

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
N° : ER-06



DOMAINE :SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE  
OPTION : COMMANDE ELECTRIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

SEGHIRI Abdelghani

KADRI Nadji

**Intitulé**

***Etude d'un système de pompage photovoltaïque à  
base d'une MSAP commandé par une nouvelle  
technique MPPT GSS***

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr. BENGUESMIA Hani	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. DJRIOU Salim	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. ROUABHI Riyadh	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	S.Rapporteur
Dr. HERIZI Abdelghafour	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2019/ 2020**

# REMERCIEMENTS

Tout d'abord et premier , on tient à remercier Dieu de nous avoir permis de terminer ce modeste travail dans de bonnes conditions.

Et nous tenons surtout à exprimer nos chaleureux remerciements à **Mr DJRIOU Salim & Mr ROUABHI Riyadh**, nos encadreurs sur ce modeste travail pour nous avoir proposés un sujet de mémoire si intéressant et pour avoir spontanément encouragés. Nous profitons de ces quelques lignes pour les remercier pour l'ensemble de cette année d'encadrement passionné avec grand professionnalisme, rigueur et gentillesse, en tant qu'enseignants d'abord, en tant que précieux conseillers lors de notre recherche sur le sujet de mémoire et bien-sûr en tant que frères, pour leur grandes qualités pédagogiques, scientifiques et humaines ainsi que les remarques judicieuses, leur soutien, et disponibilité. On ne peut nous en passer sans leur demander un grand *Pardon* pour tous les samedis ratés en famille pour être avec nous afin qu'on puisse finaliser au mieux ce travail. *Merci Riyadh & Salim.*

Nous tenons aussi à remercier le président et les membres du juré de ce mémoire d'avoir acceptés de siéger à notre soutenance. On profite également pour remercier tous ceux qui, de près comme de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

# SOMMAIRE

---

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

### **CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.**

<b>I.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 APERÇU SUR LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>4</b>
I.2.1 Systèmes de pompage au fil du soleil .....	4
I.2.2 Systèmes de pompage avec stockage électrochimique (batteries) .....	5
I.2.3 Avantages et inconvénients des systèmes de pompage photovoltaïque.....	6
<b>I.3 PRINCIPAUX COMPOSANTS D’UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE AU FIL DU</b>	
<b>SOLEIL</b>	<b>7</b>
I.3.1 Aperçu sur la source de système de pompage photovoltaïque au fil du soleil.....	7
I.3.1.1 L’énergie solaire et l’énergie solaire en L’algérie .....	8
I.3.1.2 La conversion photovoltaïque.....	9
I.3.1.3 Les différents types de système photovoltaïque .....	11
I.3.1.4 Fonctionnement d’un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale...13	
I.3.1.5 Avantages et inconvénients d’un système photovoltaïque .....	14
I.3.2 Aperçu sur la machine utilisée dans le système de pompage photovoltaïque au fil du	
soleil	15
I.3.2.1 Description de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents	15
I.3.2.2 Les différentes configurations de la machine synchrone à aimants permanents	16
I.3.2.3 Les applications des machines synchrone à aimants permanents .....	18
I.3.2.4 Avantages et inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents ...	18
I.3.3 Aperçu sur les convertisseurs utilisés dans le système de pompage photovoltaïque	
au fil du soleil	19
I.3.3.1 Les convertisseur DC/DC (hacheur) .....	19
I.3.3.2 Les convertisseur DC/AC (Onduleur).....	23
I.3.4 Aperçu sur les pompes utilisées dans le système de pompage photovoltaïque au fil du	
soleil	24

# SOMMAIRE

---

I.3.4.1	La pompe centrifuge .....	24
I.3.4.2	La pompe volumétrique .....	25
I.3.4.3	Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique .....	27
<b>I.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>28</b>

## CHAPITRE II : MODELISATION DE LA CHAINE DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.

<b>II.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>29</b>
<b>II.2</b>	<b>MODELISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE .....</b>	<b>30</b>
II.2.1	Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	30
II.2.1.1	Modèle à une diode sans résistance shunt :(Cellule idéale) .....	30
II.2.1.2	Modèle à une diode :(Cellule réelle) .....	31
II.2.2	Modèle d'un GPV .....	33
II.2.2.1	Modélisation sous Simulink .....	33
II.2.2.2	Caractéristique tension-courant d'un GPV .....	33
II.2.2.3	Caractéristique puissance-courant d'un GPV .....	34
II.2.2.4	Association des cellules photovoltaïque en parallèle .....	34
II.2.2.5	Association des cellules photovoltaïque en serie .....	35
II.2.2.5.1	Effet de l'éclairement .....	36
II.2.2.5.2	Effet de la température.....	37
<b>II.3</b>	<b>MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHROME A AIMANTS PERMANENTS .....</b>	<b>38</b>
II.3.1	Hypothèses simplificatrices .....	38
II.3.2	Equations mathématiques de la MSAP dans le repère (abc).....	39
II.3.2.1	Equations électriques .....	39
II.3.2.2	Equations magnétiques .....	40
II.3.2.3	Equations mécaniques .....	40
II.3.3	Transformation de Park .....	41
II.3.4	Equations mathématiques de la MSAP dans le repère (dq) .....	42
II.3.4.1	Equations électriques .....	42
II.3.4.2	Equations magnétiques .....	42
II.3.4.3	Expression de la puissance et du couple électromagnétique .....	42
II.3.5	Choix de repère de référence de Park .....	43
II.3.6	Modèle d'état de la MSAP .....	44

# SOMMAIRE

---

<b>II.4</b>	<b>MODELISATION ET COMMANDE DES CONVERTISSEURS UTILISEES .....</b>	<b>46</b>
II.4.1	Modélisation et technique de commande du convertisseur côté machine.....	46
II.4.1.1	Modélisation du convertisseur côté machine.....	46
II.4.1.2	Commande par modulation de largeur d’impulsion .....	48
II.4.2	Modélisation du convertisseur côté PV (hacheur) .....	50
II.4.2.1	Représentation d’un hacheur survolteur .....	51
II.4.2.2	Modélisation d’un hacheur survolteur .....	51
<b>II.5</b>	<b>MODELISATION DE LA POMPE CENTRIFUGE .....</b>	<b>54</b>
II.5.1	La caractéristique Q (H) de la pompe: .....	56
II.5.2	La caractéristique couple vitesse C ( $\omega$ ) de la pompe .....	56
II.5.3	Calcul de puissance .....	56
II.5.4	Calcul du rendement.....	57
<b>II.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>58</b>

## CHAPITRE III : COMMANDE ET OPTIMISATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.

<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>59</b>
<b>III.2</b>	<b>DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>60</b>
III.2.1	Les critères de choix.....	60
III.2.1.1	Evaluation des besoins en eau .....	60
III.2.1.2	Calcul de l’énergie hydraulique nécessaire .....	60
III.2.1.3	Détermination de l’énergie solaire disponible.....	61
III.2.1.4	Choix des composants .....	62
III.2.2	Dimensionnement de la pompe centrifuge.....	62
III.2.3	Dimensionnement du champ photovoltaïque .....	62
<b>III.3</b>	<b>Commandes d’un système de pompage photovoltaïque .....</b>	<b>63</b>
<b>III.3.1</b>	<b>Commandes de la source du système de pompage (générateur photovoltaïque).....</b>	<b>63</b>
III.3.1.1	Aperçu sur la technique d’extraction du maximum de la puissance (MPPT).....	63
III.3.1.1.1	Historique .....	63
III.3.1.1.2	Principe du la technique d’extraction du maximum de la puissance (MPPT)	63
III.3.1.2	Les Algorithmes de commande MPPT appliqués .....	65
III.3.1.2.1	La commande ‘‘Perturbation et Observation’’ (P&O).....	65
III.3.1.2.2	La commande ‘‘Golden section search’’ (GSS).....	67

# SOMMAIRE

---

<b>III.3.2</b>	Commande de la machine utilisée dans le système de pompage (Commande vectoriel)	70
III.3.2.1	Principe de la commande vectorielle (l'orientation du flux rotorique)	70
III.3.2.2	Application de la commande vectorielle a la MSAP	70
III.3.2.3	Découplage par compensation	72
III.3.2.4	Synthèse des différents régulateurs	74
III.3.2.5	Calcul des régulateurs	75
III.3.2.5.1	Régulateur du courant	77
III.3.2.5.2	Régulation de vitesse	79
III.3.2.6	Résultats de simulation numérique (MSAP-Commande vectoriel)	81
III.3.2.7	Interprétation des résultats	83
<b>III.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>85</b>

## CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.

<b>IV.1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>86</b>
<b>IV.2</b>	Simulation de la chaine de pompage PV avec la commande perturbation /observation)	87
IV.2.1	Résultats de simulation de la commande P&O	87
IV.2.2	Interprétation des résultats	90
<b>IV.3</b>	Simulation de la chaine de pompage PV avec la commande Golden Section Search	90
IV.3.1	Résultats de simulation de la commande GSS	90
IV.3.2	Interprétation des résultats	92
<b>IV.4</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>93</b>
	<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>94</b>

## Chapitre I

Figure I.1 : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil.

Figure I.2 : Principe de fonctionnement du pompage avec stockage électrochimique.

Figure I.3 : Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque.

Figure I.4 : Zones climatiques de l'Algérie.

Figure I.5 : L'effet photovoltaïque.

Figure I.6 : Les principaux types de cellules.

Figure I.7 : Système photovoltaïque autonome.

Figure I.8 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.

Figure I.9 : Système hybride PV-Eolien.

Figure I.10 : Moteur synchrone.

Figure I.11 : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

Figure I.12 : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.

Figure I.13 : Schéma d'un quadripôle électrique.

Figure I.14 : périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

Figure I.15 : Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost).

Figure I.16 : Le schéma de principe du hacheur série.

Figure I.17 : Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle.

Figure I.18 : Pompe centrifuge.

Figure I.19 : Caractéristique d'une pompe centrifuge.

Figure I.20 : Pompe volumétrique.

Figure I.21 : Caractéristique pompe volumétrique.

## Chapitre II

- Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.
- Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.
- Figure II.3 : Caractéristique  $I(V)$  d'un GPV dans les conditions standards.
- Figure II.4 : Caractéristique  $P(V)$  d'un GPV dans les conditions standards.
- Figure II.5 : Caractéristique résultante d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle.
- Figure II.6 : Caractéristique résultante d'un groupement de  $n_s$  cellules en série.
- Figure II.7 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$
- Figure II.8 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .
- Figure II.9 : L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ .
- Figure II.10 : L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .
- Figure II.11 : Schéma de la MSAP dans le repère abc.
- Figure II.12 : Machine équivalente au sens de Park.
- Figure II.13 : Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension.
- Figure II.14 : Schéma de l'onduleur triphasé.
- Figure II.15 : Illustration de la MLI triangulé - sinusoïdale.
- Figure II.16 : Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur PV.
- Figure II.17 : Courbe  $H(Q)$  de la pompe centrifuge et la caractéristique de canalisation.

## Chapitre III

- Figure III.1 : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site d' Algérie de 2010 à 2017.
- Figure III.2 : Système photovoltaïque avec une commande MPPT.

# Liste Des Figures

---

Figure III.3 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

- a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge,
- c) suite à une variation de température.

Figure III.4 : Signe de et à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.

Figure III.5 : Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O).

Figure III.6 : Algorithme MPPT Golden Section Search (GSS).

Figure III.7(a) Suivi MPPT avec l'algorithme GSS.

Figure III.7(b):Division de l'intervalle.

Figure III.8 : GSS MPPT.

Figure III.9 : schéma bloc représentant la (MSAP) après l'orientation du flux.

Figure III.10 : Description de couplage.

Figure III.11 : Principe de découplage par compensation.

Figure III.12 : Structure générale : (machine-découplage par compensation).

Figure III.13 : Commande découplée.

Figure III.14 : Schéma bloc de la commande vectorielle avec compensation des f.é.m.

Figure III.15 : Régulateur PI.

Figure III.16 : Boucle de régulation du courant  $I_q$ .

Figure III.17 : Boucle de régulation du courant  $I_d$ .

Figure III.18 : Boucle de régulation de vitesse.

Figure III.19: Boucle de régulation de vitesse simplifiée.

## Chapitre IV

Figure IV.1 : Structure de la commande perturbation & observation de la chaîne de pompage.

# Liste Des Figures

---

Figure IV.2 : Allure de vitesse du moteur avec une consigne d'irradiation variable.

Figure IV.3 : Allure de la vitesse du moteur avec une consigne de vitesse de référence .

Figure IV.4 : Allure du couple moteur par application du couple résistive de la pompe.

Figure IV.5 : Allure du couple de la pompe.

Figure IV.6 : Allure de la puissance par variation d'irradiation.

Figure IV.7 : Allure du débit avec consigne de vitesse variable.

Figure IV.8 : Structure de la commande golden section search de la chaine de pompage.

Figure IV.9: Allure de vitesse du moteur avec une consigne d'irradiation variable.

Figure IV.10 : Allure de la vitesse du moteur avec une consigne de vitesse de référence.

Figure IV.11 : Allure du couple moteur par application du couple résistive de la pompe.

Figure IV.12 : Allure de la puissance par variation d'irradiation.

Figure IV.13 : Allure du débit avec consigne de vitesse variable.



# Liste Des Tableaux

---

Tableau 1.1: Potentiel solaire en Algérie

Tableau I.2 : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

# Liste des symboles

---

## ***Abréviations***

*CPV : Cellule Photovoltaïque*

*PV : Photovoltaïque*

*GPV : Générateur photovoltaïque.*

*MPPT: Maximum Power Point Tracking.*

*PPM : Point de Puissance Maximal.*

*P&O : Perturbation et observation.*

*GSS : Golden Section Search*

*$I_{GPV}$  : le courant de générateur photovoltaïque.*

*$V_{GPV}$  : la tension de générateur photovoltaïque.*

*MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.*

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

*MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.*

*MCC : Machine à courant continu.*

*CC : Courant continu.*

*DC : Direct Curent.*

*AC : Alternative Curent.*

*PI : Correcteur Proportionnel intégrale.*

*P.I.D : Action Proportionnel intégrale dérivée.*

*f.é.m. : Force électromotrice.*

*FTBO : Fonction de transfert en boucle ouverte.*

*FTBF : Fonction de transfert en boucle fermée.*

## ***Nomenclature***

*E : L'éclairement absorbé par la cellule ;*

*$E_{ref}$ : L'éclairement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>) ;*

*$I_{ph}$  : photo- courant*

*$I_{pv}$  : Courant générer par la cellule photovoltaïque.*

*$I_d$ : Le courant circulant dans la diode.*

*$I_{sc}$ : Est le courant de court circuit de la cellule.*

*T: Température de la jonction des cellules PV [°K] ;*

## Liste des symboles

---

$T_n$ : Température de référence des cellules PV [ $^{\circ}\text{K}$ ] ;

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

$V_d$  : La tension au borne de la diode.

$R_s$  : Résistance série.

$V_{pv}$ : La tension de sortie .

$I_p$ :Le courant circulant dans la résistance  $R_{sh}$  .

$R_{sh}$ : Résistance shunt.

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

$q$  : Charge électrique élémentaire ( $1.6.10^{-19}$  (C) ).

$K$ : Constant Boltzmann ( $8.65.10^{-5}$  (eV/0K) = ( $1.38.10^{-23}$  (J/0K)).

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

$\alpha$  : rapport cyclique d'hacheur .

$R_{pv}$  : la résistance à la sortie du panneau PV.

$[Vs]$ : Vecteur des tensions stator (V).

$[Rs]$ : Matrice des résistances stator (ohm).

$[Is]$  : Vecteur des courants stator (A).

$[\Phi_s]$  : Vecteur des flux stator (wb).

$[Lss]$  : Vecteur inductance stator (H).

$[\Phi_f]$  : Vecteur du flux engendré par l'aimant permanent (wb).

$[P(\theta)]$ : Matrice de passage direct de Park.

$[P(\theta)^{-1}]$  : Matrice de passage inverse de Park.

$\theta$  : Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé.

$V_a, V_b, V_c$ : Tensions des phases statorique (V).

$I_a, I_b, I_c$ : Courants des phases statorique (A).

$L_a, L_b, L_c$ : Inductances propres des phases a,b,c respectivement (H).

$\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  : Les flux des phases statorique (H).

$t$  : Temps (s).

$V_{ds}$  : Tension direct (V).

$V_{qs}$  : Tension en quadrature (V).

$I_{ds}$  : Courant direct (A).

$I_{qs}$  : Courant en quadrature (A).

$V_a^*, V_b^*, V_c^*$ : Les tensions de phases de référence.

## Liste des symboles

---

$V_d^*, V_q^*$ : Références de tensions avec  $d$  et  $q$ .

$\Phi_{ds}$  : Flux statorique axe direct (wb).

$\Phi_{qs}$  : Flux statorique axe en quadrature (wb).

$L_d$  : Inductance directe (H).

$L_q$  : Inductance en quadrature (H).

$p(t)$  : Puissance instantané (W).

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

$\omega$ : Pulsation électrique (rad/s).

$\omega_r$ : Vitesse de rotation de la machine (rad/s).

$p$  : Nombre de paires de pôles.

$C_r$  : Couple résistant (N.m).

$\Omega$  : vitesse mécanique (rad/s)

$j$  : Moment d'inertie des parties tournantes ramenées à l'arbre moteur (Kg.).

$F_r$ : Coefficient de frottement visqueux.

$k_p$ : Le gain proportionnel.

$k_i$ : Le gain d'intégral.

$\tau_q$ : Constante du temps électrique.

$a, b, c$  : Indices correspondants aux trois phases  $a, b, c$ .

$d, q$  : Indices correspondants aux axes directe et quadrature.

$e$  : L'erreur.

$de$  : La variation de l'erreur.



## INTRODUCTION GENERALE

Les énergies naturelles telles que le soleil, l'eau, le vent et la chaleur de la terre, appelées aussi énergies renouvelables, ont assuré le développement de l'humanité, l'eau et le soleil sont les éléments de notre quotidien, ils sont importants surtout dans les régions éloignées, désertique ou montagneuses comme le sud de l'Algérie, l'augmentation de la demande en eau pour ces régions est donc une problématique de développement durable.

Les applications des énergies renouvelables, solaire (thermique ou photovoltaïque), représentent une solution excellente pour le problème, l'utilisation de ce type d'énergie pour le pompage d'eau, surtout dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec où c'est justement le moment où l'on a accès au maximum d'énergie solaire. [BEL 12]

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en développement. L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à condition d'être bien dimensionner. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèle qui reflète la réalité et ils se doivent d'être précis. [NAT 12]

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

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

## Introduction Générale

---

Plusieurs méthodes MPPT ont été développées pour des systèmes PV autonomes ou connectés au réseau. Cependant, il existe peu d'articles publiés traitant de l'application des MPPT pour les systèmes de pompage photovoltaïque. Les chercheurs ont été mis sur les méthodes MPPT Perturb and Observe (P&O) et Incremental Conductance (IC). Ces méthodes sont connues pour être les techniques MPPT de perturbation qui partagent le même principe dans lequel la valeur du paramètre de fonctionnement, tel que la tension, le courant ou le rapport cyclique, varie en permanence avec une taille de pas prédéfinie pour se rapprocher du MPP. Cette augmentation ou cette diminution permet de converger vers le MPP. Ces techniques sont robustes mais introduisent des oscillations autour du MPP qui se traduisent par un gaspillage d'énergie. **[BET 97]**

Une application de l'algorithme MPPT basé sur Golden Section Search dans les systèmes de pompage photovoltaïque a été proposée pour ce travail. Elle sera comparée au P&O conventionnel en termes de l'efficacité pour le suivi du point de puissance maximale dans des conditions climatiques variables et sa simplicité. Elle sera également comparée en termes de gaspillage d'énergie en régime permanent.

Dans notre étude nous sommes intéressés à l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale pour obtenir un algorithme qui donne une bonne qualité d'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque, de ce fait, le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

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

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément qui constitue le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur synchrone à aimant permanent MSAP et la pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous allons nous intéresser à l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque en utilisant des algorithmes de la MPPT (Maximum Power Point Tracking) Perturbation & Observation (P&O) et le nouvel algorithme proposé Golden section search (GSS). Le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque,

## Introduction Générale

---

la commande vectorielle de la MSAP ainsi que des résultats de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK seront présentés par la suite de ce chapitre.

Dans le quatrième chapitre, sera consacré à la simulation du système de pompage avec les deux algorithmes de la MPPT, puis on fait une comparaison entre les résultats obtenus par les deux techniques de commande de GPV : Perturbation & Observation (P&O) et la nouvelle algorithme Golden section search (GSS). Enfin on terminera notre travail par une conclusion générale, dans laquelle, nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

***CHAPITRE I :***  
***Généralité sur les systèmes de***  
***pompage photovoltaïque***

## I.1 INTRODUCTION

Les besoins des stations de pompage soit pour distribuer des carburants ou l'eau dans les cites isolée sont des problèmes bien réels qui ont poussé les chercheurs à développer des systèmes de pompage autonomes bien contrôlé à base des sources d'énergies durables et plus respectueuses de l'environnement. Parmi ces systèmes, on trouve système de pompage photovoltaïque qui occupe une bonne place grâce aux avantages qu'elle apporte par rapport les autres.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'architecture complète du système de pompage photovoltaïque autonome. Ensuite, nous présentons d'une façon descriptive plus détaillée les principaux composants de notre système constitué par les éléments : panneau photovoltaïque (PV) ; machine synchrone(MSAP) ; hacheur boost ; onduleur et la pompe centrifuge.

## I.2 Aperçu sur les systèmes de pompage photovoltaïque :

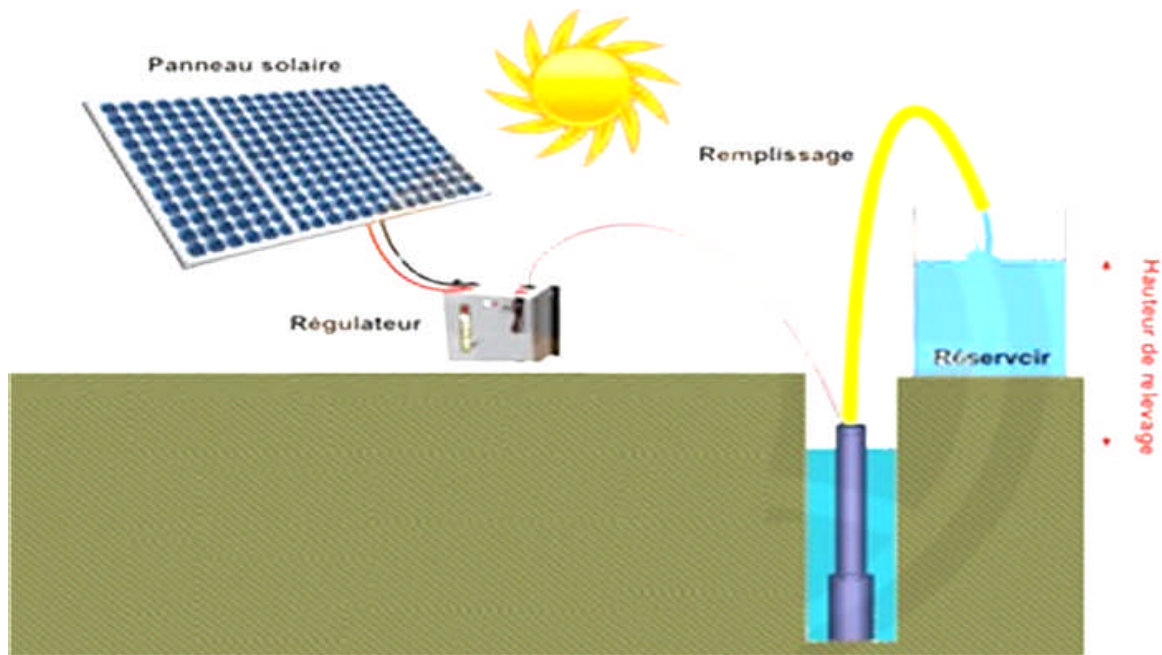
Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides est une question vitale pour les populations.

L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent [HAD 05].

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. La technologie sans batteries a quelques inconvénients, son principal défaut est d'avoir un débit d'eau qui dépend de l'ensoleillement au cours de la journée. Nous allons faire une étude avec l'ajout de batteries dans le système de pompage photovoltaïque.

### I.2.1 Systèmes de pompage au fil du soleil :

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, comme la montre la figure (I.1) [BEN 18]:



**Figure 1.1: Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil.**

Le principe de fonctionnement d'une telle installation reste relativement simplifié avec des panneaux photovoltaïques alimentant une pompe (de surface ou immergée) assistée par un régulateur contrôleur (pouvant être intégré à la pompe selon le fabricant) qui approvisionnent l'eau, lorsque les panneaux sont exposés au soleil. Le pompage au fil du soleil utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

Cette solution est moins coûteuse, mais ces pompes n'ont pas un débit constant et ne fonctionnent pas en dessous d'un certain niveau d'éclairement (début et fin de journée), leur rendement étant plus faible en dehors de la puissance nominale de fonctionnement.

### **I.2.2 Systèmes de pompage avec stockage électrochimique (batteries) :**

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. Le pompage photovoltaïque avec batterie permet d'assurer une autonomie énergétique, et un débit constant selon la demande [BEL12].

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

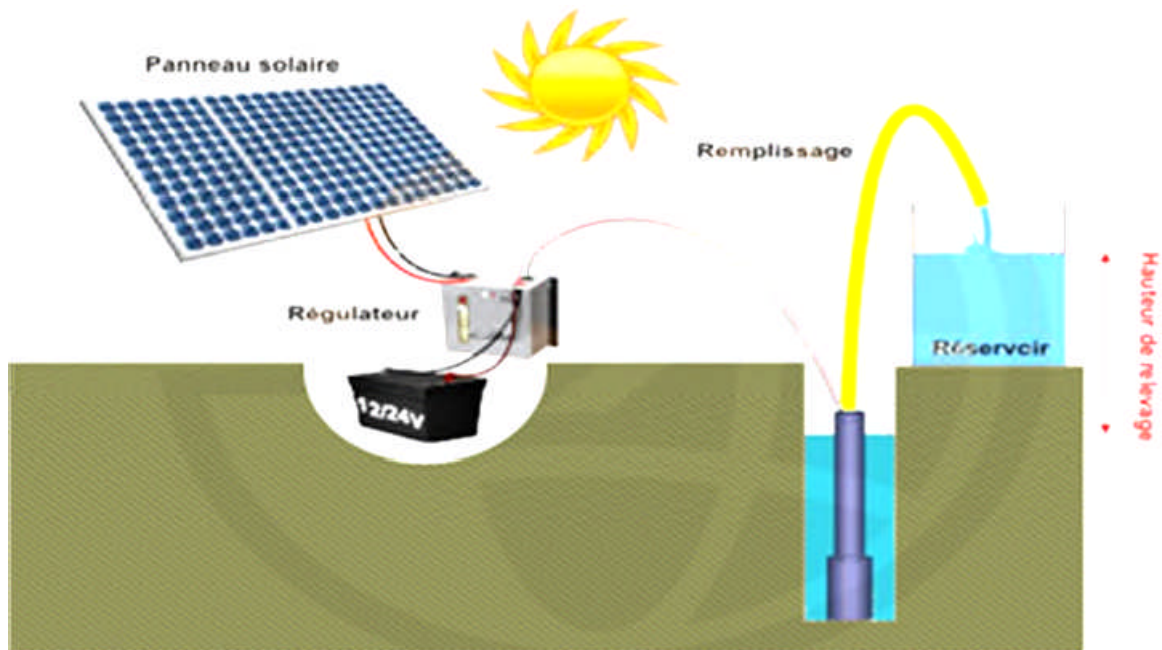


Figure I.2 Principe de fonctionnement du pompage avec stockage électrochimique.

### I.2.3 Avantages et inconvénients des systèmes de pompage photovoltaïque :

Le pompage solaire est la solution idéale au problème de l'approvisionnement en eau, de l'extraction et du pompage de l'eau même dans les endroits les plus isolés et parmi ces avantages :

- aucun coût pour le carburant, le système utilise la lumière du soleil gratuite toujours disponible.
- une longue durée de vie opérationnelle.
- un système très fiable et durable.
- facile à exploiter et à entretenir.
- un retour de l'investissement initial est garanti.
- respectueux de l'environnement.

### I.3 Principaux composants d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil :

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable ; ses performances dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température ambiante, obstacles géographiques), du rendement des modules mais aussi des caractéristiques des autres équipements (onduleur, motopompe,...) Un système de pompage PV est un système complexe qui se compose de différents éléments interactifs dont l'un agit sur l'autre à savoir : le GPV, le système de conversion, le moteur d'entraînement, la pompe et les batteries de stockage [BEN18]. Le schéma général d'un système de pompage photovoltaïque étudié dans cette mémoire est le suivant :

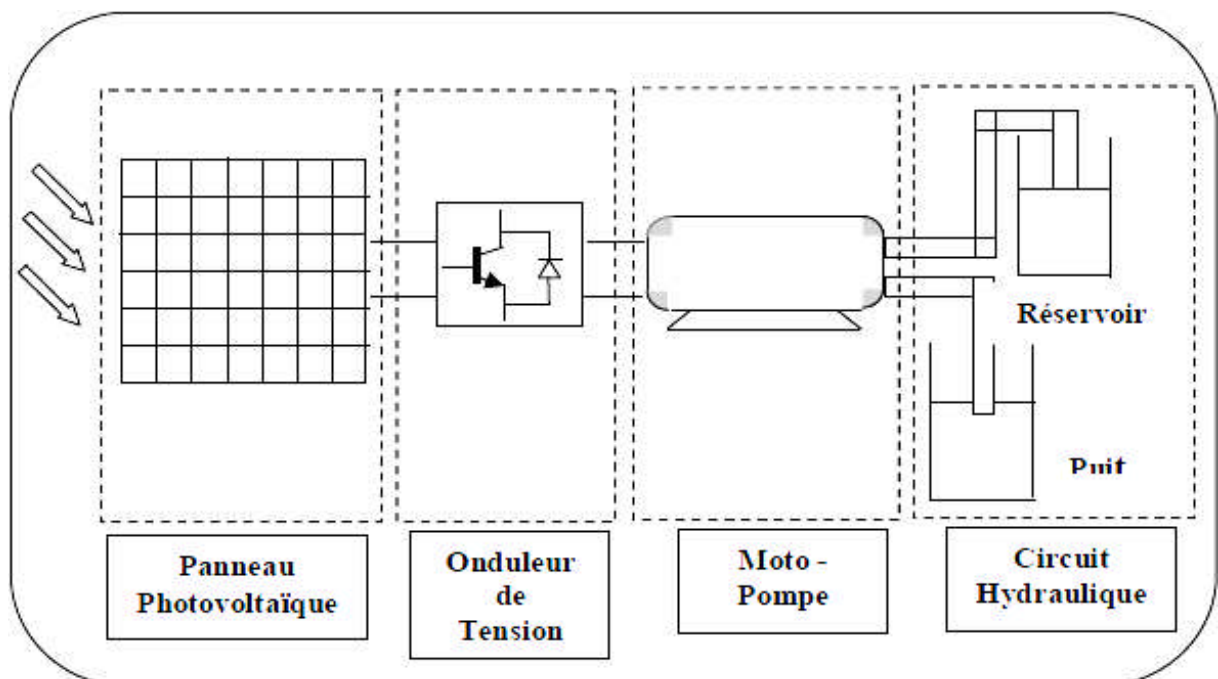


Figure I. 3 : Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque

#### I.3.1 Aperçu sur la source de système de pompage photovoltaïque au fil du soleil :

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en développement. L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à condition d'être bien dimensionner. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèle qui reflète la réalité et ils se doivent d'être précis [BET97].

### I.3. 1.1 L'énergie solaire et l'énergie solaire en L'Algérie :

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour).

L'énergie solaire, peut être convertie en chaleur ou en électricité. On distingue deux moyens principaux de convertir l'énergie solaire:

\*/L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

\*/L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [SAA 01].

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 importants 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 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud [FER 08].

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 [MIN 07]. Le tableau suivant donne le potentiel solaire algérien en chiffres et selon la localisation [NAT12].

	Régions côtières	Haut plateaux	Sahara
Superficies %	4	10	86
Durée moyenne ensoleillement(h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau 1.1: Potentiel solaire en Algérie .

Avec un gisement solaire qui dépasse les 5 milliards de GWh, notre pays a mis également en œuvre des initiatives afin de promouvoir l'électricité solaire, notamment dans le cadre de l'électrification décentralisée[MIN 07]. La cartographie ci-après présente le rayonnement solaire.

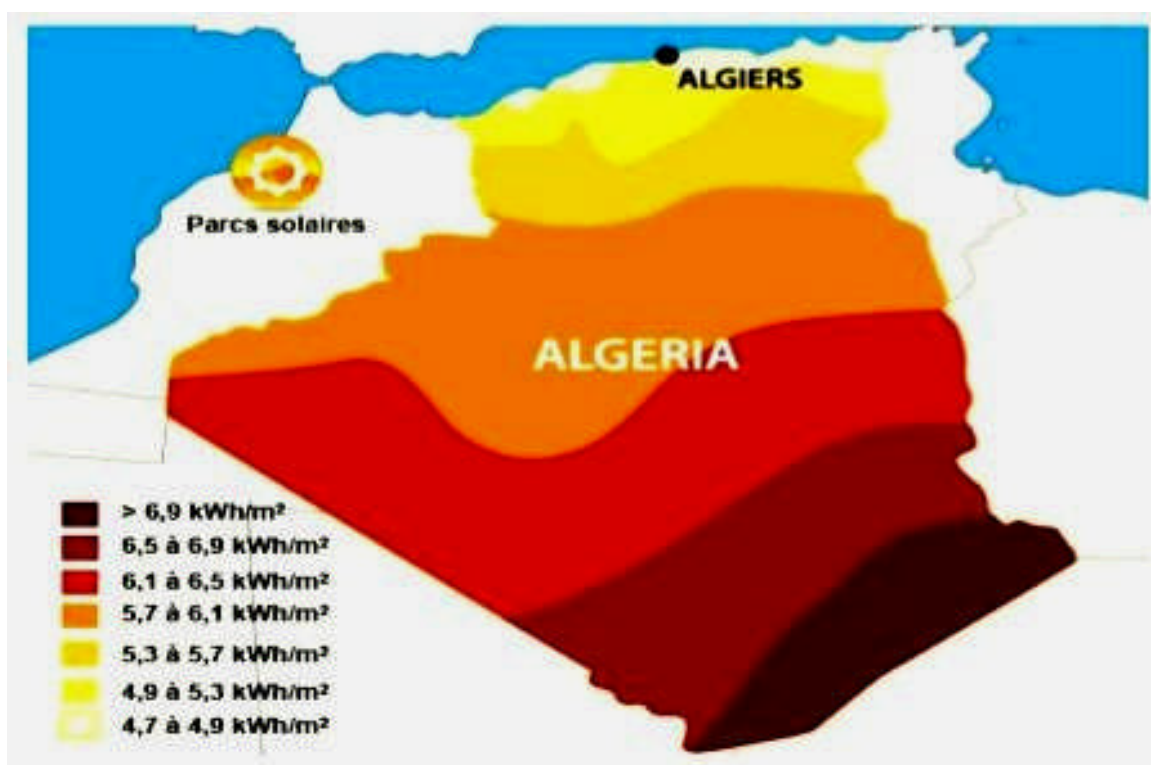


Figure I.4: Zones climatiques de l'Algérie.

### I.3.1.2 La conversion photovoltaïque :

#### 1/\*L'effet photovoltaïque :

Quand la cellule est exposée à la lumière, les photons pénétrant dans le matériau semi-conducteur, transfèrent leur énergie aux électrons qui se mettent en mouvement pour produire

un courant électrique.

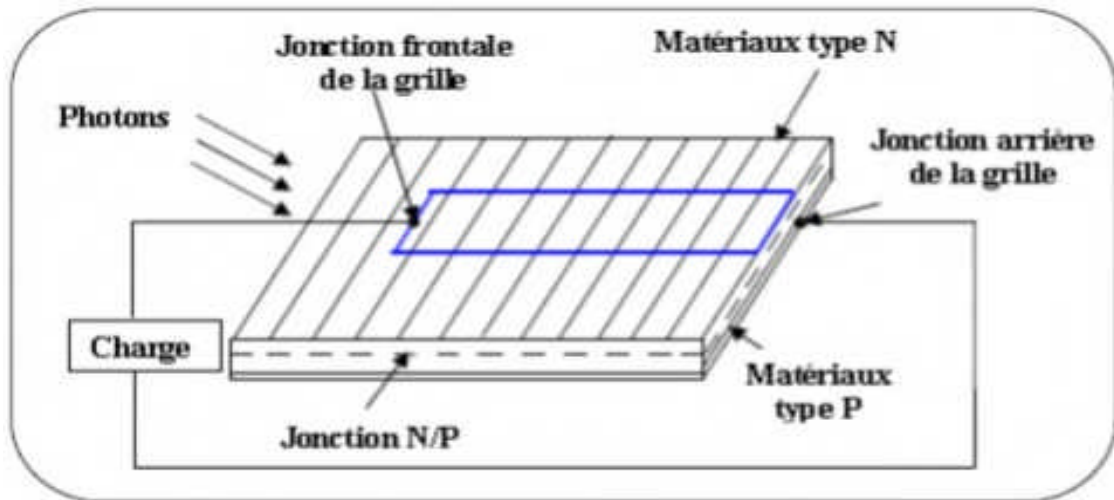


Figure I.5: L'effet photovoltaïque.

Une cellule solaire se représente comme une diode électronique de grande surface, la taille d'une cellule solaire va jusqu'à 20cm avec une forme circulaire, carrée ou dérivée de deux géométries [AZO 02].

### 2/\* Les cellules photovoltaïques :

Le principe d'une cellule photovoltaïque (CPV) est basé sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque (PV). Il consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée au rayonnement solaire.

Donc CPV est un composant électrique, exposé à la lumière génère de l'électricité grâce à l'effet PV. Les cellules solaires sont généralement associées en série et/ou en parallèle, cela permet d'obtenir une tension et/ou un courant élevé.

### 3/\*Types de cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires, qui sont réalisées à base de silicium (c'est principalement le semi-conducteur employé dans la fabrication [BEN 12]. Les cellules sont différenciables par leurs rendements et leurs coûts.

#### ➤ Cellules amorphes :

Les cellules amorphes (Figure I.6.a) ne possèdent pas de structure cristalline. Leur fabrication et leur efficacité sont inférieures par rapport aux autres types, cependant leur

rendement est faible. Elles sont utilisées dans des petits produits de consommation (les calculatrices solaires).

➤ **Cellules monocristallines :**

Les cellules aux siliciums monocristallines (Figure I.6.b), qui représentent le type avec le plus haut pouvoir de conversion, elles sont considérées parmi les cellules ayant le meilleur rendement.

➤ **Cellules poly-cristallines :**

Des cellules aux siliciums poly-cristallins (Figure I.6.c). Leur conception étant plus faciles. Les composants des cristaux de silicium sont bien visibles, le cout de fabrication est moins important cependant leur rendement est plus faible [BEN 12].



a/Cellule amorphe



b/Cellule monocristalline



c/Cellule poly-cristalline

**Figure I.6: Les principaux types de cellules.**

### I.3. 1.3 Les différents types de système photovoltaïque :

Depuis 1958, les cellules PV alimentent seulement le système énergétique des satellites. Les premières applications terrestres sont arrivées au début des années 70.

Aujourd'hui, grâce à leur fiabilité, le PV prend une place prépondérante. Il associe plusieurs composants à fin de former un système PV.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés selon les exigences sont de trois types : autonome, raccordé au réseau et hybride [DJA08].

#### 1/\*Système photovoltaïque autonome :

Système autonome illustré en Figure (I.7), c'est un site isolé qui n'est pas connecté au réseau, il permet de fournir de l'énergie électrique pour le fonctionnement des sites isolés. Ces

systèmes nécessitent l'utilisation de batteries d'accumulateur pour stocker l'énergie durant l'absence du soleil.

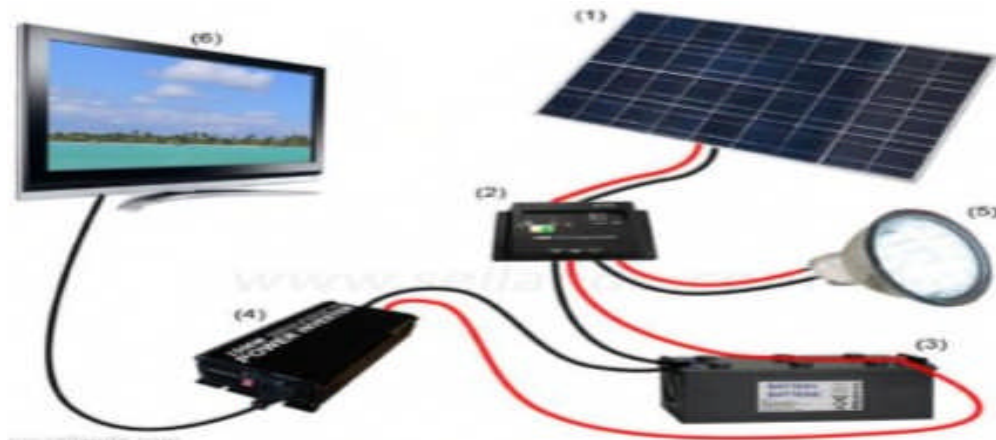


Figure I.7: Système photovoltaïque autonome.

On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes : Des balises en mer; Les lampadaires urbains; Pompage solaire; Maison en site isolé.

**2/\*Système photovoltaïque raccordé au réseau :**

Système raccordé au réseau, ou non autonome, c'est un système qui injecte l'excès d'énergie dans le réseau de distribution électrique, la figure suivante illustre ce type de système :

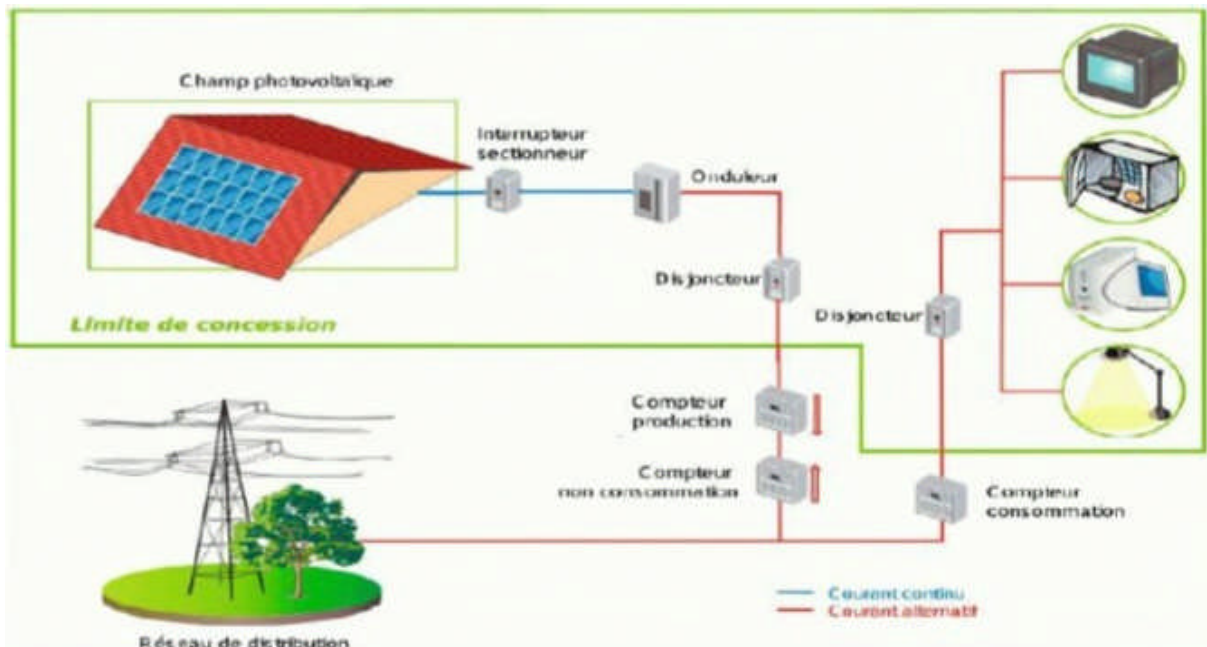


Figure I.8: Système photovoltaïque raccordé au réseau.

**3/\*Système photovoltaïque hybride:**

Il s'agit des systèmes regroupant des sources d'énergie de nature différente : Eolienne, générateur diésel ou une centrale de cogénération. Ce type d'installation est utilisé lorsque le GPV seul ne couvre pas tout l'énergie requise. La figure suivante représente le système :

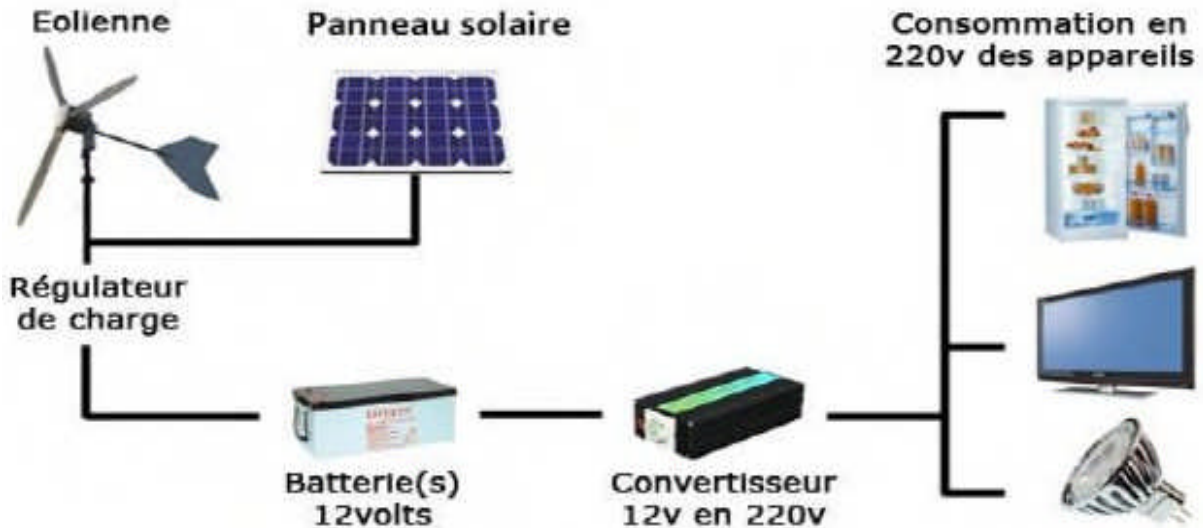


Figure I.9: Système hybride PV-Eolien.

#### I.3. 1.4 Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale :

La conception globale d'un système photovoltaïque optimisé est par nature difficile. Du côté de la source, pour un générateur photovoltaïque, la production de la puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, et aussi la variation de comportement de la charge en fonction de la consommation, ce qui est souvent difficile à prévoir. En effet, sous ces conditions changeantes, la puissance extractible est variable. Il est possible : c'est ainsi que naît en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracking). La méthode de suivi de PPM (Point de Puissance Maximal) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du panneau photovoltaïque, contrairement au contrôle à tension fixe. Le maximum de puissance est atteint par contrôle actif de la puissance, en forçant la dérivée de la puissance par rapport au temps à être nulle. [BOU07]

Le MPPT n'est pas basé sur une valeur de référence prédéterminée mais il s'agit d'une recherche de la valeur de référence pour atteindre le maximum de la puissance sur la caractéristique courant/tension. A noter que le MPPT joue un rôle très important parce qu'il maximise le rendement et il réduit le coût. Le MPPT peut extraire plus de 97% de puissance photovoltaïque une fois correctement optimisé. [BEN 12]

Parmi les solutions MPPT actuellement disponibles, on retrouve la méthode de perturbation et observation (P&O), l'algorithme d'incrémentation de la conductance et golden section search (GSS)...etc.

### **I.3. 1.5 Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque :**

Les systèmes photovoltaïques présentent un grands nombres d'avantages et d'inconvénients qui sont : [BOU07]

#### **1/\*Avantages :**

- ils sont renouvelables et non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité du système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- L'énergie photovoltaïque est fournie par la nature, elle est donc gratuite et abondante.

#### **2/\* Inconvénients :**

-la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé

-le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10% à 15 %.

-ils sont tributaires des conditions météorologiques.

-l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.

-beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

### **I.3.2 Aperçu sur la machine utilisée dans le système de pompage PV au fil du soleil :**

Le moteur d'entraînement permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher.[MAK 13]

Dans ce mémoire on a utilisé un moteur synchrone à aimant permanent qui est de plus en plus utilisé dans diverses applications grâce au développement de l'électronique de puissance et des matériaux magnétiques et aussi à l'avantage des aimants permanent qui ont remplacés le rotor bobiné. Ce qui a permis à la machine synchrone à aimant permanent d'avoir un bon rendement par rapport à la machine asynchrone où à courant continu.

#### **I.3. 2.1 Description de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents :**

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est génère soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose le synchronisme entre le champ tournant statorique et le rotor ; d'où le nom de machine synchrone. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. On note :  $\omega_r = \omega / p$ .

- ❖ Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source, il est semblable au stator de toutes les machines électriques triphasées. Il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $2\pi/3$ .
- ❖ Le rotor est une partie mobile, se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable.[HAD02]

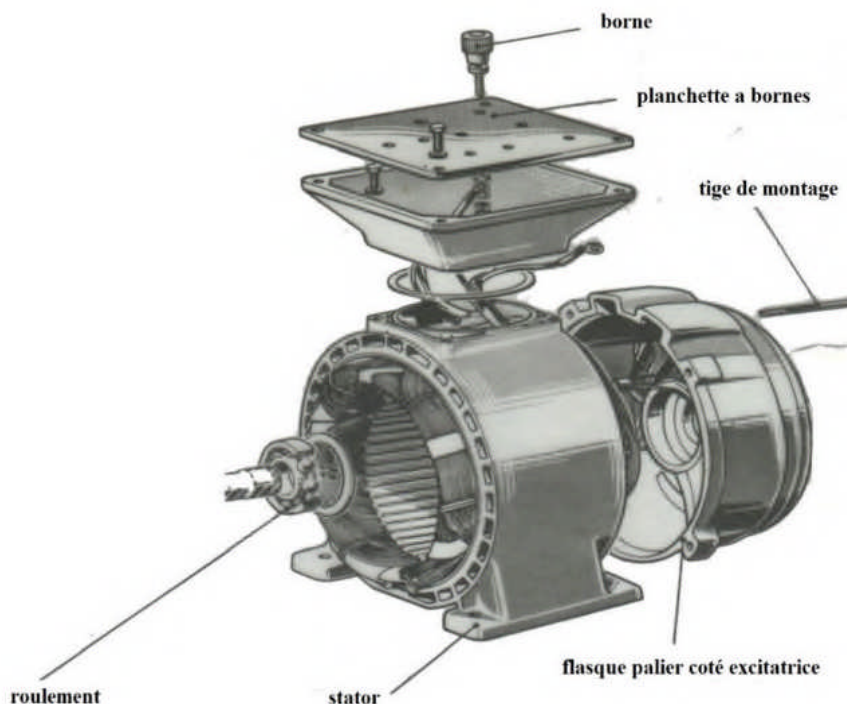


Figure I.10 : Moteur synchrone.

### I.3. 2.2 Les différentes configurations de la machine synchrone à aimants permanents :

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont des machines à courant alternatif autopilotées, la caractéristique essentielle de ces machines est que leurs vitesse de rotation est l'image exacte de la fréquence d'alimentation. Les MSAP sont constituées généralement de :

Un stator ; bobinages triphasés créant un champ tournant ;

Un rotor ; l'excitation est obtenue par des aimants permanents montés à la surface du rotor.

Les aimants permanents peuvent être utilisés comme transducteurs d'une forme d'énergie en une autre forme d'énergie, sans perdre leur propre énergie.

Avec l'application des aimants modernes, les applications sont développées dans la mesure où l'inducteur à aimant pouvait concurrencer l'inducteur bobiné.

Les aimants permanents procurent un certain nombre d'amélioration et d'avantages (inertie faible, couple élevée...) aux machines synchrones à aimants par rapport aux autres types de machines (à courants continu, synchrone à excitation électrique).[MOB01]

#### **\*/ Structures des inducteurs des machines à aimants permanents (MSAP) :**

Comme pour le cas des machines synchrones classiques, nous pouvons distinguer les moteurs à aimants dits "à pôles lisses", et ceux dits "à pôles saillants". La nuance, le sens de l'aimantation, les formes géométriques des aimants et leurs dispositions. Au niveau du rotor.

##### **1/\* Structures à pôles lisses :**

Les aimants généralement en forme de "Tuiles", sont fixés à la surface du rotor grâce à des ferrites amagnétiques au niveau de l'entrefer et plaquées sur un noyau magnétique pour tirer le meilleur partie des aimants, on a intérêt de les doter d'une aimantation radiale, tangentielle entre pôles, les aimants peuvent avoir également une aimantation mixte ou aimantation tournante.

Les structures à rotor lisse se caractérisent par un entrefer magnétique important accentué par l'épaisseur des aimants et souvent pour celle de la ferrite amagnétique de maintien.

Ces structures sont intéressantes pour un fonctionnement autopiloté, car elles présentent une faible inductance de phase et une réaction d'induit réduite, ce qui favorise ainsi une commande plus simple.[BES 05]

##### **2/\* Structures à pôles saillants :**

La saillance est obtenue par l'addition de pièces polaires ou interpolaires, qui raccourcissent nettement les lignes de flux selon les deux axes "d" et "q" respectivement suivant la position directe et la position on quadrature, ce qui augmente la valeur de l'inductance contrairement aux machines à inducteur bobiné ou la saillance est inversée c'est-à-dire, que l'inductance selon l'axe "q" est supérieure par rapport à celle suivant l'axe "d". On peut obtenir plusieurs catégories d'inducteur à pôles saillants.

### I.3. 2.3 Les applications des machines Synchrones à aimants permanents :

C'est ainsi que la machine synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- les automobiles, les véhicules purement électriques ou hybrides (moteurs roues ).
- les équipements de technologie de l'information (DVD drives),les servomoteurs, les applications robotiques.
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste),
- la production d'électricité,( par une turbine à gaz comme générateur ).
- la propulsion des sous marins, les applications navales (Propulsion navale ).
- les machines-outils, et la traction ferroviaire, et les Ascenseur.
- les application de l'énergie de l'éolienne.(comme générateur).

### I.3. 2.4 Avantages et inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents :

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux autres types de machines.[AZE 00]

#### 1/\*Les Avantages :

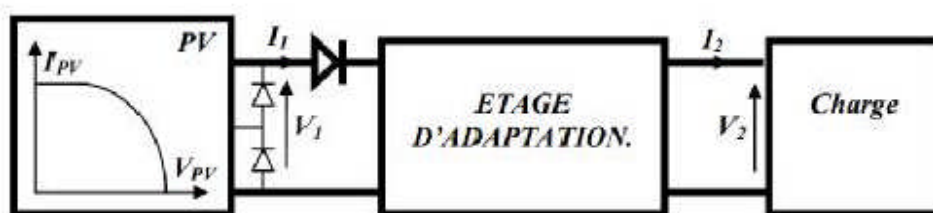
- Puissances massiques importantes et élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- Suppression des bagues et des ballait, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement en survitesse.

**1/\*Les inconvénients :**

- Coût élevé des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

**I.3.3Aperçu sur les convertisseurs utilisées dans le système de pompage PV au fil du soleil :**

Afin d'extraire à chaque instant la puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit dans la figure (I.11). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.[LAB 95]



**Figure I. 11 : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.**

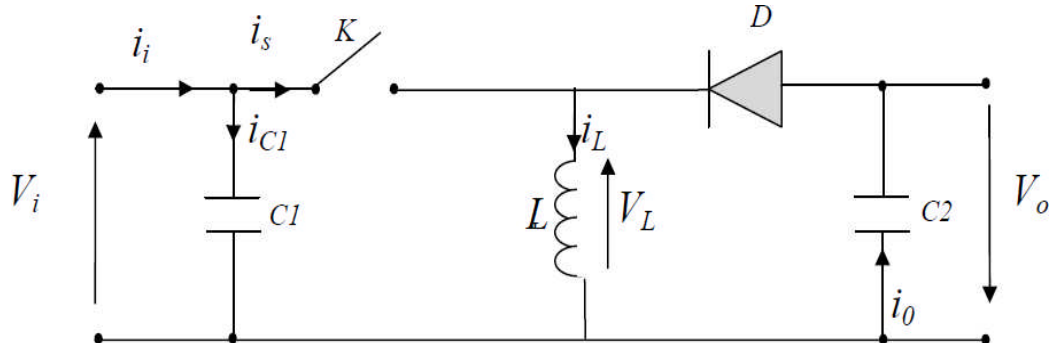
**I.3.3.1 Les convertisseur DC/DC (hacheur) :**

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.[MEL 10]

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. [MEL 10]

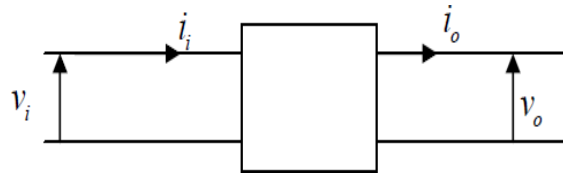
La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries. Dans une alimentation à découpage (Figure I.12), la tension d'entrée est "hachée" à

une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué. Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue .



**Figure I.12: Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.**

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (Figure I.13), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues. [MEL 10]



**Figure I.13:Schéma d'un quadripôle électrique.**

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (Figure I.14). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite. [MEL 10]

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$  avec un temps de fermeture  $= dT_s$  et un temps d'ouverture  $= (1 - d)T_s$ . Où:

- $T_s$ : est la période de commutation qui est égale  $\frac{1}{f_s}$ .

- $d$ : le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0, 1]$ ).

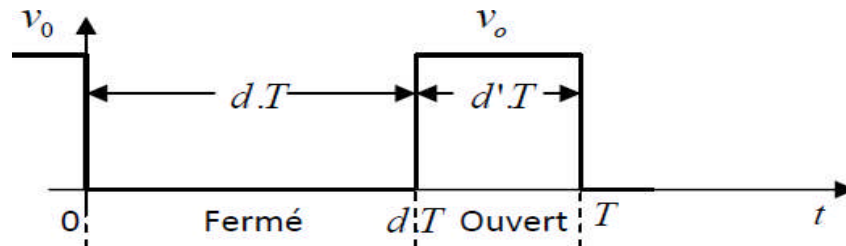


Figure I.14: périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

#### \* / Les types des convertisseurs DC-DC:

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [LAB 95]:

- ❖ convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle).
- ❖ convertisseur dévolteur (ou série).
- ❖ convertisseur dévolteur- survolteur (hacheur série –parallèle).

#### 1/ Hacheur survolteur (ou Boost):

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

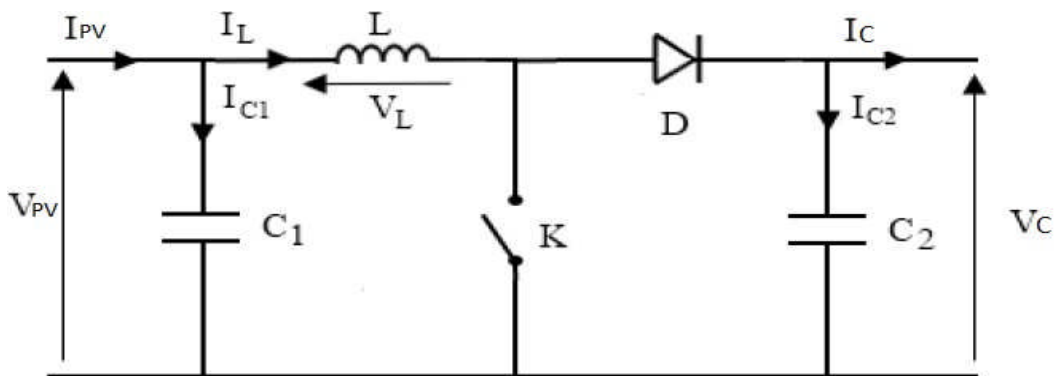


Figure I.15 : Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost).

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité  $C$  permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

#### -Fonctionnement :

L'interrupteur  $S$  est fermé pendant le temps  $\alpha \cdot T$ . L'énergie est stockée dans  $L$ , la diode  $D$  est bloquée. Le blocage de  $S$  entraîne la décharge de l'inductance. [TRA 11]

**2/ Hacheur dévolteur (ou Buck):**

Un convertisseur Buck, ou hacheur série convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie.

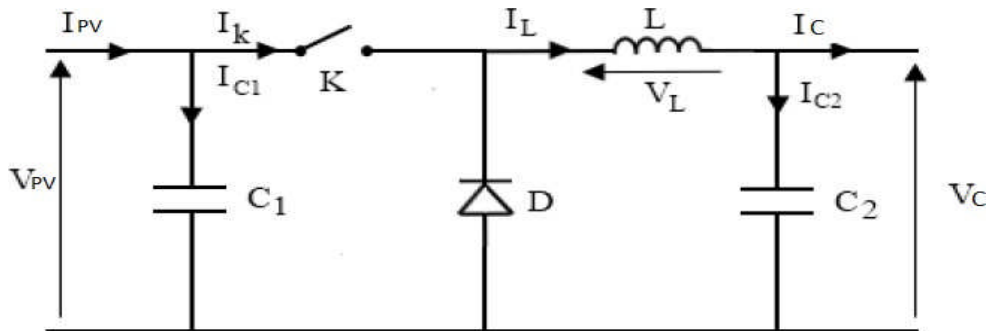


Figure I.16 :Le schéma de principe du hacheur série.

**-Fonctionnement:**

L'interrupteur S est fermé pendant la fraction  $\alpha \cdot t$  de la période de découpage T. La source primaire fournit l'énergie à l'inductance L. Lors du blocage de S, la diode de roue libre D assure la continuité du courant et la décharge de L.[TRA 11]

**3/ Hacheur dévolteur-survolteur ( Buck-Boost):**

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée  $V_e$ . Pour un rapport cyclique «  $\alpha$  » donné, et en régime de conduction continu (figure I.17), la tension moyenne à la sortie est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_e \tag{I.1}$$

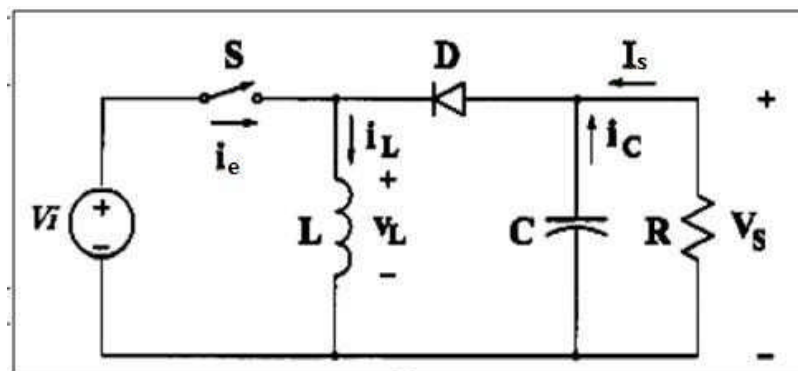


Figure I.17 :Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle.

### I.3.3.2 Les convertisseur DC/AC (Onduleur) :

Le convertisseur DC/AC est un onduleur en modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.) ou en P.W.M. (pulse width modulation). L'onduleur fonctionne évidemment avec un circuit de génération des signaux PWM commandé par un circuit de régulation et de protection. Ce dernier assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe moto-pompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsque il n y a pas d'eau dans le puits.[ARR 07]

#### 1/-Onduleur monophasé :

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

- Onduleur monophasé en demi- pont .
- Onduleur monophasé en pont .

#### 2/-Onduleur triphasé :

L'onduleur en PWM utilisé est un onduleur triphasé en pont complet constitué par trois demi-ponts. Il contient six interrupteurs formés chacun par un ou plusieurs transistors Mosfet de puissance commandés par un signal PWM.

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. A cet effet, différentes stratégies de modulation ont été proposées. Parmi celle-ci, la Modulation de Largeur d'Impulsions MLI.

#### /\*Onduleur de Tension à MLI :

Plusieurs types de MLI se présentent pratiquement, dont on peut citer: [ARR 07]

- Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal à une porteuse en général triangulaire.
- Les modulations précalculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde fondamentale.

-Les modulations postcalculées appelées encore MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

### **I.3.4 Aperçu sur les pompes utilisées dans le système de pompage PV au fil du soleil :**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement. La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. [THO 98]

Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau. Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur. [THO 98].

#### **I.3.4.1 La pompe centrifuge :**

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmis eau fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse. Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- La puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.[MAK 13]

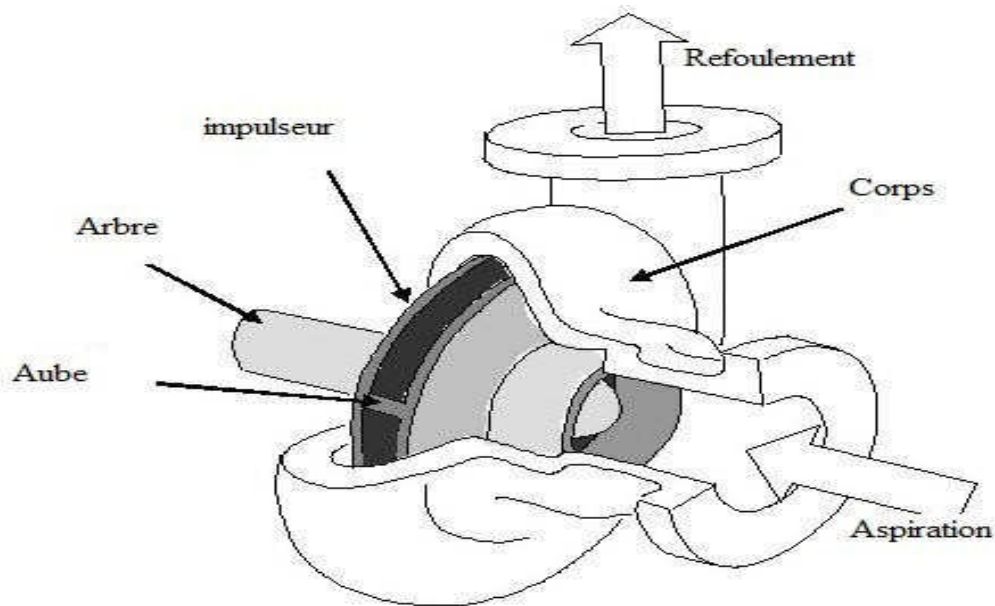


Figure I.18 : Pompe centrifuge.

- Caractéristique d'une pompe centrifuge :

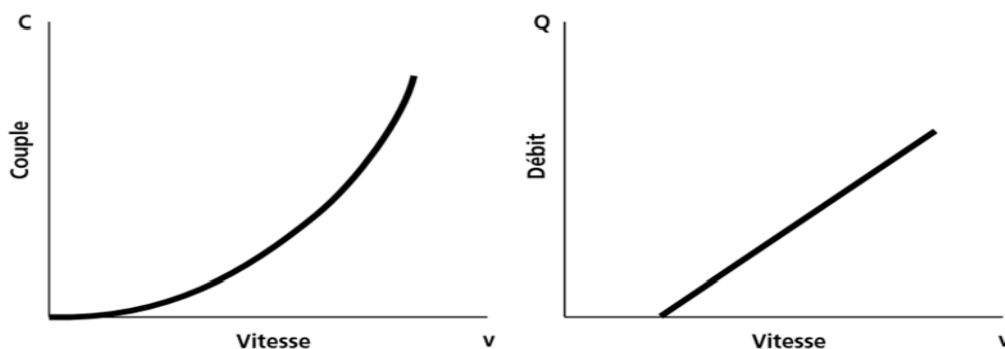


Figure I.19 : Caractéristique d'une pompe centrifuge. [THO 98]

#### I.3.4.2 La pompe volumétrique :

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.) Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m<sup>3</sup>/h) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la

caractéristique  $I=f(V)$  de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable.

Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système .[MAK 13]

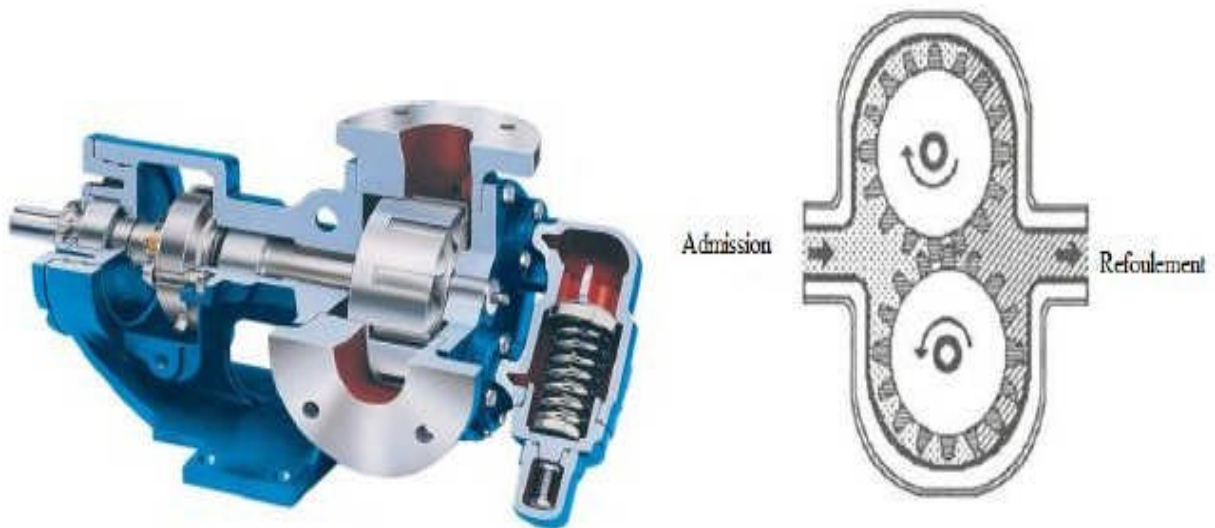


Figure I.20 : Pompe volumétrique.[POM 16]

- Caractéristique pompe volumétrique :

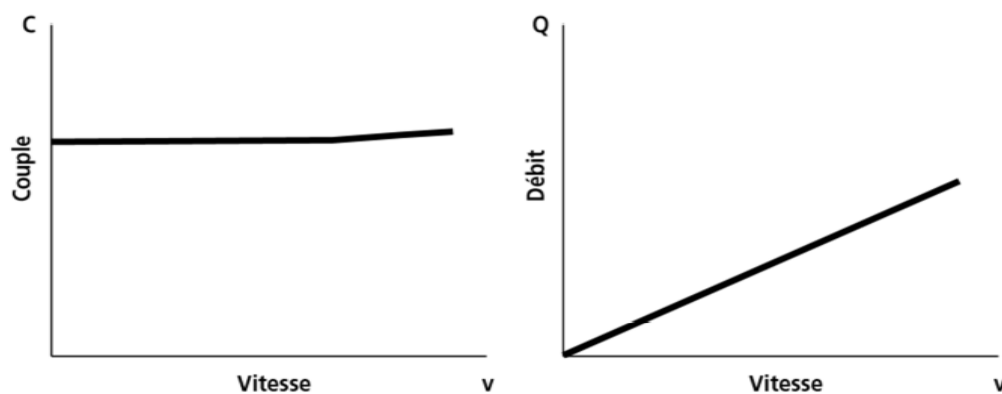


Figure I.21 : Caractéristique pompe volumétrique.[THO 98]

### I.3.4.3 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique :

La pompe centrifuge présente d'innombrables avantages par rapport aux autres types de pompes, elle a un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en œuvre facile avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché. Elle s'adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides, et elle répond aux exigences spécifiques des installations [MAK 13]. comme illustre le tableau suivant :

	<b>Pompe centrifuge</b>	<b>Pompe volumétrique</b>
<b>Mécanique</b>	Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparaît, entraînant un débit)	Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression)
<b>Performance</b>	Le débit dépend de la pression variable	Le débit est constant quelle que soit la pression.
<b>Viscosité</b>	Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité du fait des pertes par frottement dans la pompe	Le rendement augmente avec la viscosité.
<b>Rendement</b>	Rendement optimal en un point. À des pressions différentes, le rendement diminue.	Le rendement augmente avec la pression.
<b>Conditions d'entrée</b>	Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression. Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible	Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. Auto-amorçage d'une pompe à sec possible.

**Tableau I.2 : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique [14].**

**I.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons entamé ce travail par un rappel théorique sur les différents systèmes de pompage photovoltaïque utilisé, Puis, on a présenté une description plus détaillée de l'ensemble des éléments constituant du système choisi pour notre étude.

Pour ce dernier nous avons présenté aperçu sur la source de notre système, c'est l'énergie solaire par la conversion photovoltaïque, nous avons présenté les différents types et le principe du système photovoltaïque, ainsi que leur avantages et leurs inconvénients. Ensuite, le choix s'est porté sur la machine synchrone à aimants permanents où une étude détaillée (description de fonctionnement, les différentes configurations, les applications, et les avantages et les inconvénients) a été présentée. Après avoir présenté la structure des deux convertisseurs utilisé dans notre système, l'une est connectée à la machine et l'autre est connectée à la source photovoltaïque. Enfin nous avons présenté étude sur les différents types des pompes utilisées dans les systèmes de pompage photovoltaïque pour choisi la plus efficace dans notre système.

La suite de ce travail est principalement consacrée à la modélisation et la commande de cette structure.

## ***CHAPITRE II :***

***Modélisation des éléments du système de  
pompage photovoltaïque***

**II.1 Introduction**

Dans ce chapitre sont présenter la modélisation individuelle de chaque élément de l'architecture complète du système de pompage photovoltaïque composé d'une machine synchrone à aiment permanent, entraînée à une pompe centrifuge et pilotée par le stator aux moyen d'un convertisseur de puissance bidirectionnelle fonctionnant en MLI appelé l'onduleur. Les principaux objectifs de ce convertisseur sont : onduleur la tension continue générée par le générateur photovoltaïque pour la fournir au bobinage du stator de la machine, et permettre l'application des commandes pour contrôler les puissances mécanique générées par de cette machine pendant les périodes de fonctionnement de ce système. Afin d'atteindre l'objectif principal fixé, différents sous objectifs sont définis comme suit :

- ✓ Modélisation du **générateur photovoltaïque** et leur convertisseur DC-DC pour la synthèse une loi de commande (MPPT) pour contrôler la capture de la puissance à une valeur maximale dans le troisième chapitre
- ✓ Modélisation de **machine synchrone à aiment permanent** (MSAP) pour fonctionnement un moteur dans le repère de Park lié au champ tournant.
- ✓ Modélisation de l'alimentation triphasée de la machine (onduleur MLI à deux niveaux) qui permettra l'application des commandes destinées au contrôle le flux énergétique générées.
- ✓ Modélisation de la **pompe centrifuge**.

Le modèle mathématique globale obtenu sera réservé à l'application des différentes commandes pour assurer un rendement optimal.

**II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque :**

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de panneau photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie. Dans ce qui suit on récapitule les différents modèles électriques des panneaux photovoltaïques rencontrés dans la littérature. [BOU 07]

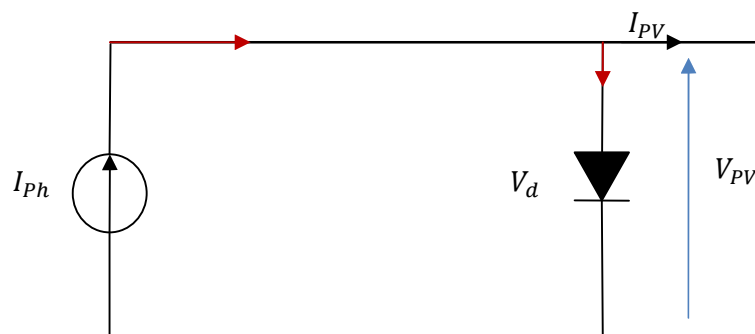
**II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :**

La modélisation des cellules PV passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module PV. on peut citer :

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

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.[BEN18]



**Figure II.1:Schéma équivalent d'une cellule idéale.**

➤ Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II. 1}$$

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{sc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

Avec :

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \tag{II.2}$$

$E$  : L'éclairement absorbé par la cellule ;

$E_{ref}$ : L'éclairement de référence ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) ;

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \tag{II.3}$$

$I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode ;

$$V_t = \frac{NkT}{q} \tag{II.4}$$

$V_t$ : Tension thermique ;

$N$  : Facteur d'idéalité de la photopile ;

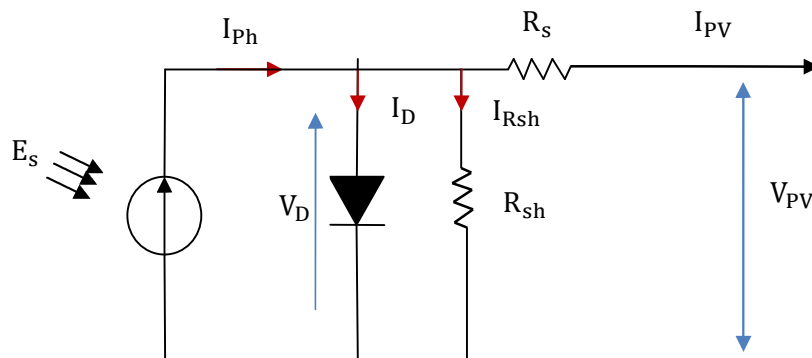
$k$  : Constant de Boltzmann ( $1,38.10^{-23} \text{ J/K}$ ) ;

$q$ : Charge de l'électron ( $1,6.10^{-19} \text{ C}$ ).

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

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (II.2).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode ( $d$ ) caractérisant la jonction, une source de courant  $I_{ph}$  caractérisant le photo-courant, une résistance série  $R_s$  représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte  $R_{sh}$  caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à  $R_s$ . [BEN 12]



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

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple. Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \tag{II. 5}$$

$I_{pv}$  : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

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

$I_d$ : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \tag{II. 6}$$

$$I_0 = I_{sc} \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[ \frac{E_g}{BK} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} \tag{II. 7}$$

$I_{sc}$ : Est le courant de court circuit de la cellule à la température de référence  $T_n$  et l'éclairement de référence ;

$T$ : Température de la jonction des cellules PV [°K] ;

$T_n$ : Température de référence des cellules PV [°K] ;

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

$E_g$  : Énergie de gap [ev] ;

$V_d$  : La tension au borne de la diode est donnée par :

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \tag{II. 8}$$

$R_s$  : Résistance série symbolise la résistance de masse dumatériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

$V_{pv}$ : La tension de sortie ;

$I_p$ : Le courant circulant dans la résistance  $R_{sh}$  ;

$R_{sh}$ : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

En substituant les équations (II.6 et II.7) dans l'équation (II.5) le courant  $I_{pv}$  devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \tag{II. 9}$$

Donc :

$$I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} - I_{pv} = 0 \tag{II. 10}$$

Cette dernière équation va nous permettre de modéliser sous Matlab/Simulink une cellule photovoltaïque puis un générateur PV, qui s'intégrera dans notre système global.

### **II.2.2 Modèle d'un GPV :**

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  ou la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ .

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un  $I_{cc}$  et un  $V_{co}$  désirés. [BEN 12]

#### **II.2.2.1 Modélisation sous Simulink :**

Dans le but d'avoir un modèle simple à utiliser, nous avons procédé à la mise en œuvre d'un modèle du panneau photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK qui va être utilisé dans la suite de notre travail. Le modèle est basé sur l'équation (II.10), comporte deux paramètres d'entrée : la température et l'ensoleillement et deux paramètres de sortie : la tension et le courant).

Dans notre étude, le module BP MSX 60W est choisi comme modèle de simulation sous MATLAB/SIMULINK. Ce module est constitué de 36 cellules solaires en silicium monocristallin en série et fournit 60 W de puissance nominale.

#### **II.2.2.2 Caractéristique tension-courant d'un GPV :**

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

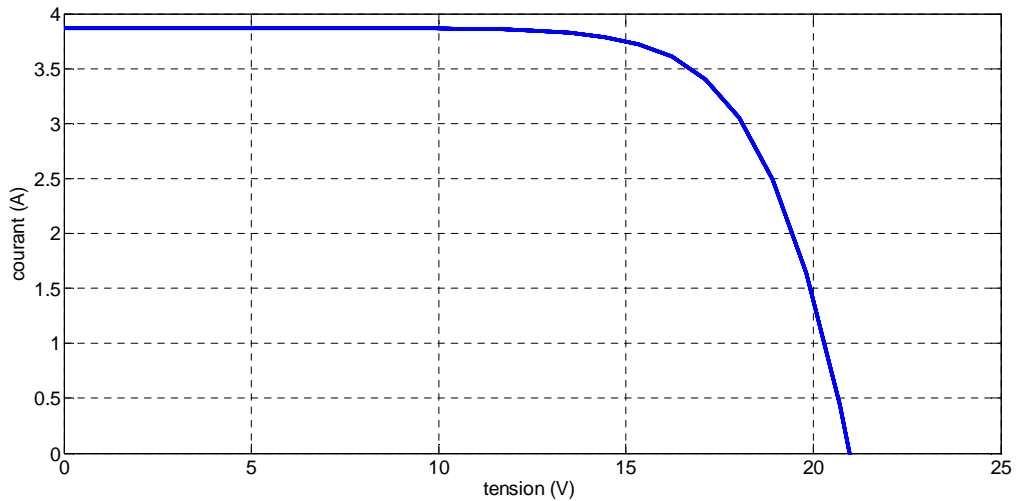


Figure II.3 : Caractéristique I(V) d'un GPV dans les conditions standards.

II.2.2.3 Caractéristique puissance-courant d'un GPV :

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

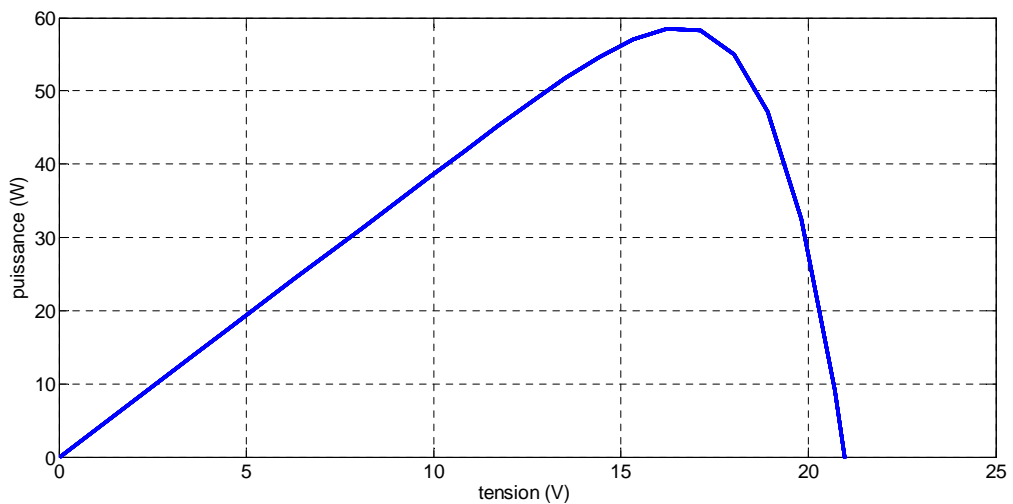


Figure II.4 : Caractéristique P(V) d'un GPV dans les conditions standards.

II.2.2.4 Association des cellules photovoltaïque en parallèle :

Une association parallèle de cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement des cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.[ALO 06]

L'équation (II-11) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n_p$  cellules.  $I_{SCn_p} = n_p * I_{SC}$  avec  $V_{OCn_p} = V_{OC}$  (II. 11)

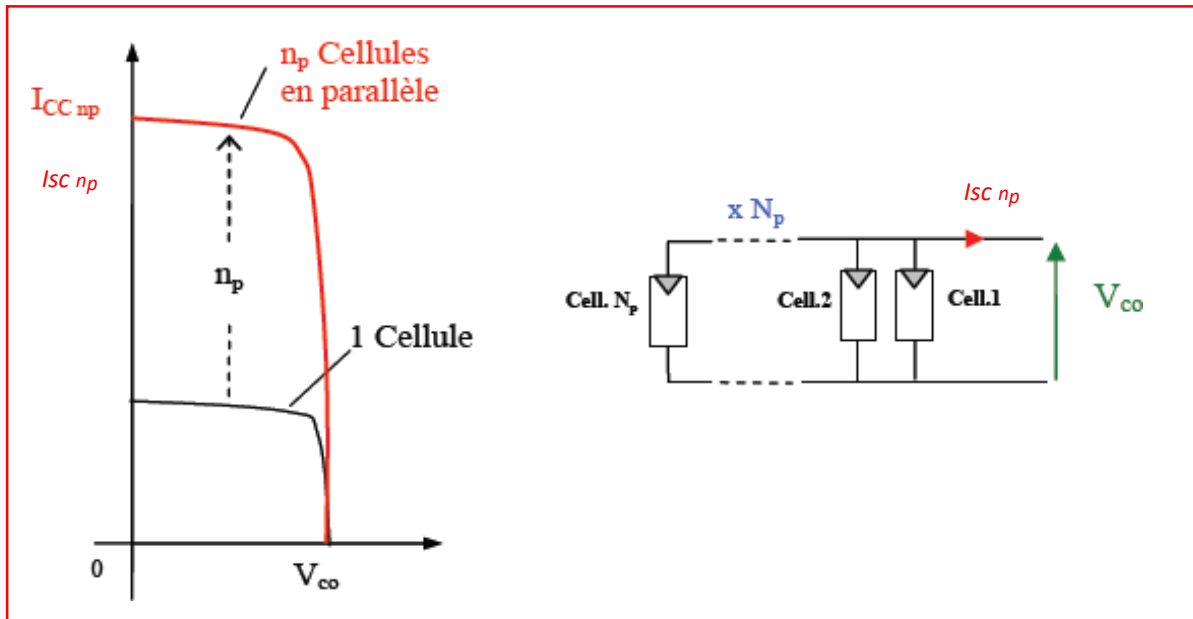


Figure II.5: Caractéristique résultante d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle.

II.2.2.5 Association des cellules photovoltaïque en série :

Une association de cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque(GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.[ALO 06]

L'équation (II-12) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $n_s$  cellules.

$$V_{CO n_s} = n_s * V_{CO} \text{ avec } I_{CC} = I_{CC n_s} \tag{II. 12}$$

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

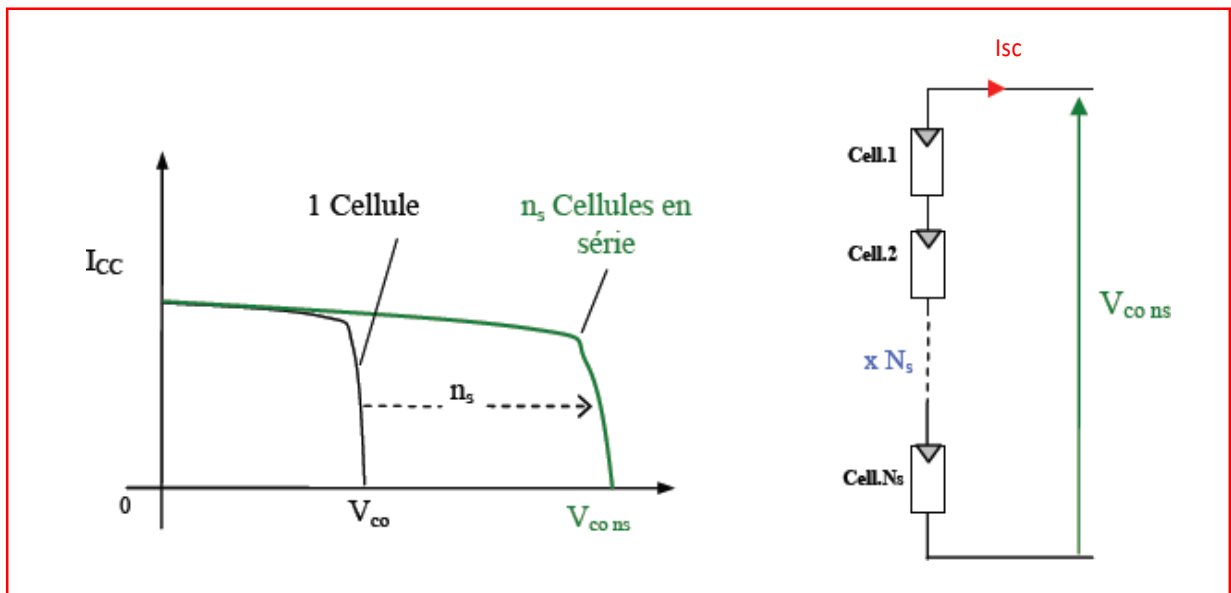


Figure II.6: Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série.

II.2.2.5.1 Effet de l'éclairement :

On applique une température  $T=25^{\circ}\text{C}$  maintenue constante et l'on fait varier l'ensoleillement (G) de 200 W/m<sup>2</sup> jusqu'à 1000 W/m<sup>2</sup>, les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes :

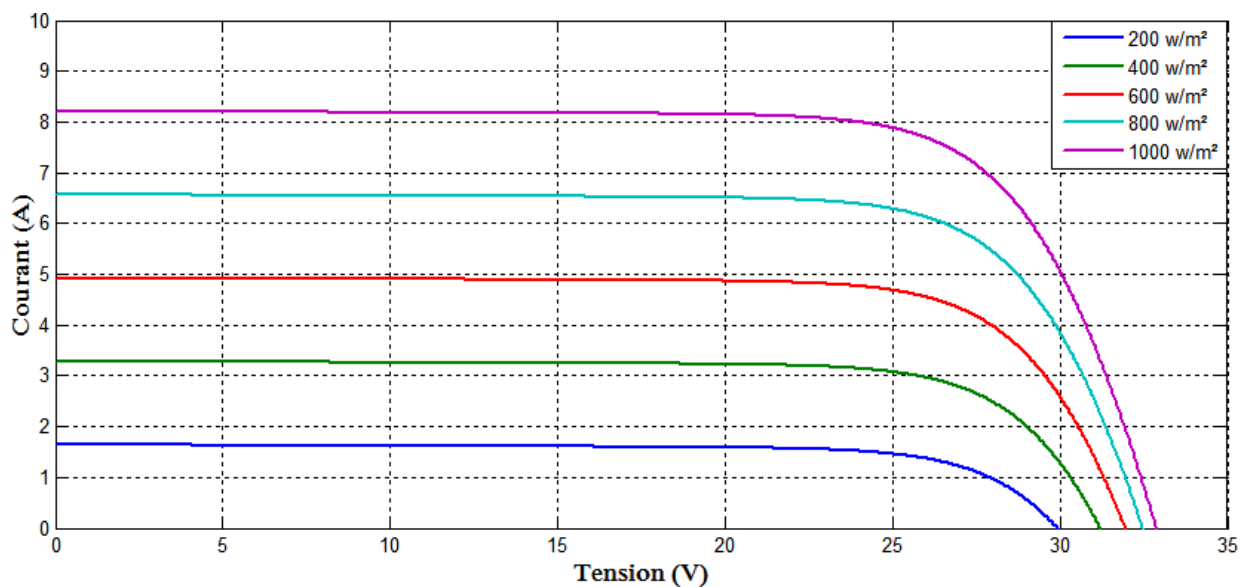


Figure II.7: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$

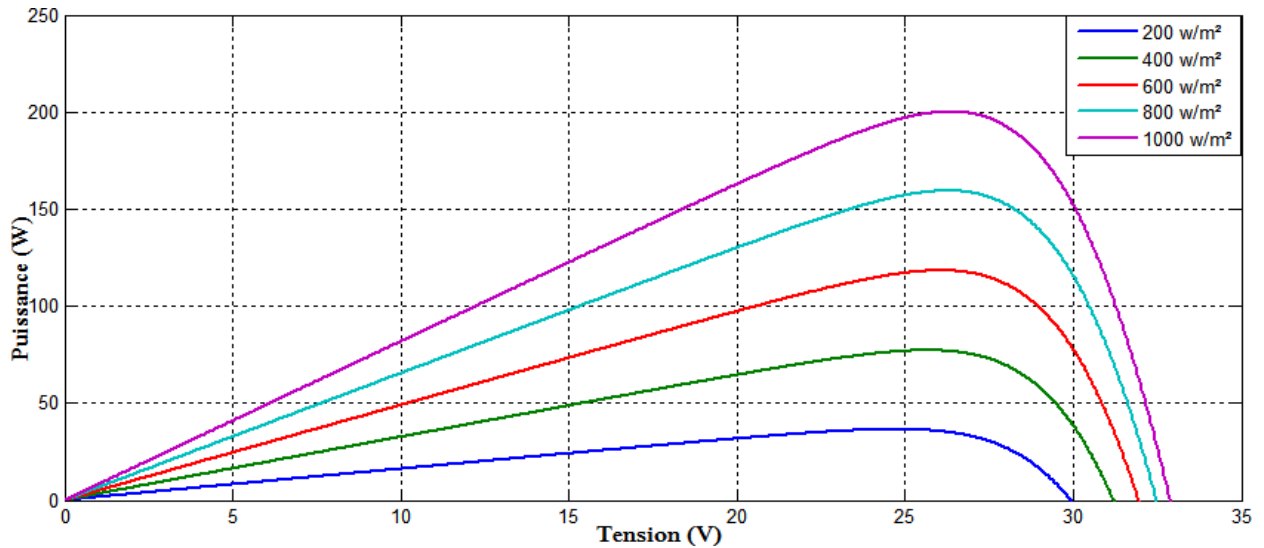


Figure II.8 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$

La caractéristique du courant-tension pour différentes valeurs de l'éclairement est décalée d'une distance proportionnellement aux rayonnements solaires. Une augmentation de l'ensoleillement engendre essentiellement une augmentation du courant PV, par conséquent la puissance du PV augmente.

**II.2.2.5.2 Effet de la température :**

Pour le fonctionnement d'un panneau solaire, la cellule PV doit s'exposer au rayonnement solaire. Ceci provoque un échauffement et la température agit sur les différentes caractéristiques de la cellule.[SIN 08]

On fixe l'ensoleillement à 1000 W/m2 et on fait varier la température de 0°C jusqu'à 75°C, les allures obtenues sont présentées en dessous:

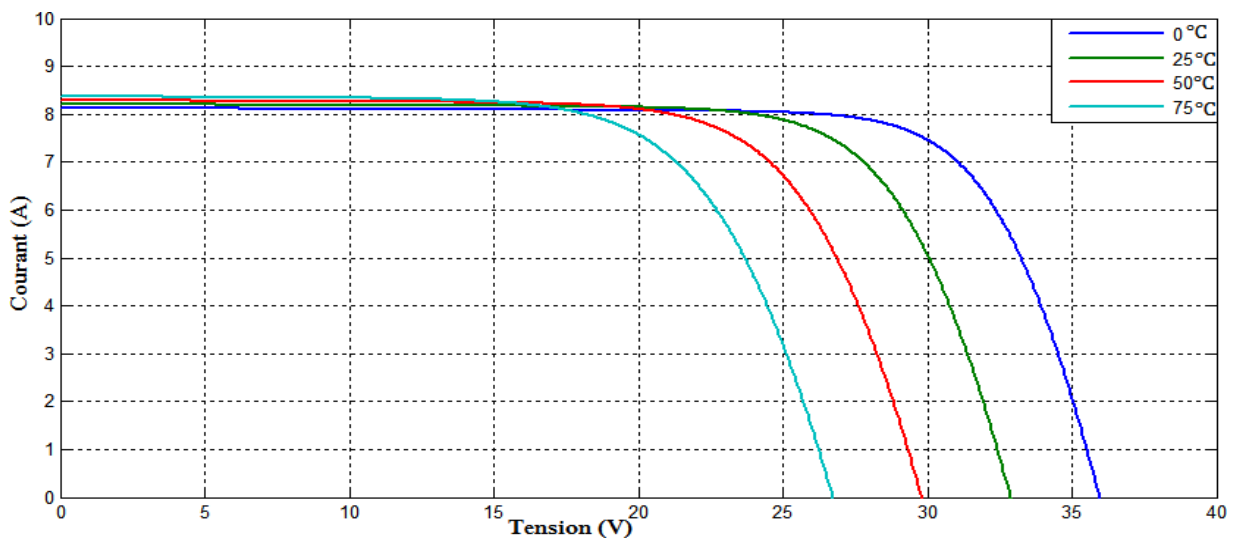
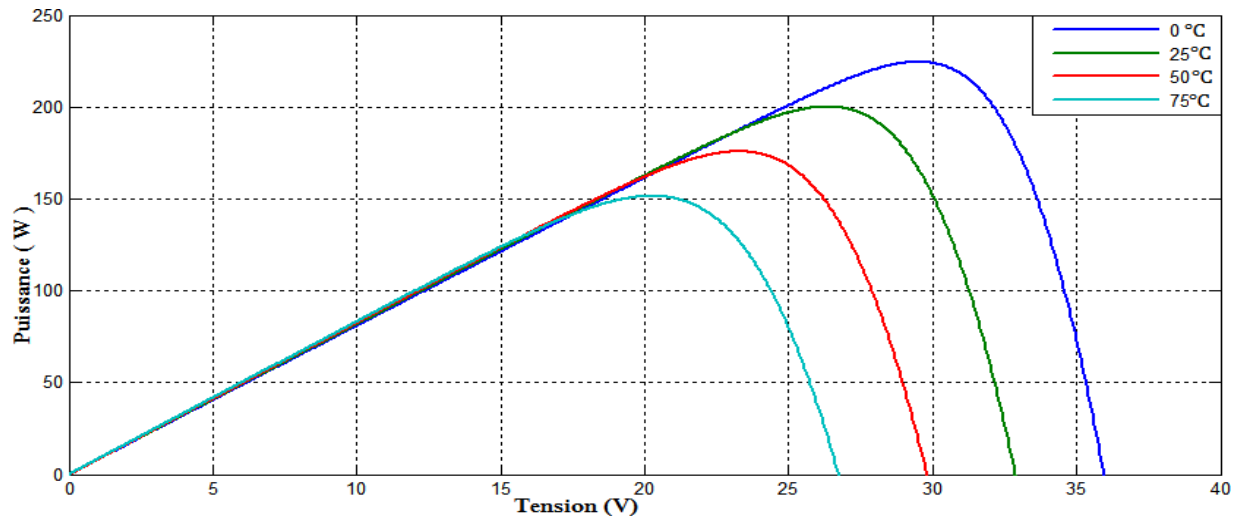


Figure II.9 :L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$



**Figure II.10 :L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$**

On remarque que l'augmentation de la température entraîne principalement une diminution de la tension par conséquent la puissance du GPV diminue. La Figure II.10 montre qu'une augmentation de la température 25°C à 75°C engendre une chute de puissance de 25%.

### II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

La machine synchrone à aimant permanent est un système non linéaire très complexe. Une commande performante sur cette machine, pour contrôler ce système, nécessite une modélisation mathématique plus précise pour représenter son comportement de manière satisfaisante et réelle.

#### II.3.1 Hypothèses simplificatrices :

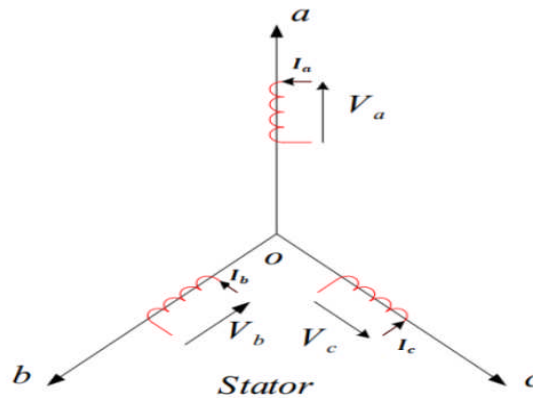
Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses à savoir que :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé et l'effet de Peau et d'hystérésis est négligé. Les flux sont des fonctions linéaires des courants qui leur donnent naissance.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, que seuls les enroulements (inducteur et induit) sont parcourus par des courants, ce qui permet de négliger les courants de Foucault.

- La densité de courant est uniforme dans les sections des conducteurs élémentaires afin de négliger l'effet pelliculaire.
- La force magnétomotrice créée le long de l'entrefer dans chaque phase de l'induit est à répartition spatiale sinusoïdale, on ne considère que le fondamental et on néglige les harmoniques d'espace.
- Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés.
- La perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air.
- L'excitation étant faite par un aimant permanent, telle que le flux d'excitation est considéré comme constant, par ailleurs, l'aimant est considéré comme un enroulement sans résistance ni inductance propre et mutuelle, mais comme source de flux [BAR 15].

**II.3.2 Equations mathématiques de la MSAP dans le repère (abc) :**

Les tensions, flux et courants statoriques triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes :



**Figure II.11 : Schéma de la MSAP dans le repère abc.**

**II.3.2.1 Equations électriques :**

$$[Vs] = [Rs][Is] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \tag{II.13}$$

Avec :

$$[Vs] = [Vas Vbs Vcs]^T, [Is] = [Ias Ibs Ics]^T, [\phi_s] = [\phi_{as} \phi_{bs} \phi_{cs}]^T$$

$$[Rs] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$R_s$ : Résistance des enroulements statoriques.

**II.3.2.2 Equations magnétiques :**

Les flux statoriques et rotoriques ont pour expression :

$$[\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [\phi_f] \tag{II.14}$$

$$\text{Et } [\phi_f] = \phi_{sf} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos \theta - \frac{2\pi}{3} \\ \cos \theta - \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix}$$

Où :

$\phi_{sf}$  : Valeur crête (constante) du flux crée par l’aimant permanent à travers les enroulements statoriques

$\theta$  : Position absolue du rotor en degré électrique

$[L_{ss}]$  : Étant la matrice des inductances statoriques.

Dans la machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statoriques  $[L_{ss}]$  est en fonction de la position. Elle contient deux termes :  $[L_{s0}]$  qui est constant, et  $[L_{s2}(\theta)]$  qui est en fonction de l’angle  $\theta = p\theta_m$ ,  $\theta$  étant l’angle électrique et  $\theta_m$  est la position mécanique du rotor par rapport au stator. **[BAR 15]**

**II.3.2.3 Equations mécaniques :**

Les seules pièces mobiles d'une (MSAP) sont le rotor et son roulement, et la robustesse et la fiabilité de cette machine est une conséquence directe de sa structure peu compliquée. A cet effet, l’application de la deuxième loi de Newton dans cette approche définit aisément. La dernière équation mécanique du modèle de système d’équations fondamentales de la MSAP

comme suite :  $\sum_i C_i = j \frac{d\Omega}{dt}$

$$C_e - C_r - f \Omega = j \frac{d\Omega}{dt} \tag{II.15}$$

$j$ : Le couple d’inertie des masses tournantes .

$C_r$  : Couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique .

$C_e$  : Couple électromagnétique .

$\Omega$  : vitesse mécanique de rotation .

$f$ : Coefficients des frottements visqueux.

$\emptyset_f$ : Flux des aimants permanents.

**II.3.3 Transformation de Park :**

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques et toriques à un système cartésien d'axes,  $d-q$ .

Dans le repère classique il y a trois axes ( $as, bs, cs$ ) orientés suivant les axes des trois enroulements statorique de la machine. D'habitude, l'axe  $as$  est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, on a toujours un seul axe ( $F$  correspondant à la direction de l'aimantation) pour la machine synchrones à aimants permanents  $\theta$  donne la position du rotor par apport au stator.

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs à  $\pi/2$  dans l'espace et alimentés par des courants à  $\pi/2$  dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les l'axes  $d$  et  $q$ , où dans le cas de la MSAP (figure II.12) l'axe  $d$  est orienté suivant le rotor, c'est-à-dire suivant la direction de l'aimantation.

Pour passer du système triphasé,  $abc$ , au système biphasé,  $d-q$ , ( réciproquement) il faut utiliser les transformations de suivantes [MOB 01][AZE 00]:

$$[V_{abc}] = [P(\theta)][V_{dq0}] \tag{II.16}$$

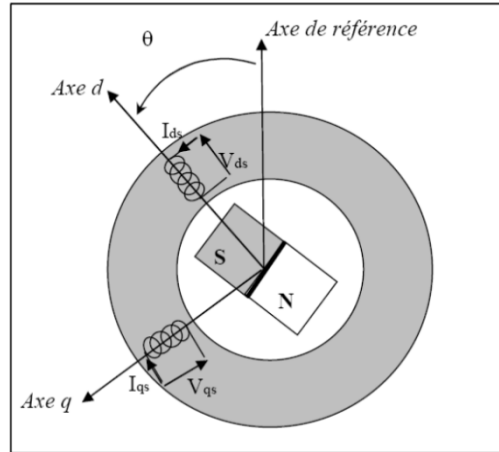
$$[V_{dq0}] = [P(\theta)]^{-1}[V_{abc}] \tag{II.17}$$

$[P(\theta)]$  et  $[P(\theta)]^{-1}$  sont les matrices de passage directe et inverse, qui sont données par:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \tag{II.18}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \tag{II.19}$$

Le système d-q sera utilisé dans la commande vectorielle des machines électriques. Dans le système d-q, les grandeurs électriques sont de type continues, ce qui donne la possibilité de faire une commande similaire à la commande des machines à courant continu.



**Figure II.12 :Machine équivalente au sens de Park [MAR 11].**

**II.3.4 Equations mathématiques de la MSAP dans le repère (d-q) :**

En appliquant la transformation de Park au système d'équation, on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor. [AZE 00]

Après développement des équations, on obtient les équations suivantes :

**II.3.4.1 Equations électriques :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega \Phi_{ds} \end{cases} \tag{II.20}$$

**II.3.4.2 Equations magnétiques :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_d I_d + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_q I_q \end{cases} \tag{II.21}$$

En introduisant (II.20) dans (II.21) on aura Le modèle électrique du MSAP sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_{ds} \frac{d}{dt} I_{ds} - \omega L_q I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_q \frac{d}{dt} I_{qs} + \omega L_d I_{ds} + \omega \Phi_f \end{cases} \tag{II.22}$$

**II.3.4.3 Expression de la puissance et du couple électromagnétique:**

Selon Park, l'expression de la puissance s'écrit comme suit :

$$p(t) = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \tag{II.23}$$

En remplaçant  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  par leur expressions il vient que :

$$p(t) = \frac{2}{3} [R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) - \left( I_{ds} \frac{d}{dt} \phi_{ds} + I_{qs} \frac{d}{dt} \phi_{qs} \right) + \frac{d}{dt} (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds})] \tag{II.24}$$

D'où :

Le 1er terme représente la chute de tension Ohmiques (pertes par effet joule).

Le 2ème terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée.

Le 3ème terme représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

Sachant que :

$$P_e = C_e \cdot \Omega \tag{II.25}$$

D'où :

$$C_e = \frac{3}{2} p [\phi_{ds} I_{qs} + \phi_{qs} I_{ds}] \tag{II.26}$$

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) I_{ds} I_{qs} + \phi_f I_{qs}] \tag{II.27}$$

Avec

$p$  : nombre de pair de pôles.

**II.3.5 Choix de repère de référence de Park :**

Pour étudier la théorie des régimes de la machine synchrones à aimants permanents, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d,q) [AZE 00]:

**II.3.5.a. Référentiel lié au stator :**

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au stator, dans ce cas la phase  $a_s$  et  $d$  coïncident. Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes de démarrages et de freinages des machines à courants alternatif.

**II.3.5.b. Référentiel lié au rotor :**

Dans ce référentiel, les axes  $(d,q)$  sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse  $\omega_r$ . l'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrages et transitoires dans les machines synchrones et asynchrones.

**II.3.5.c. Référentiel lié au champ tournant :**

Dans ce référentiel, les axes  $(d,q)$  sont immobiles par rapport au champ tournant électromécanique créé par les enroulements du stator. Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de prévoir l'application d'une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continu.

**II.3.6 Modèle d'état de la MSAP :**

D'après les équations (II.22), (II.27) et (II.15), on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} Ids = \frac{1}{Ld} (Vds - Rs Ids + \Omega Lq Iqs) \\ \frac{d}{dt} Iqs = \frac{1}{Lqs} (Vqs - Rs Iqs - \Omega Ld Ids - \Omega \phi_f) \\ Ce = \frac{3}{2} p [(Ld - Lq) Ids Iqs + \phi_f Iqs] \\ Ce - Cr - f \Omega = j \frac{d}{dt} \Omega \end{cases} \quad (II.28)$$

On Considérons les tensions  $(VdsVqs)$  et le flux d'excitation  $\phi_f$  comme grandeurs de commande, les courants statoriques  $(Ids , Iqs)$  comme variable d'état et le couple résistant  $Cr$  comme perturbation. A partir des équations (II.22) on peut écrire le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} [\dot{X}] = [A][X] + [B][V] \\ [Y] = [C][X] + [D][V] \end{cases} \quad (II.29)$$

[A] : Matrice fondamentale qui caractérise le système .

[B] : Matrice d'entrée.

[V] : Vecteur de commande.

[X] : Vecteur d'état .

[C] : Matrice de sortie.

[D] : Matrice de transfert direct.

Sous forme matricielle on peut écrire le système d'équation (II.28) comme suit :

$$\frac{d}{dt} [X] = [A][X] + [B][V] \tag{II.30}$$

Avec :

$$[X] = [I_{ds} \ I_{qs}]^T$$

$$[V] = [V_{ds} \ V_{qs} \ \phi_f]^T$$

Et

$$\begin{bmatrix} I_{\dot{d}s} \\ I_{\dot{q}s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \Omega \frac{L_q}{L_d} \\ \Omega \frac{L_d}{L_q} & \frac{-R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\Omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ \phi_f \end{bmatrix}$$

Et on pose :

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \Omega \frac{L_q}{L_d} \\ \Omega \frac{L_d}{L_q} & \frac{-R_s}{L_q} \end{bmatrix} \text{ et } [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\Omega}{L_q} \end{bmatrix}$$

On peut écrire la matrice [A] et [B] comme suit :

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ \frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \Omega$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \Omega$$

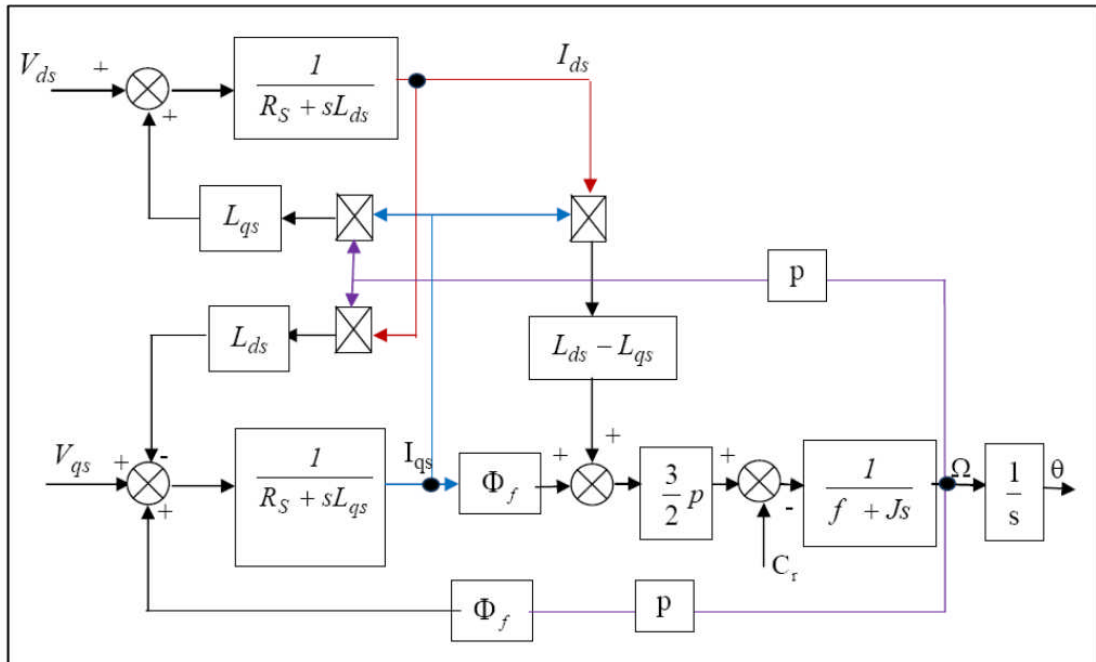


Figure II.13 :Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension.

**II.4 Modélisation et commande des convertisseurs utilisés :**

Pour assurer le fonctionnement de notre système de pompage PV on distingue deux types de convertisseurs :

- Convertisseur côté machine (Onduleur de tension) c'est un convertisseur DC-AC .
- Convertisseur côté panneau (Hacheur Boost) c'est un convertisseur DC-DC .

**II.4.1 Modélisation et technique de commande du convertisseur côté machine :**

Dans notre travail nous avons choisi l'onduleur de tension commandé par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI), la modulation sinus-triangle a été choisie pour la génération des tensions d'alimentation du MSAP.

**II.4.1.1 Modélisation du convertisseur côté machine :**

La forte évolution de l'onduleur de tension s'est appuyée d'une part sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, robustes et rapides, et, d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de "Modulation de Largeur d'Impulsions" (MLI). Ces dernières s'appuient sur les performances en terme de fréquence de découpage Pour les applications de pompage solaire, un moteur électrique à courant alternatif

est souvent utilisé. Ainsi, il faut utiliser un onduleur de tension pour alimenter ce moteur à partir des panneaux photovoltaïques.

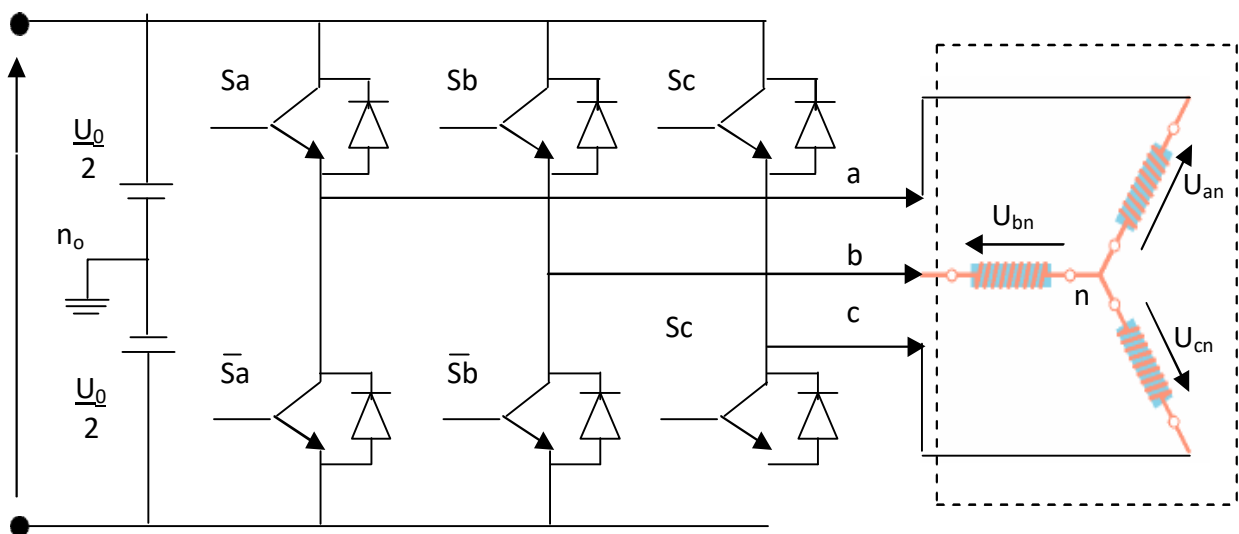
Cet onduleur transforme la tension continue issue des panneaux en une tension alternative triphasée avec une fréquence variable.[LAB 95]

d'une façon générale le convertisseur statique (onduleur) joue le rôle d'interface entre source d'énergie électrique et le moteur.

Le convertisseur statique utilisé dans notre travail est un onduleur de tension triphasé (deux niveau).Celui-ci est composé de six (06) interrupteurs, les commandes de ces dernier (interrupteur) sont complémentaires, Pour chaque bras il y a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.

- $S_{a,b,c} = 1$  : Interrupteur du demi-bras haut (a boucle fermé).
- $\bar{S}_{a,b,c} = 0$  : Interrupteur du demi-bras bas (a boucle ouvert) .

La figure (II.14) montre le schéma d'un onduleur triphasé avec sa charge.



**Figure II.14 : Schéma de l'onduleur triphasé.**

Pour simplifier l'étude, on supposera que [ROU 16]:

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

Pour les tensions composées  $u_{ab}, u_{bc}$  et  $u_{ca}$ , on a :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{ao} + u_{ob} = u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} = u_{bo} + u_{oc} = u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} = u_{co} + u_{oa} = u_{co} - u_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$u_{ao}, u_{bo}$  et  $u_{co}$  peuvent être considérées comme des tensions alimentant l'onduleur

( tension continues). Soit "  $n$  " l'indice du point neutre du coté alternatif. On a :

$$\begin{cases} u_{ao} = u_{an} + u_{no} \\ u_{bo} = u_{bn} + u_{no} \\ u_{co} = u_{cn} + u_{no} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

$u_{an}, u_{bn}$  et  $u_{cn}$  sont les tensions simples de la machine synchrone à aimants permanent

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

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad (\text{II.33})$$

La substitution de (II.31) dans (II.33) on obtient à :

$$u_{no} = \frac{1}{3}(u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (\text{II.34})$$

En remplaçant (II.34) dans (II.32), on obtient à :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{bn} = -\frac{1}{3}u_{ao} + \frac{2}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{cn} = -\frac{1}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} + \frac{2}{3}u_{co} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Alors :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{u_0}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{u_0}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ u_{cn} = \frac{u_0}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}u_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

#### **II.4.1.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion :**

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence.

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques représentent les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et à tension fixe; en général une tension continue (la tension de GPV). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement.

La méthode de contrôle des courants par M.L.I à partir d'une source de tension continue constante consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de tension sinusoïdale. La manipulation du nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à M.L.I. présente deux importants à savoir :

Repousser vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage. Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension désirée. Pour cela, deux techniques peuvent être mises en œuvre.

-Contrôle des courants par hystérésis.

-Contrôle des courants par modulation de largeurs d'impulsions (MLI).

Dans notre travail on a choisi la commande par modulation de largeurs d'impulsions (MLI) car c'est une commande robuste et simple à établir. [LAB 95]

#### **/\*Modulation de Largeur d'Impulsions Sinus-Triangle:**

Le principe général de La commande MLI consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur ( niveau puissance ). Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, de fréquence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.

- Le second, appelé signal de la porteuse, de fréquence c'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs des sorties de l'onduleur. Telle que lorsque le signal de référence est au-dessus du signal de la porteuse, l'impulsion de sortie est 1, et lorsqu'il est au-dessous de la porteuse, l'impulsion de sortie est égale à 0.

Donc le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

$$Si U_r \geq U_p \Rightarrow S(t) = 1 \text{ si non } S(t) = 0$$

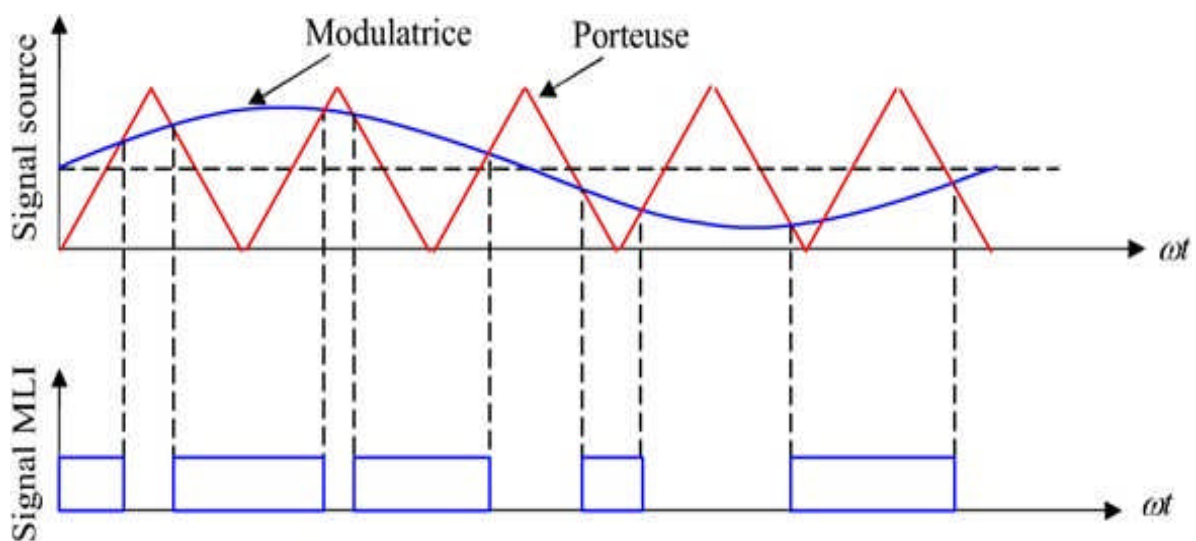
$U_r$ : la tension de référence avec  $f=50$  Hz.

$U_p$  : la tension de porteuse avec  $f=1$  KHz.

$S(t)$ : est le signal MLI résultant.

La Figure (II.15) , illustre le principe de cette commande :

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :L'indice de modulation  $m$  et le taux de modulation  $r$ .



**Figure II.15 : Illustration de la MLI triangulé - sinusoidale.**

- L'indice de modulation qui est défini comme étant le rapport entre la fréquence de la porteuse  $f_p$  et la fréquence du signal de référence ( $f$ ) :

$$m = \frac{f_p}{f} \tag{II.38}$$

- Le taux de la modulation ( le coefficient de réglage en tension ) '  $r$  ' qui est défini comme étant le rapport entre la des amplitudes de tension de la référence  $U_r$  sur la tension de porteuse  $U_p$  .

$$r = \frac{U_r}{U_p} \tag{II.39}$$

**II.4.2 Modélisation du convertisseur côté PV (hacheur) :**

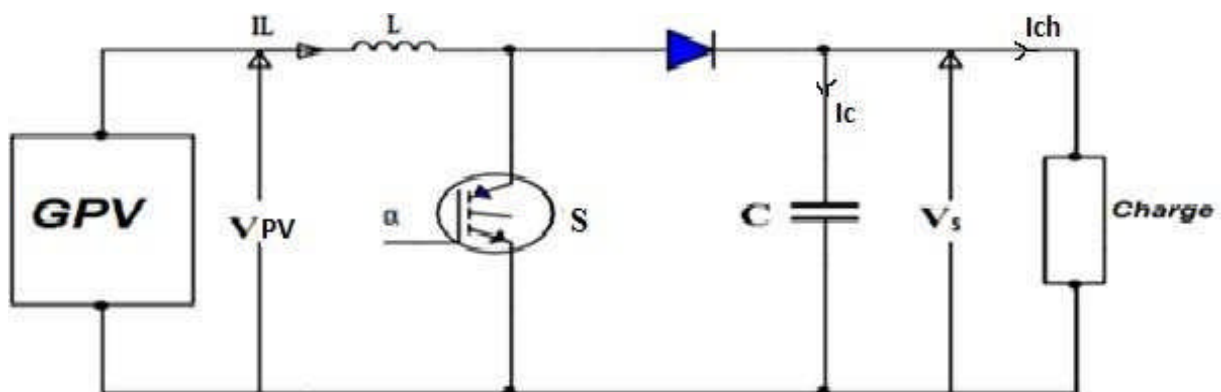
Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante.

le convertisseur Boost est le sujet de nombreuses réflexions et ressort le plus fréquemment dans la littérature pour une conversion DC/DC et de part sa simplicité, son faible coût et son rendement élevé, est la structure retenue pour réaliser la plupart des convertisseurs DC/DC photovoltaïques.

Dans le cas où la puissance générée du générateur photovoltaïque est plus forte il faut intéresser à ce type d'hacheur pour augmenter la tension d'entrée de l'onduleur.

**II.4.2.1 Représentation d'un hacheur survolteur :**

Dans ce cas, la tension d'entrée de l'hacheur boost représente la tension du générateur photovoltaïque PV (la Figure II.16).



**Figure II.16 :Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur PV.**

la résistance à la sortie du panneau PV ( $R_{pv}$ ) en fonction de  $\alpha$  et  $R_{ch}$  :

$$R_{ch} = \frac{R_{pv}}{(1-\alpha)^2} \quad (\text{II.40})$$

Dans les conditions optimales et pour une charge  $R_{ch}$  égale la résistance de l'entrée  $R_{pv}$ , le rapport cyclique ( $\alpha = 0$ ).

Aussi, le rapport cyclique  $\alpha$  s'écrit en fonction des résistances  $R_{pv}$  et  $R_{ch}$  :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_{ch}}} \quad (\text{II.41})$$

Puisque le rapport  $\alpha$  est inférieur à 1 ( $\alpha < 1$ ), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge  $R_{ch}$  remplit la condition suivante:  $R_{ch} > R_{pv}$ .

#### II.4.2.2 Modélisation d'un hacheur survolteur :

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande  $\alpha$ . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle. **[MEL 10]**

Dans de tels systèmes, l'ordre d'équations d'états est égal au nombre des éléments de stockage (pour ce cas étudié l'ordre est de 2).

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

Où  $x$ : vecteur d'état :  $x=[x_1, x_2]=[I_l, V_c]$ .

**U**: vecteur de commande.

**A**: matrice d'état.

**B**: matrice d'entrée.

**y** : le vecteur de sortie.

**C**: matrice de sortie.

➤ **Première séquence de conduction [0 à αT]:** Lorsque S est fermé. Le comportement dynamique du circuit est donné par:

$$V_{pv} = L \frac{di_1}{dt} \quad (\text{II.42})$$

$$x_1 = \frac{V_{pv}}{L}$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (\text{II.43})$$

$$x_2 = \frac{1}{C} i_c$$

$$0 = C \frac{dV_c}{dt} + I_{ch}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (\text{II.44})$$

qui peut être écrit sous la forme:  $\dot{x} = A_1 \cdot x + B_1 \cdot V_{pv}$  (II.45)

$$V_{ch} = C_1 \cdot x$$

Avec :  $C_1 = [0,1]$

➤ **deuxième séquence de conduction [αT à T]:** Lorsque S est ouvert .

$$L \frac{di_1}{dt} = V_{pv} - V_c C \frac{dV_c}{dt} = i_1 - \frac{V_c}{R}$$

$$x_1 = \frac{1}{L} V_{pv} - \frac{1}{L} x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \quad (\text{II.46})$$

$$V_{pv} = L \frac{di_1}{dt} + V_c \quad (\text{II.47})$$

$$I_l = C \frac{dV_c}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.48})$$

$$\text{D'ou : } \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (\text{II.49})$$

Ce système peut être mis sous la forme :  $\dot{x} = A_2 \cdot x + B_2 \cdot V_{pv}$

$$V_{ch} = C_1 \cdot x \tag{II.50}$$

➤ **Model Moyen:** A partir des équations (II.21) et (II.26), on peut déduire la forme moyenne et  $V_{ch}$  pour toute la période:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A_1 \cdot x + B_1 \cdot V_{pv})a + (A_2 \cdot x + B_2 \cdot V_{pv})(1 - a) \\ V_{ch} &= (C_1 a + C_1(1 - a)) \cdot x \end{aligned} \tag{II.51}$$

Avec :  $A = A_1 a + A_2(1 - a)$

$$B = B_1 a + B_2(1 - a) \tag{II.52}$$

Où : **A** : matrice d'état ; **B** : matrice de commande

En conclusion: le modèle moyen du hacheur survolteur est :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-a}{L}x_2 + \frac{1}{L}U \\ \dot{x}_2 = \frac{1-a}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \tag{II.53}$$

Ainsi le courant de la charge égale :

$$I_{ch} = \frac{1}{R}V_c = \frac{1}{R}x_2 \Rightarrow x_2 = R \cdot I_{ch} \tag{II.54}$$

Donc l'équation II.29 sera comme suite :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-a}{L}x_2 + \frac{1}{L}U \\ \dot{x}_2 = \frac{1-a}{C}x_1 - \frac{1}{C}I_{ch} \end{cases} \tag{II.55}$$

**II.5 Modélisation de la pompe centrifuge :**

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation **[PET 08]**:

$$f(H, Q, w) = 0 \tag{II.56}$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en générale C'est la vitesse qui est constante.

La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d$$

H : Hauteur totale du pompage.

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

$H_d$  : est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

perdes des charges linéaires : Se sont des pertes d'eau dans la tuyauterie est donnée par la formule suivante [THO 98]:

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{Lv^2}{D2g} \quad (\text{II.57})$$

Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s) qui est donnée par :

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{II.58})$$

$$\Rightarrow \Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{II.59})$$

perdes des charges singulières (locale) : Sont dues essentiellement aux divers changements de section est donnée par l'expression suivante : [THO 98]

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \quad (\text{II.60})$$

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

Alors La hauteur dynamique est la somme des deux pertes

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 = \left( \lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = K_{fr} \cdot Q^2 \quad (\text{II.61})$$

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

$$\text{La hauteur totale de pompage est: } H = H_s + K_{fr} \cdot Q^2 \quad (\text{II.62})$$

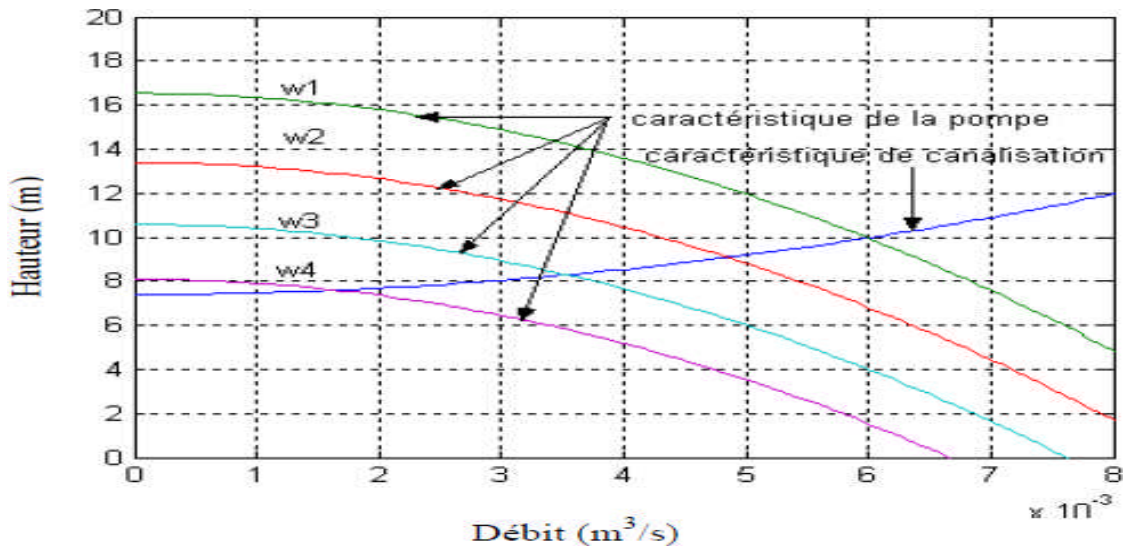
**II.5.1 La caractéristique Q (H) de la pompe:**

La relation liant la hauteur d'eau H avec le débit de la pompe Q est donnée par le modèle de « PELEIDER-PETERMANN »

$$H = a_0 \omega^2 - a_1 \omega Q - a_2 Q^2 \tag{II.63}$$

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

La courbe H (Q) est donnée par la figure suivante :



**Figure II.17 : Courbe H (Q) de la pompe centrifuge et la caractéristique de canalisation.**

Le point de fonctionnement est l'intersection de ces deux caractéristiques. Alors pour une vitesse donnée, il y a seulement un point de fonctionnement qui dépend fortement des caractéristiques de tuyauterie d'une pompe indiquée. Par conséquent une bonne conception et une tuyauterie de bon choix donnent de bons résultats dans le système de pompage.

**II.5.2 La caractéristique couple vitesse C (ω) de la pompe :**

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple résistant qui est de la forme suivante :

$$C_r = K_p \omega^2 \tag{II.64}$$

**II.5.3 Calcul de puissance:**

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

$$P_H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (w) \tag{II.65}$$

L'autre expression a considéré est celle de la puissance absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprime par la relation suivante :

$$P_m = 9,81. \rho. Q. H / \eta_p \quad (w) \quad (II.66)$$

ou:

$\eta_p$ : Le rendement de la pompe.

$P_m$  : Puissance mécanique du moteur.

$\rho$  : La masse volumique de l'eau (=1000Kg au m<sup>3</sup>).

#### **II.5.4 Calcul du rendement :**

Pour les groupes électropompes (pompe + moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement globale.

$$\rho_{mp} = \frac{P_H}{P_a} \quad (II.67)$$

**II.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la chaîne globale du système de pompage photovoltaïque séparément. Cette chaîne qui est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents entraînée une pompe centrifuge et pilotée par le stator via un onduleur deux niveaux. Cet onduleur alimenté par une source photovoltaïque à travers un hacheur survolteur.

Nous avons entamé notre travail par la modélisation d'un générateur photovoltaïque et son convertisseur (hacheur survolteur-Boost-). Par la suite, nous avons modélisé , dans une première étape, la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de Park (Repère biphasé (d-q)) lié au champ tournant qui réduit la complexité du modèle, puis, dans une seconde étape, l'onduleur qui alimente le stator de la MSAP permettant ainsi l'application des commandes pour contrôler les puissances mécanique générées par le rotor de la machine.

Ces modèles ont été utilisés dans le chapitre suivant pour l'élaboration de plusieurs techniques de commandes pour assurer un contrôle précis et continu tout en garantissant une stabilité, une rapidité de poursuite avec une erreur statique nul. Cela a permis d'obtenir un rendement élevé du système.

## ***CHAPITRE III :***

***Commande et optimisation du  
système de pompage photovoltaïque***

**III.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous dimensionnons notre système de pompage photovoltaïque pour appliquer quelques algorithmes de commandes sur ce système qui permettront de garder instantanément un bon rendement de fonctionnement. Dans la première partie de ce chapitre nous allons présenter brièvement les différentes étapes du dimensionnement de notre système. Ensuite, les méthodes correctes de dimensionnement de la pompe centrifuge et la source photovoltaïque du système, dans tous les cas il est nécessaire de connaître le besoin en eau, le gisement d'énergie solaire du lieu concerne. Ceci permet de faire le bon choix des modules photovoltaïques et la pompe centrifuge.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous développerons deux techniques de commandes ; l'une des applications concerne la commande de la source photovoltaïque du système, nous allons citer et expliquer les différents algorithmes de poursuite du point de puissance maximale pour obtenir une algorithmes qu'est donner un bonne qualité d'énergie électrique produite par cet source ; l'autre, concerne la commande vectorielle appliquée sur la machine du notre système, cette commande aux moyens de régulateurs PI basée sur l'orientation du flux statorique pour linéariser le modèle de la machine et découpler le contrôle la variation de vitesse du moteur synchrone à aimant permanent (MSAP), qui va nous permettre de réguler le débit de la pompe centrifuge.

On termine ce chapitre par des résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée sur la machine MSAP à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

### III.2 Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque :

Selon le choix de la puissance de la pompe et pour avoir la quantité d'eau pompée pour un éclairage et une température donnée, on peut dimensionner notre système de pompage suivant ces derniers paramètres pour atteindre le bon fonctionnement et le bon rendement.

#### III.2.1 Les critères de choix :

Pour atteindre cet objectif on va passer par les étapes suivantes :

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

##### III.2.1.1 Evaluation des besoins en eau :

L'estimation des besoins en eau c'est la première étape à suivre lors d'un dimensionnement d'une installation du pompage photovoltaïque. Dans le cas de l'irrigation, les besoins d'eau dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question). [LOU 13]

##### III.2.1.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire:

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_{ele} = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{R_p} \quad (III. 1)$$

ou:

$E_{ele}$ : Habituellement exprimé en KWh.

$Q$ : Débit journalier (m<sup>3</sup>/jour).

$HMT$ :Hauteur manométrique.

$R_p$  : En général le rendement des groupes motopompes est de 30% à 45%, selon le type de pompe et de moteur. [BOU 12]

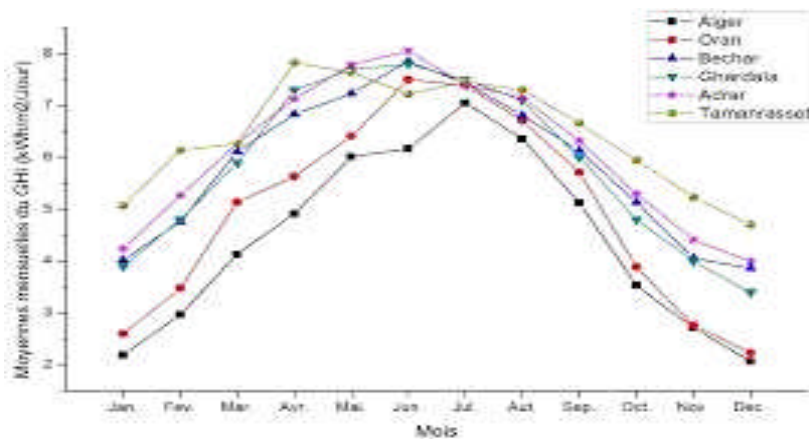
$$C_H = \frac{g \cdot \rho}{3600} = 2.725 \quad (\text{III.2})$$

$g$ : Constante de gravité (9,81 m/s<sup>2</sup>).

$\rho$ : La densité de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>).

### III.2.1.3 Détermination de l'énergie solaire disponible :

Il est nécessaire de connaître avec une assez bonne précision l'énergie solaire reçue en moyenne par jour sur le site pendant une période donnée. [ANT 06]



**Figure III.1: Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site d'Algérie de 2010 à 2017.**

#### 1/\* Inclinaison et orientation optimale des capteurs photovoltaïques :

L'inclinaison  $\beta$  des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire. [HAD 05]

L'inclinaison optimale est la latitude de lieux plus  $10^\circ$ . Les panneaux doivent constamment maintenir un angle droit avec les rayons soleil, si non orientés en plein Sud dans l'hémisphère Nord et plein Nord dans l'hémisphère Sud. [TRA 11] [HAD 05]

#### 2/\* Mois de dimensionnement :

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, son principe est de réaliser un bilan énergétique sous les conditions les plus défavorables pour le système.

C'est-à-dire, si le système fonctionne durant ce mois, il fonctionnera dans les autres mois, donc il nous garantit un fonctionnement annuel. L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire correspondantes à ce mois, serviront pour le choix des composantes du système. [BOU 12]

#### III.2.1.4 Choix des composants :

#### III.2.2 Dimensionnement de la pompe centrifuge :

Dans notre cas le débit journalier sera de 5.4 m<sup>3</sup>/h et la HMT est estimée à 63m. La pompe choisie a un rendement de 55 %, et l'efficacité du moteur, d'environ 80 % au point de fonctionnement nominal. Le rendement total du groupe motopompe ( $R_p$ ) sera donc de 45 %. D'après l'équation (III.1) de l'énergie électrique requise par la pompe on aura :

$$E_{ele} = \frac{2.725 * 5.4 * 63}{0.45} \quad (III.3)$$

$$E_{ele} = 2060.1 \text{ Wh/jour}$$

#### III.2.3 Dimensionnement du champ photovoltaïque :

D'après la figure (III.1), le mois de décembre est le mois où l'ensoleillement (G) est défavorable pour une inclinaison de 36,43°, pour le plus faible ensoleillement de 1,5 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 20 % attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur [THO 98], dans ce cas la puissance crête ( $P_c$ ) de champ photovoltaïque se calculera comme suite :

$$P_c = \frac{E_{ele}}{E_{ns}(1-pertes)} \quad (III.4)$$

$$P_c = \frac{2060.1}{1.5(1-0.2)} = 1716.75W$$

Pour des panneaux de types PROPSOLAR module 60W,  $V_{opt} = 17.20V$ ,  $I_{opt} = 3.49A$ .

$$N_{pv} \geq ENT \left[ \frac{P_c}{P_{pv,u}} \right]$$

$$N_{pv} \geq ENT \left[ \frac{1716.75}{60} \right] = 28.61 \quad (III.5)$$

Pour 30 panneaux photovoltaïque la puissance totale sera égale :

$$P_{pv,tot} = 30 * 60 = 1800W \quad (III.6)$$

On branche les panneaux en série. Parce que (Les caractéristiques du moteur synchrone utiliser :  $P_n=1400$  W, avec un rendement de 45%).

La tension à la sortie de générateur photovoltaïque totale sera :

$$V_{pv,tot} = 15 * 17.20 = 258V \quad (III.7)$$

### **III.3 Commandes d'un système de pompage photovoltaïque :**

#### **III.3.1 Commandes de la source du système de pompage (générateur photovoltaïque) :**

Les générateurs photovoltaïques ont une production électrique aléatoire directement dépendante des conditions météorologiques. Ainsi, le dimensionnement et l'exploitation optimale de l'énergie produite par ces générateurs exige l'utilisation de méthodes de gestion appropriées. De même, l'amélioration du rendement du système photovoltaïque nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV qui permet d'établir la commande adéquate en vue de tirer le maximum de puissance de ces générateurs.

##### **III.3.1.1 Aperçu sur la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT)**

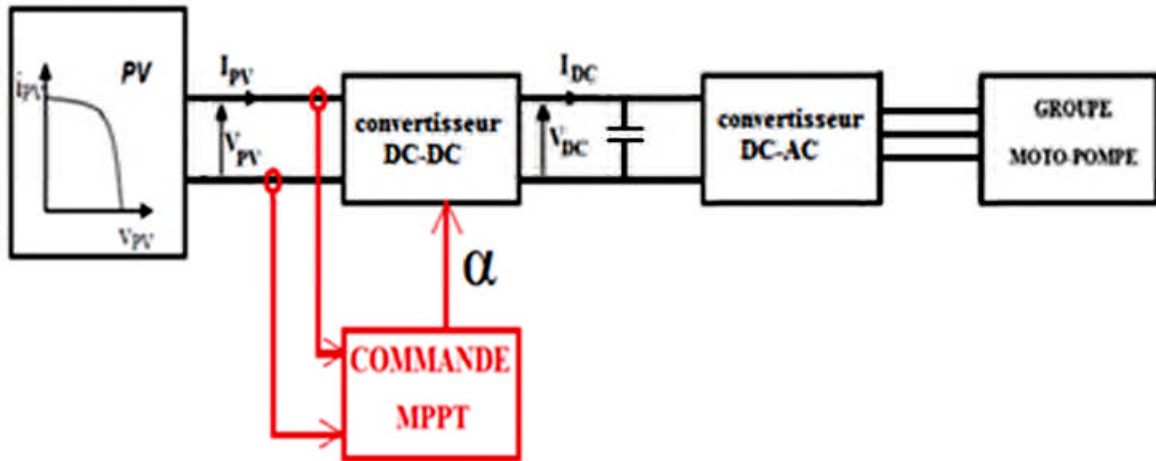
###### **III.3.1.1.1 Historique:**

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. [12]

###### **III.3.1.1.2 Principe de la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) :**

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ). [12]

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III.2).



**Figure III.2: Système photovoltaïque avec une commande MPPT.**

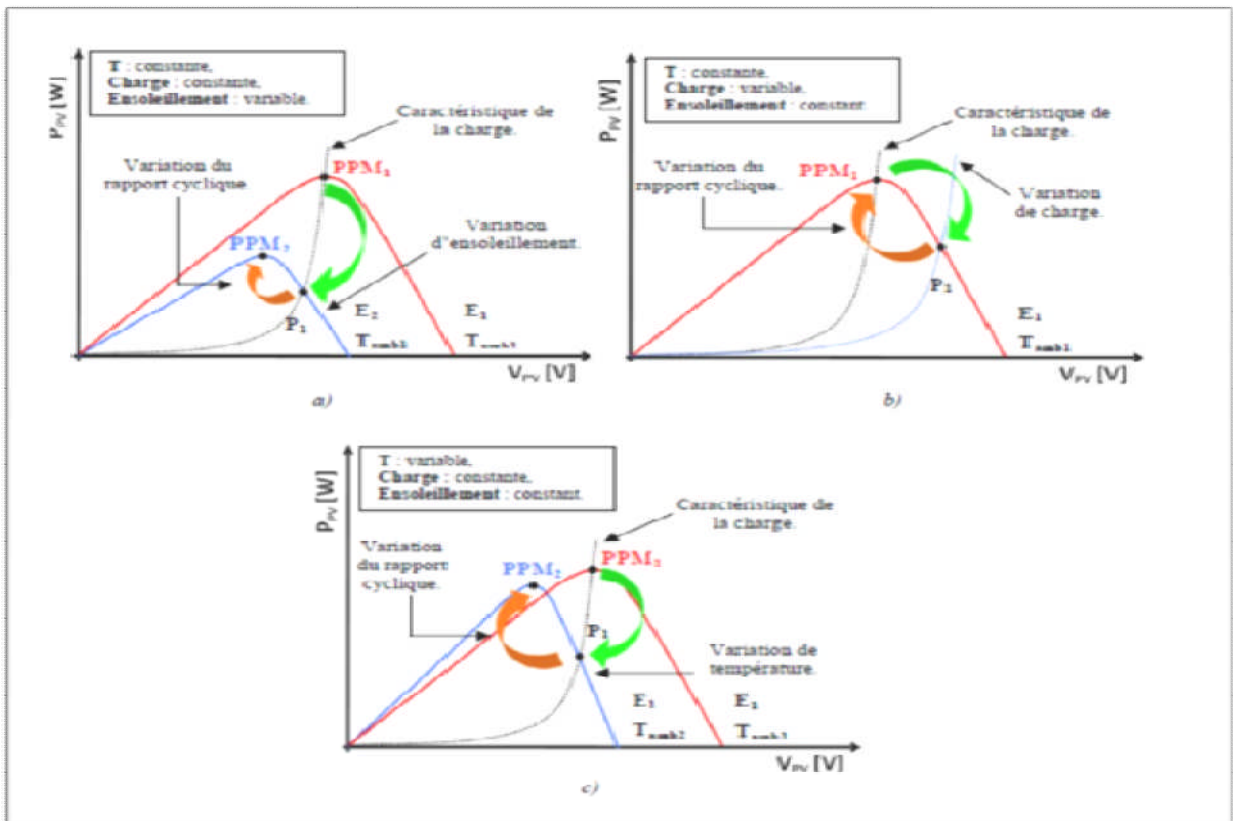
La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique du hacheur de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (III.3) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal  $PPM_1$  vers un nouveau point  $P_1$  de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum  $PPM_2$ . Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents.

En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. [24]



**Figure III.3:** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

### III.3.1.2 Les algorithmes de commandes appliqués :

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturbation & Observation (P&O) et l'incrément de conductance (INC), et la nouvelle méthode Golden section search (GSS).

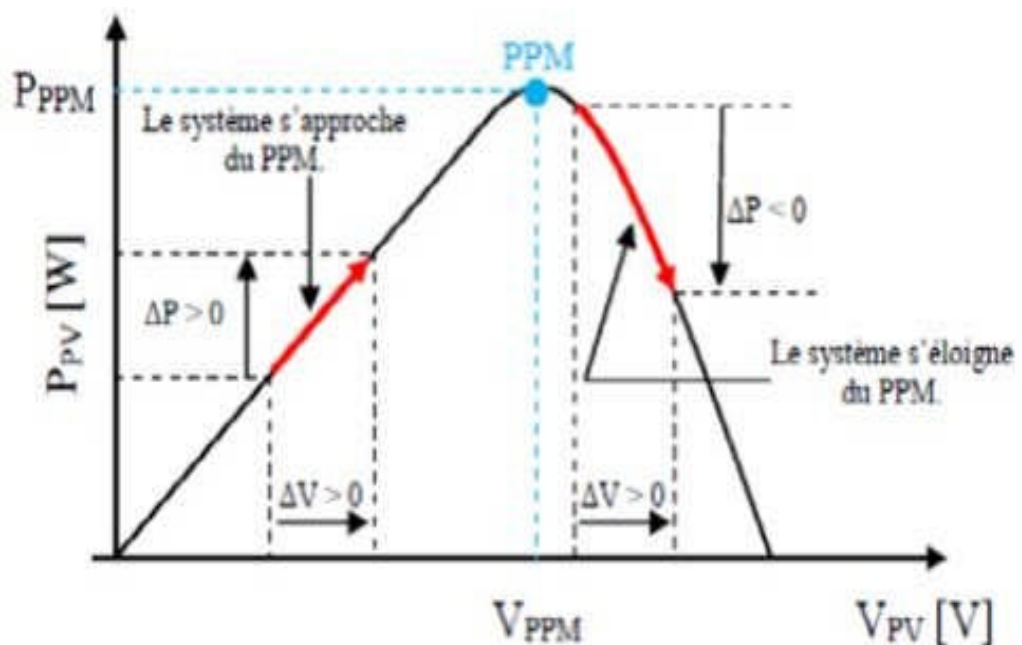
Dans notre travail on se limite à les deux méthodes; la première c'est la perturbation et observation (P&O) qui est très simple à implanter et de bon rendement, et la deuxième c'est Golden section search (GSS). Pour une meilleure compréhension de ces commandes, nous rappelons brièvement son principe dans le paragraphe suivant.

#### III.3.1.2.1 La commande 'Perturbation et Observation' (P&O):

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque. Sur la figure(III.4) on voit que

si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente, la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction.

Par contre, si la puissance diminue, alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante. Cet algorithme est résumé sur la figure (III.4) et l'organigramme descriptif est donné par la figure(III.5). Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance. L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. [25]



**Figure III.4:** Signe de et à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.

L'algorithme qui décrit le fonctionnement de la méthode P&O est illustré dans la figure (III.5) suivante :

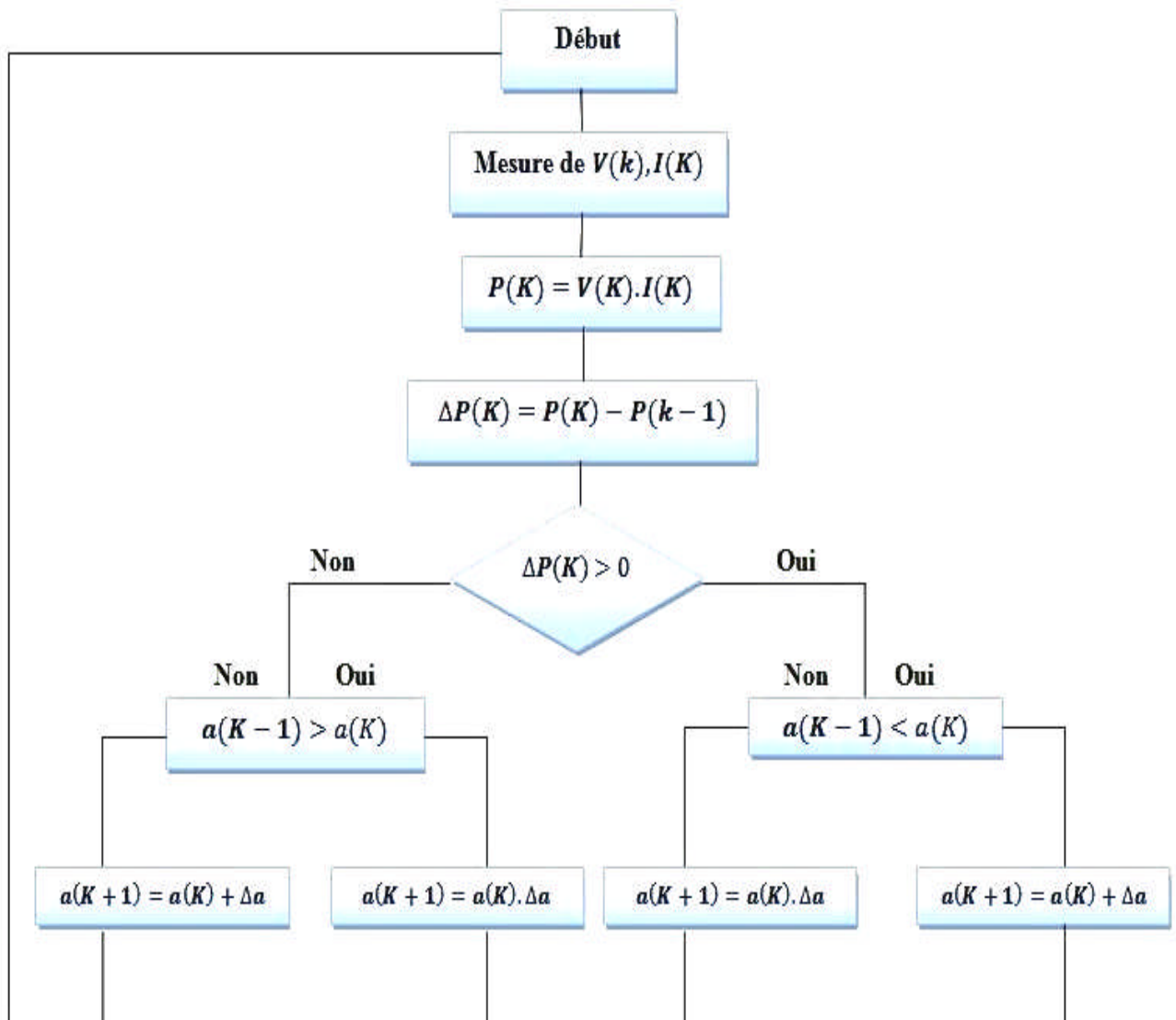
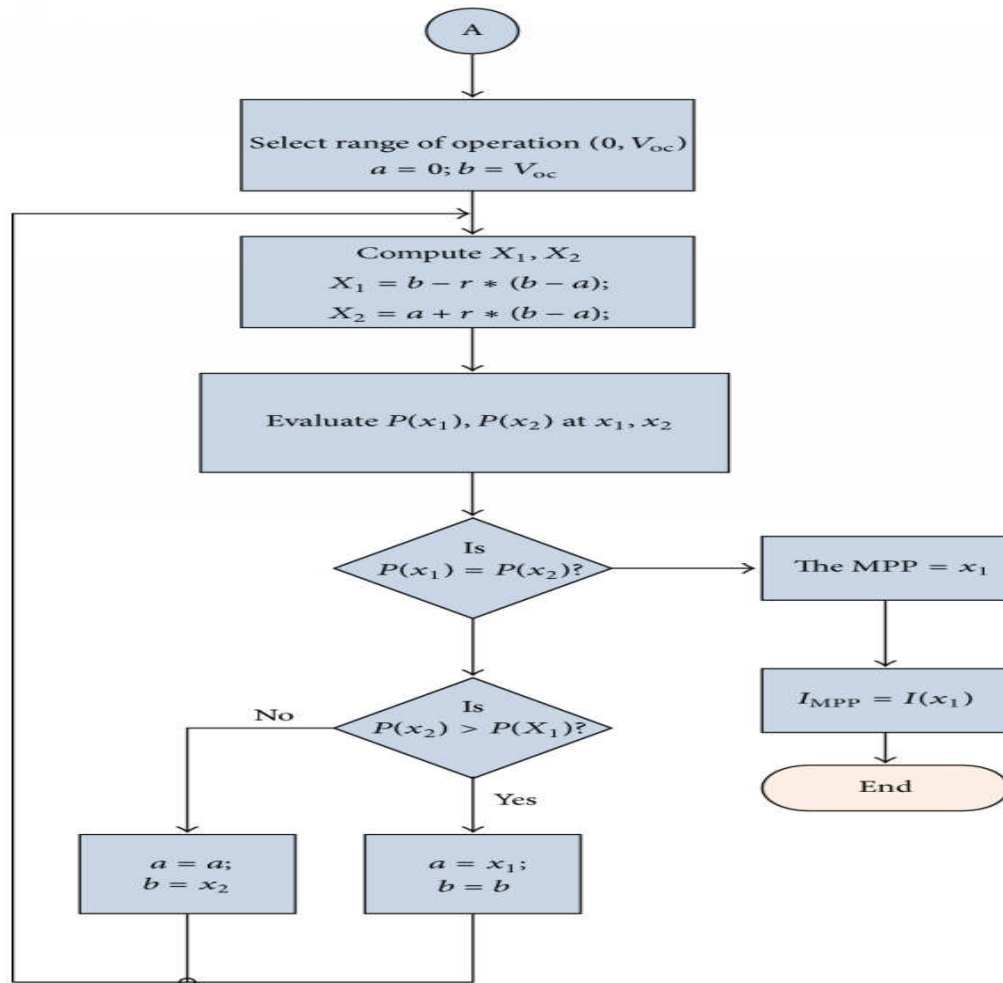


Figure III.5: Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O).

### III.3.1.2.2 la commande "Golden section search" (GSS):

La recherche de la section dorée (Golden section search GSS) est une technique pour trouver l'extremum (minimum ou maximum) en il est connu que le rétrécissement successif de la plage de valeurs à l'intérieur de laquelle l'extrémum existe. La technique tire son nom du fait que l'algorithme conserve les valeurs de fonction pour des triplets de points dont les distances forment un nombre d'or. L'algorithme est la limite de la recherche de Fibonacci pour un grand nombre de fonctions évaluations. La recherche de Fibonacci et la recherche de la section dorée ont été découvertes par Kiefer en 1953.



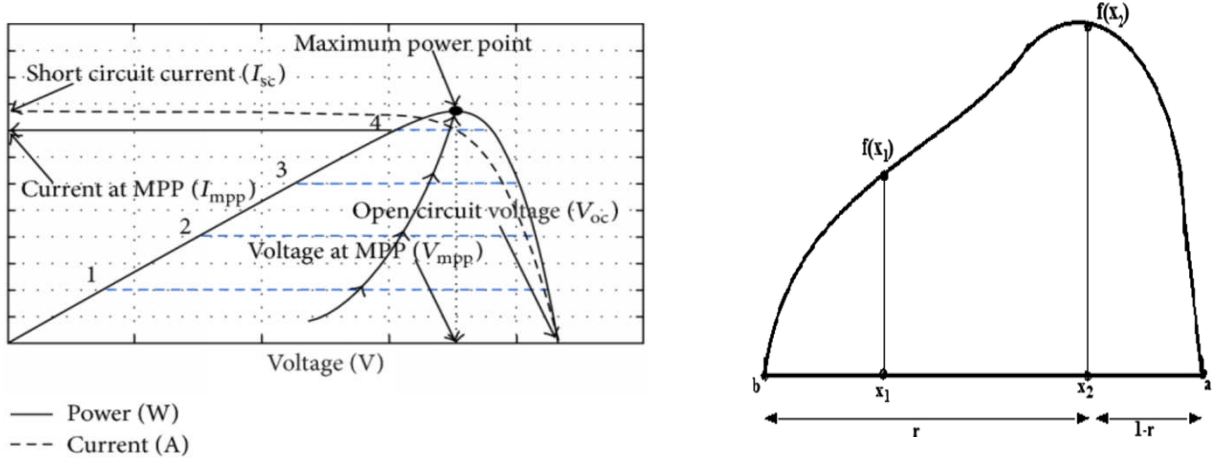
**Figure III.6:**Algorithme MPPT Golden Section Search (GSS).

**/\*Principe de la commande ‘Golden section search’ (GSS):**

Pour un MPPT basé sur GSS pour système photovoltaïque, les caractéristiques P-V sont les caractéristiques dans lesquelles  $f(x)$  correspond à la puissance, dont la valeur maximale doit être suivie. La gamme de le fonctionnement est de zéro à la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ); c'est-à-dire,  $a = 0$  et  $b = V_{oc}$  comme le montre la figure III. 7 (b). Le chemin du point maximal de suivi est illustré à la figure III.7 (a). La tension correspondant à la puissance maximale est obtenue et mappé dans les caractéristiques V-I pour obtenir la référence actuelle.

L'objectif principal est de trouver la valeur fonctionnelle maximale de  $(x)$  dans l'intervalle d'entrée  $[a b]$ . Deux points  $x_1$  et  $x_2$  sont sélectionnés dans l'intervalle  $[a b]$  et la fonction  $(x)$  est évaluée à ces points. Les points  $x_1$  et  $x_2$  sont choisi de telle sorte que chaque point subdivise l'intervalle en deux parties et la longueur de la ligne entière / la longueur de la

plus grande fraction = longueur de la plus grande fraction / longueur de la plus petite fraction.  
 Supposons un segment de ligne [0, 1] comme le montre la figure III.7 (b).



**Figure III.7(a)** Suivi MPPT avec l'algorithme GSS. **Figure III.7(b):**Division de l'intervalle.

Alors,  $1 / r = r / 1 - r$ ;

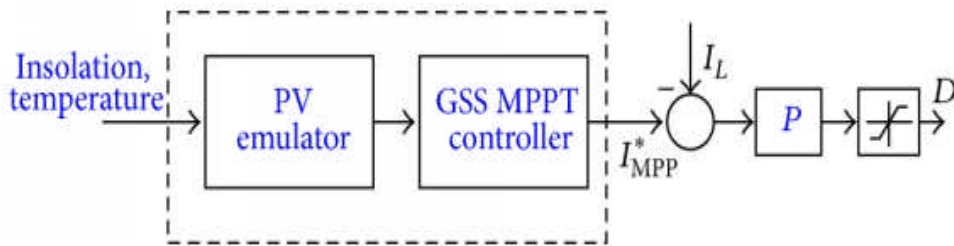
C'est,  $r^2 + r - 1 = 0$ ;

d'où:  $r = 0,618$ .

Considérons  $x_1 = b - r * (b - a)$ ; c'est-à-dire que  $x_1$  est à 0,618 intervalle de (b).

Considérons  $x_2 = a + r * (b - a)$ ; c'est-à-dire que  $x_2$  est à 0,618 intervalle de (a).

Le retour du courant d'inductance est utilisé pour générer l'erreur en la comparant avec le courant de référence  $I_{mpp}$  généré par l'algorithme GSS et il est traité par un contrôleur proportionnel (P). Ce contrôleur P modifie le rapport cyclique (D) en fonction de l'erreur et régit le PV pour suivre la puissance maximale point sur ses caractéristiques. La figure III.8 montre le schéma de principe du générateur de référence basé sur GSS MPPT.



**Figure III.8:** GSS MPPT

### III.3.2 Commande de la machine utilisée dans le système de pompage (Commande vectoriel) :

La commande des machines synchrones à aimant permanent est difficile du fait qu'il existe un couplage complexe entre le flux et le couple. Cette difficulté a encouragé le développement de plusieurs techniques de commande afin que ces machines se comportent comme des machines à courant continu, caractérisées par un découplage naturel de la vitesse et du couple. Parmi ces techniques de commande, la commande vectorielle, commande par logique floue et la commande par mode glissant [Nour ben].

#### III.3.2.1 Principe de la commande vectorielle (l'orientation du flux rotorique) :

Quelque soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ou de position), le contrôle du couple de moteur est nécessaire. Celui-ci, dépendant des deux variables  $I_d$  et  $I_q$ , nous laisse un degré de liberté. Cette liberté peut être exploitée afin de satisfaire un critère d'optimisation selon l'application.

L'objectif principal de la commande vectorielle des MSAP est donc de contrôler le couple de manière optimale selon un critère choisi. Le critère choisi correspond souvent à la minimisation des pertes Joule à couple donné. Mais ce critère demande la solution d'un problème d'optimisation qui impose le contrôle simultané des courants  $I_d$  et  $I_q$ . Pour simplifier la commande, on fixe souvent le courant  $I_d$  de manière que le couple soit proportionnel à  $I_q$  dans une plage de vitesse donnée. [BAB 01][BOU 05][MER 07].

Dans les machines à rotor lisse ( $L_d = L_q$ ), où le couple ne dépend que de la composante en quadrature  $C_{em} = p \cdot \Phi_f \cdot I_q$ , la valeur optimale du courant direct est évidemment zéro ( $I_d = 0$ ). Mais pour pôles saillants elle peut être fixée à une valeur qui correspond au couple maximal à courant maximal.

#### III.3.2.2 Application de la commande vectorielle à la MSAP :

Le modèle de la MSAP alimenté en tension est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + L_d \omega I_d + \omega \Phi_f \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

$$\text{et :} \quad j \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f \omega_r \quad (\text{III.9})$$

avec :  $\omega = p \cdot \omega_r$

$$C_{em} = p [(L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f I_q] \tag{III.10}$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAP est un système multi-variable, non linéaire et fortement couplé.

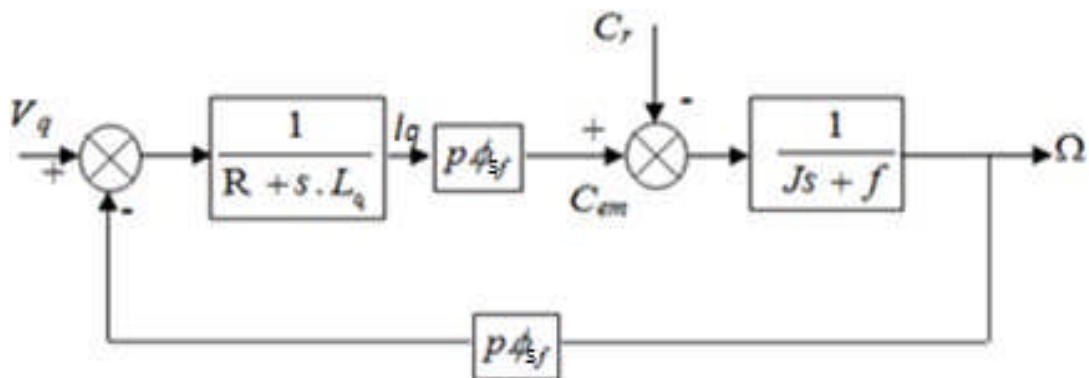
Le but principal de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leurs comportements statiques et dynamiques grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

La machine étudiée est à pôles lisses, son couple électromagnétique est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de Park est maintenu calé sur l'axe q ( $I_s = I_q$ ). Ceci revient à imposer la composante directe du courant nulle qui a pour effet la diminution des pertes joule. Le système d'équations (III.8) devient :

$$\begin{cases} V_d = -L_q \omega I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega \phi_f \end{cases} \tag{III.11}$$

et le couple devient :  $C_{em} = p \cdot \phi_f \cdot I_q$  (III.12)

On remarque que cette stratégie permet d'éliminer le problème de couplage entre les axes «d» et «q». Le modèle (III.11),(III.12) et l'équation mécanique peuvent être représentées par le schéma fonctionnel figure(III.9) qui ressemble à celui de la machine à courant continu.



**Figure III.9:**schéma bloc représentant la (MSAP) après l'orientation du flux.

### III.3.2.3 Découplage par compensation:

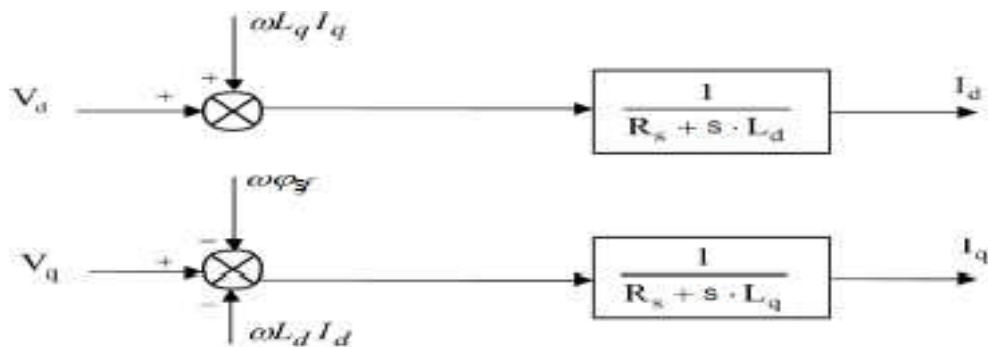
L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes  $d$  et  $q$ . [BEN 05]

Les tensions suivant les axes ( $d$ ,  $q$ ) peuvent être écrites sous les formes suivantes :

$$\begin{cases} V_d = \left( R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} \right) - \omega L_q I_q \\ V_q = \left( R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \right) + \omega (L_d I_d + \Phi_f) \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

$$\omega = p \cdot \omega_r$$

La figure (III.10) représente le couplage entre l'axe « $d$ » et « $q$ » :



**Figure III.10:** Description de couplage.

Les tensions  $V_d$  et  $V_q$  dépendent à la fois des courants sur les axes « $d$ » et « $q$ », on est donc amené à implanter un découplage. Ce découplage est basé sur l'introduction des termes compensatoires  $e_d$  et  $e_q$ .

$$\text{avec:} \begin{cases} e_d = -\omega L_q I_q \\ e_q = \omega (L_d I_d + \Phi_f) \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

A partir de l'équation (III.13) et (III.14) on a :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

avec: 
$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + S \cdot L_d) I_d \\ V_{q1} = (R_s + S \cdot L_q) I_q \end{cases} \quad (III.16)$$

On a donc les courants « $I_d$ » et « $I_q$ » sont découplés. Le courant  $I_d$  ne dépend que de  $V_{d1}$ , et  $I_q$  ne dépend que  $V_{q1}$ , à partir de l'équation (III.16) les courants  $I_d$  et  $I_q$  s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{(R_s + S \cdot L_d)} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{(R_s + S \cdot L_q)} \end{cases} \quad (III.17)$$

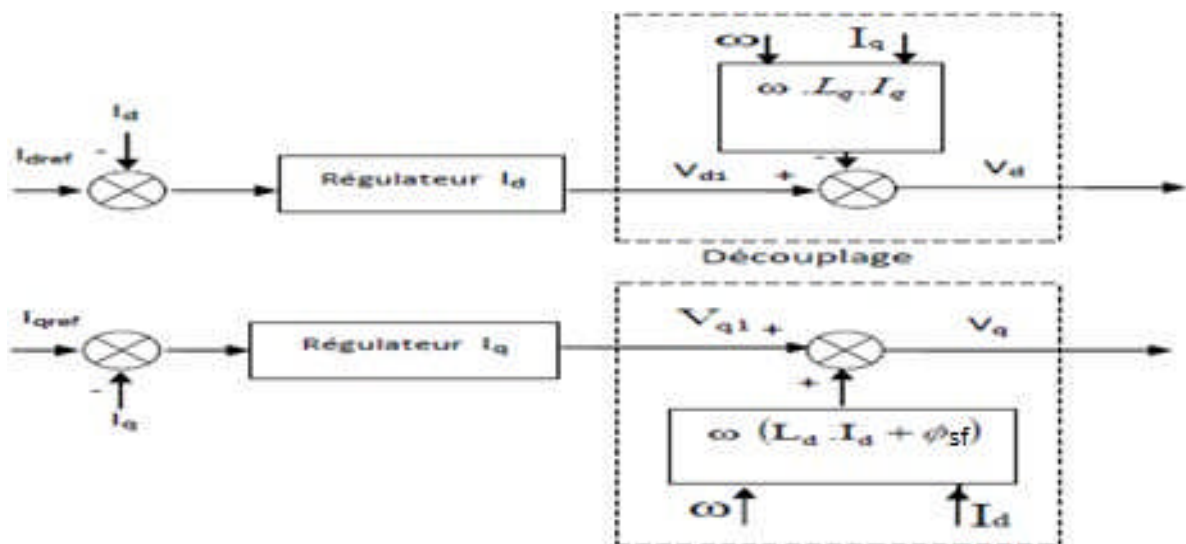
**S:** Opérateur de *Laplace*.

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques.

Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure ci-dessous [MER 07] :

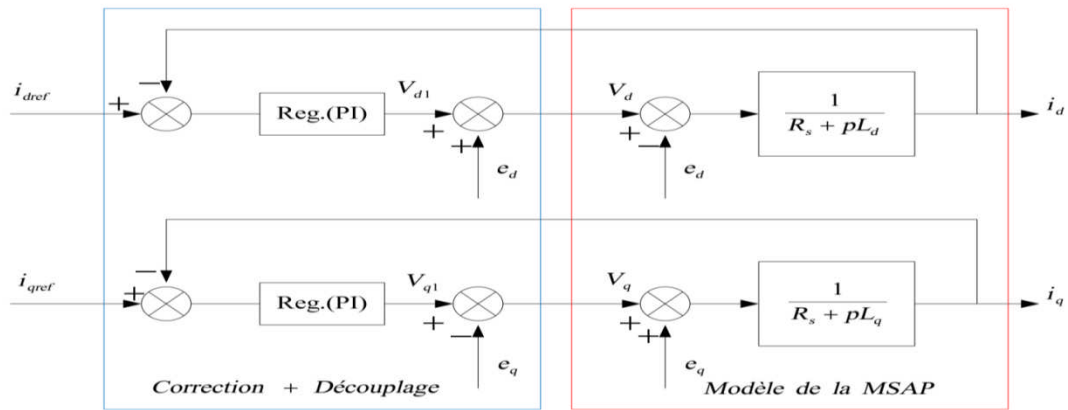
avec :  $V_{d1}$  : la tension à la sortie de régulateur de courant « $I_d$ ».

$V_{q1}$  : la tension à la sortie de régulateur de courant « $I_q$ ».



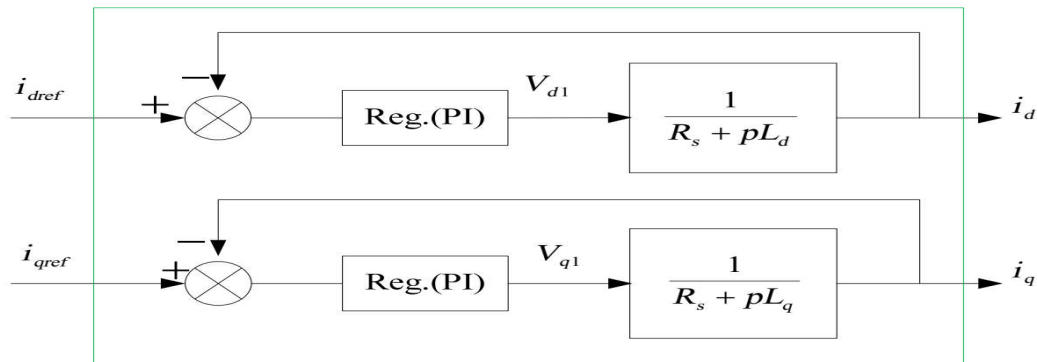
**Figure III.11:** Principe de découplage par compensation.

Si on associe la machine avec le bloc de compensation on obtient la figure (III.12) :



**Figure III.12:** Structure générale : (machine-découplage par compensation).

Les actions sur les axes «*d*» et «*q*» sont donc découplés et représentées par la figure (III.13) :



**Figure III.13:** Commande découplée.

### III.3.2.4 Synthèse des différents régulateurs:

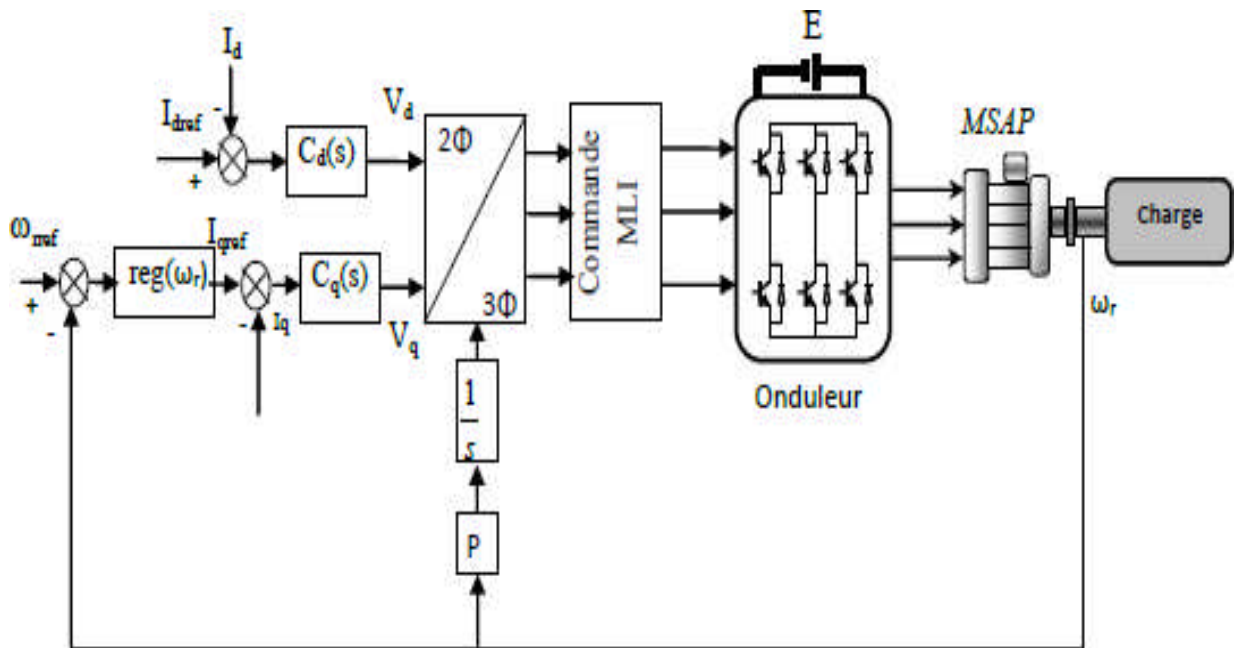
La référence du courant direct  $I_{dref}$  est fixée, et la sortie du régulateur de vitesse  $I_{qref}$  constitue la consigne de couple  $C_{em}^*$ . Les références des courants  $I_{dref}$  et  $I_{qref}$  sont comparées séparément avec les courants réels de la machine  $I_d$  et  $I_q$ .

Les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références  $V_d^*, V_q^*$ .

Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant  $I_{qref}$ . Par contre, le courant  $I_{dref}$  est imposé nul.

Chaque axe découplé peut être représenté par un bloc de correction  $C_i(s)$  avec ( $i=d, q$ ).

La figure (III.14) représente le schéma global de la commande vectorielle d'une machine synchrone à aimants permanents avec compensation dans le repère  $(d, q)$  :



**Figure III.14:** Schéma bloc de la commande vectorielle avec compensation des f.é.m.

### III.3.2.5 Calcul des régulateurs:

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus. Les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre.

Les éléments fondamentaux pour la réalisation des régulateurs sont les actions P.I.D (proportionnelle, intégrale, dérivée). Les algorithmes, même les plus performants, sont toujours une combinaison de ces actions.

Nous considérons que la machine est orientée vectoriellement et complètement découplée. Ceci nous permet d'écrire les équations de la machine d'une manière simple et de calculer les coefficients des régulateurs.

Nous nous contentons de régulateurs classiques de type PI dans une structure par boucle imbriquée. Dans ce cas, nous pouvons distinguer deux modes :

- Le mode électrique (mode rapide : boucle interne).
- Le mode mécanique (mode lent : boucle externe).

Pour chacune des boucles de courant, nous proposons de commander la machine par des régulateurs classiques Proportionnel Intégrateur (PI) pour compenser la perturbation du couple résistant au niveau de la réponse de la vitesse de rotation, c'est-à-dire ;ils comportent une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne.[MAS 07][BEN 05].

Le régulateur (PI) (action proportionnelle-intégrale) est une combinaison d'un régulateur P et d'un régulateur I. Le régulateur (PI) est la mise en parallèle des actions proportionnelle et intégrale, comme montre la figure (III.15).

La relation entre la sortie  $U_r(t)$  et le signal d'erreur  $\epsilon(t)$  est donnée par la relation suivante :

$$U_r(t) = K_p \epsilon(t) + K_i \int_0^t \epsilon(t) d(t) \quad (\text{III.18})$$

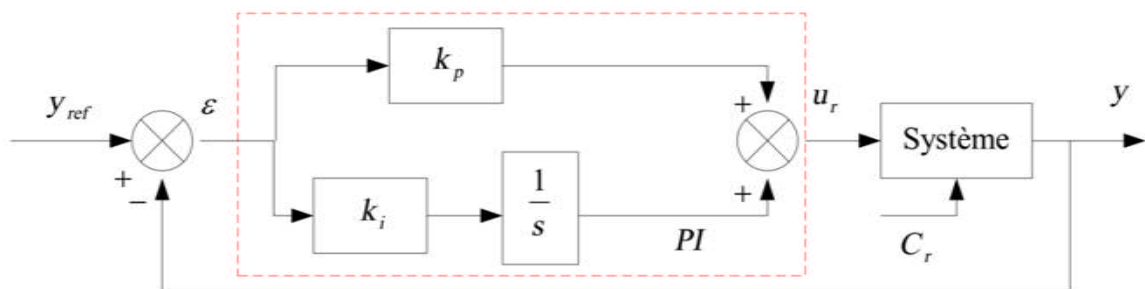
c'est à dire: 
$$\frac{U_r(t)}{\epsilon(t)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.19})$$

avec :  $K_p$ : Gain proportionnel.

$K_i$  : Gain intégral.

$T_i$  : Constante de temps d'intégration ; telque :  $T_i = \frac{1}{K_i}$

Le régulateur (PI) est donné par la figure suivante :



**Figure III.15:** Régulateur PI.

La fonction de transfert sera :  $\frac{U_r}{\epsilon} = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right)$  (III.20)

On peut aussi écrire le régulateur sous la forme suivante :

$$PI \rightarrow \frac{U_r}{\epsilon} = \frac{1+sT_1}{sT_2} \tag{III.21}$$

avec :

$$\begin{cases} K_p = \frac{T_1}{T_2} & (a) \\ K_i = \frac{1}{T_2} & (b) \end{cases} \tag{III.22}$$

**III.3.2.5.1 Régulateur du courant:**

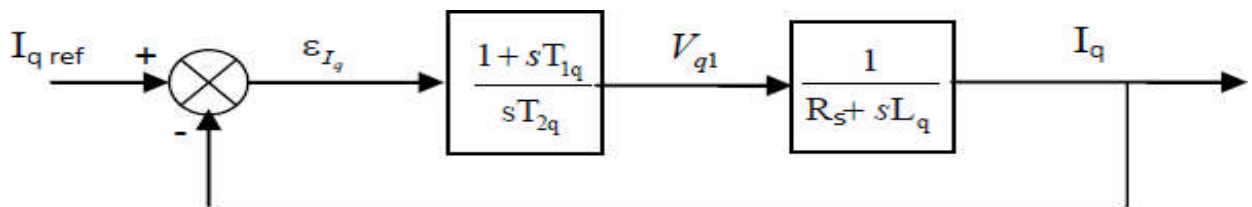
La commande de la MSAP s’effectue en contrôlant les courants  $I_d$  et  $I_q$  comme suit :

**1/\*Régulateur du courant  $I_q$ :**

Le système est composé d’une boucle de régulation de vitesse, qui impose la référence  $I_{qref}$ , le courant  $I_d$  est maintenu nul, la commande est effectuée par les régulateurs (PI) pour avoir l’erreur statique nulle ( $\epsilon = 0$ ).

Sachant que :  $I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q}$  (III.23)

Et que la forme générale du régulateur (PI) est :  $\frac{1+sT_1}{sT_2}$  (équation (III.21)), on aboutit au schéma de la figure (III.16) :



**Figure III.16:** Boucle de régulation du courant  $I_q$ .

La fonction de Transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure (III.16) est :

$$FTBO = \frac{1 + sT_{1q}}{sT_{2q}(R_s + sL_q)} \tag{III.24}$$

$$FTBO = \frac{1 + sT_{1q}}{sT_{2q}R_s \left(1 + s\frac{L_q}{R_s}\right)} \tag{III.25}$$

Par l’utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

$$1 + sT_{1q} = 1 + s\frac{L_q}{R_s} \text{ ce qui se traduit par la condition :}$$

$$\frac{L_q}{R_s} = T_{1q} = \tau_1 \quad (\text{III.26})$$

avec  $\tau_1$  : Constante de temps électrique.

Si on remplace la constante par sa valeur, équation (III.26) dans l'équation (III.24), on trouve :

$$FTBO = \frac{1}{sR_sT_{2q}} \quad (\text{III.27})$$

Pour la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF):

$$FTBF = \frac{FTBO}{1+FTBO} \quad (\text{III.28})$$

$$FTBF = \frac{1}{1+sR_sT_{2q}} \text{ de la forme :}$$

$$\left( \frac{1}{1 + s\tau_q} \right) \quad (\text{III.29})$$

Par identifications on trouve :

$$\tau_q = R_sT_{2q} \Rightarrow T_{2q} = \frac{\tau_q}{R_s} \quad (\text{III.30})$$

$$\text{en imposant le temps de référence : } T_r = 3\tau_q (\text{critère de } \pm 05\% ) \quad (\text{III.31})$$

$$\text{on a :} \quad T_{2q} = \frac{T_r}{3R_s} \quad (\text{III.32})$$

$T_r$ : Temps de réponse imposé.

$$\tau_q = \frac{L_q}{R_s} \text{: Constante de temps électrique de l'axe } q \text{ de la machine.}$$

On remplace l'équation (III.30) dans (III.22b), on obtient :

$$K_i = \frac{R_s}{\tau_q} \quad (\text{III.33})$$

Si on remplace l'équation (III.31) dans (III.33) et on obtient finalement :

$$\begin{cases} K_{pq} = \frac{3L_q}{T_r} \\ K_{iq} = \frac{3R_s}{T_r} \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

### 2/\* Régulateur du courant $I_d$ :

Pour la régulation du courant  $I_d$ , on suit la même procédure utilisée pour la régulation du courant  $I_q$ .

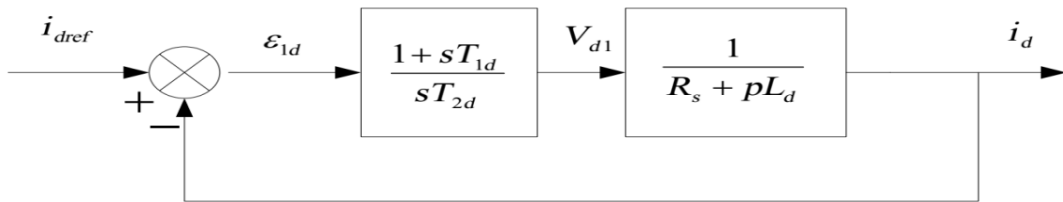


Figure III.17: Boucle de régulation du courant  $I_d$ .

$$FTBO = \frac{1 + sT_{1d}}{sT_{2d}(R_s + sL_d)} = \frac{1 + sT_{1d}}{sT_{2d}R_s(1 + s\frac{L_d}{R_s})} \quad (\text{III.35})$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + sR_sT_{2d}} = \frac{1}{1 + s\tau_d} \quad (\text{III.36})$$

$$T_{1d} = \frac{L_d}{R_s} = \tau_d \text{ on impose : } T_r = 3 \cdot \tau_d \quad (\text{III.37})$$

$$\tau_d = R_s T_{2d} \rightarrow T_{2d} = \frac{\tau_d}{R_s} \quad (\text{III.38})$$

On remplace l'équation (III.37) dans (III.38) on obtient :

$$T_{2d} = \frac{T_r}{3R_s} \quad (\text{III.39})$$

$\tau_d = \frac{L_d}{R_s}$ : Constante de temps électrique de l'axe d de la machine.

#### III.3.2.5.2 Régulation de vitesse:

Le processus à commander est décomposé en deux sous système :

- Sous système du réglage de courant  $i_q$  donc du couple aussi.
- Sous système de la partie mécanique.

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure ci-dessous :

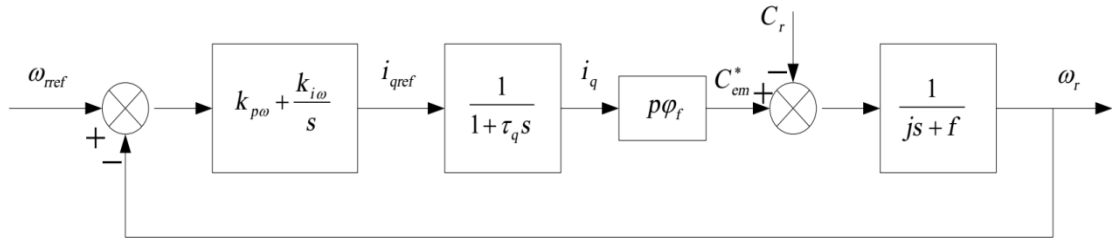


Figure III.18: Boucle de régulation de vitesse.

La boucle de régulation de vitesse Figure (III.18) peut être simplifiée par la Figure (III.19) :

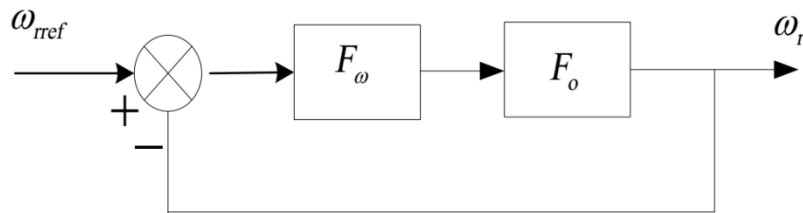


Figure III.19 : Boucle de régulation de vitesse.

$F_ω(s)$  : La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$F_ω(s) = k_{pω} + \frac{k_{iω}}{s} = \frac{1+s T_{1ω}}{s T_{2ω}} \tag{III.40}$$

$$\text{Ou : } \begin{cases} k_{pω} = \frac{T_{1ω}}{T_{2ω}} \\ k_{iω} = \frac{1}{T_{2ω}} \end{cases} \tag{III.41}$$

$F_o(s)$  : La fonction de transfert en boucle ouverte pour  $C_r=0$ , est donnée par :

$$F_o(s) = \frac{p\phi_f}{f(1+s\tau_q)+(1+s\tau_m)} \tag{III.42}$$

$\tau_m = \frac{J}{f}$  : Constant mécanique de la machine.

La FTBF est donnée par :

$$FTBF = \frac{F_ω(s).F_o(s)}{1+F_ω(s).F_o(s)} \tag{III.43}$$

Après les calculs en trouve:

$$FTBF(s) = \frac{p\phi_f(k_{pω}s+k_{iω})}{J\tau_qs^3+(J+f\tau_q)s^2+(p\phi_fk_{pω}+f)s+p\phi_fk_{iω}} \tag{III.44}$$

Si on néglige  $(J \cdot \tau_q)$  et  $(f \cdot \tau_q)$  devant  $(J)$  , le polynôme caractéristique de cette fonction devient:

$$P(s) = Js^2 + (p\phi_f k_{p\omega} + f)s + p\phi_f k_{i\omega} \quad (\text{III.45})$$

La FTBF possède une dynamique de 2ème ordre, par identification à la forme canonique du 2ème ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0} p^2 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_0}\right) p + 1 = 0 \quad (\text{III.46})$$

Où  $\omega_0$ : Pulsation propre du système,

$\zeta$  : Facteur d'amortissement.

Par identification terme à terme entre l'équation (III.45) et (III.46) on trouve :

$$\begin{cases} k_{p\omega} = \frac{2J\zeta - f}{p\phi_f} \\ k_{i\omega} = \frac{\omega_0^2 J}{p\phi_f} \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

Pour la détermination des caractéristiques du régulateur, on choisit un facteur d'amortissement égal à 0.7 et on définit la pulsation des oscillations non amorties à partir de la dynamique souhaitée.

### III.3.2.6 Résultats de simulation numérique (MSAP-Commande vectoriel) :

La figure (III.20) représente le schéma bloc de simulation de la commande vectorielle de la MSAP, elle comporte :

- le bloc de la machine MSAP .
- le bloc des régulateur PI .
- le bloc de découplage .
- le bloc de la transformé de PARK inverse générant les tensions de référence.

Pour une application d'une charge de 6 N.m à partir de 0.5s à 1.5s on va tirer les allures des paramètres de la machine MSAP lors de la commande vectorielle .

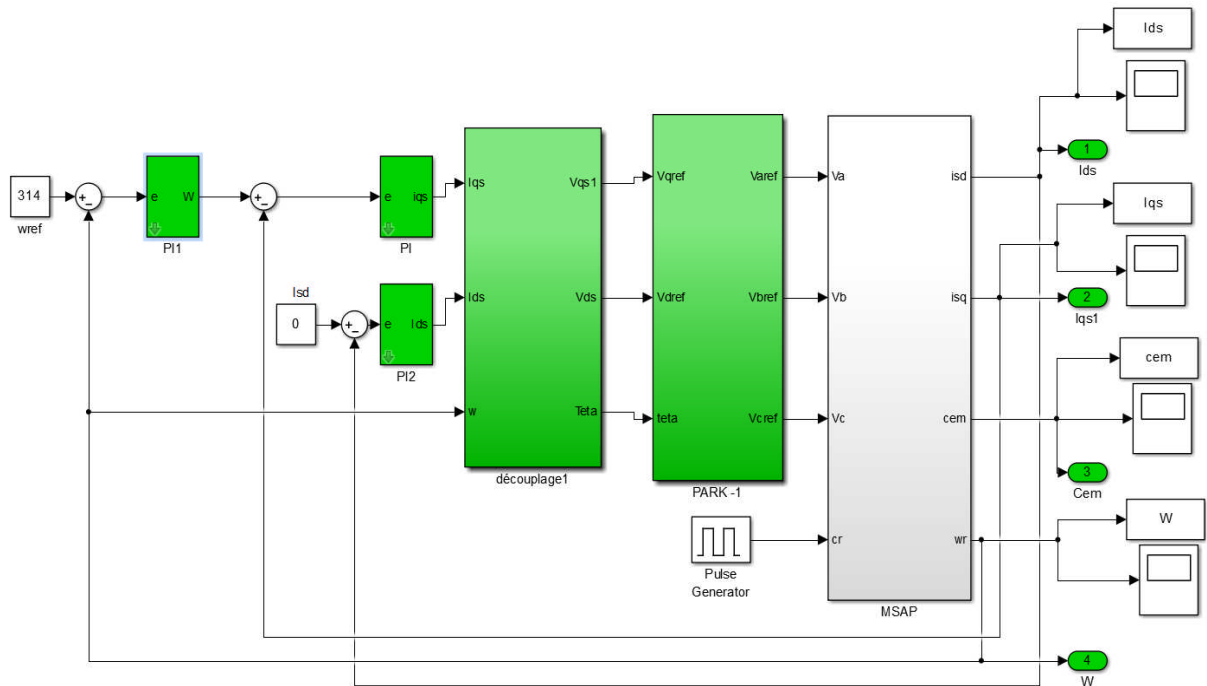
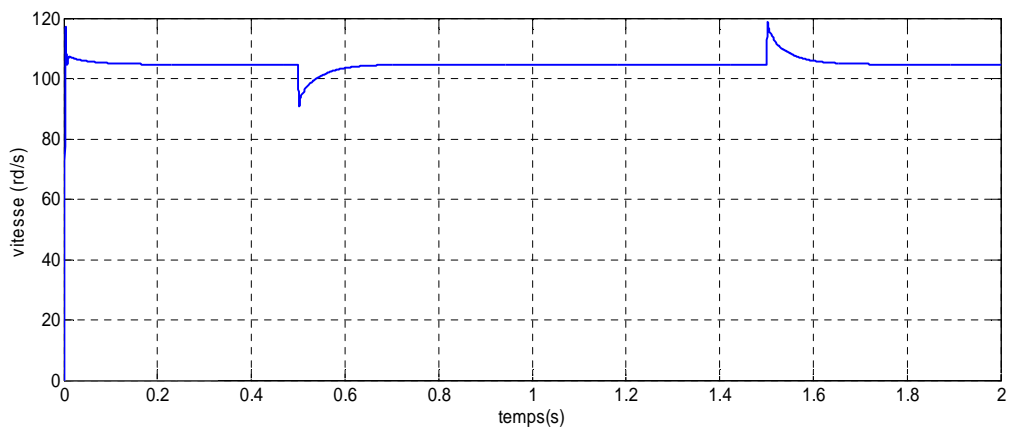
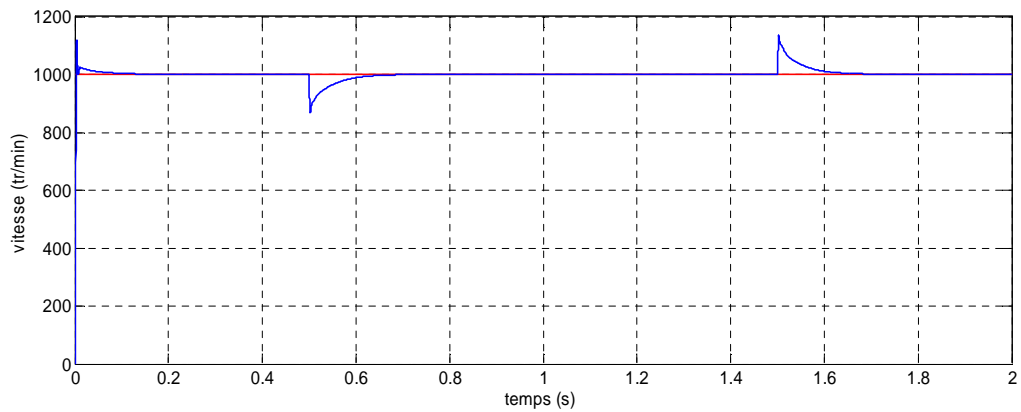
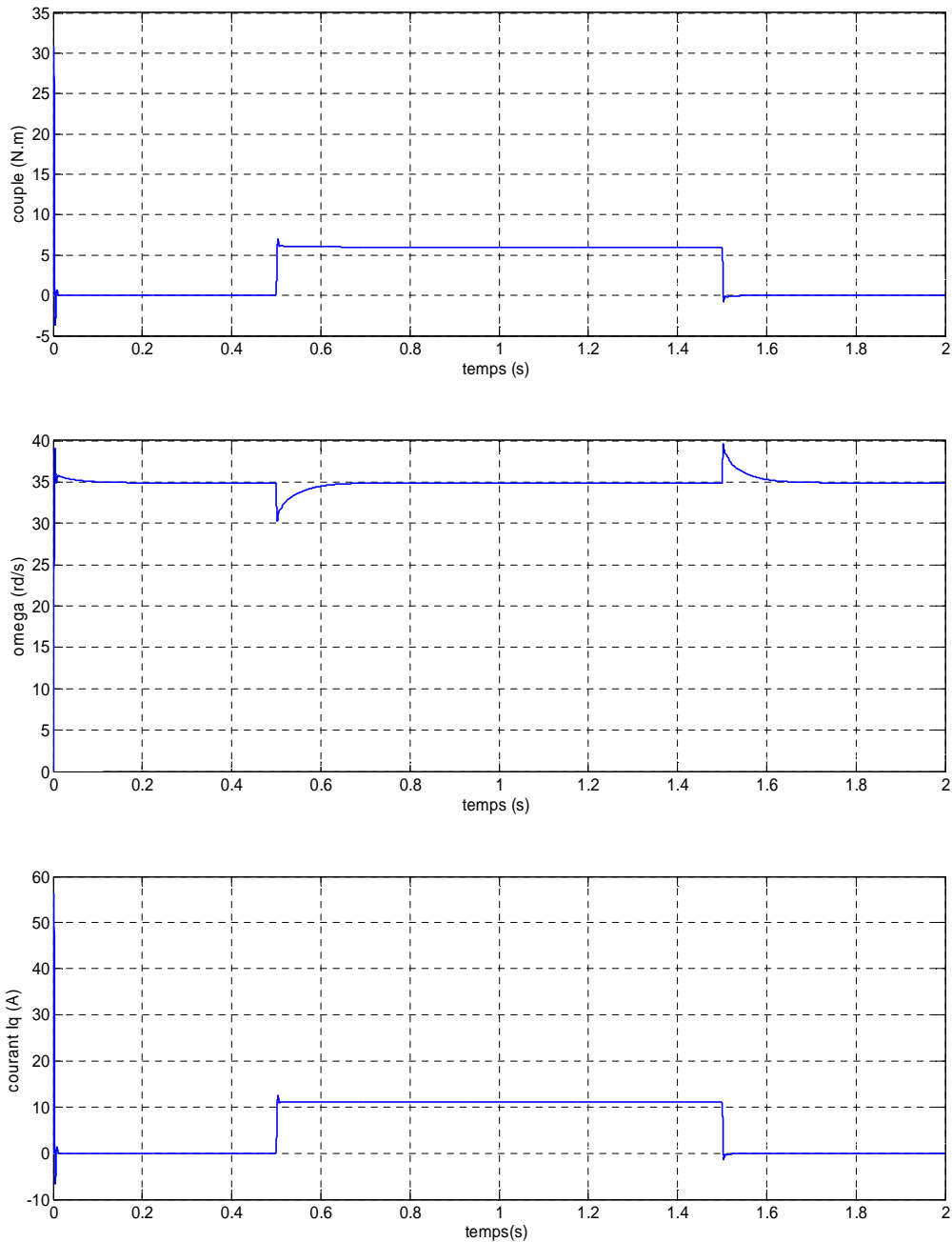


Figure III.20 :Le schéma bloc de simulation de la commande vectorielle

voila les résultats de simulation :





**Figure III.21 :** L'allure des paramètres de la MSAP lors de la commande vectorielle

Avec application d'une charge de 6 N.m à partir de 0.5s à 1.5s

### III.3.2.7 Interprétation des résultats :

La figure III.21 représentent les résultats de simulation de l'essai à vide et en charge du MSAP, pour un échelon de consigne de 104.66 rad/s, et suivie d'une application de charge de 6 N.m à partir de  $t=0.5s$  à  $1.5s$ . On remarque que :

- L'allure de la vitesse suit sa référence avec un dépassement pendant le régime transitoire. Après l'application de la charge

- à l'instant  $t=0.5s$ , la vitesse présente une chute qui est rejetée, puis rejoint sa valeur de référence.
- à  $t=1.5s$  la vitesse présente une augmentation qui est rejetée aussi, puis rejoint sa valeur de référence.
- Le couple subit un pic au premier moment de démarrage, puis atteint la valeur du couple résistant avant et après l'application de la charge,
- La réponse des deux composantes du courant montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine ( $I_d = 0$ )
- Le courant  $I_q$  est l'image du couple.

**III.4 Conclusion :**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons vu le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque; en suite on a décrit la commande MPPT, qui permet la recherche de point précis de puissance maximale sous des variations des conditions environnementales. Dans notre travail on a choisi deux algorithmes; l'algorithme de Perturbation et observation "P&O", et l'algorithme de Golden section search (GSS)

La deuxième partie de ce chapitre, est consacrée à la présentation du principe de la théorie du contrôle par la commande vectorielle de MSAP.

La commande vectorielle permet d'avoir une dynamique proche de celle de la machine à courant continu, autrement dit, une dynamique asymptotiquement linéaire et découplée. Cependant, cette structure de commande nécessite que les paramètres de la machine soient précis. Ceci exige une bonne identification des paramètres. En conséquence, le recours à des algorithmes de commande robuste, pour maintenir un niveau de découplage et de performance acceptable, est nécessaire.

Enfin nous avons présenté les résultats de simulation numérique des paramètres (MSAP-Commande vectoriel) et leur interprétation qui montrent une bonne poursuite de la vitesse et du couple aux valeurs de références correspondantes. Aussi, nous avons constaté que les erreurs de poursuite sont relativement faibles et le découplage entre les deux grandeurs de contrôles est toujours maintenu.

## ***CHAPITRE IV :***

### ***Simulation du système de pompage photovoltaïque***

**IV.1 INTRODUCTION**

Après avoir défini et modélisé les différents composants du système de pompage photovoltaïque, puis expliqué le principe de la commande vectorielle et les deux commandes de l'adaptation GPV (perturbation & observation et Golden section search) dans les chapitres précédents, dans ce chapitre, on va présenter la simulation du système global avec les deux commandes dont l'objectif est la comparaison entre ces deux dernières. Des résultats de simulations seront présentés et commentés dans des conditions de fonctionnement fixe et variable.

Des différentes simulations seront effectuées sur le système étudié qui est composé de 15 panneaux photovoltaïques en série de 60W, d'un hacheur survolteur, d'un onduleur de tension et d'un groupe motopompe (MSAP, pompe centrifuge). La simulation de ces systèmes se fait sous Matlab/Simulink.

## IV.2 Simulation de la chaine de pompage PV avec la commande perturbation /observation:

La figure IV.1 représente les éléments constitutifs de la chaine de pompage photovoltaïque avec la commande perturbation & observation P&O. La vitesse de référence ( $\Omega_{réf}$ ) est calculée en fonction de la puissance photovoltaïque optimisée par l'algorithme MPPT "P&O" où GSS, elle est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{réf} = \sqrt[3]{(P_{pv} * \Omega_n * \eta) / P_n} \quad (IV.1)$$

$P_{pv}$ : Puissance photovoltaïque totale (W)

$\Omega_n$ : vitesse nominale du moteur synchrone (rad/s)

$\eta$ : Rendement du groupe motopompe

$P_n$ : Puissance nominale (W)

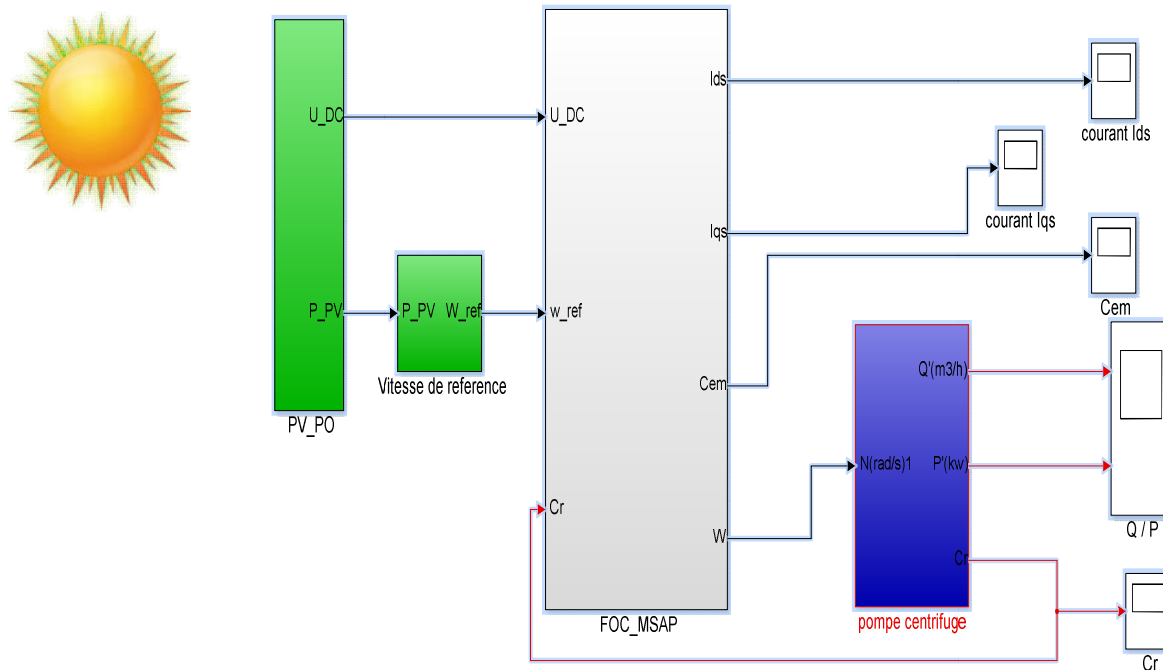
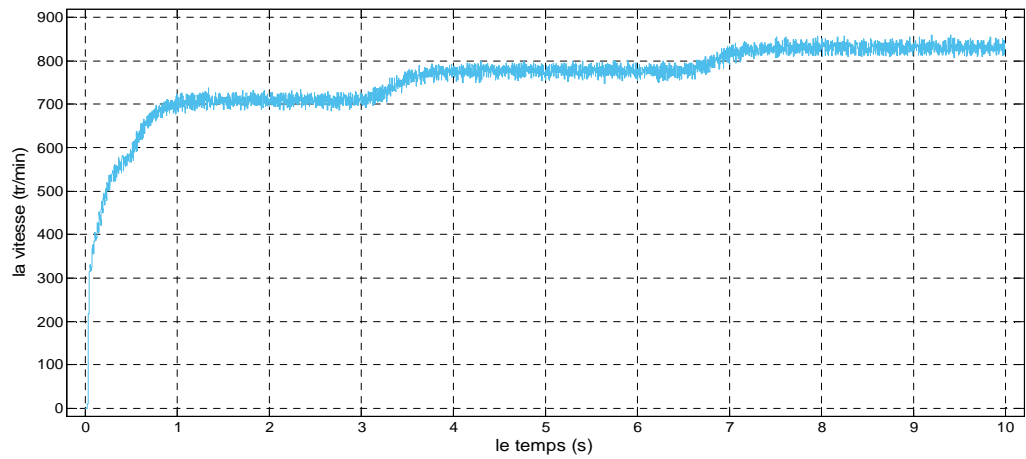


figure IV.1 : Structure de la commande perturbation & observation de la chaîne de pompage.

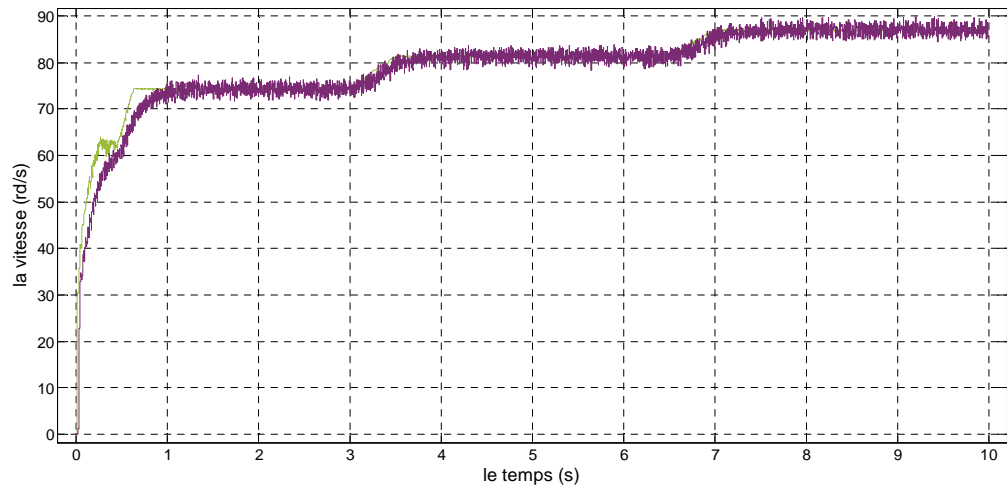
### IV.2.1 Résultats de simulation de la commande P&O :

La simulation est réalisée par MATLAB/SIMULINK, la pompe centrifuge est entraînée par la machine synchrone à aimant permanent MSAP, alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux (avec  $m=30, r=0.9$ ) associé à un module photovoltaïque de 30 panneaux.

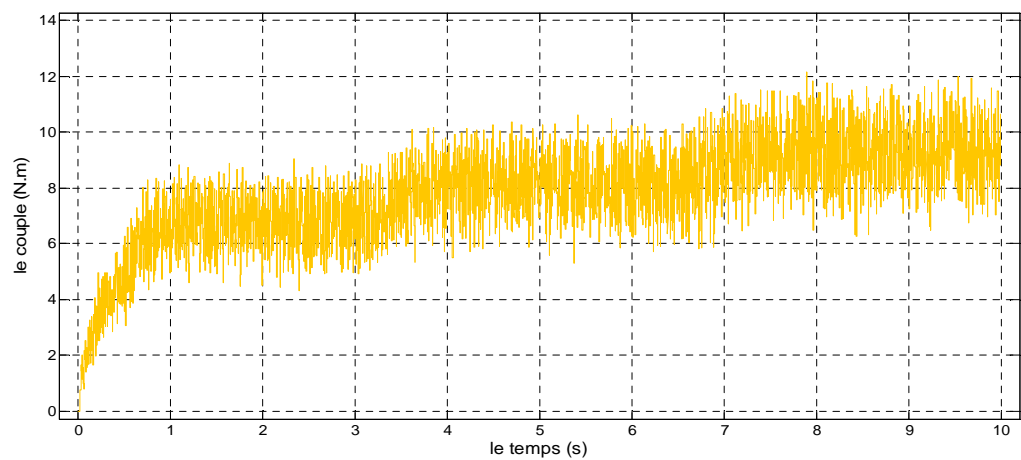
La consigne de vitesse de la motopompe est variée avec le changement d'irradiation  $G$  de 600 W/m<sup>2</sup> et 800 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup>.



**Figure IV.2:** Allure de vitesse du moteur avec une consigne d'irradiation variable.



**Figure IV.3:** Allure de la vitesse du moteur avec une consigne de vitesse de référence.



**Figure IV.4 :** Allure du couple moteur par application du couple résistive de la pompe.

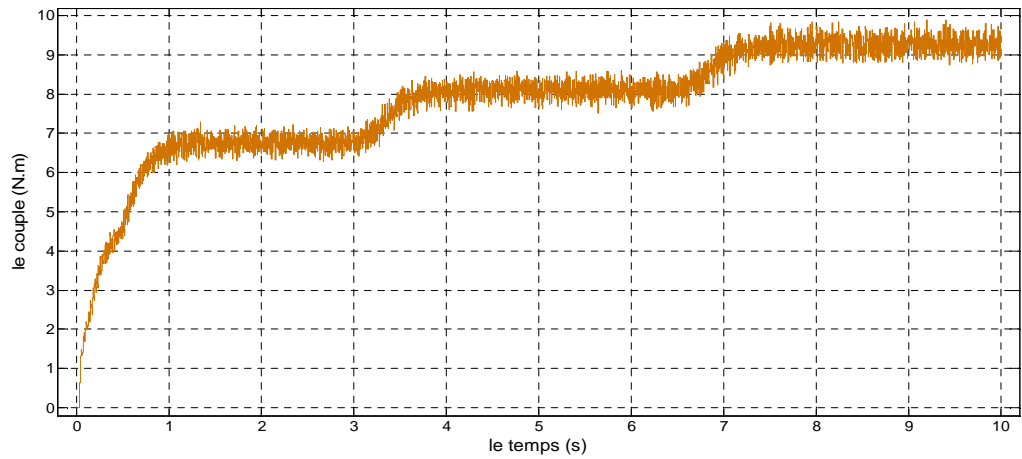


Figure IV.5: Allure du couple de la pompe.

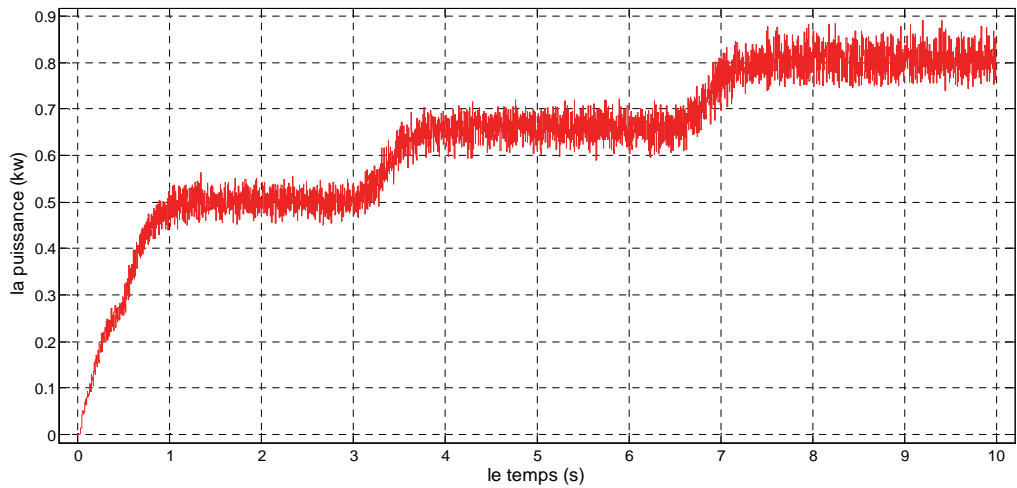


Figure IV.6 :Allure de la puissance par variation d'irradiation.

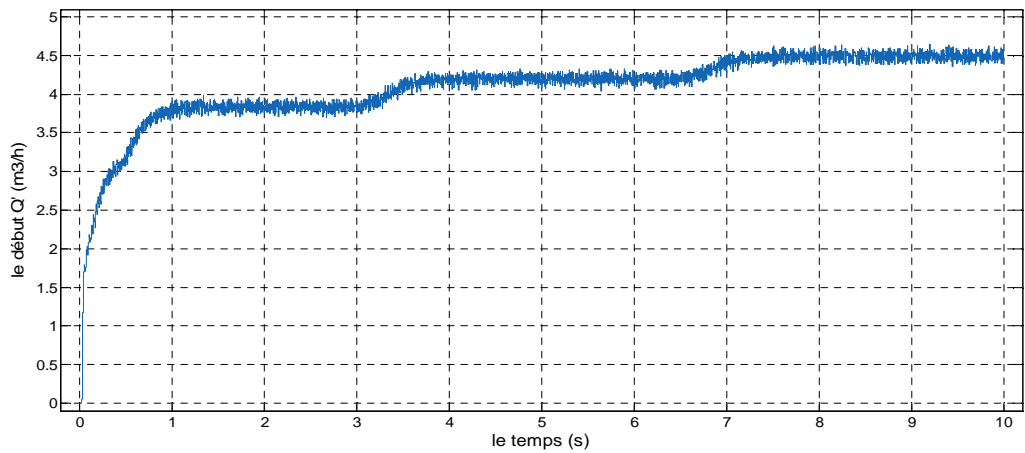


Figure IV.7 : Allure du débit avec consigne de vitesse variable.

### IV.2.2 Interprétation des résultats :

D'après les figures précédentes on constat que chaque variation subit d'irradiation, elle va affecter les réponses de la pompe (vitesse, couple, puissance, débit) car sont proportionnelles à la vitesse de rotation du moteur.

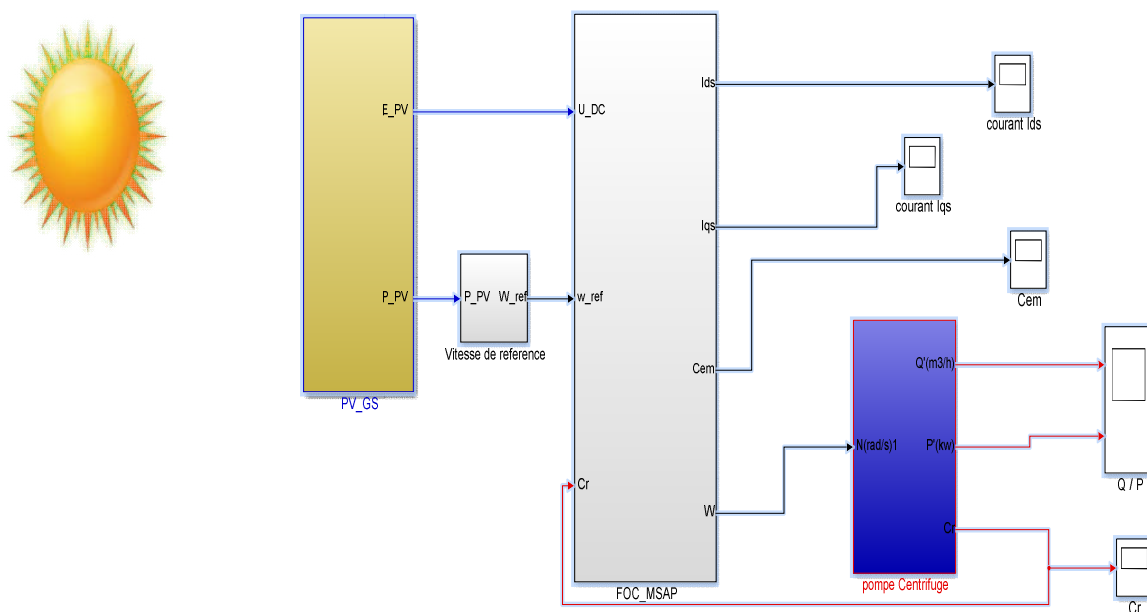
D'après la figure (IV.3), on voit bien que la vitesse suit la valeur de référence avec un temps de réponse de 0.8s et faible d'oscillation.

Le couple moteur suit encore le couple résistif de la pompe avec un faible d'oscillation.

Le débit de la pompe est proportionnel direct à la variation de la puissance qui suit cette dernière l'irradiation  $G$ .

### IV.3 Simulation de la chaine de pompage PV avec la commande Golden Section Search :

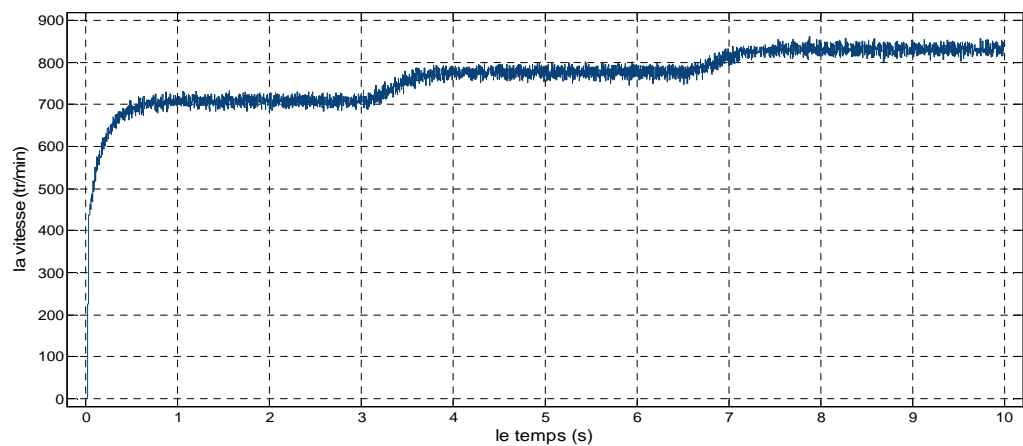
La figure IV.8 représente les éléments constituons de la chaine de pompage photovoltaïque avec la commande golden section search GSS.



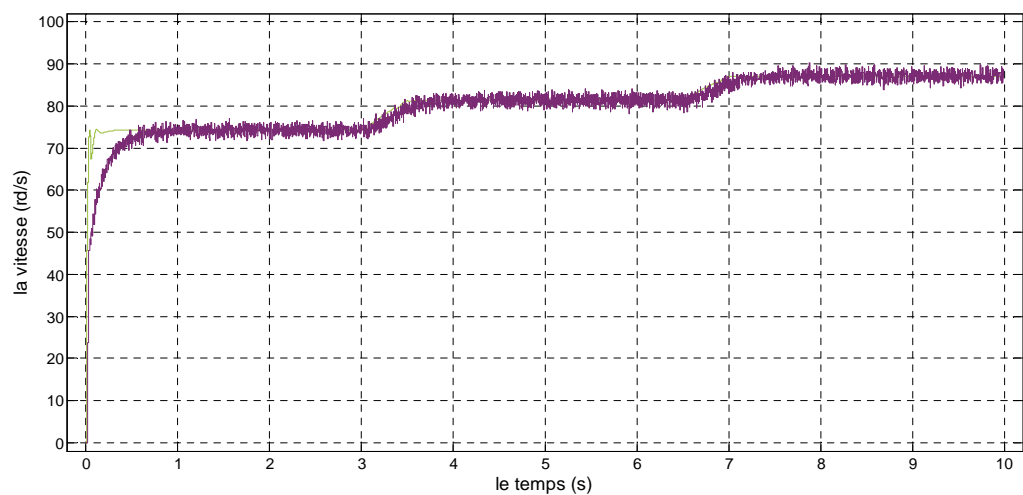
**La figure IV.8 :** Schéma bloc de système de pompage photovoltaïque à base GSS.

#### IV.3.1 Résultats de simulation de la commande GSS:

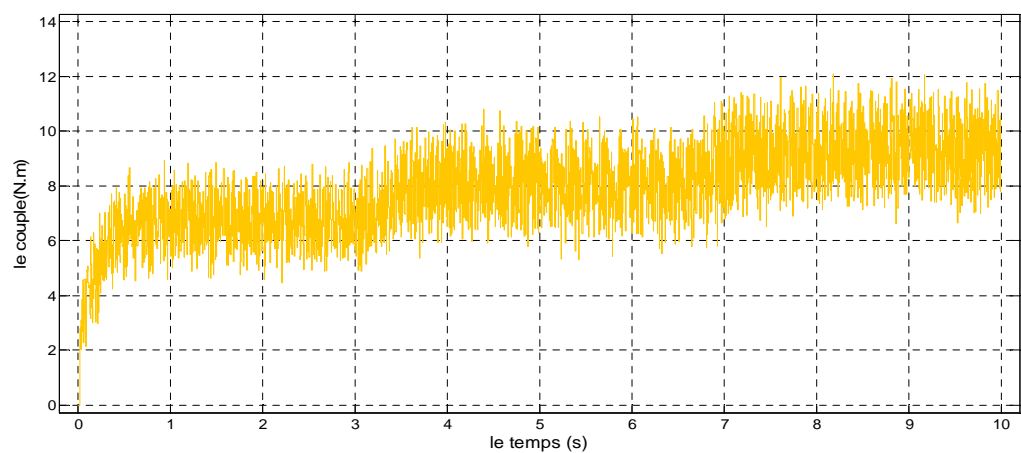
La simulation est réalisée par MATLAB/SIMULINK, pour les mêmes paramètres et les mêmes conditions que la commande P&O on obtient les résultats suivants :



**Figure IV.9:** Allure de vitesse du moteur avec une consigne d'irradiation variable.



**Figure IV.10 :** Allure de la vitesse du moteur avec une consigne de vitesse de référence.



**Figure IV.11 :** Allure du couple moteur par application du couple résistive de la pompe.

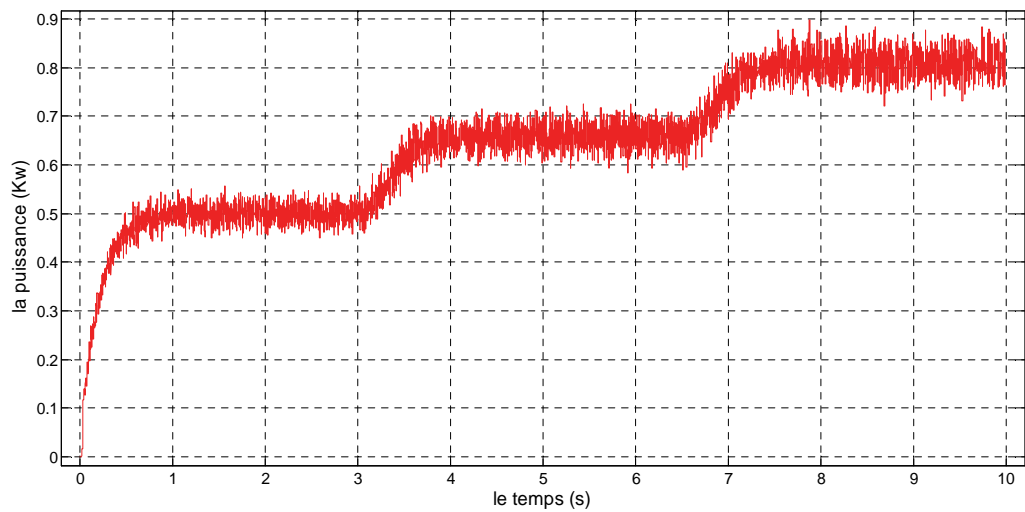


Figure IV.12 : Allure de la puissance par variation d'irradiation.

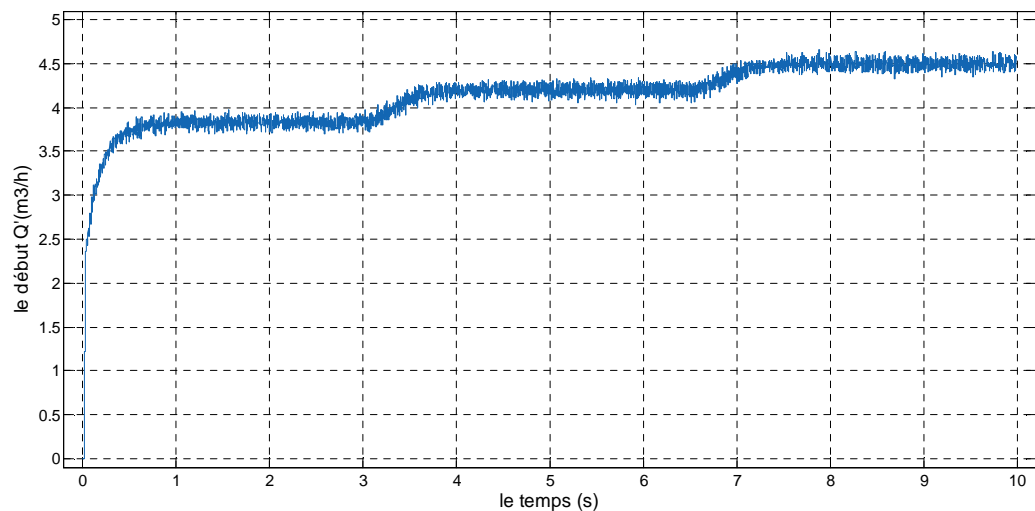


Figure IV.13 : Allure du débit avec consigne de vitesse variable.

### IV.3.2 Interprétation des résultats :

D'après les figures précédents on constat que chaque variation subit d'irradiation, elle va affecter les réponses de la pompe (vitesse, couple, puissance, débit) car sont proportionnelles à la vitesse de rotation du moteur.

D'après la figure (IV.10), on remarque que la vitesse suit la valeur de référence avec un temps de réponse de 0.5s et très faible d'oscillation .

**IV.4 CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons appliqué les deux algorithmes d'optimisation MPPT de GPV (perturbation & observation et Golden section search) à notre système de pompage photovoltaïque composé de 30 panneaux photovoltaïques associés à un convertisseur DC/DC élévateur de tension qui permet le fonctionnement du générateur photovoltaïque à son maximum de puissance qu'elle que soit les conditions météorologiques.

La comparaison des résultats de simulation des deux algorithmes précédente nous a permis de voir que l'algorithme GSS (Golden section search) présente les meilleures performances par rapport l'algorithme P&O (perturbation & observation).

### CONCLUSION GENERALE

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

Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau PV. L'objectif est la simulation de fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension. A l'issue des simulations effectuées, nous avons constaté une dépendance des performances du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du champ photovoltaïque.

Afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la machine, une interface joue le rôle d'adaptation entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale. Comme solution un convertisseur statique incorporée entre la source et la charge commandé directement par la technique PWM.

Pour fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, le convertisseur DC-DC associé doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. A cet effet, une nouvelle méthode MPPT basée sur le GSS est proposée et testée à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink. Le modèle précis d'un générateur photovoltaïque, ainsi qu'un convertisseur Boost ont été sélectionnés pour la mise en œuvre.

La technique proposée ne nécessite que l'intervalle initial pour trouver le MPP avec certitude. Cette technique montre une vitesse de suivi rapide, elle ne présente aucune oscillation autour du MPP et elle peut fournir des performances de suivi précises et fiables du MPP lorsque des changements d'irradiance ou de température.

Dans ce travail, nous avons procédé en premier temps à définir et étudier les différents éléments constituées la chaîne de pompage photovoltaïque, L'étape suivante a été consacrée à la

## Conclusion Générale

---

modélisation de l'ensemble moteur-convertisseur statistique et leur commande afin de révéler le comportement de la machine MSAP.

Une comparaison des performances de ce système utilisant P&O et GSS MPPT a été implémentée. Le moteur synchrone à aimant permanent est sélectionné pour entraîner la pompe centrifuge appliquant la commande vectorielle adoptée pour contrôler la vitesse du moteur à l'aide du MPPT basé sur GSS et P&O dans le système de contrôle pompage photovoltaïque

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

## ANNEXE

**Tableau 01 : Caractéristique du module photovoltaïque à  $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $E=1000\text{W/m}^2$**

Température	$T$	25	$^{\circ}\text{C}$
Tension de circuit ouvert	$V_{oc}$	21.40	V
Courant de court circuit	$I_{sc}$	3.9	A
Tension optimale	$V_{mp}$	17.20	V
Courant optimale	$I_{mp}$	3.49	A
Puissance de crête	$P_c$	60	W
Surface	$S_m$	0.4221	$\text{m}^2$

**Tableau 02 : Caractéristique de la machine synchrone à aimant permanent**

Fréquence	$f$	50	HZ
Puissance nominal	$P$	1.4	KW
Vitesse nominal	$n$	1000	Tr/mn
Tension nominal	$U_{sn}$	208	V
Courant nominal	$I_{sn}$	5	A
Résistance d'une phase statorique	$R_s$	1.4	$\Omega$
Le moment d'inertie	$J$	0.00176	$\text{Kg/m}^2$
Flux des aimants	$\varphi_{e_v}$	0.1546	Wb
Coefficient de frottement visqueux	$f_v$	0.00038818	$\text{Nm}/(\text{rad/s})$
Nombre de pôles	$P$	3	.....
Inductance directe	$L_d$	0.0066	H
Inductance en quadrature	$L_q$	0.0058	H

**Tableau 03: Caractéristique de la pompe centrifuge .**

Puissance nominale	$P_n$	927.045	W
Vitesse nominale	$n$	1000	tr/mn
Hauteur totale du pompage	$H$	63	M
Hauteur statique	$H_s$	7.4	M
Longueur de la tuyauterie	$L$	7.4	M
Accélération de la pesanteur	$g$	9.81	m /s <sup>2</sup>
La masse volumique de l'eau	$\rho$	1000	Kg/m <sup>3</sup>

[HAD 05] - **A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi**, «Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque» ; Revue des Énergies Renouvelables. Vol.8, pp (19 – 26), 2005.

[BEN 18] - **M. Benaissa**; « *Contribution à l'étude du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques* » ; Thèse doctorat, Université Djilali Liabes De Sidi Bel-Abbes, 2018.

[BEL 12] - **A. BELHOCINE et S.ZAIDI**, « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » ; Mémoire de master., Université de Bejaïa, 2012.

[BET 97] - **A. Betka** « Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil »,Thèse de Magister, Université de Biskra.1997

[SAA 01] - **A. Saadi** «Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque », Thèse de magister, Université de Biskra 2001.

[FER 08] - **A. FERRAI**, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village » ; Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[NAT 12] - **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>.

[MIN 07] - **Ministère de l'Energie et des Mines** « Guide des Energies Renouvelables », Edition 2007 Alger.

[AZO 02] - **B. Azoui** «Concept and realisation of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solar application », Thèses of doctorat of science, University of Batna 2002.

[BEN 12] - **I. Ben djamaa** «Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque » ; Mémoire de magister, Université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.

[DJA 08] - **Djarallah, M.** (2008). contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique. *Université de Batna Thèse de Doctorat en Science*.

[BOU 07] - **BOUALEM, DENDIB**, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative.", Université Ferhat Abbas-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique, 2007.

[MAK 13] - **S. Makhloufi** : « *Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes* » ; Thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.

[HAD 02] - **M. HadeF-** « contrôle directe du couple des machines synchrones avec et sans capteur mécanique »Thèse de magister, Université Abderrahmane Mira Bejaia 2002.

[MOB 01] - **B. N. Mobarakeh** « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants », Thèse de doctorat de L'INPL 2001.

[BES 05] - **N. BESSOUS** « Commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent », mémoire de PFE, Université de Constantine 2005.

[AZE 00] - **K. Azeddine** "Etude d'une commande non- linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents", Ph, Québec, Canada, 2000.

[MEL 10] - **K. EL-Melouani**, «dimensionnement d'un hacheur survolteur» ; Application noté de polytech Clermont-Ferrand, France, 2010

[LAB 95] - **F. Labrique , G. Seguiet, R. Baussiere** «Les convertisseur de l'électronique de puissance, la conversion continu – alternatif », Tec. Doc. Paris 1995

[TRA 11] - **F.TRAHI** «Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA », mémoire de magister, université de M. MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2011.

[ARR 07] - **M. ARROUF** « Optimisation de l'ensemble onduleur moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque » Thèse de Doctorat Université Mentouri de Constantine 2007.

[THO 98] - **D.THOMAS, R. JIMMY, S.ERIC, S.BOCAR** « Le pompage photovoltaïque 'manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens' ». Université d'Ottawa. Canada, 1998

[POM 16] - [http://www.pompesetprocess.com/media/article/photo/lrg\\_2972\\_photo\\_url\\_2984.jpg?rand=416313161](http://www.pompesetprocess.com/media/article/photo/lrg_2972_photo_url_2984.jpg?rand=416313161).

[ALO 06] - **M. C. Alonso-Garcia, J. M. Ruiz, F. Chenlo**, « Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module », Solar Energy Materials & Solar Cells Volume 90, Issue 3, 15 February 2006, Pages 329-340.

[SIN 08] - **Singh, P., Singh, S. N., Lal, M., & Husain, M. (2008)**. Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. Solar Energy Cells, 92(12), 1611-1616.

[BAR 15] - **BARDADI M**, «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel.». Thèse magister, université des sciences et de la technologie d'Oran 2015.

[MAR 11] - **Marwa EZZAT**, « commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone a aimants permanents.». Thèse doctorat, Ecole centrale de Nantes 2010.

[ROU 16] - **ROUABHI R**, «Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne». Thèse doctorat, université de Sétif 2016.

[PET 08] - **Petrova-Koch, V., Hezel, R., & Goetzberger, A. (Eds.). (2008)**. High-efficient low-cost photovoltaics: recent developments (Vol. 140). Springer.

## **RESUME**

Cette thèse présente une nouvelle technique basée sur la méthode d'optimisation Golden-Section-Search (GSS) est appliquée dans les systèmes de pompage photovoltaïque utilisant un moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) contrôlé par la commande vectorielle avec une simplicité de fonctionnement globale maximale, Comparée à la méthode de suivi MPPT conventionnelle telle que Perturb et Observe (P & O), la technique GSS offre deux avantages : une réponse rapide et une absence de perturbation. Le transfert de puissance maximal du panneau photovoltaïque à la pompe centrifuge est assuré par une sélection optimale de la vitesse de fonctionnement du MSAP. Cette technique démontre l'efficacité de l'architecture proposée. Le logiciel Matlab / Simulink est utilisé pour simuler les performances de l'architecture proposée dans différentes conditions climatiques.

### **Mots clés**

Système de pompage photovoltaïque, moteur synchrone à aimant permanent, MPPT, Golden-Section-Search, MPPT, Vitesse optimale, Commande vectorielle, Générateur photovoltaïque, Pompe centrifuge.

### **ABSTRACT**

This thesis presents a new technique based on the Golden-Section-Search (GSS) optimization method is applied in photovoltaic pumping systems using a permanent magnet synchronous motor (MSAP) controlled by vector control with overall simplicity of operation. Maximum, Compared to the conventional MPPT tracking method such as Perturb and Observe (P&O), the GSS technique offers two advantages: rapid response and no disturbance. The maximum power transfer from the photovoltaic panel to the centrifugal pump is ensured by an optimal selection of the operating speed of the MSAP. This technique demonstrates the effectiveness of the proposed architecture. Matlab / Simulink software is used to simulate the performance of the proposed architecture under different climatic conditions.

### **Keywords**

Photovoltaic pumping system, permanent magnet synchronous motor, MPPT, Golden-Section-Search, MPPT, Optimal speed, Vector control, Photovoltaic generator, Centrifugal pump.