovoltaïque [17].

#### 1.5.1 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négatives (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle -) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle +) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [17,19], comme le montre la figure(1.3).

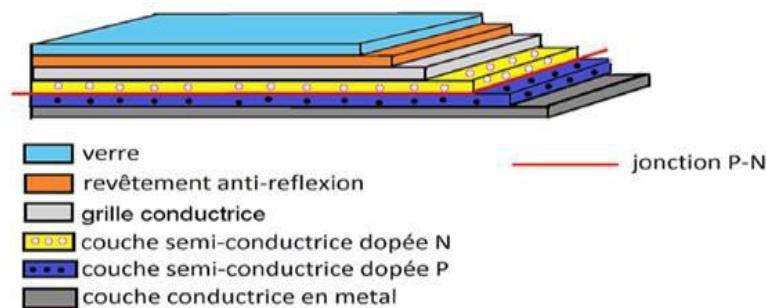


Fig. 1.3. La structure de la cellule photovoltaïque [19].

### 1.5.2. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque :

Dans une cellule photovoltaïque, lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque [16,19], comme le montre la figure (1.4).

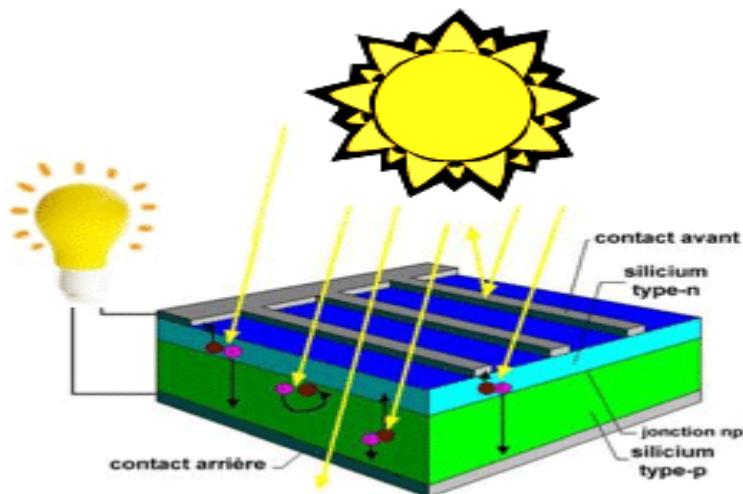


Fig. 1.4. Principe de fonctionnement de la cellule .

### 1.6. Les différentes générations des cellules solaires :

Les cellules solaires sont généralement classées en première, deuxième et troisième génération. Les cellules solaires à silicium cristallin (c-Si et mc-Si) sont acceptées en première génération, tandis que les cellules à couches minces (a-Si et CdTe) sont considérées en deuxième génération. Les cellules solaires de troisième génération sont basées sur les nanotechnologies : cellules solaires tandem, super tandem, à bande intermédiaire, etc [21].

### 1.6.1. Première génération : Silicium cristallin (mono et poly) :



Fig. 1.5. Cellule monocristalline [21].

Les cellules solaires de première génération (silicium cristallin) sont divisées en deux types : monocrystallin (c-Si, SiN) et polycristallin (mc-Si, poly-Si). L'efficacité des cellules solaires monocrystallines est de 15 à 18%. Le coût de ce type de cellules est de 4,5 \$ / W [21].

#### 1.6.1.1. Les cellules monocrystallines :

Elles sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 16 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse [21,22]. .

#### 1.6.1.2. Les cellules poly-cristallines :

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples et leur coût de production est moins élevée que les cellules mono-cristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocrystallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Durée de vie estimée 30 ans. L'efficacité des cellules solaires poly cristallines est de 12 à 15% [21,22]. .

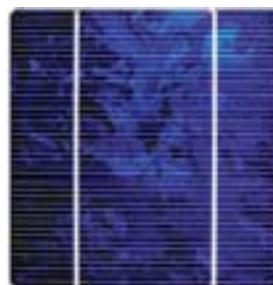


Fig. 1.6. Cellule poly cristalline.

### 1.6.2. Deuxième génération :( couches minces "thin films")

Les cellules solaires de deuxième génération (couches minces) sont regroupées en deux espèces:Amorphous (a-Si) et Tellurure de cadmium (CdTe) . Ces types de cellules représentent 7% du marché des cellules solaires en raison de leur faible rendement. Ces cellules structurées assez minces, dont l'épaisseur varie de 1 à 4  $\mu\text{m}$  seulement, ont une efficacité de 7 à 14%. Le prix de fabrication est aussi bas que 1 \$ / W [21].

#### 1.6.2.1. Les cellule au Telluride de Cadmium (CdTe) :

L'efficacité des cellules solaires à base de tellurure de cadmium est d'environ 17%. Le prix de fabrication est nettement inférieur à celui des autres types de cellules solaires. L'Université de Californie à Riverside a utilisé deux panneaux photovoltaïques en CdTe pour produire de l'hydrogène par électrolyse en 1992. Ce système est considéré comme le premier du genre [21,22].



Fig. 1.7. Cellule au Telluride de Cadmium[21].

**1.6.2.2. Les cellule au silicium amorphe (a-Si) :** Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. L'efficacité des cellules solaires amorphes (a-Si) est de 8 à 10% seulement [21,22].



Fig. 1.8. Cellule au silicium amorphe[21].

### 1.6.3. Troisième génération :( Pérovskites, multijonction, concentration)

Les cellules solaires de troisième génération sont des cellules solaires basées sur la nanotechnologie (pérovskites, multi-jonction, concentration, etc.) et sont en phase de recherche et développement. Étant donné que ces types de cellules ont le potentiel d'efficacité supérieure, cela les rend très attractives et une avancée majeure est considérée si elles peuvent être fabriquées de manière rentable, [21].

**1.6.3.1. Les Cellules Pérovskites :** sont des cellules composées d'un élément hybride organique-inorganique ayant une structure de pérovskite. En 2016, le rendement est passé à 22,1 % ce qui en fait une alternative prometteuse ! Leur coût de production est faible. L'inconvénient de ces cellules réside dans leur instabilité et faible résistance aux agents extérieurs (eau, températures..) [23].

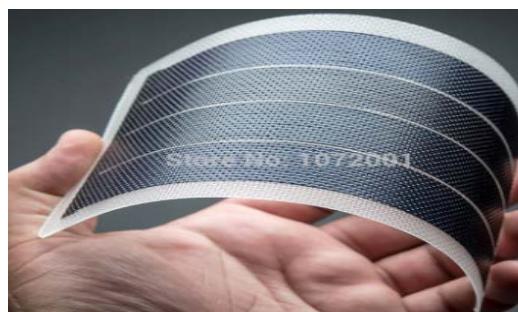


Fig. 1.9. Cellule Pérovskites[23].

### 1.6.3.2. Les Cellules multi-jonction :

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces avec une base en silicium affichant un rendement de conversion de 32 % à 39 % [20,23].



Fig. 1.10. Cellule multi jonction [23].

#### 1.6.3.3. Les Cellules à concentration :

Le photovoltaïque à concentration est basé sur un principe simple : la lumière du soleil est concentrée plusieurs centaines de fois par un dispositif optique (miroir parabolique ou lentille de Fresnel) avant d'atteindre la cellule photovoltaïque. Et ainsi d'avoisiner des rendements cellules de l'ordre de 40%. Leur sensibilité à la température est largement inférieure aux cellules en silicium, les rendant particulièrement efficaces en zones à fort ensoleillement [23].



Fig. 1.11. Cellule à concentration [23].

#### 1.7. Le rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. [20].

Le tableau suivant compare le rendement des différentes technologies des cellules PV.

Tableau 1.1. Rendement des différentes technologies.

Generations	Type des cellules	Rendement des cellules
Première	Siliciummonocristallines	17-20 %
	Siliciumpolycristallines	16 à 18%
Deuxième	CdTe(Tellurure de Cadmium)	15 %
	Siliciumamorphe	13,4 %
Troisième	Pérovskites	22,1 %
	Cellules à concentration	40%
	Cellules multi-jonction	32 % à 39%

### 1.8. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent de la cellule PV est illustré à la figure 1.12. Dans le diagramme ci-dessous, la cellule PV est représentée par une source de courant en parallèle avec une diode ou  $R_s$  et  $R_p$  représentent respectivement les résistances série et parallèle. Le courant et la tension de sortie de la cellule PV sont représentés par  $I$  et  $V$  [24].

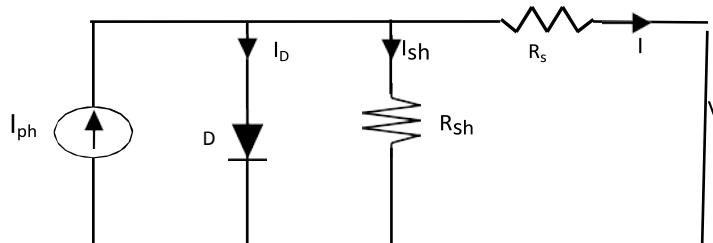


Fig. 1.12. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque( $I$ ) se met sous la forme mathématique suivante [24,25] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.1)$$

Où :

$I_{ph}$ : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

$I_d$  : Le courant circulant dans la diode.

$I_{sh}$  : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

L'expression qui donne le courant de la diode ; il est représenté sous la forme suivante [24,25] :

$$I_d = I_o \cdot [\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{nV_T}\right) - 1] \quad (1.2)$$

Où :

$I_o$  : courant de saturation de diode.

$V$  : tension aux bornes.

$R_s$  : résistance en série d'un module PV,

$R_{sh}$  : résistance shunt intrinsèque de la cellule,

$V_T$  : tension thermique ;

$n$  : facteur d'idéalité

Le courant dérivé par la résistance parallèle est donc [16,23] :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

En substituant les équations (1.2 ; 2.3) dans l'équation (1.1), le courant  $I$  devient [19,26] :

$$I = I_{ph} - I_o \cdot [\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{nV_T}\right) - 1] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

Où :

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (1.5)$$

$q$  : charge d'électrons (1.60217646 e-19C),

$K$  : constante de Boltzmann (1.3806503 e-23 J K-1),

$T$  : condition de température de travail.

## 1.9. Module photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle forme un module, figure 1.13. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent,

augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmentera [27,28].



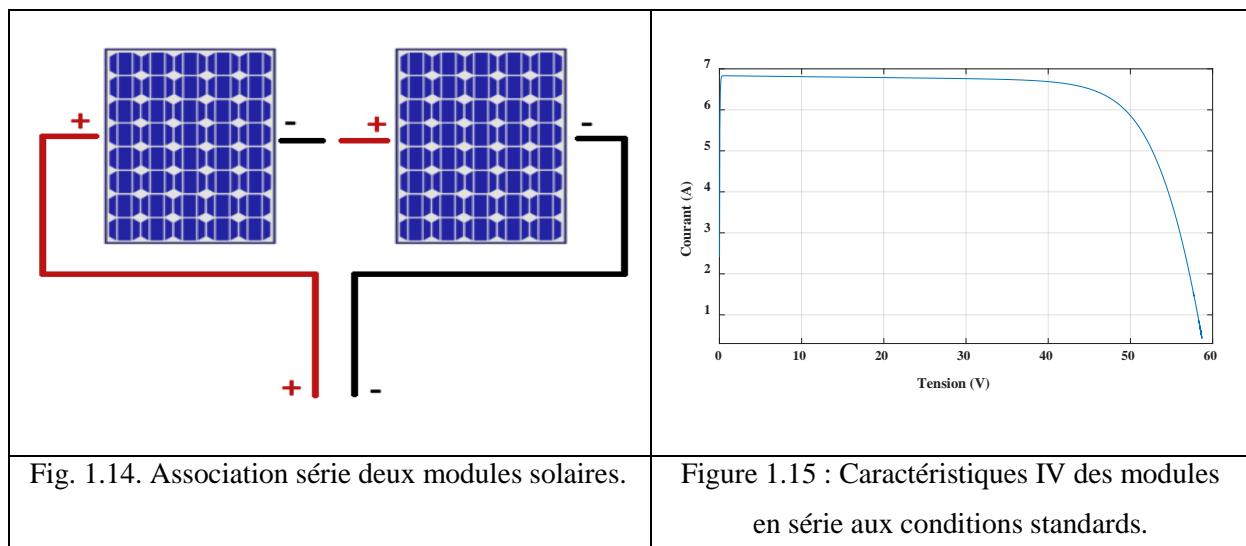
Fig. 1.13. Modules photovoltaïques

### 1.10. Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il est nécessaire de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'exclusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent endommager les cellules de façon permanente [16].

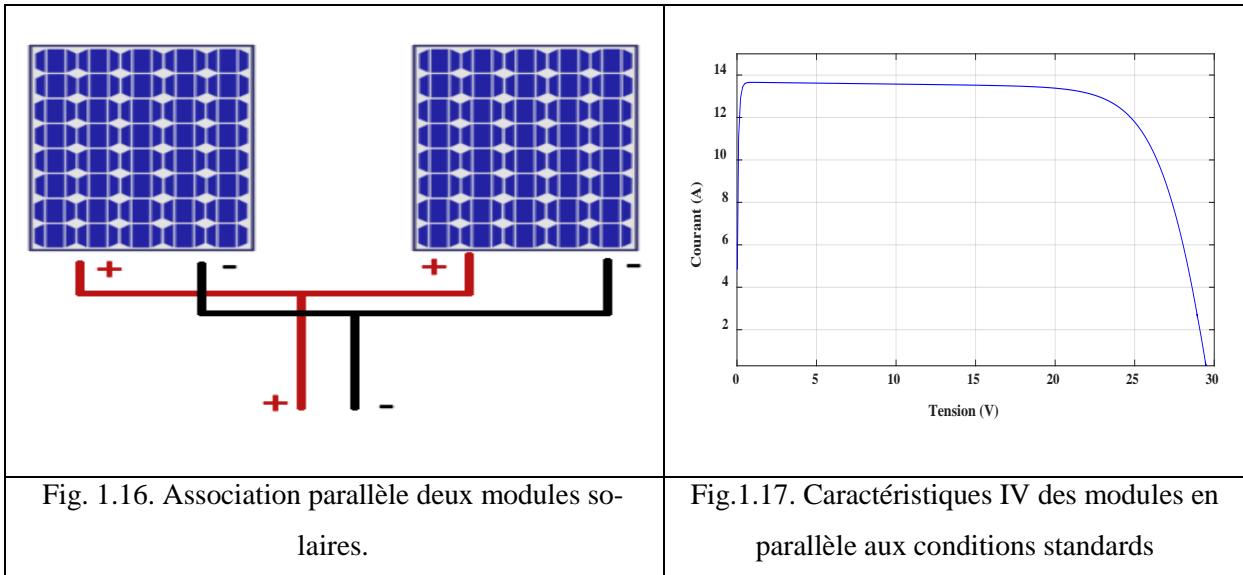
#### 1.10.1. Association en série

L'association en série des modules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module [27,29].



**1.10.2 Association en parallèle :** En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportion-

nellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [27,29].



## 1.11. Les caractéristiques électriques du module

Sous un éclairement donné, tout module photovoltaïque est caractérisé par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre le module. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [27] :

### Tension de circuit ouvert ( $v_{co}$ )

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant du module est nul. Il est lié à la résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation [28].

### Courant de court-circuit ( $i_{cc}$ )

Le courant de court-circuit est le courant obtenu quand les bornes du module sont court-circuitées ( $V=0$ ). Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination du module et est relié sur la surface éclairée, [27].

### Point de puissance maximale, (PPM)

Son point en anglais : maximal power point (MPP), obtenu pour une tension et un courant maximal [28] :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (1.6)$$

La figure (1.18) représente la courbe  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

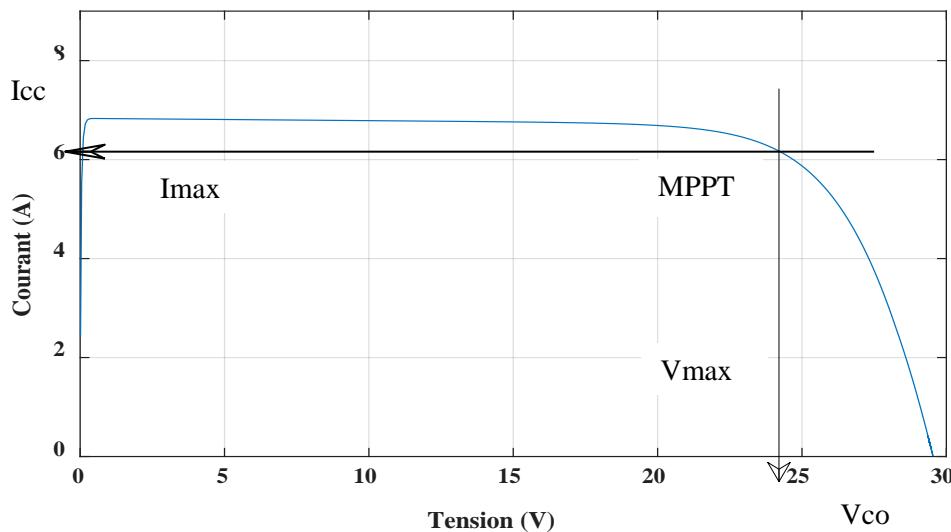


Fig. 1.18. Caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque.

### Autres paramètres du module solaire :

#### Factor de suffisance, ff

Le facteur de suffisance d'un module solaire est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Cela reflète combien de résistances en série et peu de résistances shunt dans la cellule solaire. Pendant que le module solaire se dégrade avec l'âge, sa résistance en série tend à augmenter ce qui conduit à un facteur de suffisance inférieur [30].

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (1.7)$$

#### Rendement de la cellule, $\eta$

Le rendement d'un module solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par le module à la puissance lumineuse d'incident [30].

$$\eta = \frac{P_m}{GA} \quad (1.8)$$

A est la surface génératrice en m<sup>2</sup> et G ensoleillement en W/m<sup>2</sup>

## 1.12. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules formés par un certain nombre de cellules photovoltaïques, connectées ensemble en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaires. [30].



Fig. 1.19. Champ photovoltaïque.

## 1.13. Simulation d'un générateur photovoltaïque :

Le type de modèle PV mono-cristallin a été choisi. Il est constitué de 10 cellules d'une puissance de 190 W. Le Tableau (1.2) résume les caractéristiques de ce module PV. Les caractéristiques électriques du panneau sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 1.2.** Caractéristique électrique du panneau dans les conditions standards <CST>  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  
 $G=1000\text{W/m}^2$ .

<b>Puissance optimale</b>	190W
<b>Tension de circuit ouvert (<math>V_{\text{co}}</math>)</b>	36V
<b>Courant de court-circuit (<math>I_{\text{cc}}</math>)</b>	6.7A
<b>Tension à la puissance maximale (<math>V_m</math>)</b>	30.4V
<b>Courant à la puissance maximale (<math>I_m</math>)</b>	6.25A

### 1.13.1. Modèle de simulation

Nous avons procédé à la mise en œuvre d'un modèle du générateur photovoltaïque sous Matlab-Simulink. Le modèle comporte deux paramètres d'entrée (la température et l'ensoleillement) et deux paramètres de sortie (la tension et le courant). La figure (1.20) illustre le modèle du générateur photovoltaïque.

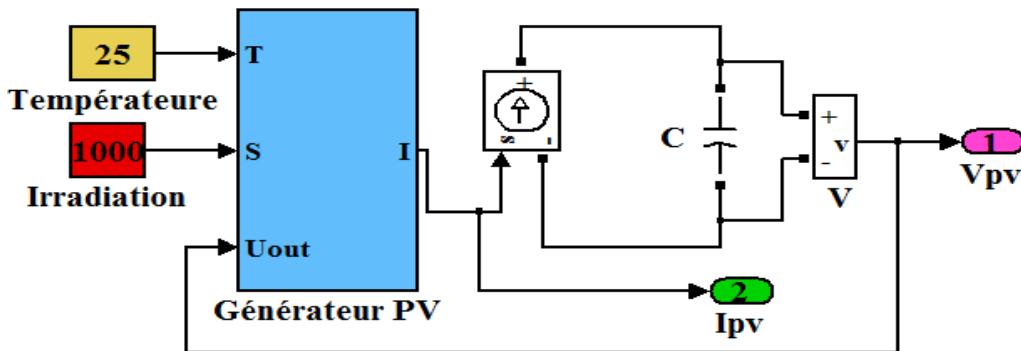


Fig. 1.20. Modèle de simulation d'un générateur PV.

### 1.13.2-Effets de l'irradiation et de la température :

Nous allons étudier la simulation du générateur photovoltaïque qui est composé de 5 modules en série et ce groupe de cinq modules sont mis en parallèle en deux branches pour former un générateur PV de puissance de 1.9 Kw dans les conditions standard ( $E=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ),

L'effet des conditions météorologiques est simulé à l'aide de Matlab / Simulink. Les caractéristiques I-V et P-V pour différentes conditions d'irradiation solaire et de température sont représentées respectivement :

#### 1.13.2.1. Influence de l'irradiation

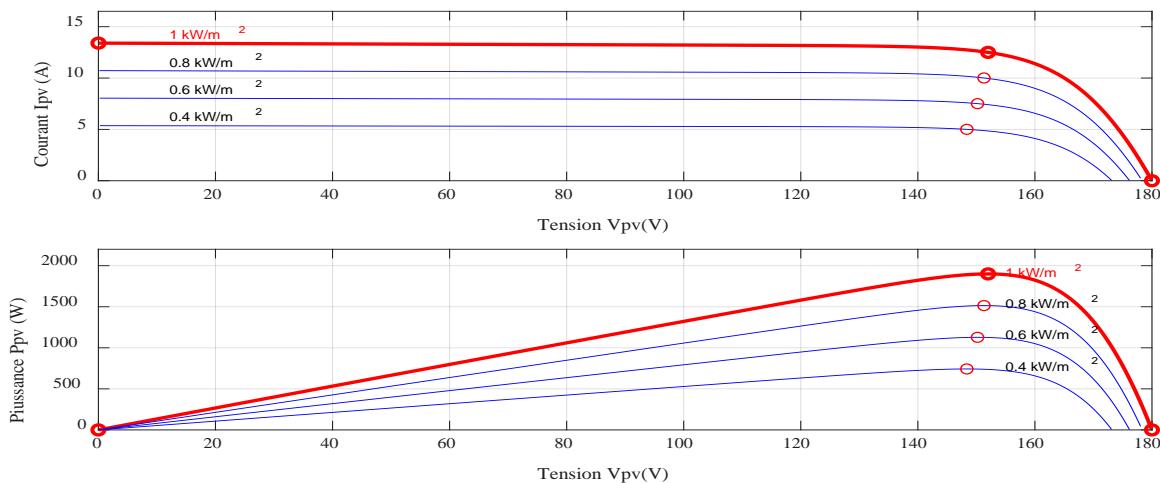


Fig. 1.21. Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du générateur en fonction de l'irradiation ( $T = 25^\circ\text{C}$ ).

Le courant varie directement avec le rayonnement lumineux et la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (1.21) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

### 1.13.2.2. Influence de la température

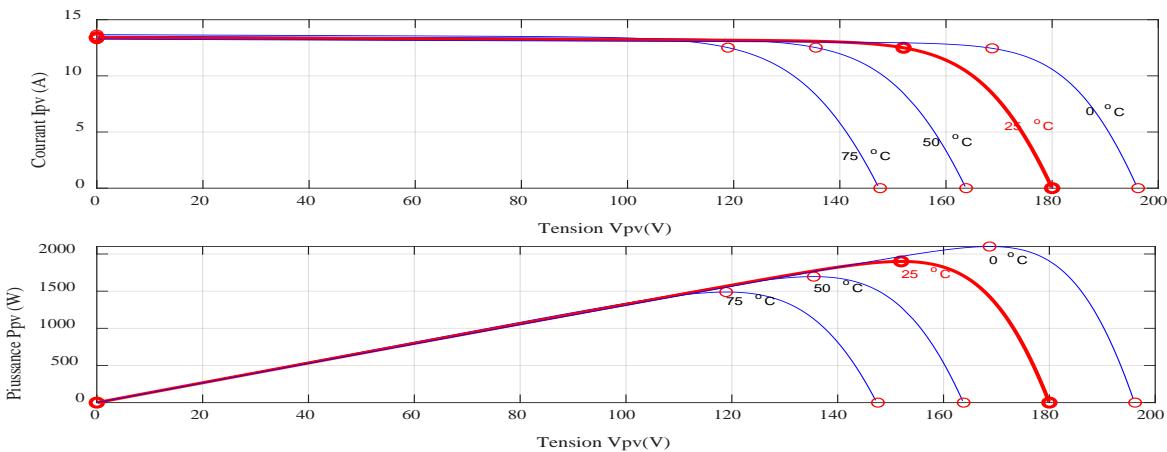


Fig. 1.22. Evolution de la caractéristique (I-V), (P-V) du générateur en fonction de la température

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres. On remarque dans la figure (1.22) la diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

### 1.14 Avenages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque présente des avantages énormes tels que :

- ❖ Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre,
- ❖ Propreté durant son utilisation,
- ❖ Grande fiabilité,
- ❖ Peu d'entretien,
- ❖ Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts),
- ❖ Utilisation autonome et décentralisée. [31]

Malgré ces avantages intéressants, il y a aussi des inconvénients tels que:

- ❖ Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces,
- ❖ Technologie coûteuse,
- ❖ Facteur de charge faible,
- ❖ Stockage difficile,
- ❖ Difficulté à recycler les composants du système,
- ❖ Investissement élevé dépendant des décisions politiques [31]

**1.15 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur les énergies renouvelables en générale. Nos études centrée sur l'énergie photovoltaïque, c'est l'énergie la plus intéressante elle est disponible avec un immense potentiel. Ce potentiel favorise sons utilisation pour l'alimentation électrique, en particulier les sites isolés dans les diverses régions mondiales et nous avons détaillé le principe de la cellule photovoltaïque afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion en énergie électrique.

*Chapitre 2 :*

**Le hacheur boost et la  
technique de poursuite  
MPPT(P&O).**

## 2.1. Introduction :

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables.

Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquence, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPPT du générateur photovoltaïque. Les méthodes évaluées sont : Perturbé et Observé (PO), technique de conductance incrémentielle (IC) et logique floue (FLC).

Dans ce chapitre, nous allons étudier et simuler la méthode de poursuite du point de puissance maximale basée sur perturbe et observe (P&O) avec un convertisseur (boost). Ensuite, les résultats et discussions des simulations de la technique de poursuite seront discutées.

## 2.2. Convertisseur DC-DC :

Le convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit abaisseur (Buk) dans le cas contraire, il est dit élévateur (Boost). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des configurations d'élévateur et d'abaisseur (Buck-Boost). En ce qui concerne notre travail, on considère le convertisseur élévateur "hacheur boost", [32,33].

### 2.2.1. Hacheur élévateur (Boost) :

Un hacheur élévateur (Boost) est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. On utilise un convertisseur

élévateur lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Le schéma de la figure (2.1), représente le circuit électrique de l'élévateur.

Comme le montre la figure (2.1), le convertisseur élévateur est composé de la résistance R, le transistor S et de la diode D. Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur le courant et la tension de sortie. [32, 33, 34, 35].

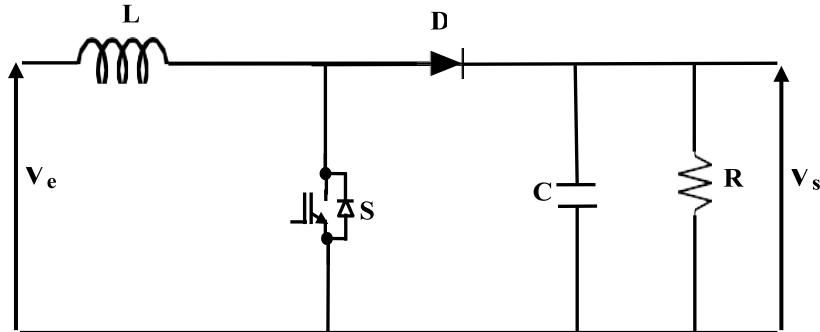


Fig. 2.1. Circuit électrique de base du hacheur élévateur.

### 2.2.1.1 Principe de Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur peut être divisé en deux phases :

#### Phase 1 : Pour $t \in [0 \text{ à } \alpha \cdot T]$ :

Le transistor est passant et la diode D est bloquée, cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

#### Schéma équivalent :

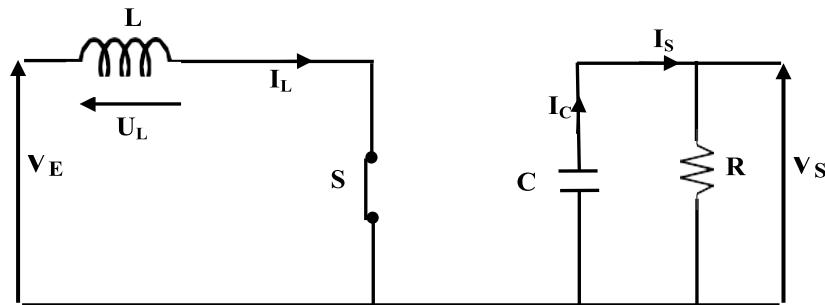


Fig. 2.2. Circuit équivalent du convertisseur Boost pour  $S_{on}$ .

La tension d'entrée :

$$U_L = V_E \quad (2.1)$$

Avec

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.2)$$

Le courant dans la bobine :

$$I_L(t) = \frac{V_E}{L} t + I_{min} \quad (2.3)$$

Le courant dans la diode :

$$I_D(t) = 0 \quad (2.4)$$

Le courant dans le transistor :

$$I_S(t) = I_L(t) \quad (2.5)$$

**Phase 2 : Pour  $t \in [\alpha T \text{ à } T]$  :**

Le transistor est bloqué et la bobine L restitue l'énergie emmagasinée, la diode est passante, [32, 33, 34].

**Schéma équivalent :**

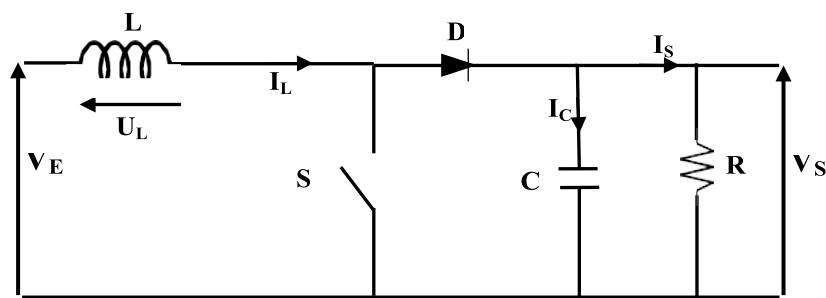


Fig. 2.3. Circuit équivalent du convertisseur boost pour  $T_{off}$ .

La tension de sortie :

$$V_S = V_E - U_L \quad (2.6)$$

$$U_L < 0 \quad (2.7)$$

En conséquence

$$V_S > V_E \quad (2.8)$$

Le courant dans la bobine :

$$I_L(t) = -\frac{V_S - V_E}{L} t + I_{max} \quad (2.9)$$

Le courant dans la diode :

$$I_D(t) = I_L(t) \quad (2.10)$$

Le courant dans le transistor :

$$I_S(t) = 0 \quad (2.11)$$

### 2.2.1.2 .Les paramètres d'élévateur :

La tension de sortie ( $V_s$ ) et le rapport cyclique ( $D$ ) sont donnés par les équations suivantes [35] :

$$V_s = \frac{V_E}{1 - D} \quad (2.12)$$

Alors,

$$D = 1 - \frac{V_E}{V_s} \quad (2.13)$$

En supposant un circuit sans perte,

$$V_E \cdot I_E = V_s \cdot I_s = \frac{I_s \cdot V_E}{1 - D} \quad (2.14)$$

Le courant de sortie moyen est alors :

$$I_s = I_E (1 - D) \quad (2.15)$$

Les relations des filtres d'entrée et de sortie (L) et (C) sont respectivement données par les équations suivantes [33] :

$$L = \frac{D(1 - D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (2.16)$$

$$C = \frac{D}{2 \cdot f \cdot R} \quad (2.17)$$

Par conséquent, les valeurs de conception du convertisseur élévateur sont présentées dans le tableau (2.1).

**Tableau 2.1.** Valeurs du convertisseur élévateur (Boost).

Les paramètres	Valeurs
<b>Tension d'entrée (V<sub>e</sub>)</b>	152V
<b>Tension de sortie (V<sub>s</sub>)</b>	420 V
<b>Fréquence de commutation (f)</b>	10Khz
<b>Rapport cyclique (D)</b>	0.64
<b>Inducteur (L)</b>	13.94 $\mu$ H
<b>Condensateur (C)</b>	9.45 $\mu$ F
<b>Résistance(<math>\Omega</math>)</b>	3.4 $\Omega$

La Figure (2.4), illustre les tensions d'entrée(V<sub>e</sub>) et de sortie(V<sub>s</sub>) du convertisseur élévateur. La tension de sortie correspondante est obtenue à partir de la tension d'entrée à un rapport cyclique.

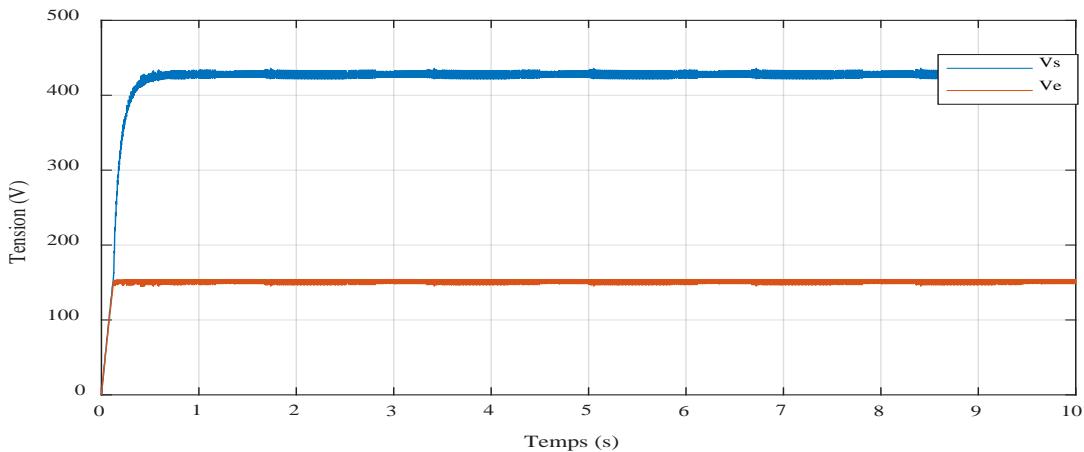


Fig. 2.4. Tension d'entrée et de sortie du convertisseur élévateur.

### 2.3. Le point de puissance maximum (MPP) :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme inclus dans les contrôleurs de charge utilisés pour extraire la puissance maximale disponible du système photovoltaïque quelles soient les conditions météorologiques. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique (D) en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le générateur PV [36,37].

Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance tirée du générateur photovoltaïque, [35]. Le schéma fonctionnel du système est présenté à la Figure (2.5) :

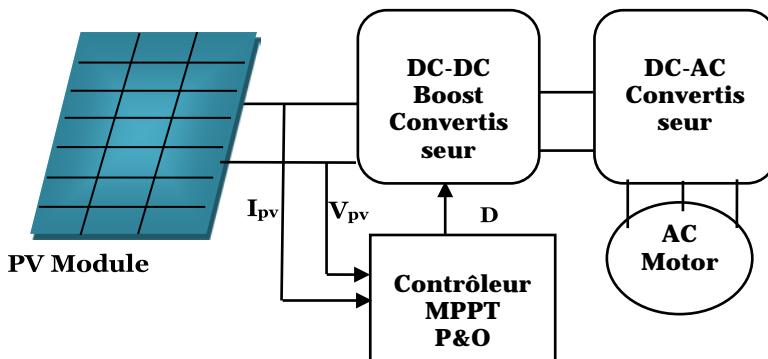


Fig. 2.5. Schéma fonctionnel à conversion photovoltaïque.

### 2.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT :

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela nous comparons un point de puissance actuel  $P(k)$  avec un point de puissance précédent  $P(k-1)$

Si  $P(k-1) = P(k)$ , la dérivée est nulle, cela veut dire le point de fonctionnement est situé au maximum.

Si  $P(k-1) < P(k)$ , la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximale MPPT. Si la dérivée est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale. Ainsi, au démarrage du système, la recherche de MPPT se fait progressivement, en cherchant le premier point maximum [38,39].

Le concept de base du MPPT sur une courbe PV d'un générateur photovoltaïque est illustré à la figure (2.6).

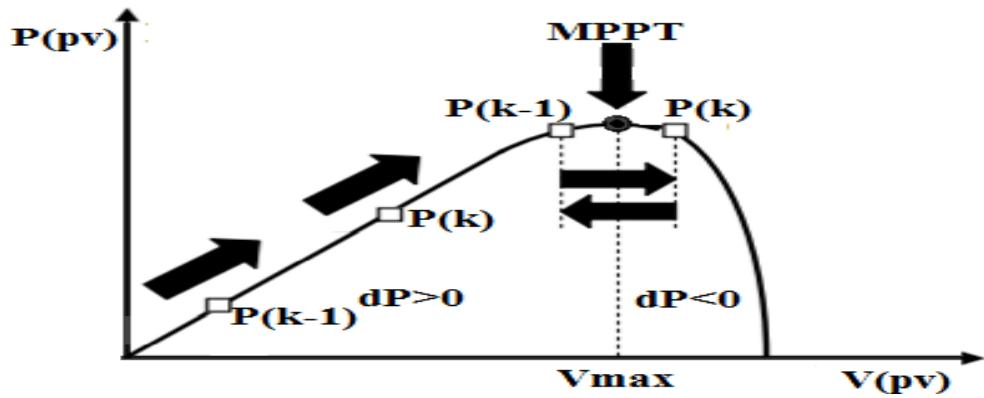


Fig. 2.6. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

## 2.5. Les Techniques MPPT :

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPPT ont été développées. Les techniques sont différentes dans de nombreux aspects tels que les capteurs requis, la complexité, le coût, la portée d'efficacité, vitesse de convergence, suivi correct en cas d'irradiation ou changement de température, le matériel nécessaire à la mise en œuvre entre autres. Certaines des techniques MPPT les plus populaires sont [40,41] :

- Perturbation et observation.
- Méthode de conductance incrémentale.
- Courant de court-circuit fractionnel.
- Tension de circuit ouvert fractionnaire.
- Logique floue.
- Réseaux de neurones.

### 2.5.1. La Technique Perturbation et Observation :

Dans ce mémoire, nous avons utilisé la méthode perturbation et observation (P&O) qui est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT. Elle est basée sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de Vref où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède l'inconvénient dû aux oscillations autour du MPPT en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du MPPT lors de changement rapide des conditions climatiques. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du MPPT, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser [42].

Tout d'abord, la tension  $V(K)$  et le courant  $I(K)$  sont mesurés pour calculer la puissance  $P(k)$ . Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure  $P(k-1)$ . Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du générateur PV est supérieure à la valeur précédente  $P(k-1)$  alors on garde la même direction de perturbation du cycle précédent sinon on inverse la perturbation du cycle. De même manière répété jusqu'à ce que le point maximal soit suivi, figure (2.7), [43,44].

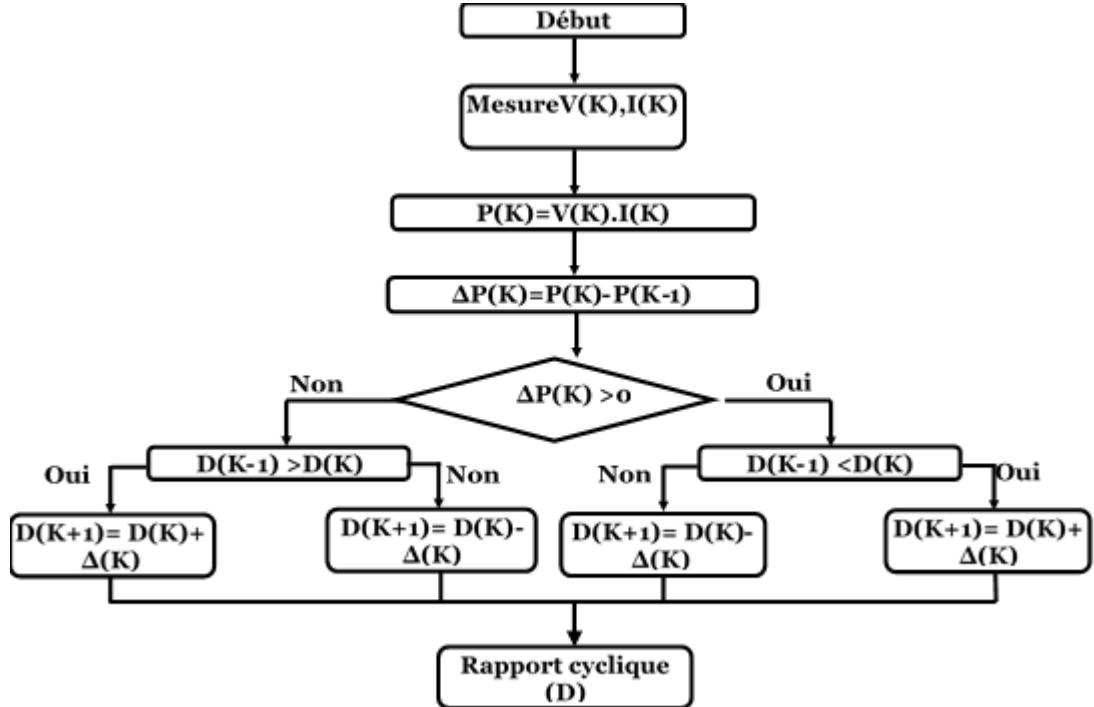


Fig. 2.7. Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.

Le modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbation et Observation (P & O) est représenté à la figure (2.8).

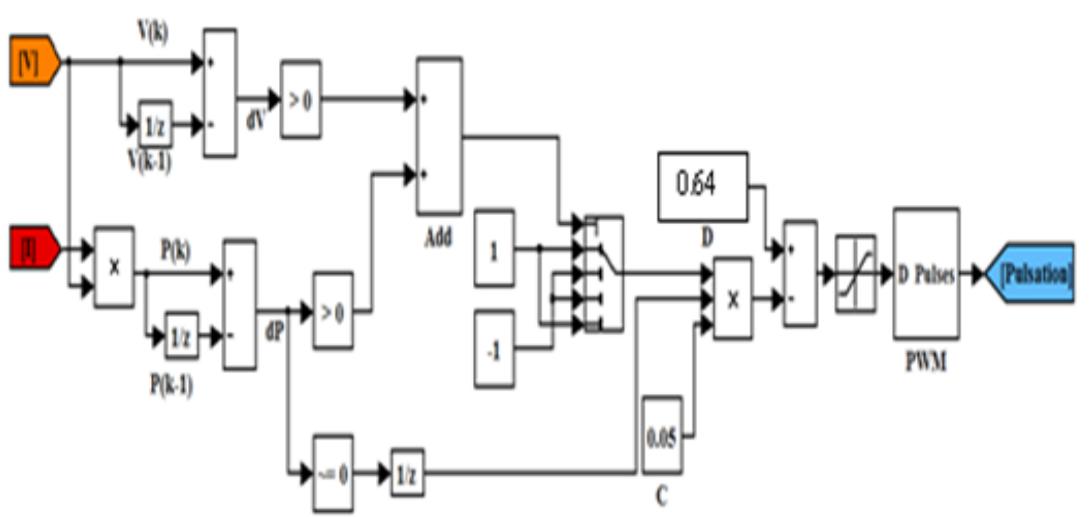


Fig 2.8. Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbation et Observation.

## 2.6 Ombrage

Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbre, etc.) fasse de

l'ombre aux panneaux solaires.

De l'ombre sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques.

### 2.6.1 Les différents types d'ombrages

On peut distinguer deux types d'ombrages :

- l'ombrage partiel : c'est un ombrage qui laisse passer en partie les rayons du soleil.
- l'ombrage total : on appelle ombrage total ou complet ce qui vient couvrir le panneau (couverture, branche cassée, saleté de toute nature, etc.).

Il faut savoir que les cellules photovoltaïques sont montées en série. La cellule la plus faible va donc avoir un impact sur le rendement des autres cellules. Ainsi, l'ombrage total d'une rangée de cellules peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace.

Toutefois, les panneaux photovoltaïques sont aujourd'hui équipés de diodes by-pass, ce qui permet de limiter l'impact d'une ombre sur une partie du panneau.

Par exemple, pour un panneau équipé d'un jeu de 3 diodes by-pass, si une ombre affecte une cellule, alors la série de cellules branchées sur la même diode by-pass est court-circuitée et le reste du panneau continu de produire.

En revanche, si les panneaux photovoltaïques sont montés en séries appelées « branches », c'est le panneau qui produit le moins qui définit la performance de la branche de panneaux.

### 2.7. Simulation et interprétation :

#### Générateur photovoltaïque :

Le type PV poly-cristallin (Dimel) a été choisi. Il est constitué de 10 cellules d'une puissance de 190 W. Le Tableau (2.2) résume les caractéristiques de ce module PV. Les caractéristiques électriques du panneau sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 2.2.** Caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards <CST>

T=25°C, G=1000W /m<sup>2</sup>.

Puissance maximale	190W
Tension de circuit ouvert (V <sub>co</sub> )	36.2V
Courant de court-circuit (I <sub>cc</sub> )	6.7A
Tension à la puissance maximale (V <sub>m</sub> )	30.4V
Courant à la puissance maximale (I <sub>m</sub> )	6.25A

Le générateur photovoltaïque est constitué de 10 panneaux, 5 en série et 2 en parallèle donnant une puissance maximale de 1.93 KW et une tension d'entrée de 152V.

La figure (2.9), montre le schéma fonctionnel du modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé et simulé à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink, basé sur l'algorithme MPPT de la méthode perturbation et observation.

Il est bien clair que notre système proposé à base de P&O fonctionne parfaitement.

Ensuite, nous avons tracé la puissance en fonction de la tension avec un éclairement différent de  $1000\text{W/m}^2$  à  $400\text{ W/m}^2$  tout en maintenant la température constante  $25^0\text{C}$  comme il est illustré à la figure 2.10

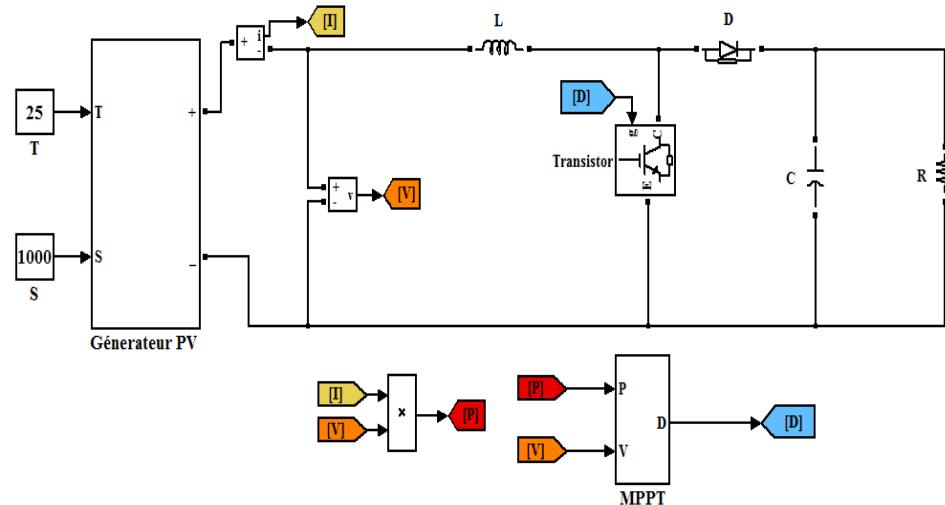


Fig.2.9. Modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé par MPPT.

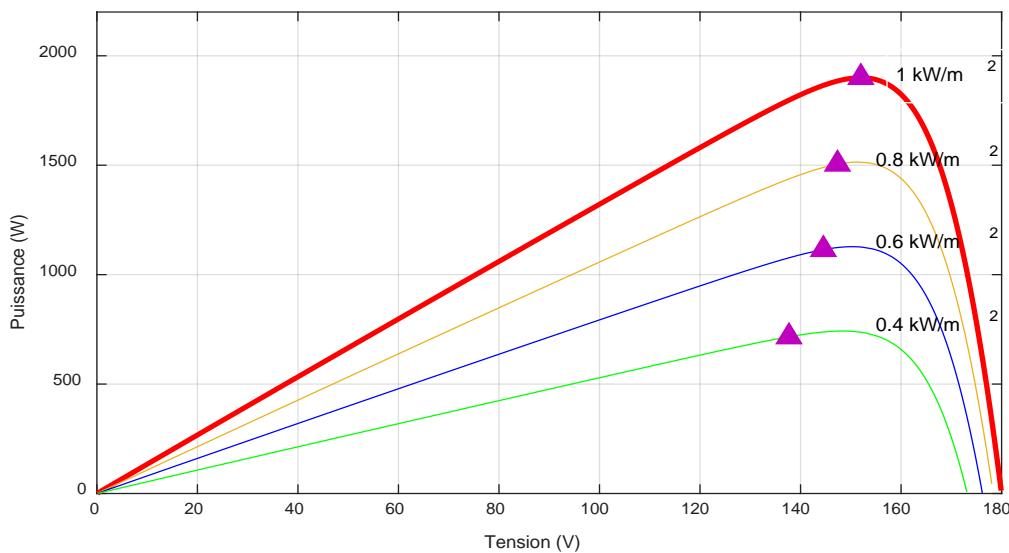


Fig 2.10. Les points de puissance maximale simulés par (P&O).

Sur la base d de la figure (2.10), nous observons que le point de puissance maximale obtenu en appliquant la technique P&O (1930watts) est atteint lorsque l'éclairement énergétique est de  $1000\text{ W/m}^2$ .

Cependant, avec un éclairement énergétique réduit, le point de poursuite optimal est réduit.

La figure (2.11) ci-dessous représente la variation de la puissance en fonction du temps avec la technique (P&O) sous les conditions atmosphériques standard ( $1000\text{W} / \text{m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) pour tester le temps de réponse de cette technique.

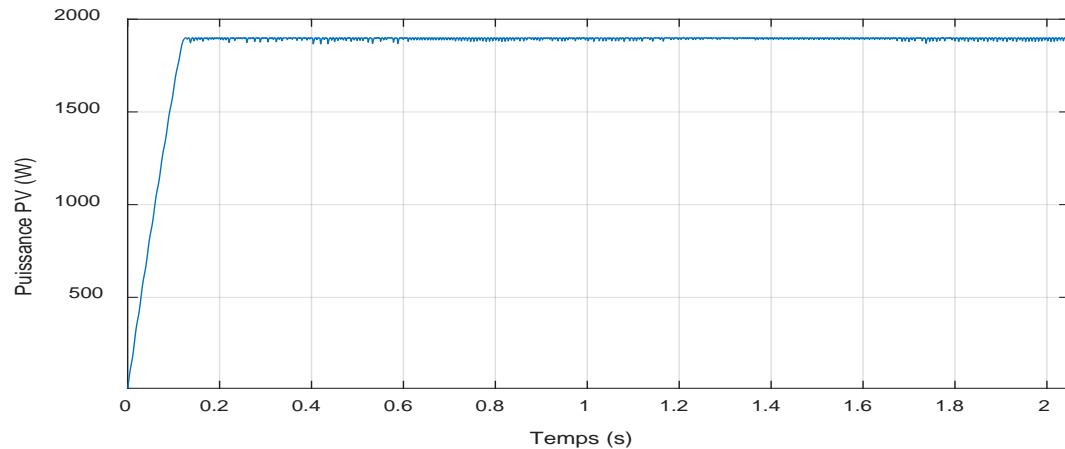


Fig. 2.11. Puissance du générateur photovoltaïque obtenue par la technique (P&O).

En régime permanent, la puissance maximale fournie par le système PV commandé par la commande (P&O) est atteinte, cela prouve l'efficacité de cet algorithme proposé.

Nous allons maintenant tester la performance de commande MPPT précédemment développée en effectuant séparément des variations sur la température et l'ensoleillement.

Dans la figure (2.12), nous apportons des variations sur l'irradiation solaire et nous supposons que la température est constante et égale à  $25^\circ\text{C}$ . L'irradiation de 0 à 2 seconde correspond au rayonnement ( $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ ), puis de 2 à 5 seconde réduite à  $800 \text{ W} / \text{m}^2$  et puis de 5 à 8 seconde réduite à  $600 \text{ W} / \text{m}^2$ , et enfin de 8 à 10 seconde réduite à  $400 \text{ W} / \text{m}^2$ .

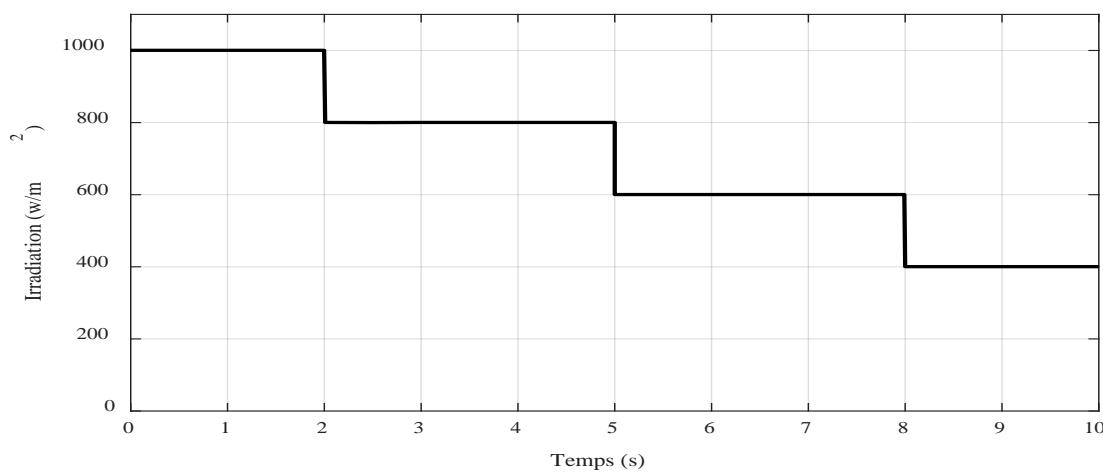


Fig.2.12. La variation de l'irradiation.

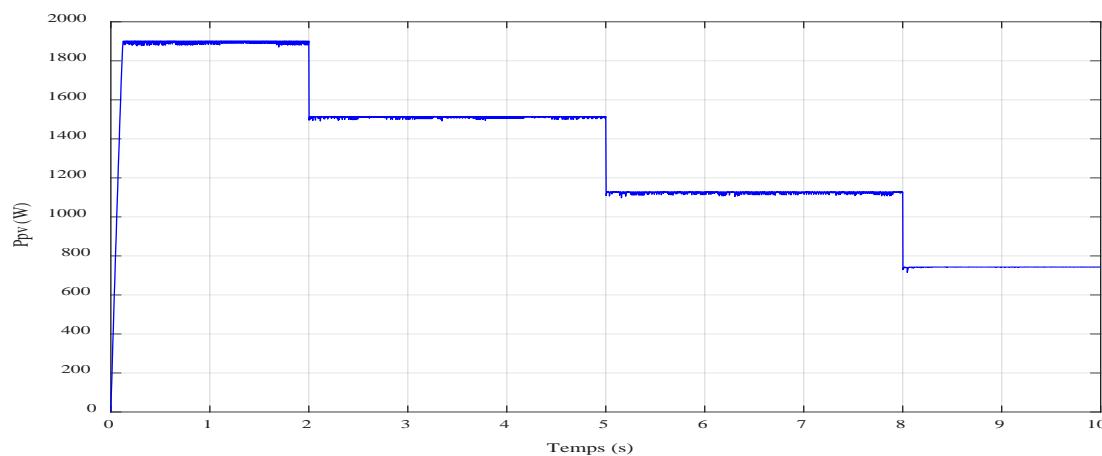


Fig.2.13. L'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable.

La figure (2.13) montre l'évolution de la puissance correspondante à la variation de l'irradiation.

Nous remarquons que P&O donne des résultats satisfaisants et extrait du générateur photovoltaïque une puissance maximale sous plusieurs niveaux de l'irradiation.

Dans la simulation, figure (2.14), on a varié la température entre 0s et 3.5s et entre 3.5s et 7.1s tout en gardant l'irradiation constante ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) pour voir le comportement de notre commande. Notre commande MPPT à base de l'algorithme P&O a bien réagi et il y a une poursuite parfaite à ce changement de température.

La figure (2.15) montre l'évolution de la puissance correspondante à la variation de la température.

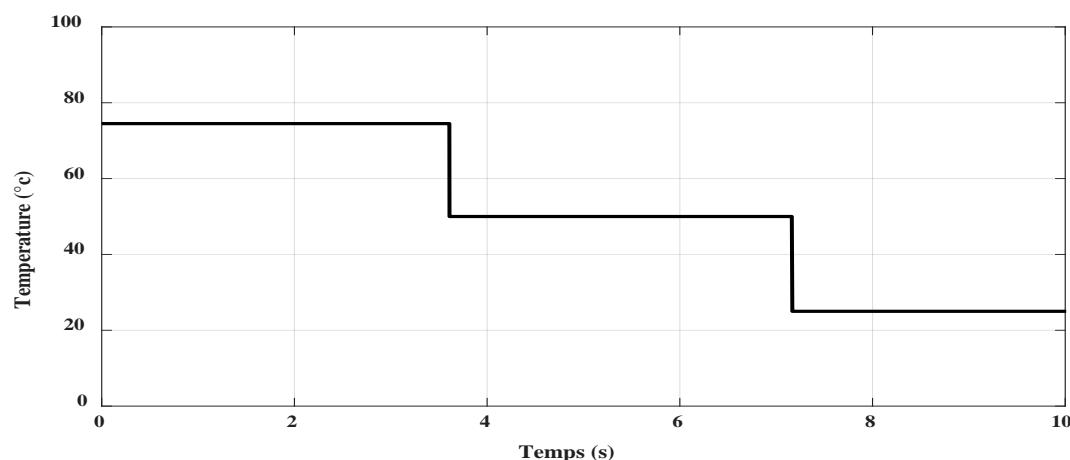


Fig. 2.14. La variation de température (C°).

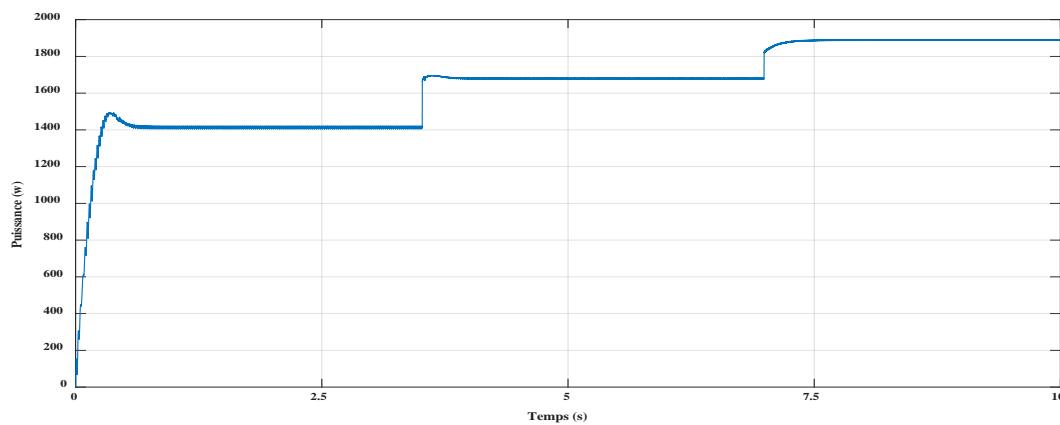


Fig. 2.15. L'évolution de la puissance PV pour une température variable.

## 2.8. Conclusion :

Le point de puissance maximale (MPPT) permet d'augmenter l'efficacité des systèmes photovoltaïques en assurant les paramètres de fonctionnement du générateur dans des conditions optimales et améliorant ainsi le rendement du système photovoltaïque et par la suite la réduction des coûts.

Ce chapitre est une tentative pour étudier et discuter la technique MPPT (perturbé& observé). La technique de la suivie de la puissance maximale (MPPT) est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance. La technique MPPT la plus populaire est la Perturbation et Observation suite à sa simplicité et la facilité de son implémentation pratique.

Les résultats obtenus de simulation montrent l'efficacité de la technique MPPT utilisé dans ce mémoire point de vu poursuite de la puissance maximale.

*Chapitre 3 :*

La commande vectorielle  
indirecte d'une machine  
asynchrone

### 3.1. Introduction

Grace au développement de l'électronique de puissance, il est aujourd'hui possible d'obtenir des machines asynchrones aussi performant dans le domaine des entraînements variables que des machines à courants continus. Pour commander un moteur asynchrone il existe deux types de contrôle : une commande scalaire ou une commande vectorielle [45]. La commande scalaire est basée sur le modèle en régime permanent de la machine. En conséquence, cette commande est simple et robuste, mais présentent de mauvaises performances dynamiques. Pour éviter cette limitation, on utilise une commande vectorielle, basée sur le modèle dynamique de la machine. Le but de cette commande est d'arriver à commander la machine asynchrone à cage d'écurieul comme une machine à courant continu MCC à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit) [46].

L'orientation de flux rotorique est la plus intéressante du fait des avantages qu'elle offre. En revanche, plusieurs problèmes demeurent. Principalement l'influence des paramètres de la machine sur l'orientation du flux, et sur le comportement des correcteurs, ainsi que l'insuffisance des performances dynamiques des correcteurs traditionnels [57].

Dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant statorique et le champ tournant rotorique varie en fonction de la charge et de la vitesse de glissement, ce qui provoque des interactions complexes et des réponses oscillatoires. *Blaschke* et *Hasse* ont proposé une méthode, dite « *commande vectorielle* », permettant d'obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu [47]. Le vecteur courant statorique est décomposé en deux composantes, l'une contrôle le flux et l'autre contrôle le couple.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord rappeler le principe de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone et la modélisation d'un onduleur de tension à deux niveaux. de la commande vectorielle indirecte et l'onduleur de tension à deux niveaux

### 3.2. Principe de l'onduleur de tension triphasé

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif DC/AC. Il est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un

courant alternatif. Il s'agit d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension, possédant six cellules de commutation (IGBT) et six diodes (antiparallèle) [48]. Chaque bras de l'onduleur est composé de deux cellules de commutation constituée chacune de l'interrupteur avec sa diode, la sortie correspondante au point milieu du bras. Le schéma d'un onduleur à deux niveaux est représenté sur la figure 3.1. Il existe des onduleurs à fréquence variable et à fréquence fixe, des onduleurs monophasés et triphasés [49, 50].

- Les onduleurs à fréquence fixe sont principalement utilisés dans les alimentations de secours pour éviter les microcoupures et dans la conversion des systèmes d'énergie renouvelable (PV, turbine éolienne).
- Les onduleurs à fréquence variable sont utilisés particulièrement comme variateur de vitesse pour les moteurs à courant alternatif et particulièrement les moteurs asynchrones.

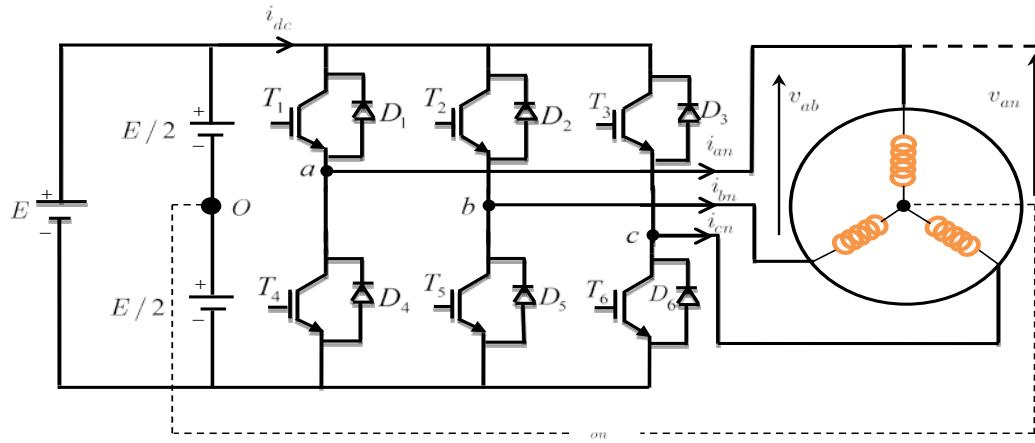


Fig 3.1: Schéma simplifié d'un onduleur de tension triphasé.

### 3.3. Technique de commande MLI sinus-triangle

Le principe de fonctionnement de cette technique de commande consiste à comparer les tensions de référence (au niveau de commande) pour trois phases avec un signal appelé « porteuse : tension à haut fréquence commutation », généralement triangulaire [51, 52].

Le but de technique MLI est de commander les interrupteurs du convertisseur. Le mode de fonctionnement est très simple et base sur les conductions suivantes :

- Si  $v_{ref} > v_p$  : l'interrupteur supérieur du pont conduit.
- Si  $v_{ref} < v_p$  : l'interrupteur inférieur du bras de pont conduit.

Où  $v_{ref}$  représente une des trois tensions de référence et  $v_p$  représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse [53].

### 3.3.1. Caractéristiques de la MLI sinus-triangle

La technique de commande MLI se caractérise par de deux paramètre [54] :

- Indice de modulation « $I_m$ » : qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de modulation (porteuse) sur la fréquence de référence.

$$I_m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (3.1)$$

$I_m$  : Indice de modulation.

$f_p$  : La fréquence de modulation (porteuse).

$f_{ref}$  : La fréquence de référence.

- le taux de modulation « $T_m$ » : qui est défini comme étant le rapport de la tension de référence sur la tension de porteuse.

$$T_m = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (3.2)$$

$T_m$  : Le taux de modulation (porteuse).

$V_{ref}$  : La tension de référence.

$V_p$  : La tension de porteuse.

### 3.3.2. Equation de porteuse

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

$$\begin{cases} v_p = V_p \left( -1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[ 0, \frac{T_p}{2} \right] \\ v_p = V_p \left( 3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[ \frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (3.3)$$

Donc  $v_p = \{-V_p, V_p, -V_p\}$  sur la période  $[0, T_p]$ .

### 3.3.3. Équations des tensions de référence

Le signal de référence (dans ce cas triphasé) est un signal sinusoïdal s'amplitude  $v_{ref}$  et fréquence  $f_{ref}$ . Les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par [55] :

$$\begin{cases} v_{ref\_a} = V_r \sin(2\pi f_{ref} t) \\ v_{ref\_b} = V_r \sin\left(2\pi f_{ref} t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{ref\_c} = V_r \sin\left(2\pi f_{ref} t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.4)$$

### 3.3.4. Équations des états des interrupteurs

Les états des interrupteurs sont donnés par l'équation suivante :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{ref\_i} - v_p) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{ref\_i} - v_p) < 0 \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c \quad (3.5)$$

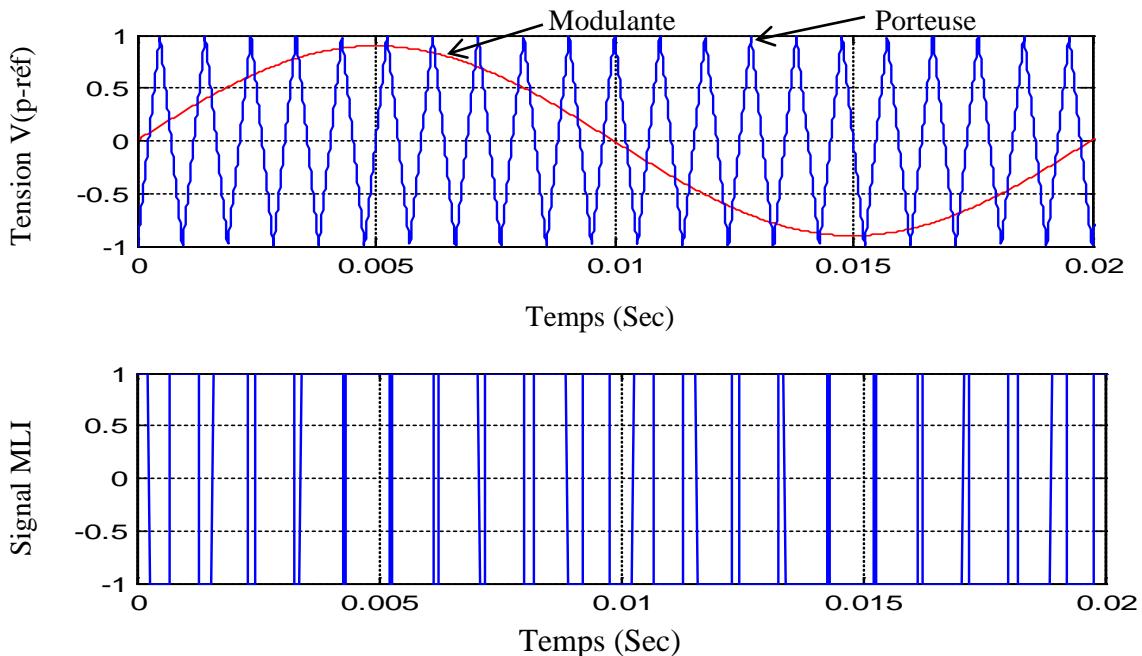


Fig 3.2 : Principe de la commande à MLI sinus-triangle.

### 3.3.5. Simulation de la commande MLI sinus-triangle

En utilisant un indice de modulation  $I_m = 21$  et un taux de modulation  $T_m = 0.9$  pour la simulation du programme, les résultats de simulation sont donnés par les figures ci-dessous.

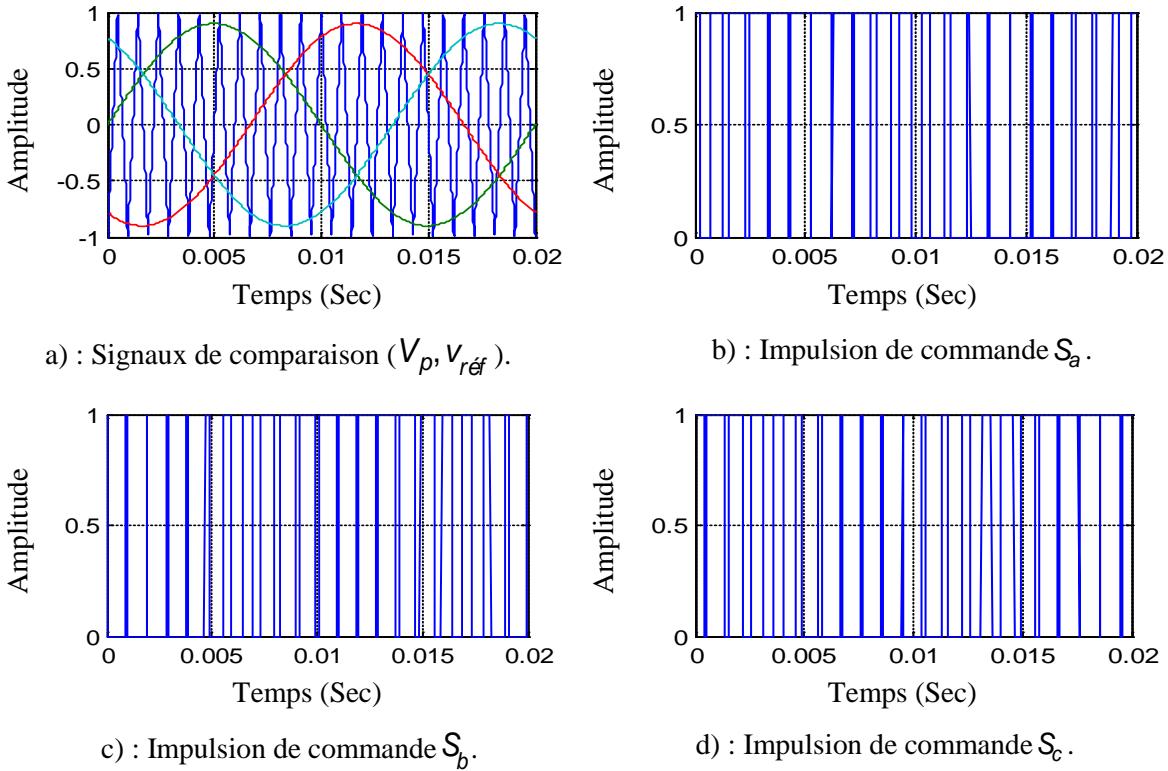


Fig 3.3 : Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.

### 3.4. Principes et objectifs de la commande vectorielle

La commande vectorielle par orientation de flux (FOC), est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines électriques à courant alternatif. Pour la machine asynchrone, le principe d'orientation du flux a été développé par **Blaschke** au début des années soixante-dix. L'objectif de cette technique de commande est orienté le vecteur flux suivant l'un des axes du repère ( $d, q$ ), à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple électromagnétique [55]. Il s'agit donc de placer le référentiel ( $d, q$ ) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct ( $d$ ). Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant du stator ( $i_{sd}$ ) qui est l'équivalent du courant inducteur de la machine à courant continu et le couple électromagnétique

est commandé par l'autre composante ( $i_{sq}$ ) qui l'équivalent du courant induit de la machine à courant continu [57, 45].

Malgré l'existence de nombreuses variables d'état, la classification de la commande vectorielle se fait suivant l'orientation du repère ( $d, q$ ) :

- Orientation suivant le flux rotorique.
- Orientation suivant le flux statorique.
- Orientation suivant le flux d'entrefer.

### 3.4.1. Orientation du flux rotorique

Le choix du flux rotorique permet un découplage naturel caractérisé par une impédance du flux par rapport à la composante du courant statorique en quadrature avec le flux. Le référentiel lié au flux rotorique est choisi pour obtenir des fonctionnements de la machine à induction comparable à ceux de la machine à courant continu. Dans la majorité des cas, le référentiel est choisi selon le flux rotorique [58]. Le principe d'orientation consiste à aligner le flux rotorique sur l'axe direct du repère de Park [55]. Il est illustré par la figure (3.4).

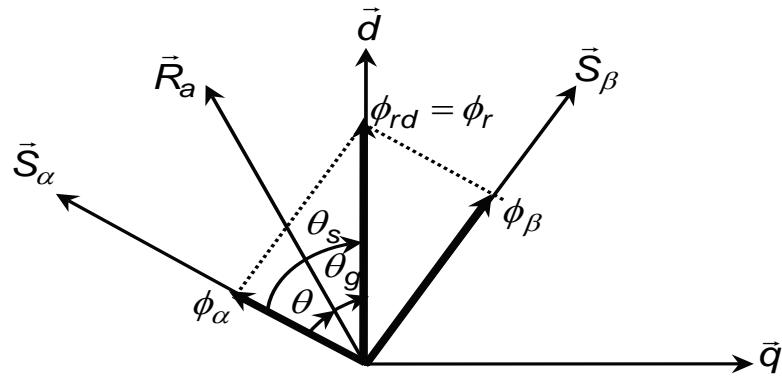


Fig 3.4: Principe d'orientation du flux rotorique.

Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \phi_r \\ \phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

En imposant  $\phi_{rq} = 0$ , le modèle d'état de la machine asynchrone (annexe A) devient :

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} i_{sd} = \frac{R_s}{\sigma L_s} i_{sd} + \omega_s i_{sq} - \frac{1}{\sigma L_s} \frac{L_m}{L_r} \left( \frac{d\phi_r}{dt} \right) + \frac{1}{\sigma L_s} v_{sd} \\ \frac{di}{dt} i_{sq} = \frac{R_s}{\sigma L_s} i_{sq} - \omega_s i_{sd} - \frac{1}{\sigma L_s} \frac{L_m}{L_r} \omega_s \phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} v_{sq} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} \phi_r = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \phi_r \\ \omega_g = \frac{L_m R_r}{L_r} \frac{i_{sd}}{\phi_r} \\ \frac{di}{dt} \omega = \frac{p}{J} (C_{em} - C_r) - \frac{f}{J} \omega \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec

$$C_{em} = \frac{pL_m}{L_r} \phi_r i_{sq}$$

Après le passage par la transformation de Laplace, nous obtenons de l'équation (3.8):

$$\phi_r = \frac{L_m}{1 + s \cdot T_r} i_{sd} \quad (3.9)$$

$$C_{em} = \frac{pL_m}{L_r} \phi_r i_{sq} \quad (3.10)$$

La position angulaire  $\theta_s$  du repère d'axe ( $d, q$ ) par rapport à la phase statorique de référence  $\vec{S}$  est obtenue par :

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad (3.11)$$

Avec

$$\omega_s = \omega + \omega_g \quad (3.12)$$

### 3.5. Types de la commande vectorielle

Dans la commande vectorielle, il existe principalement deux méthodes pour orienter le flux, l'une est appelée la méthode directe et l'autre est appelée la méthode indirecte. Dans ce travail nous nous intéressons par la méthode indirecte.

### 3.5.1. Commande vectorielle indirecte

Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer ou estimer l'amplitude du flux (donc le flux n'est pas régulé), mais seulement sa position, l'idée est proposée par **Hasse** [47]. La position du flux rotorique est calculée par addition de la position de la fréquence de glissement  $\theta_g$  calculée à partir des commandes du couple et du flux avec la position du rotor. Le calcul de  $\theta_s$  est illustré par la figure (3.5).

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température. En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué.

La procédure consiste à résoudre numériquement l'équation (3.11), soit :

$$\frac{d}{dt} \theta_s = \omega_s + \frac{L_m R_r}{L_r \phi_r} i_{sq} \quad (3.13)$$

Etant donné que le flux  $\phi_r$  est régi par la première équation du système (3.8), c'est-à-dire :

$$\frac{d}{dt} \phi_r = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \phi_r \quad (3.14)$$

En régime permanent, l'équation (3.14) donne  $\phi_r = L_m i_{sd}^*$ . Donc, l'équation (3.13) devient :

$$\frac{d}{dt} \theta_s = \omega_s + \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{sq}^*}{i_{sd}^*} \quad (3.15)$$

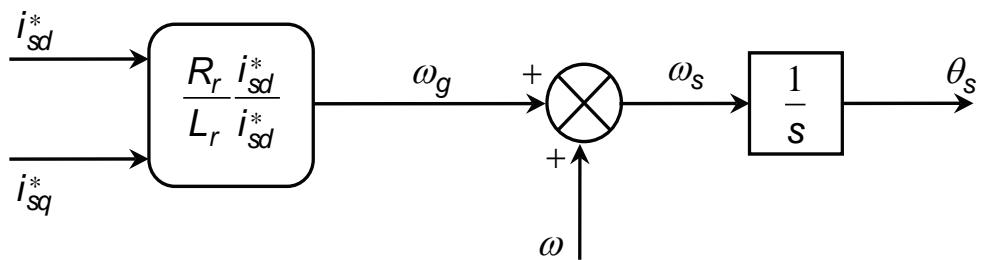


Fig 3.5 : Méthode de la commande vectorielle indirecte.

L'intérêt de la méthode indirecte est d'utiliser uniquement des grandeurs de référence qui ne sont pas bruitées. En effet, à partir du flux de référence  $\phi_r^*$  et couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$ , les courants de référence  $i_{sd}^*$  et  $i_{sq}^*$  se déduisent directement par le biais des équations (3.9) et (3.10), soit :

$$i_{sd}^* = \frac{1}{L_m} \left( \phi_r^* + T_r \frac{d}{dt} \phi_r^* \right) \quad (3.16)$$

$$i_{sq}^* = \frac{L_r}{pL_m \phi_r^*} C_{em}^* \quad (3.17)$$

### 3.6. Mise en œuvre de la commande vectorielle de la MAS

#### 3.6.1. Mise en évidence du découplage entre les axes

Les tensions statoriques obtenues à partir du système (3.7) sont :

$$\begin{cases} v_{sd} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\phi_r}{dt} \\ v_{sq} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + \sigma L_s \omega_s i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s \phi_r \end{cases} \quad (3.18)$$

Selon l'équation (3.18), bien que le flux soit constant, il y a un grand couplage entre le courant  $i_{sq}$  et la tension  $v_{sd}$  d'une part et le courant  $i_{sd}$  et la tension  $v_{sq}$  d'autre part.

On dit que les deux tensions  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  comportent des termes croisés.

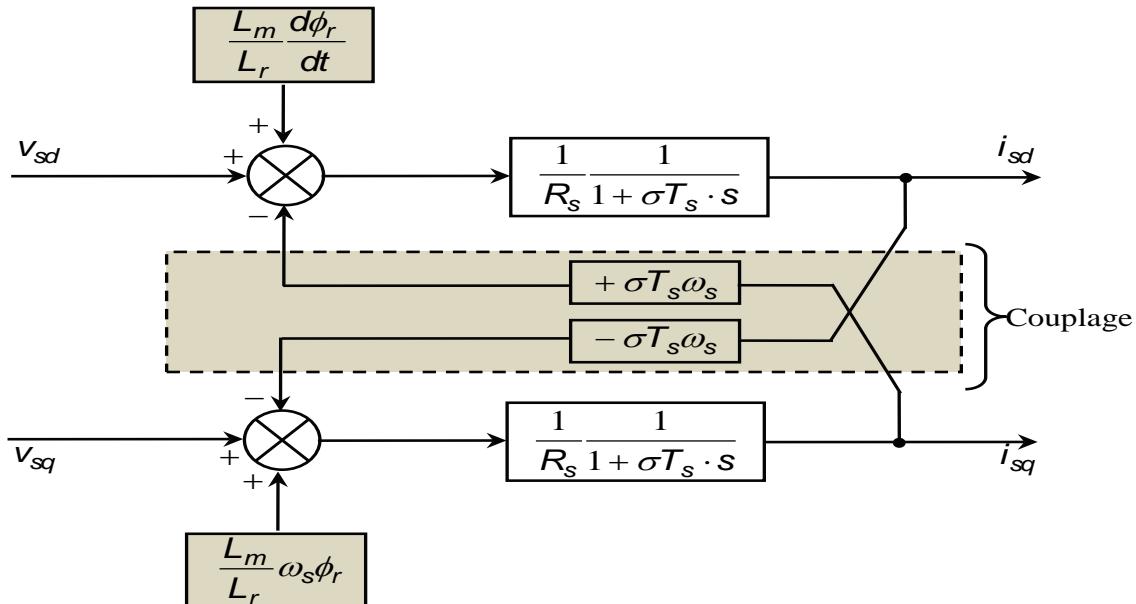


Fig 3.6 : mise en évidence du couplage entre les axes ( $d-q$ ).

### 3.6.2. Commande vectorielle avec découplage

Afin d'éviter ce couplage entre les deux équations de (3.18), nous utilisons une méthode de compensation qui a but d'annuler les termes croisés et les termes non-linéaires.

Cette méthode consiste à faire la régulation des courants statorique en négligeant les termes de couplage. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs des courants statorique pour obtenir les tensions de références nécessaires pour le réglage [45].

En posant les  $f_{em}$  suivantes :

$$\begin{cases} f_{em,d} = -\sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\phi_r}{dt} \\ f_{em,q} = \sigma L_s \omega_s i_{rd} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s \phi_r \end{cases} \quad (3.19)$$

Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} v_{sd} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} + f_{em,d} \\ v_{sq} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + f_{em,q} \end{cases} \quad (3.20)$$

D'après l'application de transformation de Laplace sur l'équation (3.19), nous obtenons :

$$\begin{cases} (\sigma L_s \cdot s + R_s) i_{sd} = v_{sd} - f_{em,d} \\ (\sigma L_s \cdot s + R_s) i_{sq} = v_{sq} - f_{em,q} \end{cases} \quad (3.21)$$

Où :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{(\sigma L_s \cdot s + R_s)} (v_{sd} - f_{em,d}) \\ i_{sq} = \frac{1}{(\sigma L_s \cdot s + R_s)} (v_{sq} - f_{em,q}) \end{cases} \quad (3.22)$$

À travers l'équation (3.22), nous pouvons tracer le schéma bloc du modèle simplifié de la machine asynchrone suivant la figure 3.7.

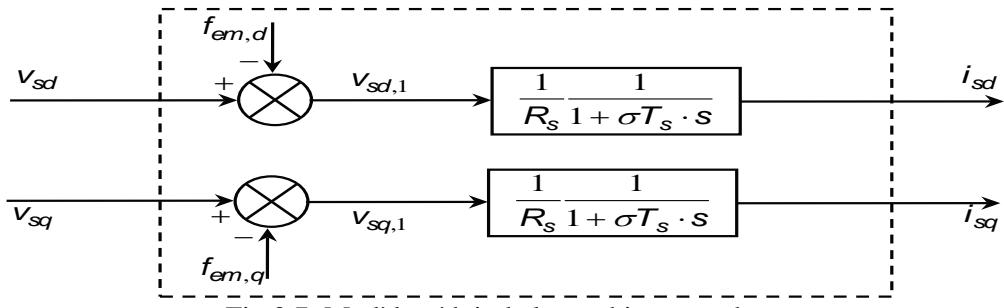


Fig 3.7: Modèle réduit de la machine asynchrone.

### 3.6.3. Schéma bloc de la régulation

Les termes  $f_{em,d}$  et  $f_{em,q}$ , correspondent aux termes de couplage entre les axes ( $d$ ) et ( $q$ ).

La solution proposée consiste à ajouter des tensions identiques mais de signes opposés à la sortie des correcteurs de courants de manière à séparer les boucles de régulation d'axes ( $d$ ) et ( $q$ ) comme le montre la figure (3.8).

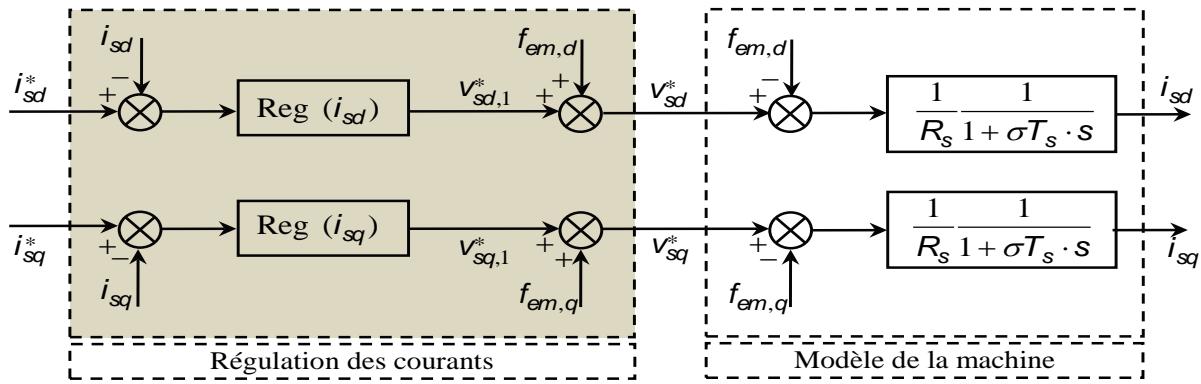
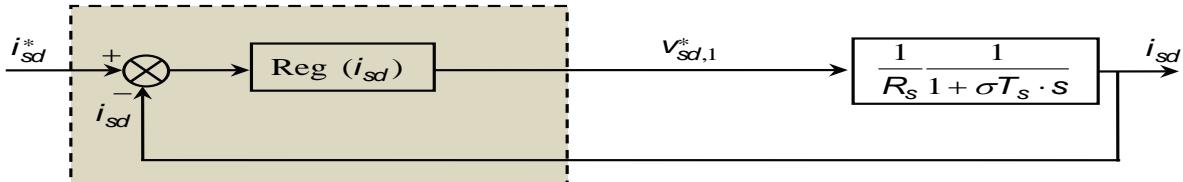
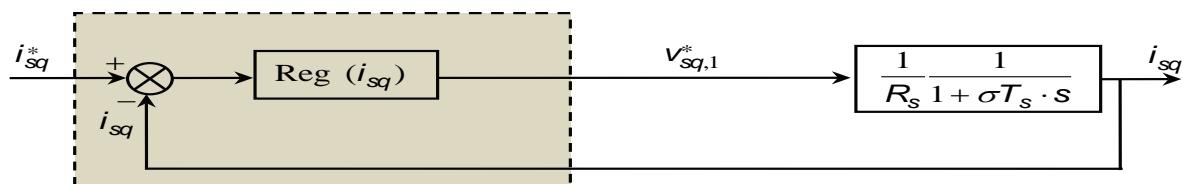


Fig 3.8 : Découplage par addition des termes de compensation.

D'après le découplage par addition des termes de compensation qui est exprimé dans la figure 3.8, nous aboutissons alors aux schémas blocs simples et identiques pour les deux axes :

Fig 3.9 : Boucle de régulation du courant  $i_{sd}$  après découplage.Fig 3.10 : Boucle de régulation du courant  $i_{sq}$  après découplage.

### 3.7. Schéma globale de la commande

A partir du modèle du moteur élaboré et des équations de découplage données par l'équation (3.19), nous pouvons élaborer un schéma de principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté sur l'axe (*d*) (figure (3.11)).

### 3.8. Synthèse des correcteurs

Pour le système de réglage, nous choisissons d'utiliser des correcteurs de type Proportionnel-Integral (PI), étant donné qu'ils sont simples à mettre en œuvre. Ce type de correcteur, l'action proportionnelle sert à régler la rapidité de la dynamique du système, alors que l'action intégrale permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir. Le calcul des correcteurs est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles.

#### 3.8.1. Correcteur du courant $i_{sd}$

Le correcteur du courant en direct fournit la tension  $v_{sd,1}$  nécessaire au maintien du couple à sa valeur de référence. D'après la figure (3.7), la fonction de transfert  $\frac{i_{sd}}{v_{sd,1}}$  et donnée par :

$$\frac{i_{sd}}{v_{sd,1}} = \frac{1 / R_s}{1 + \sigma T_s \cdot s} \quad (3.23)$$

La fonction transfert en boucle fermé (FTBF) de courant  $i_{sd}$  s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{i_{sd}}{i_{isd}^*} = \frac{\frac{A}{T} (K_{p,isd} \cdot s + k_{i,isd})}{s^2 + s \cdot \left( \frac{1 + A \cdot K_{p,isd}}{T} \right) + \frac{A \cdot K_{i,isd}}{T}} \quad (3.24)$$

Avec :

$$\begin{cases} A = \frac{1}{R_s} \\ T = \sigma T_r \end{cases} \quad (3.25)$$

Et :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (3.26)$$

Le dimensionnement du correcteur est fait à l'aide du principe d'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique de l'équation (3.24) est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative. Pour lequel de dénominateur des fonctions de transfert correspondantes est de la forme :

$$D(s) = s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 + \omega_0^2 \quad (3.27)$$

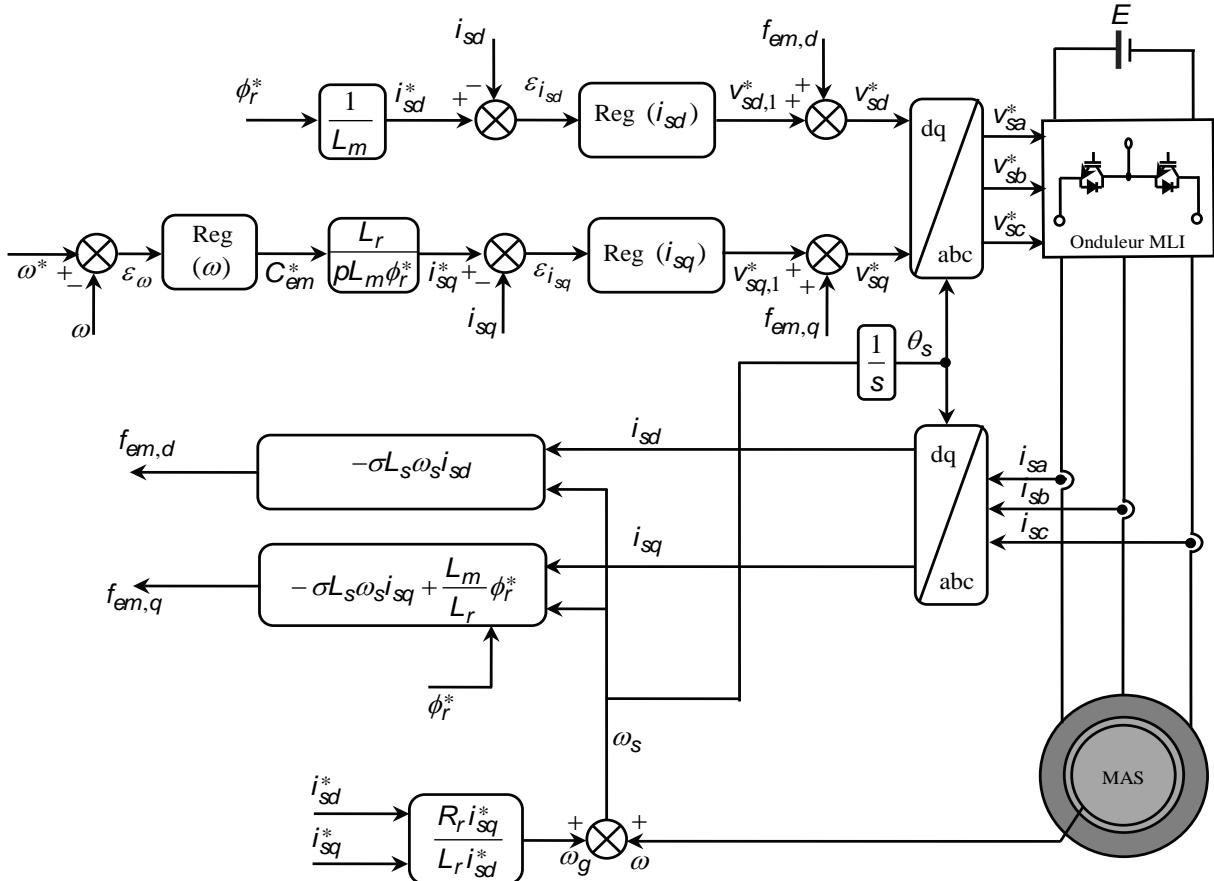


Fig 3.11 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte.

La boucle de régulation du courant  $i_{sq}$  est représentée par la figure (3.12).

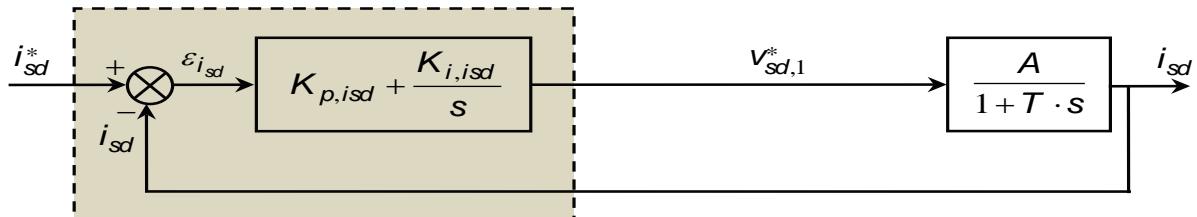


Fig 3.12 : Schéma bloc de régulation du courant  $i_{sd}$ .

Par identification entre les équations (3.24) et (3.27), nous obtenons les paramètres suivants du correcteur PI :

**Tableau 3. 1** : Paramètres du correcteur du courant d'axe en direct.

Paramètres du correcteur du courant d'axe en direct	
	$K_{p,isd}$
Correcteur PI	$\frac{(2 \cdot T \cdot \xi \cdot \omega_0 - 1)}{A}$
	$\frac{T \cdot \omega_0^2}{A}$

### 3.8.2. Correcteur du courant $i_{sq}$

Le correcteur du courant en quadrature fournit la tension  $v_{sq,1}^*$  nécessaire au maintien du couple à sa valeur de référence. D'après la figure (3.10), la fonction de transfert  $\frac{i_{sq}}{v_{sq,1}}$  et donnée par:

$$\frac{i_{sq}}{v_{sq,1}} = \frac{1/R_s}{1 + \sigma T_s \cdot s} \quad (3.28)$$

La boucle de régulation du courant  $i_{sq}$  est représentée par la figure (3.13).

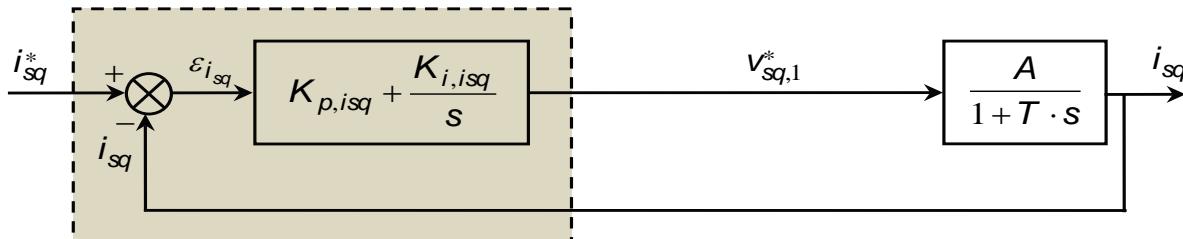


Fig 3.13 : Schéma bloc de régulation du courant  $i_{sq}$ .

Les mêmes calculs effectués pour le correcteur du courant  $i_{sd}$  sont appliqués à ce correcteur.

Les paramètres du correcteur sont donc les mêmes. Ils sont donnés par :

**Tableau 3. 2** : Paramètres du correcteur du courant d'axe en quadrature.

Paramètres du correcteur du courant d'axe en quadrature.	
	$K_{p,isq}$
Correcteur PI	$\frac{(2 \cdot T \cdot \xi \cdot \omega_0 - 1)}{A}$
	$\frac{T \cdot \omega_0^2}{A}$

### 3.8.3. Correcteur de la vitesse rotorique, $\omega$

#### 3.8.3.1 Régulation Intégrale-Proportionnelle (IP)

D'après l'équation mécanique (annexe A), nous avons :

$$\frac{\omega}{T_{em}} = \frac{K_m}{1 + T_m s} \quad (3.29)$$

Avec

$$K_m = \frac{p}{f}, T_m = \frac{J}{f}$$

D'où le schéma bloc de la boucle de régulation de la vitesse :

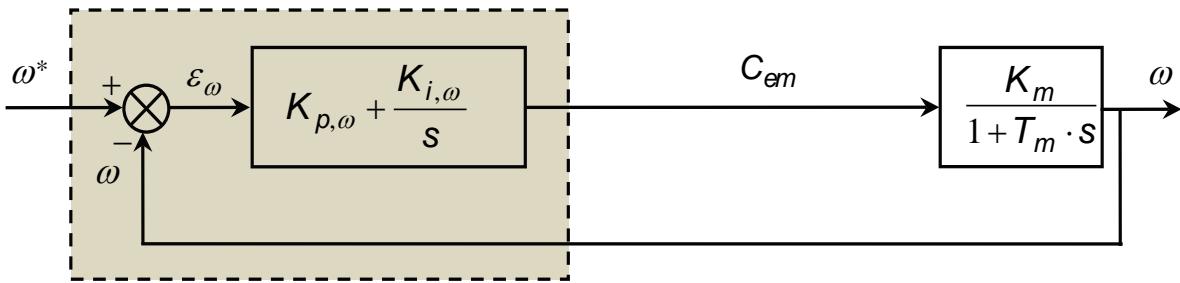


Fig 3.14 : Schéma bloc de régulation de la vitesse  $\omega$ .

La boucle la plus externe est la boucle de régulation de la vitesse. Pour cette raison, les pôles imposés pour la boucle externe (boucle de vitesse) seront plus proches de l'origine du plan des racines par rapport aux pôles des boucles internes (boucles de flux et des courants)

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{\omega}{\omega^*} = \frac{\frac{K_m(K_{p,\omega} \cdot s + K_{I,\omega})}{T_m}}{s^2 + s \cdot \left( \frac{1 + K_m \cdot K_{p,\omega}}{K_r} \right) + \frac{K_m \cdot K_{I,\omega}}{K_r}} \quad (3.30)$$

Par imposition des pôles en boucle fermée, nous obtenons les paramètres du correcteur PI :

Tableau 3. 3 : Paramètres du correcteur PI de la vitesse.

Paramètres du correcteur PI de la vitesse.		
	$K_{p,\omega}$	$K_{i,\omega}$
Correcteur PI	$\frac{(2 \cdot T_m \cdot \xi \cdot \omega_0 - 1)}{K_m}$	$\frac{T_m \cdot \omega_0^2}{K_m}$

### 3.8.3.2 Régulation Proportionnelle-Intégrale avec Anti-Windup (PIAW)

Le PIAW illustré à la Fig 3.15 est différent de celui ci-dessus. le PI classique montré dans la figure (3.14) peut conduire à un mauvais comportement à cause du phénomène de 'Windup' [58]. L'origine de ce phénomène est le fait que la commande calculée par le régulateur est différente de celle appliquée réellement au système. Si le signal de commande dépasse la valeur assignée dans le limiteur, l'intégrateur continu à intégrer l'erreur quelle que soit la réponse du système, cela provoque une amplification importante de la commande difficile à l'affaiblir rapidement, ce qui entraîne un dépassement considérable au cours de la saturation pourrait même déstabiliser le système [60]. Le PI Anti-Windup contient une configuration avancée capable d'améliorer la qualité du contrôle. En fait, le contrôleur PI anti-Windup est utilisé pour minimiser la dégradation des performances qui se produit en raison de l'effet de « Windup » dans le contrôleur PI conventionnel. La figure (3.15) montre la configuration utilisée dans notre travail. La valeur du gain G inverse du gain proportionnel  $K_p$ . [61]. Dans le contrôleur PI anti-Windup l'entrée vers l'intégrateur est la différence entre la sortie saturée et l'entrée non saturée. Il produit des performances améliorées par rapport au contrôleur PI normal. [62]

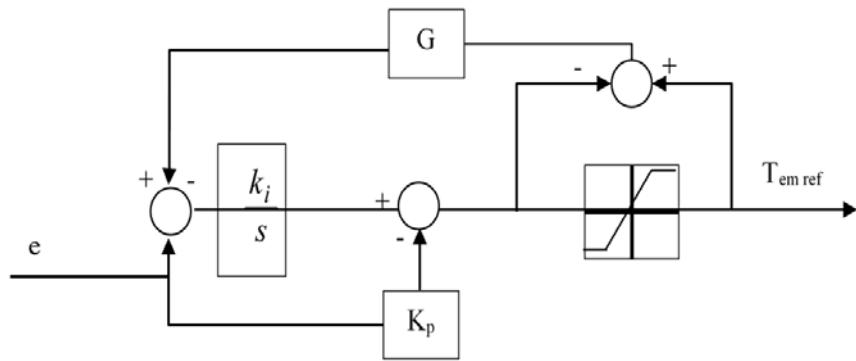


Fig. 3.15. Contrôleur PI avec boucle anti-Windup.

La relation entre les gains G et  $K_p$  est donnée par l'équation (3.31).

$$G = 1/K_p \quad (3.31)$$

**3.9 Conclusion :**

Ce chapitre présente le principe de l'onduleur de tension triphasée à deux niveaux. Ensuite, une revue théorique de quelques notions de base sur la commande vectorielle indirecte puis une synthèse des correcteurs. Dans le chapitre suivant, on va simuler le système complet du pompage photovoltaïque en boucle fermée utilisant la commande vectorielle indirecte pour la régulation du débit de la pompe, et on va introduire l'ombrage complet pour voir l'effet sur le débit et la puissance hydraulique.

*Chapitre 4 :*

Dimensionnement de  
l'installation de pompage

#### 4.1. Introduction :

Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque est essentiel pour son bon fonctionnement et pour la satisfaction de l'utilisateur. Dans tous les cas il est nécessaire de connaître le besoin en eau, le gisement d'énergie solaire du lieu concerné. Ceci permet de faire le bon choix des modules photovoltaïques, leur implantation et la structure supporte et le choix des composants électriques assurant la régulation et la protection du système et des usagers.

Ce chapitre est donc dédié au dimensionnement de l'installation de pompage d'eau photovoltaïque et à la simulation de ses différents composants en tenant compte que le système est en boucle fermée. Il est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur statique boost équipé avec son MPPT qui peut assurer la poursuite du point optimal sans interruption, d'un onduleur à deux niveaux et d'une pompe couplée à un moteur à induction commandé par la commande vectorielle indirecte dans le but de varier la vitesse du moteur qui va nous permettre de réguler le débit de la pompe centrifuge. Afin de maximiser les paramètres hydrauliques de la pompe, la vitesse du moteur doit être optimisée avec un contrôle de vitesse optimale.

On a simulé notre système complet en tenant compte de l'ombrage total afin de voir l'effet de ce dernier point de vu débit et puissance hydraulique. L'ombrage partiel fera l'objet pour la continuité de ce travail dans le futur.

#### 4.2 Les pompes centrifuges :

Les pompes sont généralement choisies selon la hauteur manométrique totale du puits (HMT). Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement : elles sont soit de type volumétrique ou bien de type centrifuge. Outre ces deux classifications, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : pompe à aspiration et pompe à refoulement [64].

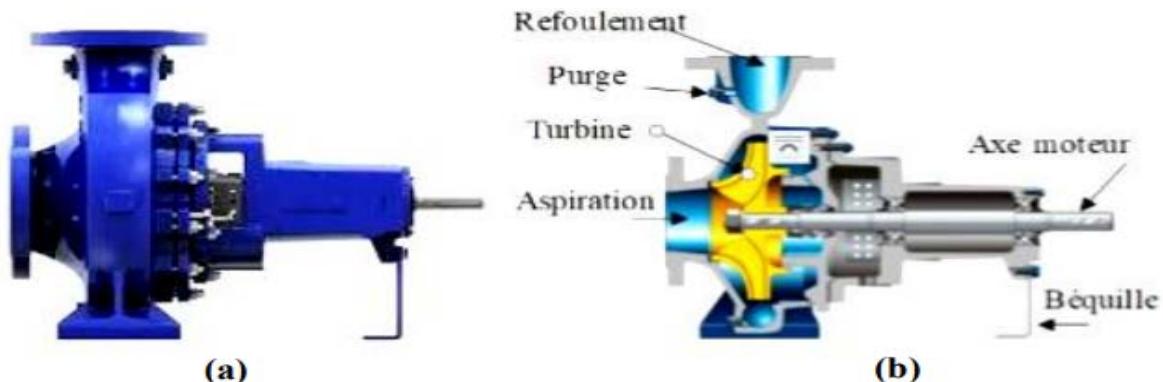


Figure 4.1 :(a) Pompe centrifuge accouplée MAS, (b) coupe longitudinale.

Une pompe centrifuge est une machine rotative qui pompe un liquide en le forçant au travers d'une roue à aube ou d'une hélice appelée impulsleur (souvent nommée improprement turbine). C'est le type de pompe industrielle le plus commun. Par l'effet de la rotation de l'impulsleur, le fluide pompé est aspiré axialement dans la pompe, puis accéléré radialement, et enfin refoulé tangentiellement[63].

#### **4.2.1 Le principe de fonctionnement :**

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

##### **a) L'aspiration :**

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage [64].

##### **b) L'accélération :**

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. À la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression [63].

#### **4.2.2. Avantages et inconvénients :**

Les pompes centrifuges forment des dispositifs robustes. À caractéristiques égales, elles présentent souvent un meilleur rendement, et un fonctionnement plus régulier, sont plus fiables et moins bruyantes que les machines alternatives. Elles sont davantage compatibles avec l'utilisation de fluides chargés de particules solides. Mais elles ne sont pas autoamorçantes.

#### **4.3 Puissance Hydraulique :**

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

$$P_h = \eta_{mp} \times p_e = \rho \times g \times HMT \times Q \quad (4.1)$$

La pompe centrifuge oppose un couple résistant Cr :

$$Cr = K_r \times \Omega_n^2 \quad (4.2)$$

Avec  $K_r$  un coefficient de proportionnalité [ $\text{Nm}/(\text{rad.s-1})^2$ ] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{p_n}{\Omega_n^3} \quad (4.3)$$

#### 4.4. Dimensionnement de l'installation de pompage :

Le tableau (4.1) représente l'irradiation moyenne annuelle durant toute l'année de chaque mois de la ville de Saida. Donc, l'irradiation moyenne est approximativement  $5.77 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ .

**Tableau 4.1** : Irradiations mensuelles de la wilaya de Saida.

<b>Mois</b>	<b>Irradiation (kWh/m<sup>2</sup>/j).</b>
Janvier	4.51
Fevrier	5.17
Mars	5.87
Avril	6.03
Mai	6.16
Juin	6.7
Juillet	6.74
Août	6.80
Septembre	6.33
Octobre	5.87
Novembre	4.73
Décembre	4.41
<b>Moyenne</b>	<b>5.77</b>

Dans ce projet, le débit journalier est choisi à  $Q = 14 \text{ m}^3/\text{h}$  et la HMT est estimée à 18 m. La pompe choisie a un rendement de  $\eta_p = 55\%$ , et celui du moteur est d'environ  $\eta_{mot} = 80\%$  au point de fonctionnement nominal. Le rendement total du groupe motopompe  $\eta_{mp} = 44\%$ .

La puissance électrique requise par la pompe est décrite par l'équation suivante [64] :

$$P_e = \frac{P_h}{\eta_{mp}} = C_h \cdot Q \cdot HMT / \eta_{mp} = \frac{2.725 * 14 * 18}{0.44} = 1560 \text{ W/j} \quad (4.4)$$

Avec :

$P_h$  : Puissance hydraulique = 686.7W/j

$$c_h = g * \rho = 9.81 * \frac{1000}{3600} = 2.725,$$

$C_h$  : Constante hydraulique,

$g$  : pesanteur ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),

$\rho$  : Masse volumique de l'eau ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) = 1000.

**Note :** 1 Wh = 3600 J

On calcule l'énergie électrique  $E_{el}$  consommée pendant le temps de pompage  $T_{pom}$  dans une journée :

-On a un réservoir de volume  $V_{res} = 70 \text{ m}^3$

$$T_{pom} = V_{res} / Q = 70 / 14 = 5 \text{ heures} \quad (4.5)$$

$$E_{el} = P_e \cdot T_{pom} = 1560 * 5 = 7800 \text{ Wh/j} \quad (4.6)$$

L'énergie produite  $E_p$  par un champ photovoltaïque est égale à :

$$E_p = \frac{E_{el}}{K} = \frac{7800}{0.72} = 10833.33 \text{ Wh/j} \quad (4.7)$$

$K$  : un coefficient correcteur dépendant de l'incertitude météorologique, de l'inclinaison des modules solaires et du rendement global du système photovoltaïque. Sa valeur théorique est comprise entre 0.55 et 0.75 [63,64].

#### 4.4.1. La puissance crête du générateur photovoltaïque

La puissance crête du générateur photovoltaïque dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation.

$$P_c = \frac{E_p}{I_r} = \frac{10985.85}{5.77} = 1878 \text{ W} \quad (4.8)$$

Où  $I_r$  est l'irradiation moyenne journalière estimée dans notre région à  $5.77 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ .

#### 4.4.2 Le nombre de modules photovoltaïques :

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

$$N = P_c / P_{mod} = 1878 / 190 = 9.88 \approx 10 \quad (4.9)$$

Le générateur photovoltaïque aura donc une puissance crête de  $1878 \text{ W}$  et sera composé de 10 modules de  $190 \text{ W}$ , 5 en séries et l'ensemble sont parallèles.

#### 4.5. Structure générale de la simulation :

La structure détaillée, figure 4.2 pour la simulation des différents composants d'un système de pompage photovoltaïque en utilisant la commande vectorielle indirecte pour la commande de la vitesse de rotation de la motopompe est représentée qui est composée d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur statique boost équipé par son MPPT, d'un onduleur à deux niveaux et d'une pompe couplée à un moteur à induction.

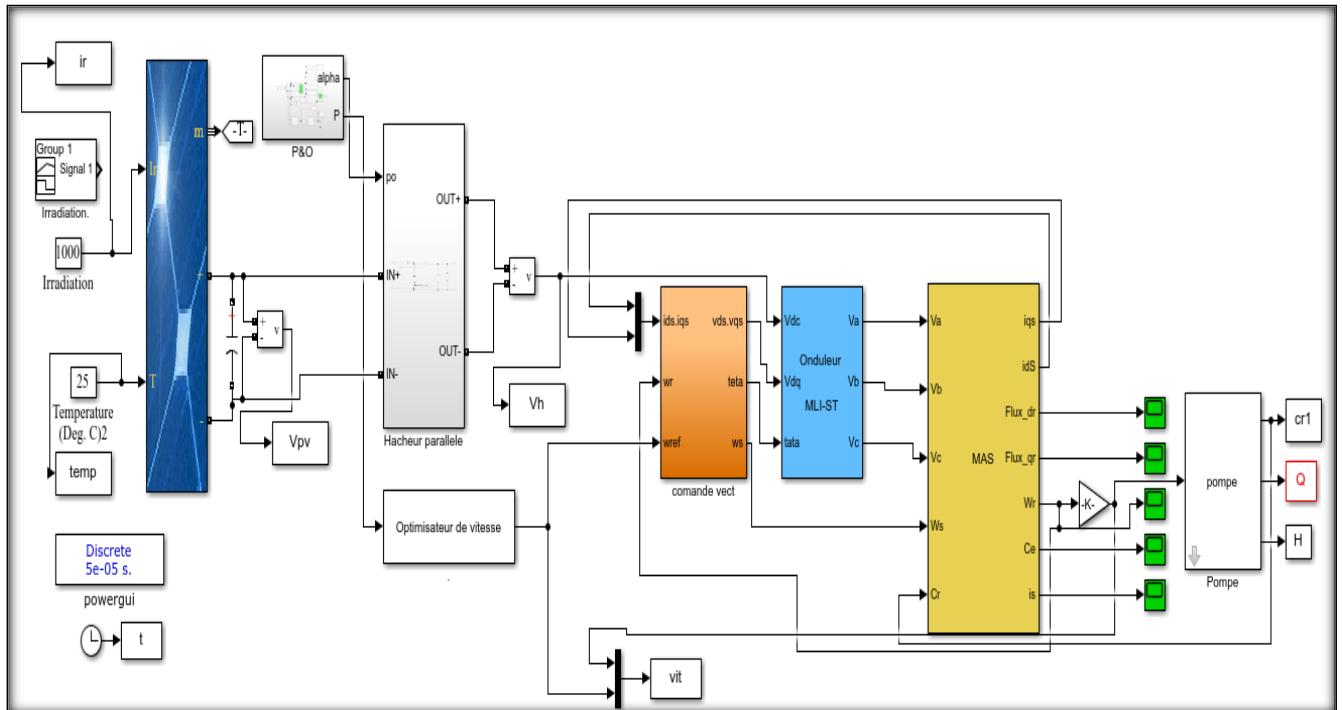


Figure 4.2 : Structure générale de la simulation du système de pompage photovoltaïque en boucle fermée.

#### 4.6. Résultats de simulation et interprétation :

La simulation est réalisée par MATLAB/SIMULINK/Sim power. La pompe centrifuge est entraînée par la machine asynchrone et alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux en faisant appel à une stratégie pour la commande du système de pompage, à savoir la commande vectorielle indirecte. Le générateur photovoltaïque est composé de 10 panneaux, 5 en série et 2 en parallèle avec une puissance crête de 1900 W. On a effectué au premier lieu la simulation sans MPPT ensuite avec MPPT afin de s'assurer que notre système fonctionne correctement.

Les tableaux ci-dessous montrent les résultats obtenus avant et après MPPT et qui confirment réellement la validité de notre algorithme (P&O) proposé.

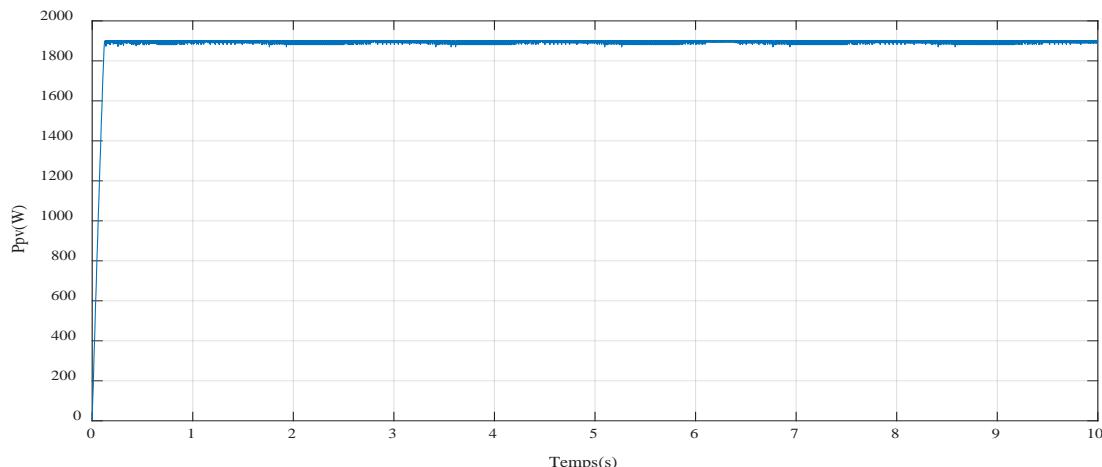
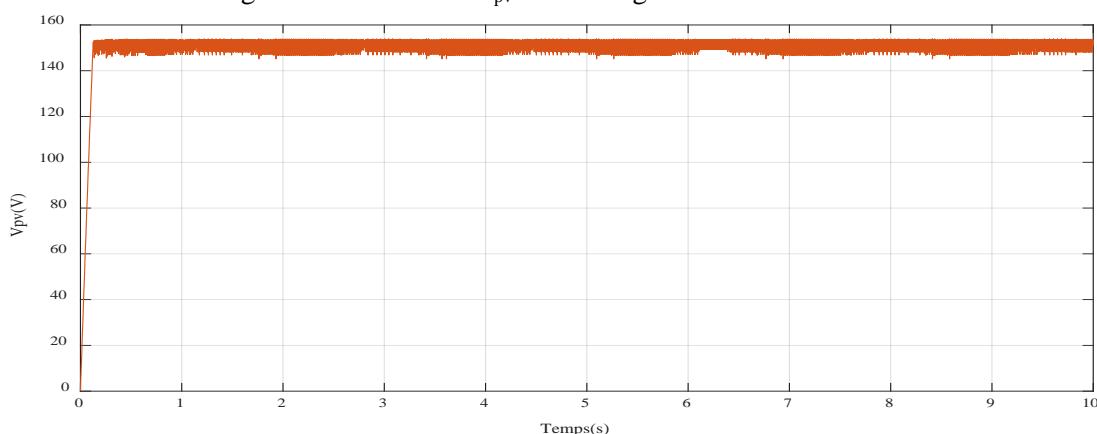
**Tableau 4.2** : les résultats obtenus avant et après MPPT.

Irradiance( $\text{W/m}^2$ )	$P_{\text{pv}}(\text{max})(\text{W})$	
	Avant MPPT	Après MPPT
1000	1900	1900
800	1515	1515
600	1128	1128
400	743	743

Ensuite, le reste de la simulation a été effectué afin de visualiser les grandeurs électriques du GPV à savoir :  $P_{\text{PV}}$ ,  $V_{\text{PV}}$  et  $I_{\text{PV}}$  avec un éclairement fixe de  $1000 \text{ W/m}^2$ , par la suite on a varié le niveau de l'éclairement progressivement de  $1000 \text{ W/m}^2$  à  $400 \text{ W/m}^2$ .

La continuité de cette simulation concernera la visualisation de la vitesse avec un éclairement fixe et varié. Enfin, nous allons nous intéresser à la commande vectorielle indirecte ainsi que l'obtention des graphes de la puissance hydraulique, le débit et la hauteur manométrique pour un éclairement fixe ensuite un éclairement varié. Les résultats de simulation sont présentés à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

Les figures (4.3), (4.4) et (4.5) représentent la réponse du GPV sous un éclairement fixe à  $1000 \text{ W/m}^2$  :

Figure 4.3 : Allure de  $P_{\text{pv}}$  sans changement d'éclairement.Figure 4.4 : Allure de  $V_{\text{pv}}$  sans changement d'éclairement.

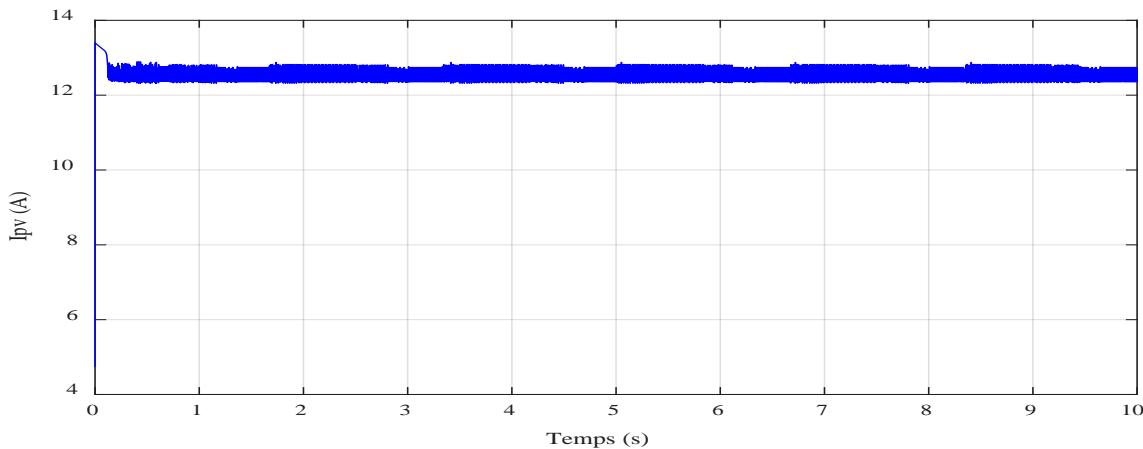


Figure 4.5 : Allure de  $I_{pv}$  sans changement d'éclairement.

Nous remarquons d'après la figure 4.3 que la puissance est au alentour de 1900W qui a été calculée auparavant, tandis que la tension se stabilise à 152V, figure 4.4 l'équivalent de cinq panneaux en série de 30.4V chacun (tension à la puissance maximale) et le courant est approximativement à 12.50A figure 4.5, deux panneaux en série à raison de 6.25A (courant à la puissance maximale), voir Tableau 4.1.

Pour tester la robustesse de la commande MPPT, on a varié le niveau de l'éclairement successivement 1000 - 800- 600 - 400  $w/m^2$  et on a effectué la même démarche de simulation.

Les figures ci-dessous représentent la réponse du GPV durant cette variation.

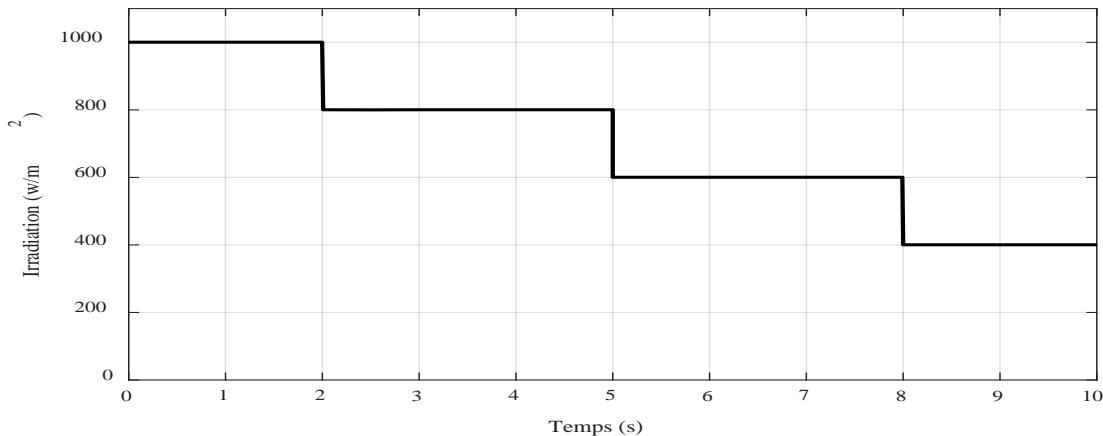
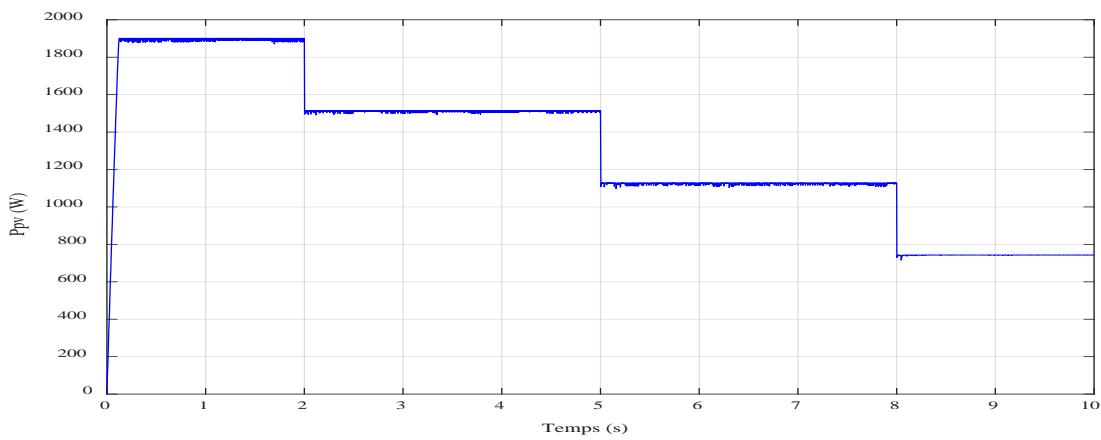
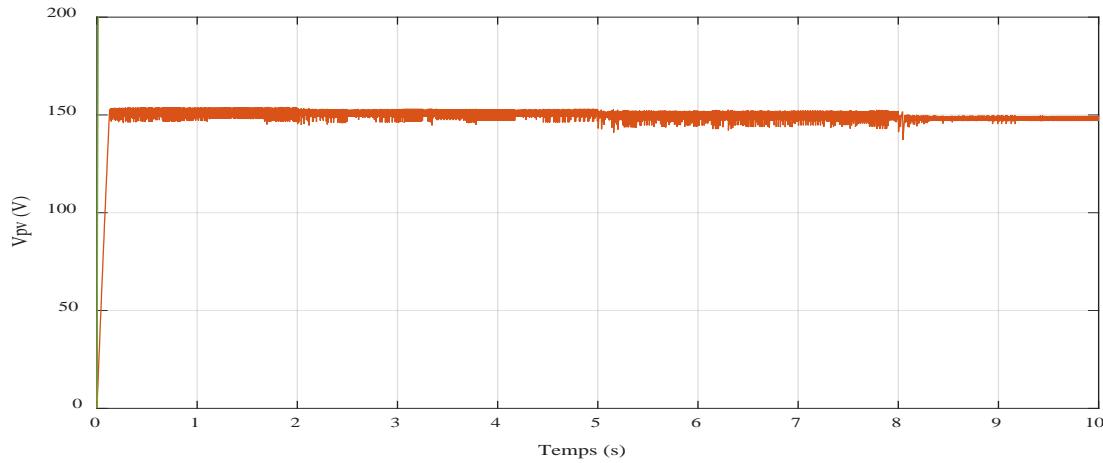
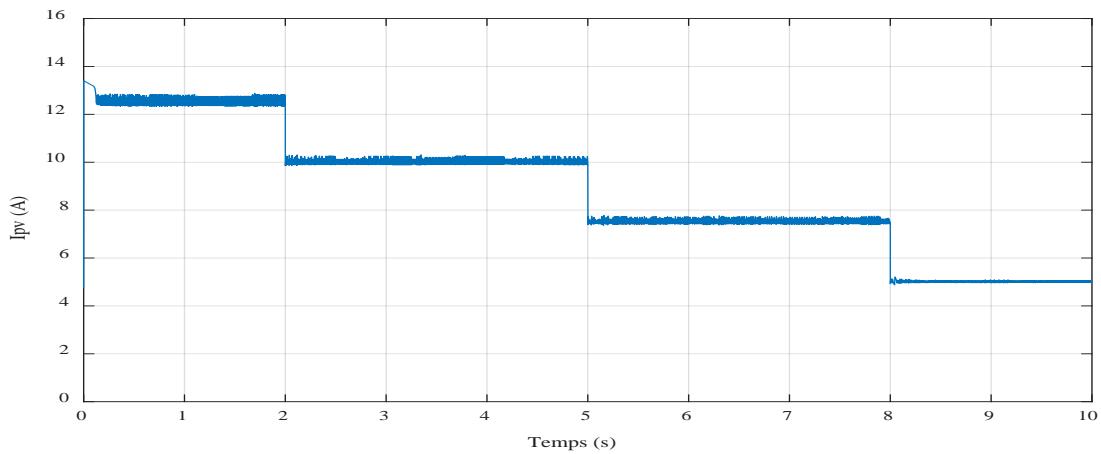


Fig.4.6 La variation de l'irradiation.

Figure 4.7 Allure de  $P_{pv}$  avec changement d'éclairement.Figure 4.8 : Allure de  $V_{pv}$  avec changement d'éclairementFigure 4.9 : Allure de  $I_{pv}$  avec changement d'éclairement.

D'après la figure 4.7, il est clair que la commande MPPT assure parfaitement la poursuite de la valeur de la puissance maximale qui est extraite du générateur photovoltaïque. À propos de la tension figure 4.8, le changement d'éclairement a un effet négligeable tandis que le courant figure 4.9 diminue progressivement avec la diminution de l'éclairement.

Afin de visualiser la tension qui alimente l'onduleur, on a pris les deux allures de la tension de bus continu à une irradiation fixe à  $1000 \text{ w/m}^2$  et la deuxième allure est prise après la variation de l'irradiation. Les figures 4.10.1 et 4.11 représentent ces deux allures.

Il est tout à fait clair, que la variation de la tension d'entrée ( $V_{dc}$ ) alimentant l'onduleur varie avec la variation de l'éclairement et cela est due principalement à la variation du rapport cyclique. (Tableau 4.3)

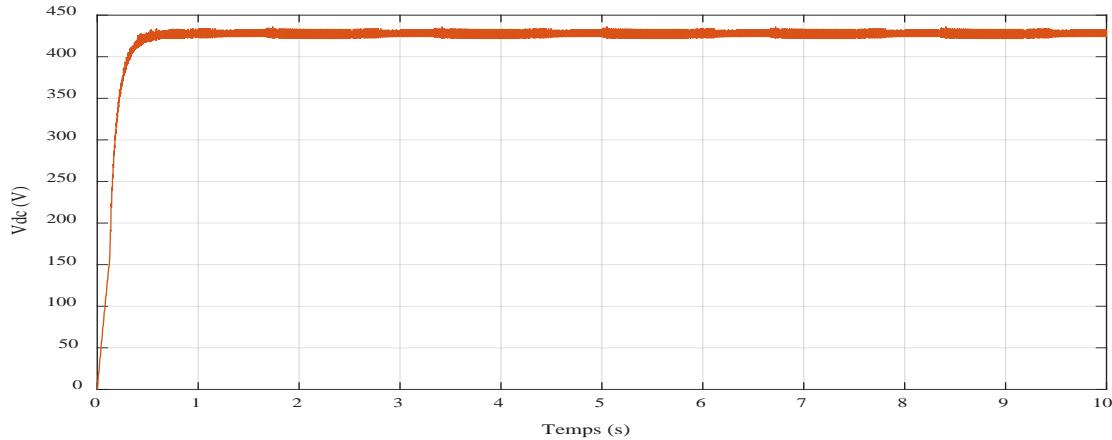


Figure 4.10: Allure de la tension continue  $V_{dc}$  sans changement d'éclairement.

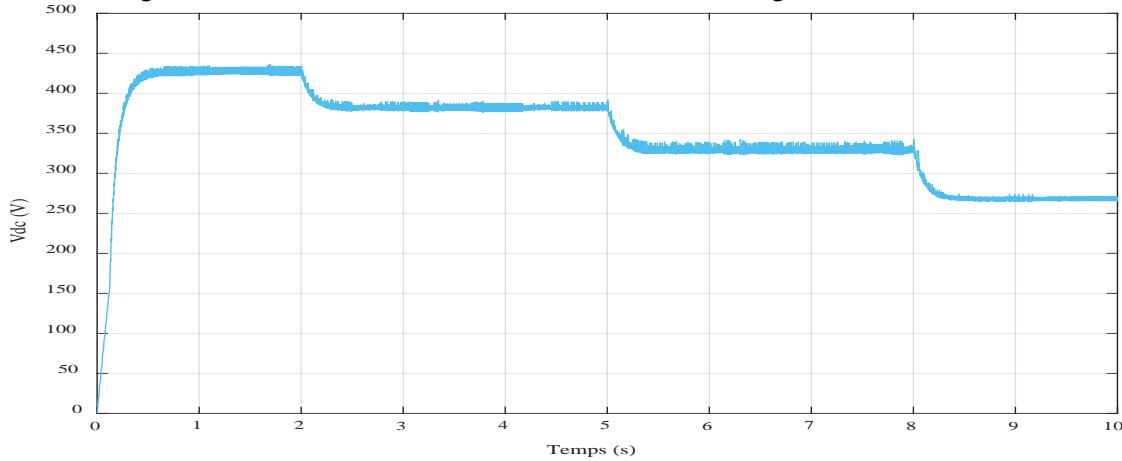


Figure 4.11 : Allure de  $V_{dc}$  avec changement d'éclairement.

En ce qui concerne la vitesse du moteur asynchrone, la vitesse de référence du moteur varie en fonction de la puissance de sortie du PVG qui est utilisée pour calculer la vitesse optimale, celle-ci est ensuite utilisée comme vitesse de référence pour la motopompe. On constate d'après la figure 4.12 que la vitesse du moteur suit parfaitement sa vitesse de référence sans dépassement quand le GPV est soumis à un niveau fixe de l'irradiation et une fois que l'irradiation diminue la vitesse à son tour diminue et plus particulièrement aux faibles irradiations suivant sa référence, figure 4.13 , on peut remarquer que le bon suivi de la vitesse a également entraîné un bon suivi de la puissance photovoltaïque d'où un transfert de puissance maximum vers la pompe à eau. L'efficacité des stratégies de contrôle apparaît clairement, ils donnent performance et robustesse au système proposé et permet d'atteindre rapidement le débit de pompe souhaité.

**Tableau 4.3** Variation du rapport cyclique  $\alpha$  en fonction de l'irradiation.

Irradiance	1000 (w/m <sup>2</sup> )	800 (w/m <sup>2</sup> )	600 (w/m <sup>2</sup> )	400 (w/m <sup>2</sup> )
V <sub>PV</sub> (V)	152	150	149	148
V <sub>DC</sub> (V)	428	380	335	265
$\alpha$	0.64	0.6	0.55	0.44

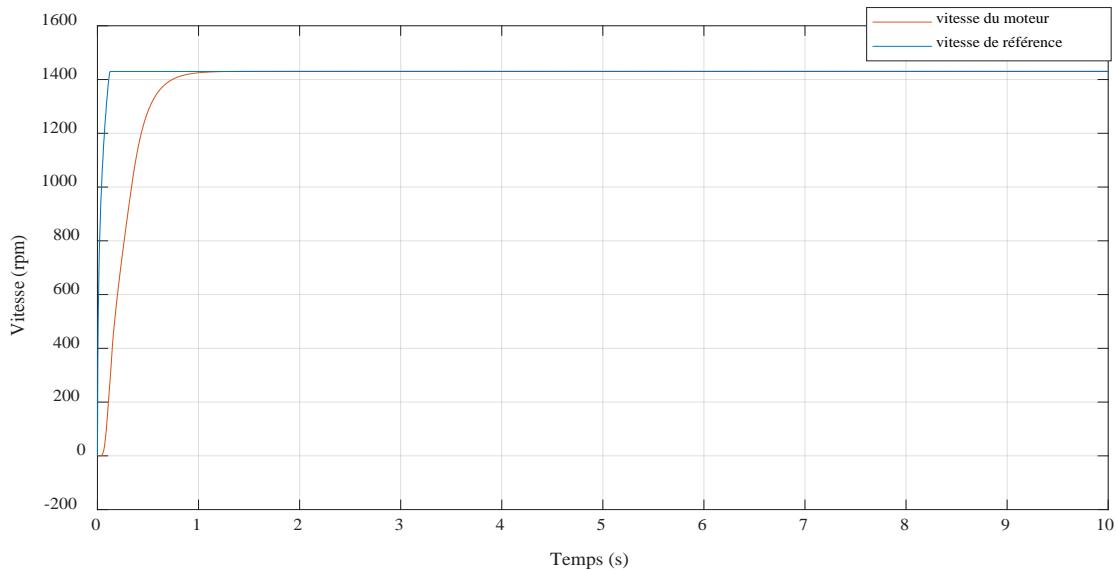


Figure 4.12 : Allure de la vitesse sans changement d'irradiation.

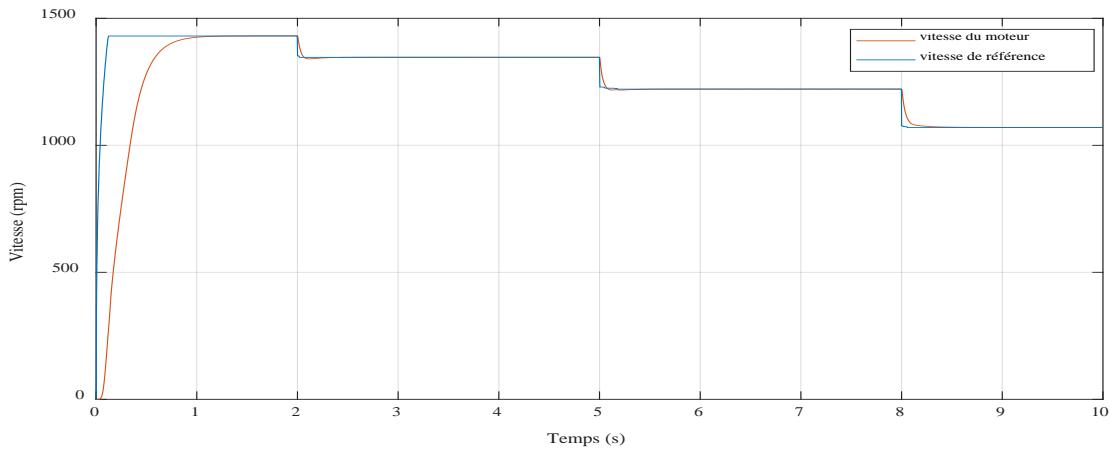


Figure 4.13 : Allure de la vitesse avec changement d'irradiation.

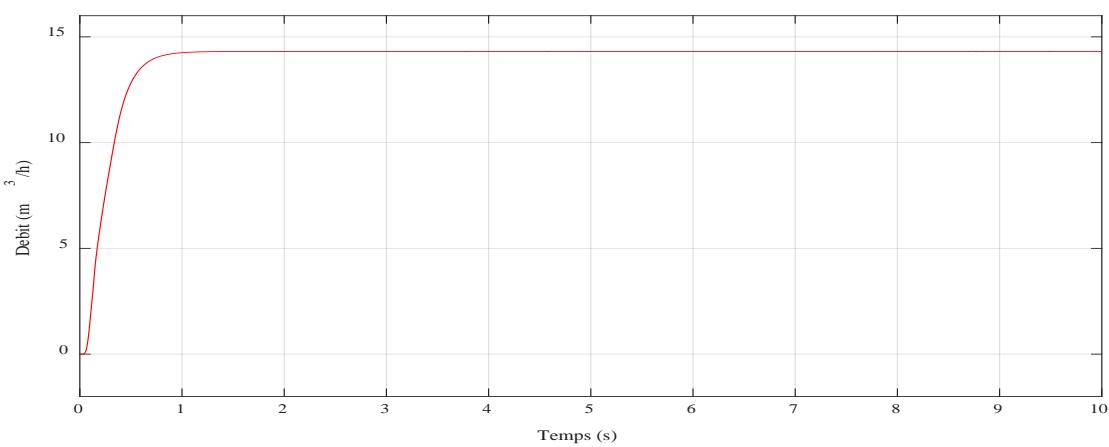


Figure 4.14 : Allure du débit de la pompe sans changement d'irradiation.

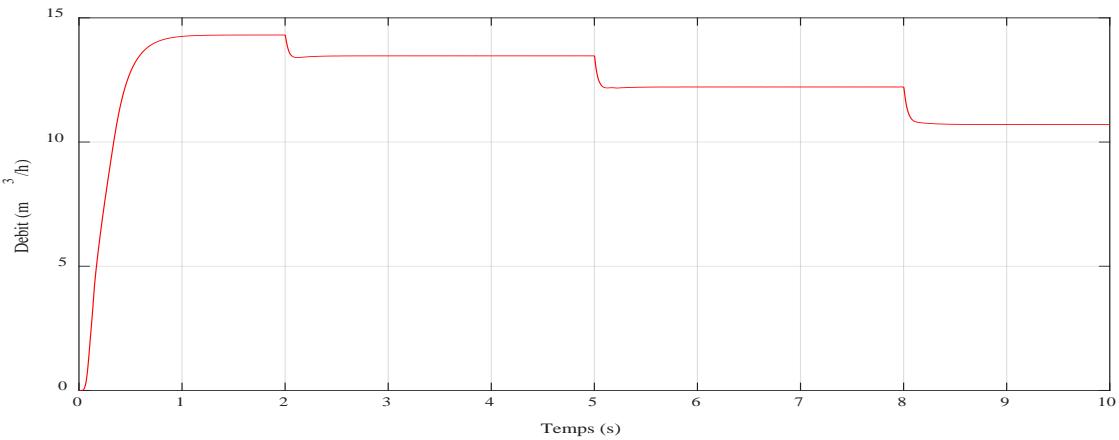


Figure 4.15 : Allure de débit de la pompe avec changement d'irradiation.

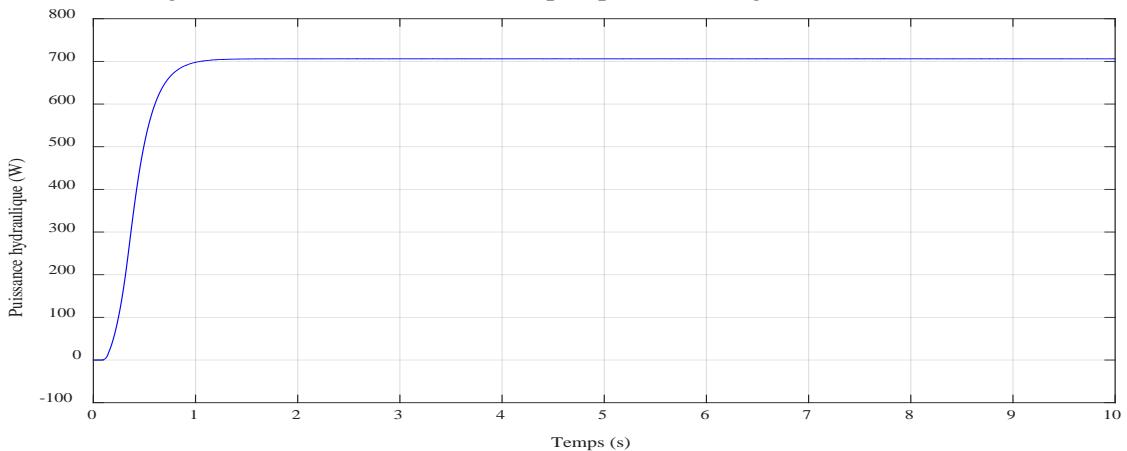


Figure 4.16 : Allure de La puissance hydraulique sans changement d'irradiation.

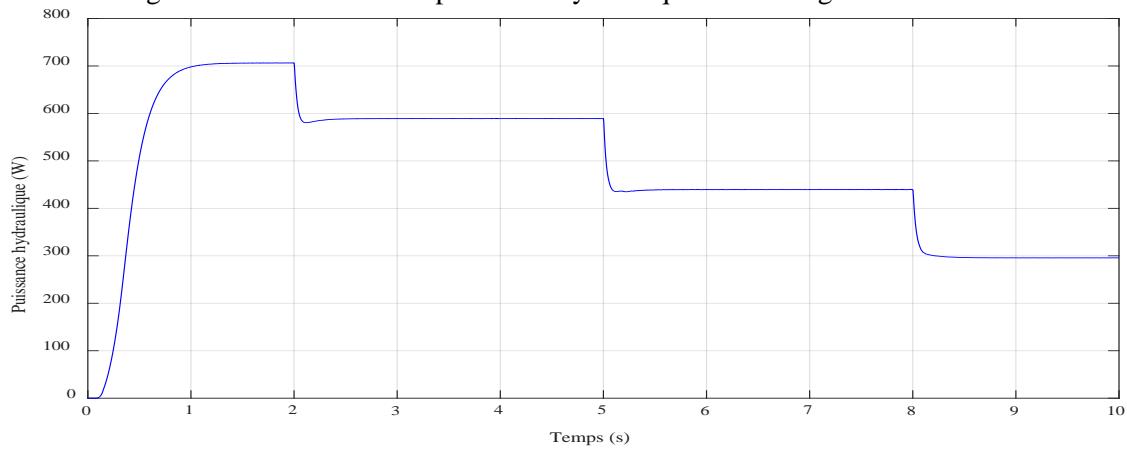


Figure 4.17 : Allure de La puissance hydraulique avec changement d'irradiation.

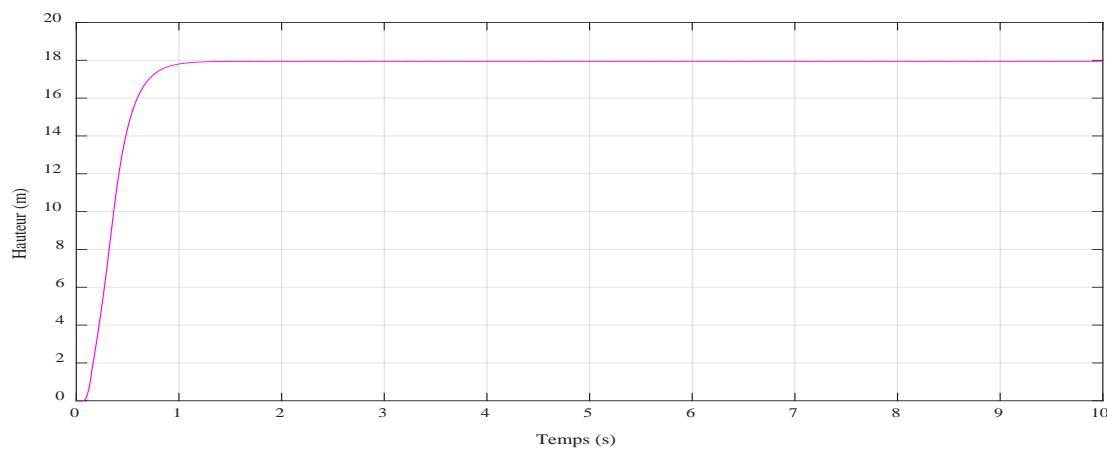


Figure 4.18 : Allure de la HMT en fonction du temps sans changement d'irradiation.

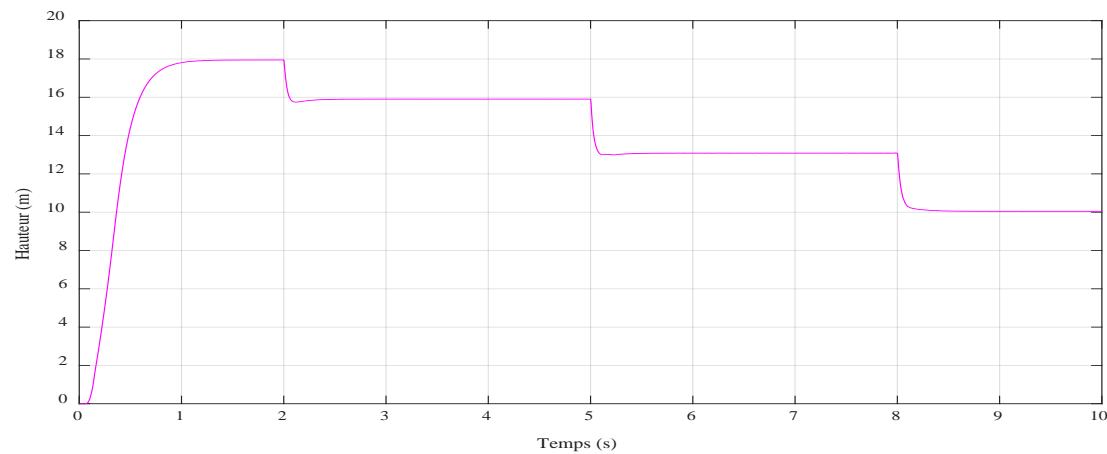


Figure 4.19 : Allure de la HMT en fonction du temps avec changement d'irradiation.

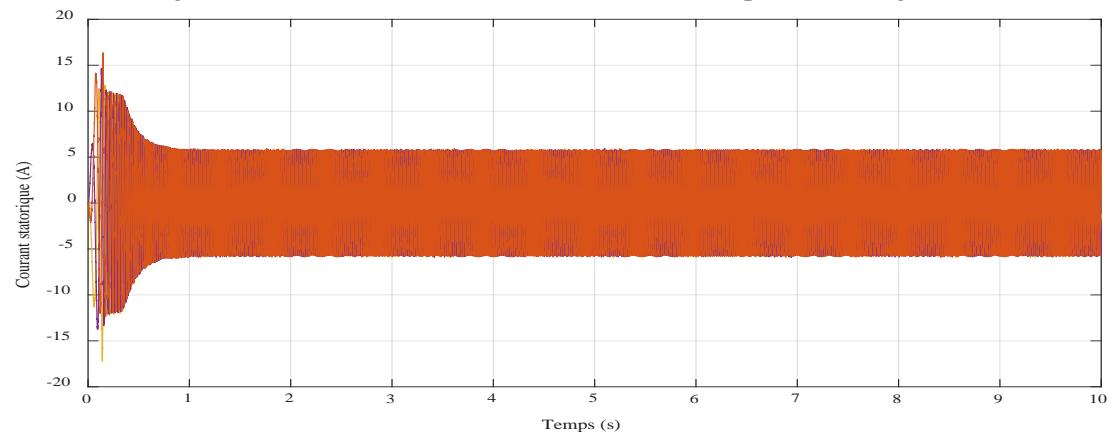


Figure 4.20 : Allure du courant en fonction du temps sans changement d'irradiation.

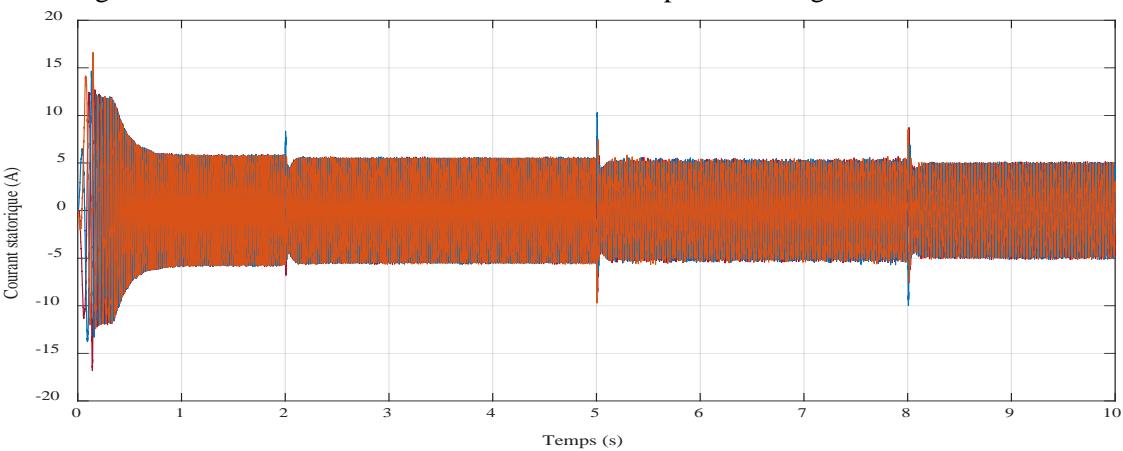


Figure 4.21 : Allure du courant en fonction du temps avec changement d'irradiation.

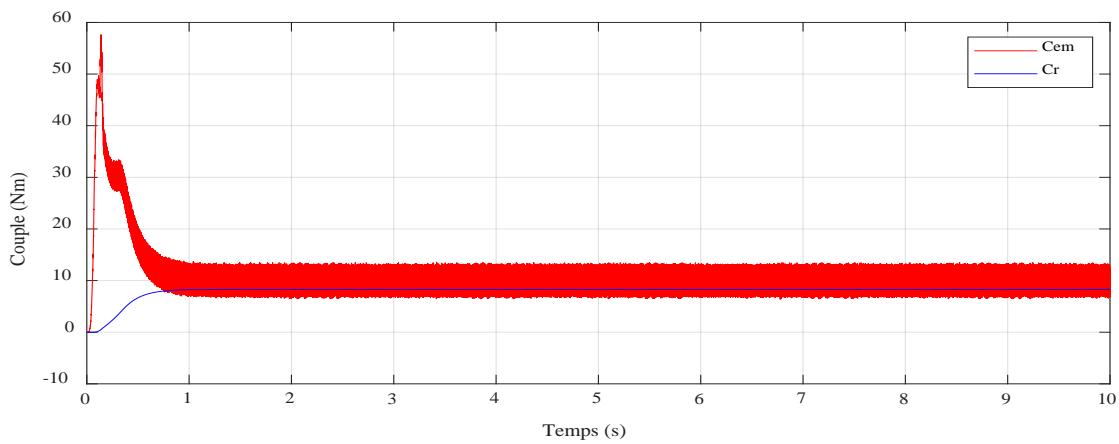


Figure 4.22 : Allure du couple électromagnétique et couple résistant en fonction du temps sans changement d'irradiation.

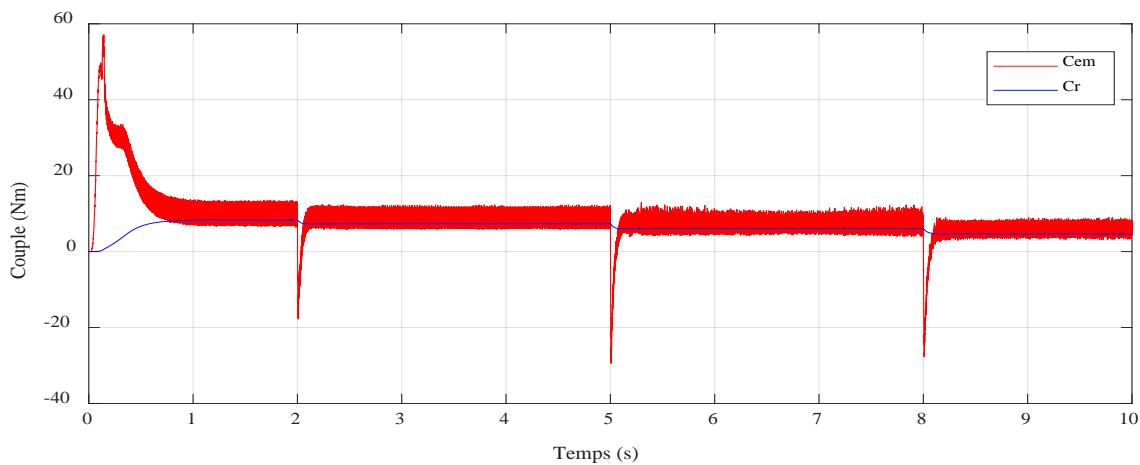


Figure 4.23 : Allure du couple électromagnétique et couple résistant en fonction du temps avec changement d'irradiation.

En ce qui concerne les paramètres hydrauliques de la pompe à savoir : la puissance hydraulique et le débit représentées par les figures 4.15 et 4.17 respectivement, Il est clair que le débit et la puissance hydraulique diminuent sensiblement avec la diminution de l'éclairement et on a remarqué également quand la puissance hydraulique a diminué avec la diminution de HMT, le débit est resté constant.

Il est à noter, à l'éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ , HMT à 18 m et le débit de  $14\text{m}^3/\text{h}$ , nous avons effectivement obtenu la puissance hydraulique approximative de 705 W calculée auparavant et cela évidemment justifie notre bon système basé sur l'algorithme P&O.

Les figures 4.20, 4.22 représentent les courants statoriques et le couple Cem et Cp respectivement. D'après les figures 4.21 et 4.23, on remarque que lorsque l'irradiation G diminue, les courants statoriques et le couple électromagnétique diminuent. La commande vectorielle a assuré que pour un éclairement variable, le couple du moteur est égal à celui du besoin de la pompe.

Le tableau 4.4. Résume la réponse des paramètres de la pompe selon le niveau de l'éclairement :

**Tableau 4.4** La réponse des paramètres de la pompe selon la variation de l'irradiance.

Irradiance	1000 (w/m <sup>2</sup> )	800 (w/m <sup>2</sup> )	600 (w/m <sup>2</sup> )	400 (w/m <sup>2</sup> )
P <sub>hyd</sub> (w)	705	589	440	295
Q(m <sup>3</sup> /l)	14	13.5	12.3	10.8

Le tableau 4.5. Résume la réponse des paramètres de la pompe selon la variation de la hauteur pour une irradiance constante 1000 (w/m<sup>2</sup>)

**Tableau 4.5** La réponse des paramètres de la pompe selon la variation de la hauteur.

H (m)	18	14	10	6
P <sub>hyd</sub> (w)	705	551	393	236
Q(m <sup>3</sup> /l)	14	14	14	14

#### 4.7. Conclusion :

L'objectif de notre étude est la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil basé sur un moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge qui aspire l'eau pour remplir un réservoir.

La puissance extraite des générateurs photovoltaïques varie pendant la journée, alors que le pompage de l'eau comme le stockage ne doit être fait que durant une période limitée de la journée. Il est nécessaire d'installer un système de gestion du pompage et de la consommation de l'eau durant les périodes les plus favorables.

Dans ce chapitre, nous avons traité le dimensionnement de l'installation de pompage, ensuite nous avons présenté les résultats de simulation du système de pompage complet en l'optimisant avec la commande MPPT ou on a choisi la méthode P&O dans notre étude, et dans le but d'avoir un débit réglable, nous avons choisi la commande vectorielle indirecte associé avec un régulateur de vitesse IP avec Anti-Windup. L'avantage de cette méthode est qu'elle a une mise en œuvre simple et une réponse dynamique rapide. Les résultats de simulation obtenus montrent que la vitesse de la machine d'entraînement de la pompe suit bien la valeur de consigne qui varie en fonction de la puissance de sortie du PVG pour assurer un transfert de puissance maximum vers la pompe et par conséquent le débit d'eau désiré.

Les résultats de simulation montrent la robustesse du système de pompage photovoltaïque choisi et la simplicité de la commande utilisée.

---

## Conclusion générale

Dans le cadre de l'étude de notre mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème influence de l'ombrage complet sur le système de pompage photovoltaïque en boucle fermée . Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme MPPT statique à base de P&O via un convertisseur DC/DC boost pour obtenir le point de puissance maximale, un groupe motopompe et un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge. Le moteur de notre pompe solaire fonctionnera au fil du soleil. Ensuite nous avons appliqué une commande vectorielle indirecte afin d'avoir un débit réglable, et étudier le contrôle de la motopompe, afin d'amener des meilleures performances à notre système de pompage.

Le premier chapitre a traité des généralités sur des différents types des panneaux photovoltaïques, le modèle de l'éclairement, l'effets des paramètres climatiques (température , éclairement) sur la sortie du panneau et le différent branchement des panneaux (série et parallèle).

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les convertisseurs statiques, d'abord les DC/DC (hacheurs) avec la modélisation mathématique et sa commande MPPT (perturbé&observé).

Le troisième chapitre a traité la commande vectorielle indirecte qui améliorera les performances de notre moteur asynchrone, responsable de l'entrainement de la pompe centrifuge.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous avons étudié le système de pompage photovoltaïque global en boucle fermée avec simulation sous Matlab Simulink.

Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité de la commande MPPT à base de P&O choisie. On a constaté que la variation de l'irradiation (ombrage complet) sur le système de pompage est plus particulièrement aux basses irradiations, la puissance hydraulique diminue considérablement ainsi que le débit. De plus, une évaluation de la commande vectorielle indirecte a réussi à réguler la vitesse du moteur asynchrone. Notre système a bien réagi et les résultats de simulations sont très satisfaisants qui s'accordent parfaitement avec la théorie et les calculs établis sont bien respectés.

---

Comme perspective, nous souhaitons la continuité de ce travail en tenant compte de l'ombrage partiel pour atténuer les conséquences de l'ombrage complet sur les performances du générateur photovoltaïque et plus précisément sur le système de pompage photovoltaïque.

# Annexe A

## A.1. Modèle triphasé de la machine asynchrone

### A.1.1 Les équations électriques réelles de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Les équations de tension des phases statoriques et rotoriques s'écrivent pour le stator [Ame-12]:

- **Pour stator**

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (A.1)$$

- **Pour rotor**

$$\begin{cases} v_{ra} = 0 = R_r i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ v_{rb} = 0 = R_r i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ v_{rc} = 0 = R_r i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (A.2)$$

Ce qui peut se résumer sous la forme matricielle par :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] = 0 = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \end{cases} \quad (A.3)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ [V_r] &= \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Et :

$[V_s] = [v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}]^T$  : Vecteur des tensions instantanées des phases a, b et c statoriques.

$[I_s] = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$  : Vecteur des courants instantanées des phases a, b et c statoriques.

$[\phi_s] = [\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}]^T$  : Vecteur des flux instantanées des phases a, b et c statoriques.

$[V_r] = [v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}]^T$  : Vecteur des tensions instantanées des phases a, b et c rotoriques.

$[I_r] = [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T$  : Vecteur des courants instantanées des phases a, b et c rotoriques.

$[\phi_r] = [\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}]^T$  : Vecteur des flux instantanées des phases a, b et c rotoriques.

$R_s$  et  $R_r$  : Résistance d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

### A.1.2. Les équations Magnétiques (la relation entre le flux et courant)

Pour le stator et rotor :

$$\begin{aligned} [\phi_s] &= [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\phi_r] &= [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \\ [L_{ss}] &= \begin{bmatrix} l_{ss} & m_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & l_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & m_{ss} & l_{ss} \end{bmatrix} \text{ Et } [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_{rr} & m_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & l_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & m_{rr} & l_{rr} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Où la matrice des inductances statoriques et rotoriques est donnée par :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = m_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Avec :

$l_{ss}$ ,  $l_{rr}$  : Inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement ;

$m_{ss}$ ,  $m_{rr}$  : Inductances mutuelles entre deux phases statorique et entre deux phases rotorique, respectivement ;

$m_{sr}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique ;

En raisonnant sur les équations de tensions statoriques et rotoriques ainsi que sur l'expression des flux magnétiques qui traversent ces phases, nous obtenons les équations matricielles des tensions de phases :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][I_r] \} \\ [V_r] = 0 = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}][I_{rr}] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_s] \} \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

### A.1.3. L'équation Mécanique

L'équation mécanique s'écrit par la relation suivante :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + f \cdot \omega \quad (\text{A.7})$$

### A.2. Modélisation diphasée de la machine asynchrone

#### A.2.1. Définition

La transformation de PARK permet de changer un système triphasé ( $a, b, c$ ) vers un système biphasé ( $d, q$ ). Cette transformation s'applique sur les courants, les tensions et les flux à travers un changement de variables faisant intervenir l'angle  $\theta$  de rotation électrique entre l'axe  $d$  du repère diphasé et le repère fixe lié à la phase du stator.

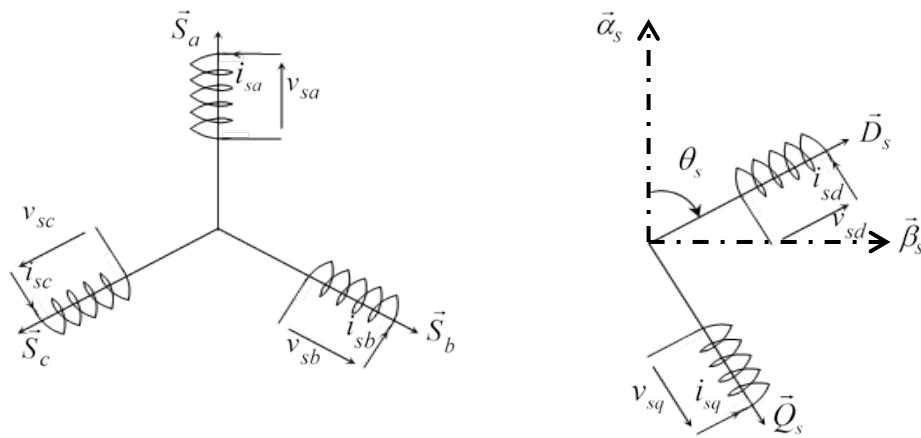


Figure A.1 : Repérage angulaire du système d'axes ( $d, q$ ) associé au stator de la MAS.

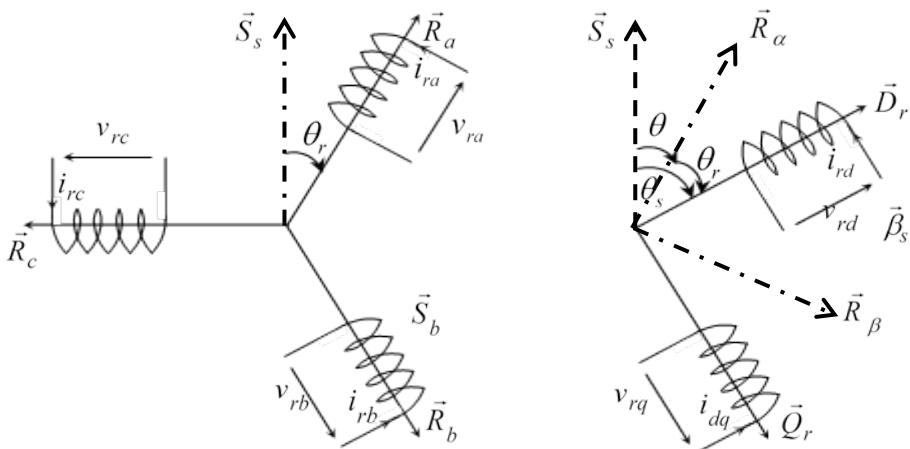


Figure A.2 : Repérage angulaire du système d'axes ( $d, q$ ) associé au rotor de la MAS.

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Le changement des variables (tensions, courants, flux) est défini par la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [p(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

### A.2.2. Choix de référentiel de Park

Suivant la constitution et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone, nous trouvons trois choix utiles pour le référentiel ( $d - q$ ) :

- **Référentiel fixe au stator** (référentiel stationnaire  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$ ) : Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.
- **Référentiel fixé au rotor** (référentiel tournant  $\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \theta_S = \theta = \omega = P \cdot \Omega$ ) : Ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires.
- **Référentiel fixé au champ tournant statorique** (référentiel tournant à la vitesse de pulsation statorique  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ ) : Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude et la synthèse des lois de commande. Les axes sont désigné par ( $d - q$ ). C'est ce dernier référentiel que nous allons utiliser en vue de l'étude de la commande vectorielle à flux statorique orienté. Ce choix permet de définir une pulsation de glissement  $\omega_g = \omega_s - \omega_r$ .

### A.2.3. Modèle diphasé de la asynchrone

#### A.2.3.1. Equations électriques

D'après la transformation de Park et en appliquant la loi des mailles aux composantes des vecteurs statoriques et rotoriques dans le repère tournant, on trouve le système d'équations (A.11) qui

représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère  $(d, q)$  lié de champ tournant.

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

### A.2.3.2. Equations électromagnétiques

De la même manière, nous obtenons les expressions des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

Où  $L_s$  et  $L_r$  sont respectivement les inductances statorique et rotorique, et  $L_m$  est l'inductance mutuelle statorique et rotorique.

Les expressions des courants en fonctions des flux sont comme suit :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{sd} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{rd} \\ i_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{sq} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{rq} \\ i_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{rd} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{sd} \\ i_{rq} = \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{rq} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{sq} \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

$$L_s = I_{ss} - m_{ss}, L_r = I_{rr} - m_{rr}, L_m = \frac{3}{2} m_{sr} \quad (\text{A.14=})$$

### A.2.3.3. Le couple électromagnétique

Aux équations précédentes, il faut ajouter l'équation générale du couple électromagnétique qui peut être dérivée de l'expression de la Co-énergie et qui s'exprime par:

$$C_{em} = [I_s]^T \left\{ \frac{d}{dt} [L_m] \right\} [I_r] \quad (\text{A.15})$$

Après l'application de la transformation de Park sur cette équation, nous aboutissons à l'expression :

$$C_{em} (i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}) = p \cdot L_m \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{A.16})$$

En utilisant les expressions (A.15) et (A.16), d'autres expressions du couple électromagnétique peuvent être retrouvées :

$$C_{em}(i_{sd}, i_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}) = \frac{pL_m}{L_s} (\phi_{rd}i_{sq} - \phi_{rq}i_{sd}) \quad (\text{A.17})$$

Étant donné que la fréquence des tensions statorique est imposée par le réseau électrique, celle de la pulsation des courants rotorique est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega \quad (\text{A.18})$$

#### A.2.3.4. Modèle d'état de la machine asynchrone

Nous pouvons exprimer le modèle d'état de Park de la machine asynchrone sous la forme matricielle suivante [Ame-12] :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} \phi_{rd} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega \phi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} i_{sq} - \omega_s i_{sd} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega \phi_{rd} + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} \phi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{sq} \\ \frac{d\phi_{rd}}{dt} = L_m \frac{R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{rd} + \omega_g \phi_{rq} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = L_m \frac{R_r}{L_r} i_{sq} - \omega_g \phi_{rd} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{rq} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (C_{em} - C_r) - \frac{f}{J} \cdot \omega \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

Avec :

$$C_{em}(i_{sd}, i_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}) = \frac{pL_m}{L_r} (\phi_{rd}i_{sq} - \phi_{rq}i_{sd}) \quad (\text{A.20})$$

Où :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} : \text{Est le coefficient de dispersion.}$$

#### A.3. Modélisation de l'onduleur de tension triphasé

Dans cette étude, on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. Sachant que dans un régime équilibré [Ata-19].

$$v_a + v_b + v_c = v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (\text{A.21})$$

Donc que :

$$\begin{cases} V_a = V_{an} = V_{ao} + V_{on} \\ V_b = V_{ab} = V_{bo} + V_{on} \\ V_c = V_{cn} = V_{co} + V_{on} \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

Les trois tensions composées sont données par la relation suivante:

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{A.23})$$

En faisant la somme des équations du système (A.23), on obtient:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3V_{on} = 0 \quad (\text{A.24})$$

D'où

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = -3V_{on} \quad (\text{A.25})$$

Donc :

$$V_{on} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{A.26})$$

On remplace l'équation (A.26) dans l'équation (A.24), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{A.27})$$

Dans ces conditions, on peut écrire [Sai-16] :

$$\begin{cases} V_{ao} = \frac{V_{dc}}{2} \cdot S_a \\ V_{bo} = \frac{V_{dc}}{2} \cdot S_b \\ V_{co} = \frac{V_{dc}}{2} \cdot S_c \end{cases} \quad (\text{A.28})$$

On remplace l'équation (A.27) dans l'équation (A.26), on obtient les tensions aux bornes de la machine (la charge), qui sont données par la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.29})$$

Le courant d'entrée de l'onduleur est donnée par :

$$i_c = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{A.30})$$

---

## Annexe B

### B. 1.paramètres des régulateurs pour la commande vectorielle indirecte :

<b>Régulateur PI des courants statoriques</b>	
$K_{p,isq}$ , $K_{p,isd}$	9.4051
$K_{i,isq}$ , $K_{i,isd}$	1583.9

<b>Régulateur PI de la vitesse de rotation</b>	
$K_{p,\omega}$	5.5800
$K_{i,\omega}$	310

---

# *Bibliographie*

## Bibliographie

- [1] S. Boukebbous, D. Kerdoun, N. Benbaha, H. Ammar, A. Boutadara , "Effet de l'ombrage sur un système de pompage Photovoltaïque" . International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), pp. 14-20.2016.
- [2] N. H. Selman, J. R. Mahmood, "Comparison Between Perturb & Observe, Incremental Conductance and Fuzzy Logic MPPT Techniques at Different weather conditions". International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 5(7), 12556-12569. 2016.
- [3] H.Othmani, H. Chaouali, D. Mezghani, et al, "Optimisation de la Technique de Perturbation et Observation par la logique floue", In 3ème conférence Internationale des énergies renouvelables CIER-2015 International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET). 2015.
- [4] MAMBRINI ,Tomas.Caraertisaton de panneaux solaires pholtovoltaïques on conditiatons réelles d'inptantation et en fonction des différentes technologies.2014.thésede doctorat.paris 11
- [5] AntonioLuque, Steven Hegedus, ' Handbook of Photovoltaic Science and Engineering', ISBN 0-471-49196-9, 2003.
- [6] Mekemecheabdelkader, 'Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes', Rapport de thèse de doctorat ,L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem,04/07/2017.
- [7] Roger a. messenger jerry ventre , 'Photovoltaic Systems Engineering' ,second editionThis edition published in the Taylor & Francis e-Library, 2005.
- [8] Paulescu, Marius, et al , 'Weather modeling and forecasting of PV systems operation', Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] L.M.Fraas, 'Low- cost solar electriquepower',springer international publishing Switzerland 2014.
- [10] David réaux 'Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-SiH/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface', Rapport de thèse de doctorat, l'université paris-sud, le 30 juin 2017.
- [11] M.Derbalet N.Debbah, « Étude et Commande d'un Système Hybride Eolien Photovoltaïque Connecté au Réseau avec Stockage. Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie » ; Mémoire d'ingénierat, École Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2013.
- [12] K.Bouziane et H.Gaddouri « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque optimisé » ; Mémoire de master .Universitie Larbi Tebessa 2017.
- [13] Ministère de l'Energie et des Mines « Guide des Energies Renouvelables », Edition 2007 Alger
- [14] 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>.
- [15] H.Benlahreche, « Etude et optimisation d'un Système de pompage Photovoltaïque» ;Mémoire de master,Université Mentouri-Constantine, 2012.
- [16] Zegrarmansour, ' Optimisation de l'association gpv- onduleur multi niveau',rapport de thèse de doctorat , Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016 / 20 17.
- [17] M. Angel Cid Pastor, ' Conception et réalisation de modules photovoltaïques, , Rapport de thèse de doctorat , l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,29 septembre 2006.
- [18] Abderrezekmahfoud, 'Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement, Rapport de thèse de doctorat ? L'université de Sétif 1, le 18/02/2015.
- [19] Mohamed Ansoumane Camara, ' Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs', rapport de thèse dedoctorat, l'université Paris Est Créteil, 4 juillet 2011.
- [20] Meekhun, Dariga. Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonome pour l'application aéronautique. Diss. INSA de Toulouse, 2010.
- [21] Sahin, Mustafa Ergin, and Halil İbrahim okumuş,'Physical structure, electrical design, mathematical modeling and simulation of solar cells and modules', Turkish Journal of

- Electromechanics and Energy 1.1 (2016).
- [22] Omar ibrahimElmi, 'Nouvelles structurez de cellules solaires à base de silicium : Texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une couche Down-Conversion', rapport de thèse dedoctorat, L'université de Lille 1,Le30 Mars 2017.
  - [23] Bagher, Askari Mohammad, Mirzaei Mahmoud AbadiVahid, and MirhabibiMohsen, 'Typesof solar cells and application', American Journal of optics and Photonics 3.5 (2015): 94-113.
  - [24] Bellia, Habbati, RamdaniYoucef, and Moulay Fatima , 'A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB, 'NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics 3.1 (2014): 53-61.
  - [25] Celik, AliNaci, and Nasir Acikgoz , 'Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and five-parameter models', Applied energy 84.1 (2007): 1-15.
  - [26] Manuel Godinho Rodrigues, Eduardo, et al, 'Simulation and Comparison of Mathematical Models of PV Cells with Growing Levels of Complexity', Energies 11.11 (2018): 2902.
  - [27] Brahamiimensouhilaepousebousmaha , 'Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires', rapport de thèse de doctorat ,L'universitédjillalilabes de sidi-bel-abbes, En 2018.
  - [28] Mohamed Arrouf, ' Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompebranche sur un générateurphotovoltaïque', rapport de thèse de doctorat, l'universitémentouri de Constantine, le 25/12/2007.
  - [29] Jimmy Royer, Thomas Djiaiko,Eric Schiller et BocarSadaSy, 'Le Pompage Photovoltaïque', Publ. en collab. avec : IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA,ISBN 2-89481-006-7.
  - [30] Mohamed Djarallah, ' Contribution a l'étude des systèmesphotovoltaïquesrésidentiels couples au réseauélectrique', rapport de thèse de doctorat, l'université de Batna, le 16 / 01 /2008.
  - [31] Abdelkader Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n, Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.
  - [32] Muhammad Harunur Rashid," Power Electronics : Circuits, Devices an Applications", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersy 07632, 2004.
  - [33] B.K. Bose,« Power Electronics and AC drives», Prentice-Hall, Inc. 1986, pp-402.
  - [34] Séguier. G, Francis. L, and Philippe. D, 'Electronique de puissance'. Edition DUNOD.1999.
  - [35] Masri. S, and Chan. P.W, 'Design and development of a dc-dc Boost converter with constant output voltage'. In Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), International Conference on (pp. 1-4).IEEE.2010.
  - [36] Salas. V, Olias. E, Barrado. A, and Lazaro. A, 'Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems '.Solar energy materials and solar cells 90.11: 1555-1578. 2006.
  - [37] Ayache. Z, Bendaoud. A, Slimani. H, Benazza. B, Miloudi. H, and Bentaallah. A, 'Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque par la logique floue'. International Conference on Electrical Networks (ICEN), Sidi Bel-Abbès. 2010.
  - [38] Alsumiri. M. A, Jiang. L, and Tang. W. H , 'Maximum power point tracking controller for photovoltaic system using sliding mode control'. 7-3.2014.
  - [39] Singh. S, Mathew. L, and Shimi. S. L, 'Design and simulation of intelligent control MPPT technique for PV module using MATLAB/SIMSCAPE'.Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng 2: 4554-4566.2013.
  - [40] Abbes. H, Abid. H, Loukil. K, Toumi. A, and Abid. M, 'Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque'. Revue des Energies Renouvelables 17.3: 435-445.2014.
  - [41] Tumma, A, and Balasubramanian. V.G , 'Study on using maximum power point algorithms to improve the efficiency of solar energy storage for unmanned aerial vehicles'. International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication 1.8 2: 49-54.2013.

- [42] Cabal. C, ' Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque'. Rapport de thèse, université de Toulouse 3-Paul Sabatier. 2008.
- [43] Faranda. R, and Leva. S, 'Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems', WSEAS transactions on power systems 3.6: 446-455.2008.
- [44] Ngan. M. S, and Tan. C. W, 'A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems.IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC) (pp. 22-27). 2011.
- [45] Amer, M «commande vectorielle indirect sans capteur mécanique d'un moteur asynchrone avec la contribution d'un estimateur flou de la résistance statorique», Université Dr, Moulay Tahar à Saida, Soutenue 2012.
- [46] Mesai, A, Kais, N «Commande de la machine asynchrone à double alimentation apport des techniques de l'intelligence artificielle», Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, Soutenue le juin 2017.
- [47] Hasse, K « Zur dynamik drehzahlgeregelter antriebe mit stromrichtegespeisten asynchron-kurzschlusslaufer-machinen », Ph. D. Dissertation, TH Darmstadt, 1969.
- [48] **Atallah, M et Kharoub, B** «Gestion des puissance active et reactive dans une ferme éolienne au vu de intégration dans le réseau électrique», universite Dr Moulai tahre de Saida,Soutenu le 04/07/2019.
- [49] Chouder, A «Modèle de simulation d'une commande en temps réel d'un onduleur de tension triphasé», Rev, Energy, Ren : Valorisation (1999) 131-135.
- [50] Bousehaba, M «Réalisation d'une commande MLI à choix multiple», Université Abou Bekr Belkaide de Tlemcen, Soutenu publiquement le 28 Juin 2017.
- [51] Tarak, G «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 29/09/2011.
- [52] Hadji, kh et Smail, S «Etude et modélisation d'un convertisseur triphasé AC/DC commande par la technique MLI», Université Dr Moulay Tahar de Saïda, Soutenu le 05/06/2017.
- [53] Miloud, Y, Hartani, K «Control strategy for three phase voltage source PWM rectifier based on the space vector modulation» Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol, 10, N°3, pp, 61-65, August 2010.
- [54] Mokrane, S « Modélisation et commande d'un aérogénérateur a machine asynchrone double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération», Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, Août 2013.
- [55] Megharbi, H et Hamri, S «Etude et modélisation des convertisseurs statiques destinés à améliorer la qualité de l'énergie électrique», Soutenu le 19/06/2016.
- [56] Caron, J. P. et Hautier, J. P «Modélisation et commande de la Machine asynchrone », Edition Technip, 1995.
- [57] Seguier, G et Notelet, F « Electrotechnique industrielle », Edition Technique et doc, Lavoisier, 1994.
- [58] Peng, F.Z "Speed and flux sensorless field oriented control of induction motors for electrics vehicles", Proceeding of IEEE applied power electronics conference and exposition, APEC 00, Vol-1, PP.133-139, 6-10 feb 2000.
- [59] C. M. R. Oliveira, M. L. Aguiar, J. R. B. A. Monteiro, W. C. A. Pereira, G. T. Paula & T. E. P.Almeida, "Vector Control of Induction Motor Using an Integral Sliding Mode Controller with Antiwindup", Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Vol. 27, No. 2, pp. 169–178, 2016.
- [60] J. Espina, A. Arias, J. Balcells & C. Ortega, "Speed Anti-Windup PI strategies review for Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Machines", 2009 Compatibility and Power Electronics, Badajoz, 2009, pp. 279–285.
- [61] A.Shyam, & JL, F. D, "A comparative study on the speed response of BLDC motor using conventional PI controller, anti-windup PI controller and fuzzy controller". In 2013 International Conference on Control Communication and Computing (ICCC),IEEE. December .2013. pp. 68-73
- [62] M.Degla et B.Ben Ahmed, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque » ; Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.

- 
- [63] F.Bendioudi et F.Lakhdari, « Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries » ; Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa,
  - [64] F.Bendioudi et F.Lakhdari, « Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries » ; Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2014.