



**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**MEMOIRE**

**DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER**

**EN ELECTEONIQUE**

**Spécialité: Instrumentation**

**THEME**

**Etude et optimisation d'un système de  
pompage photovoltaïque au fil soleil**

**Présenté par le binôme :**

- ABIDET Nour El Houda**
- HAOUAM Aya**

**Devant le jury :**

**Melle. GOUDER Soraya**  
**Mr. GUIZA Dhaouadi**  
**Melle. Nehal Wassila**

**MCB**  
**MCB**  
**MAA**

**Président**  
**Rapporteur**  
**Examineur**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciement

Tout d'abord, je remercie Dieu tout puissant qui m'a permis

De terminer ce travail dans les meilleures conditions et qui m'a Ouvert un chemin pour  
rechercher la connaissance.

Je remercie mon encadreur Dr GUZA.D qui m'a toujours

Soutenu par son aide et ses précieux conseils.

J'exprime mon remerciement à tous les enseignants de la faculté des sciences et des  
technologies -ECHAHD LARBI TEBESSI- qui m'ont suivi durant mon cursus universitaire et qui se  
me transmettre leurs savoirs faire.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail de près ou de loin  
et qui méritent d'y trouver leurs noms.

## Dédicace

Je dédie ce travail,

A mes très chers parents

Qui ont veillé à mon confort et qui ont joué un rôle actif

Pour m'amener à ce niveau

A toute la famille Abidet et Haouam

Mes frères, mes sœur,

qui s'est tenue sur certaines lignes dans ce travail.

A mes amies

### Résumé :

L'utilisation de l'énergie solaire dans les endroits isolés pour différentes applications, comme le pompage de l'eau, est très importante pour les populations des pays en développement qui n'ont pas accès à une source d'eau potable fiable. Cependant, les générateurs photovoltaïques ont deux inconvénients majeurs : un rendement faible et un coût élevé, le but de ce travail est d'étudier un système photoélectrique qui fonctionne à puissance maximal , cette étude portera sur deux points principaux : le premier point est l'étude de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque est étudié en utilisant le logiciel Matlab/Simulink et Le deuxième point concerne l'optimisation du rendement d'un système PV en appliquant l'algorithme MPPT. La conversion de l'énergie électrique en énergie hydraulique est réalisée par un groupe motopompe composé d'un moteur à courant continu et d'une pompe centrifuge.

Mots clé : Pompage PV, Convertisseur Boost, moteur pompe, Optimisation

### ملخص :

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم الطاقات المتجددة التي تستعمل في المناطق النائية المعزولة أو البعيدة عن شبكة التوزيع للطاقة الكهربائية لما لها من فوائد كثيرة وإيجابيات متعددة من بين هذه المجالات التي تستعمل فيها نجد مجال ضخ المياه ومع هذا نجد عدة مشاكل تعرقل استعمالها نذكر منها تكلفتها الباهظة و المردود ضعيف إن تطور المغناطيس الدائمة و إلكترونيك الاستطاعة أعطت دفع ملحوظ في تطوير الآلات الكهربائية الدوارة سرعات متغيرة في هذا المنوال تم إنجاز هذه المذكرة التي من خلالها قمنا نمذجة و محاكاة التحكم في ضخ المياه حيث يتكون هذا النظام من عدة أجزاء وهي مولد الطاقة و أهمها تقنية متابعة نقاط الاستطاعات الشمسية و المحرك التزامني بمغناطيس دائم و المضخة هذه التقنية تضمن التكيف بين المولد الشمسي و الحمولة الأعظمية التي يفضلها يتم رفع مردود المحرك لتخفيض ثمن تحويل الطاقة وتحسين المردود.

الكلمات المفتاحية: مضخة كهروضوئية ، محول ، محرك ، تحسين.

### Abstract :

Utilizing solar energy in remote locations for various purposes, such as water pumping, offers significant advantages for developing nations facing severe water scarcity. However, photovoltaic generators suffer from two primary drawbacks: high cost and low efficiency. The advancements in permanent magnet technology and power electronics have facilitated the development of variable speed machines. This study focuses on the modeling, simulation, control, and optimization of solar-powered pumping systems. The system consists of photovoltaic panels, a voltage inverter, a permanent magnet synchronous motor, a centrifugal pump, and a hydraulic circuit.

Keywords : PV Pumping, boost Converter , Motor Pompe, optimization.

Liste des symboles

Symbole	Unité	Définition
$I_{ph}$	A	Photo- courant
$I_{pv}$	A	Courant généré par la lumière ou photo courant
$P_{pv}$	W	puissance fourni par cellule lorsqu' elle fonctionne en générateur.
$I_d$	A	Courant direct d'obscurité de la jonction
$I_{RP}$	A	Courant qui circule dans la résistance parallèle
$V_d$	V	La tension à travers la diode
$P$	w	puissance
$E_g$	eV	Energie de la bande interdite
$q$	$1,6.10^{-19}$ coul	Charge de l'électron
$I_s$	A	Courant de saturation
$I_{cc}$	A	Courant à circuit ouvert
$K$	J/K	La constante de Boltzmann
$I_s$	A	Courant de saturation
$I$	A	Courant de la cellule
$U_T$	V	Tension thermique
$p_m$	w	La Puissance maximale
$I_m$	A	Le Courant maximale
$v_i$	v	Tension d'entrée
$v_o$	v	Tension de sortie
$C_1, C_2$	F	Des capacités
$I_L$	A	Courant de bobine
$I_i$	A	Courant d'entrée
$T_{em}$	(N.m)	Le couple électromagnétique instantané produit
$\eta$	%	Le rendement
$T$	°K	Température absolue
$T_a$	°K	Température ambiante
$T_{ref}$	°K	Température ambiante référence
$N_p$	-	Nombre des modules parallèles
$N_s$	-	nombres des modules en série
$E_r$	$W/m^2$	Eclairage de référence
$E$	$W/m^2$	Eclairage
$\eta_c$	%	Rendement d'une cellule solaire
$P_{incident}$	W	Puissance du rayonnement solaire incident
$f f$	%	Facteur de forme
$P_{max}$	W	Puissance maximale

Liste des symboles

$V_{max}$	V	Tension de la Puissance maximale
$I_{max}$	A	Courant de la Puissance maximale
$P_{op}$	W	Puissance optimale
$V_{op}$	V	Tension optimale
$I_{op}$	A	Courant optimale
A	–	Facteur de qualité
$V_{co}$	V	Tension à circuit ouvert
$I_{cc}$	A	Courant à circuit ouvert
$R_p$	$\Omega$	résistance shunt
$R_s$	$\Omega$	résistance série
NOCT	$^{\circ}K$	Température de fonctionnement normal de cellule
$T_c$	$^{\circ}K$	Température de cellule
$T_{a.ref}$	$^{\circ}K$	Température ambiante référence
$I_{GPV}$	A	Le courant du générateur photovoltaïque
$V_{GPV}$	V	la tension du générateur photovoltaïque
A		le rapport cyclique
$J_m$	$Kg/m^2$	courant d'excitation
$B_m$		un champ magnétique d'induction
$K_e, K_t$		constantes de tension et de couple de moteur.
$I_a$	A	le courant d'armature de moteur.
$R_a$	$\Omega$	la résistance de d'armature de moteur circuit
$C_e$	$N*m$	le couple électromagnétique de moteur
$C_r$	$N*m$	le couple résistant de moteur.
$\epsilon$		Coefficient de pertes de charges locales
HMT	(m)	Hauteur manométrique totale
$H_g$	(m)	hauteur géométrique
$\eta_p$		Rendement de la pompe
$\rho$	( $Kg/m^3$ ).	Masse volumique de l'eau
$g$	( $m/s^2$ ).	accélération de la pesanteur
$P_m$	w	puissance fournie par le moteur
$V_{ch}$	V	Tension de charge
$I_{ch}$	A	Courant de charge
$K_{fr}$		Coefficient de perte de charge relatif à la pompe
$K_c$		Coefficient de pertes de charge relatif à la pompe
$K_1$	$m/(rad/sec)(m^3/h)$	Coefficient correcteur dépendant des dimensions de la pompe
$H_t$	(m)	Hauteur théorique
$K_f$		Coefficient de débit

Liste des symboles

$P_{ah}$	$w$	Puissance hydraulique absorbée (ou puissance utile à la conversion)
$T$	$K$	couple de torsion sur l'arbre de la pompe
$\omega$	tr/min	vitesse angulaire de la pompe
$Q$	$m^3/s$	Débit
$\lambda$		Coefficient des pertes de charge linéaires
$L$	$m$	Le diamètre d'un tronçon de conduite
$g$	(m/s).	L'accélération de la pesanteur
$D$	$m$	Diamètre de la tuyauterie
$v$	$m/s$	Vitesse moyenne du fluide
$K_p$		Constante de la canalisation
$K_r$	(Nm/rad.s <sup>-1</sup> )	Coefficient de proportionnalité
$K_0, K_1, K_2$		des constantes propres de la pompe donnée par le constructeur
$C_s$		Couple statique
$e_m(t)$		Une tension appelée f.é.m. (force électromotrice)
$J(t)$		Inertie totale entraînée (moteur $j_m$ et charge $j_{ch}$ )
$T_r$		Couple résistant
$g$	$w$	Puissance mécanique du moteur
$K_{fr}$		Constante de canalisation
$K_T$		Constante de couple moteur
$K_e$		Constante de tension
$E$		La radiation captée par le PV
$T_f$		Couple de frottement visqueux
$H$		Hauteur totale du pompage
$H_s$		Hauteur statique
$H_d$		Est la somme des pertes linéaire et singulière
$P_a$	$w$	La puissance électrique absorbée par la pompe
$P_u$	$w$	La puissance électrique utile délivrée
$\eta_m$	%	Rendement du moteur
$\eta_c$	%	Rendement du convertisseur
$C_m$		Couple moteur
$\eta_{gm}$	%	Le rendement GPV-MAP
$sg$	$m^2$	Surface de générateur
$K_p$		Coefficient de la pompe centrifuge
$P_{op}$	$W$	Puissance en fonctionnement optimale
$I_{op}$	$A$	Le courant en fonctionnement optimale

*Lexique*



<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>GPV.</b>	Générateur Photovoltaïque
<b>FF</b>	Facteur de forme.
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking.
<b>MPP</b>	Maximal Power Point
<b>T</b>	Temps de conduction
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation.
<b>DC</b>	Courant Continu (Direct Current).
<b>AC</b>	Courant Alternatif (Alternative Current)
<b>MSAP</b>	(Moteur Synchrone à Aimant Permanent)
<b>DC/AC</b>	Un convertisseur pour un moteur à courant alternatif
<b>DC/DC</b>	Un convertisseur pour un moteur à courant continu
<b>MCC</b>	Moteur à courant continu
<b>MPP</b>	Maximal Power Point

## Table des matières

*Remerciement*

*Dédicace*

*Liste des symboles*

*Liste des Tableaux*

*Liste des figures*

***Introduction Générale..... 1***

***Chapitre 01 Généralités sur les systems de pompage photovoltaïque ..... 3***

***1.1 Introduction..... 4***

***1.2 Energie solaire photovoltaïque ..... 4***

***1.3 Générateur photovoltaïque..... 4***

1.3.1 Cellule photovoltaïque ..... 5

1.3.2 Principe de fonctionnement..... 7

1.3.3 Modélisation du générateur photovoltaïque ..... 7

1.3.4 Circuit équivalent d'une cellule PV ..... 8

1.3.5 Paramètres des cellules photovoltaïques ..... 9

1.3.6 Caractéristique du générateur PV ..... 11

1.3.7 Les zones de Caractéristique d'un générateur photovoltaïque..... 14

1.3.8 Les paramètres qui influent sur la caractéristique du générateur photovoltaïque

..... 15

***1.4 Association des modules PV..... 17***

1.4.1 Association en série..... 17

1.4.2 Association en parallèle ..... 18

1.4.3 Association mixte (série/parallèle)..... 19

***1.5 Méthodes de pompages..... 19***

1.5.1 Pompage au fil du soleil ..... 20

1.5.2 Pompage avec stockage électrochimique (batteries)..... 20

Fig1.17 : Système de pompage PV avec stockage. .... 21

<b>1.6 Conclusion</b> .....	<b>21</b>
<b>Chapitre 02 Convertisseurs statiques et les techniques de commande MPPT</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Introduction</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2. Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs)</b> .....	<b>23</b>
2.2.1 Différents types d'hacheurs.....	24
2.2.2 Simulation d'un convertisseur Boost .....	28
<b>2.3 La commande MPPT</b> .....	<b>30</b>
2.3.1 Définition .....	30
2.3.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.....	30
2.3.3 Principe Recherche du point de puissance maximale (MPPT) .....	31
Fig.2.11 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT	
.....	31
<b>2.4 Gestion de la MPPT</b> .....	<b>31</b>
2.4.1 Les Différents types de commande MPPT.....	32
2.4.2 La méthode Incrémentation des conductances (Inc. Cond) .....	32
2.4.3 La méthode Perturbe & Observe (P& O).....	34
2.4.4 Algorithmes MPPT basés sur la logique floue (LF). .....	37
2.4.5 La Structure d'un contrôleur floue .....	37
<b>2.5 Conclusion</b> .....	<b>41</b>
<b>Chapitre 03 Modélisation d'un groupe</b> .....	<b>42</b>
<b>3.1 Introduction</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2 Le moteur</b> .....	<b>43</b>
3.2.1 Le moteur à aimant permanent sans balais.....	45
3.2.2 Résultats de simulation de moteur à aimant permanent .....	48
<b>3.3 Les pompes</b> .....	<b>49</b>
3.3.1 Les différents types des pompes.....	49
3.3.2 Selon l'emplacement de la pompe par rapport à l'eau pompée : .....	50
3.3.3 Selon leur principe de fonctionnement : .....	50

Les pompes hydrauliques non volumétriques (roto-dynamique).....	50
3.3.4 Les pompes volumétriques.....	51
3.3.5 Turbopompe.....	53
<b>3.4 La constitution d'une pompe centrifuge.....</b>	<b>54</b>
3.4.1 Le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge.....	55
3.4.2 Modélisation de la pompe centrifuge.....	55
3.4.3 Les Caractéristiques de la pompe centrifuge.....	56
3.4.4 Domaine d'application d'une pompe centrifuge.....	60
<b>3.4 Conclusion.....</b>	<b>61</b>
<b>Chapitre 04 Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque.....</b>	<b>62</b>
<b>4.1 Introduction.....</b>	<b>63</b>
<b>4.2 Dimensionnement du système photovoltaïque.....</b>	<b>63</b>
4.2.1 Dimensionnement de la Motopompe [22].....	63
4.2.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	65
<b>4.3 Simulation du générateur PV.....</b>	<b>66</b>
4.3.1 Influence de la Température.....	67
4.3.2 Influence de l'éclairement.....	67
<b>4.4 Le couplage direct.....</b>	<b>68</b>
4.4.1 Rendement et quantité d'eau du système de pompage PV en couplage direct ..	70
4.4.2 Optimisation du système de pompage photovoltaïque.....	71
4.4.3 Technique de recherche de point de la puissance Maximal MPPT.....	73
<b>4.5 Comparaison entre un système optimise et non optimise.....</b>	<b>74</b>
4.5.1 Caractéristique de charge et de puissance.....	74
4.5.2 Caractéristique du rendement et du débit du système de pompage PV.....	75
<b>4.6 Simulation du système globale.....</b>	<b>76</b>
<b>4.7 Conclusion.....</b>	<b>77</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>79</b>
<b>Références.....</b>	<b>82</b>

**Liste des Tableaux**

Tableau 1.1 : Caractéristiques électriques typiques du module *BPSOLARMSX60*..... 13

Tableau.2.1 : Les Règles de base utilisée en commande MPPT floue.[12] ..... 40

Tableau 3.1 : résume les avantages et les inconvénients des moteurs mentionner ci-dessus... 44

## Liste des figures

Fig.1.1 : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV [2].	5
Fig.1.2 : Cellule de silicium monocristallin.	6
Fig.1.3 : Cellule de silicium poly cristallin.	6
Fig.1.4 : Cellule de silicium amorphe.	6
Fig1.5 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.	7
Fig.1.6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.	8
Fig.1.7 : Modèle de simulation de GPV.	13
Fig.1.8 : Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV.	14
Fig.1.9 : Différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.	15
Fig.1.10 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques PV.	16
Fig.1.11 : Influence de la température sur les caractéristiques PV.	16
Fig.1.12 : Influence de facteur de qualité sur les caractéristiques PV.	17
Fig.1.13 : Association en série des modules PV.	18
Fig.1.14 : Association en parallèle des modules PV.	18
Fig.1.15 : Association mixte (série/parallèle) des modules PV.	19
Fig1.16 : Système de pompage PV au fil du soleil [6].	20
Fig1.17 : Système de pompage PV avec stockage.	21
Fig.2.1:Symbole d'un convertisseur DC-DC. [8]	23
Fig.2.2 : Schéma électrique d'un hacheur Buck.	24
Fig.2.3 : Le Schéma d'un hacheur Buck fermé(a) : K fermé, (b) : K ouvert	24
Fig.2.4 : Schéma de principe d'un hacheur dévolteur-survolteur	26
Fig.2.5: Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert.	26
Fig.2.6 : Schéma électrique d'un hacheur Boost	27
Fig.2.7 : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert	28
Fig.2.7 : Modèle Simulink d'un convertisseur boost	29

Fig.2.8 : Signal de commande du convertisseur DC-DC. ....	29
Fig.2.9 : caractéristique de sortie boost $V_s$ et $V_d$ en fonction de temps .....	29
Fig.2.10: caractéristique de sortie boost $V_s$ et $V_d$ en fonction de temps. ....	30
Fig.2.11 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT .....	31
Fig.2.12 : 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. ....	32
Fig.2.13 : Algorithme d'incrément de la conductance .....	33
Fig.2.16 : Algorithme de la méthode Incrément de conductance.....	35
Fig.2.17 : Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation.....	36
Fig.2.18 : Structure générale d'un contrôleur flou [12]. ....	38
Fig.3.1 : la Constitution d'un moteur courant continu sans balais. ....	46
Fig.3.2 : l'Architecture d'un moteur sans balais. ....	46
Fig.3.3 : Machine à courant continu à aimant permanent .....	47
Fig.3.4: Modèle simulink du moteur à aimant permanent. ....	48
Fig.3.5 : Variation de courant et de la vitesse du moteur en fonction de temps. ....	49
Fig. 3.6 : Variation du couple électromagnétique et du couple résistant. ....	49
Fig.3.7 : Classification générale des pompes. ....	50
Fig.3.8 : Pompe à piston.....	51
Fig.3.9 : Pompe doseuse à membrane sèche. ....	52
Fig.3.10 : Pompe à palettes. ....	52
Fig.3.11 : Pompe à engrenage externe. ....	53
Fig. 3.12 : pompe à vis. ....	53
Fig. 3.13 : La constitution d'une pompe centrifuge. ....	55
Fig. 3.14: Caractéristiques débit-vitesse d'une pompe centrifuge. ....	57
Fig. 3.16: Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.....	58
Fig. 3.17: Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation .....	59
Fig. 3.18: Caractéristiques puissance hydraulique - vitesse d'une pompe centrifuge. ....	59

Fig. 3.19: Caractéristiques de rendement de la pompe centrifuge. ....	60
Fig.4.1 : Schéma bloc du GPV sous Matlab/Simulink.....	66
Fig.4.2 : Caractéristique électriques P(V) et I(V) du panneau aux conditions standards. ....	66
Fig.4.3 : Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) du GPV.....	67
Fig.4.4 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques I(V) et P(V) du GPV. .....	67
Fig. 4.5: Couplage direct d'un système de pompage PV. ....	68
Fig.4.6: Schéma bloc d'un système de pompage(couplage direct).....	69
Fig.4.7 : Courbes caractéristique-charge en couplage direct. ....	70
Fig.4.9 : Le rendement en couplage direct .....	71
Fig.4.10 : Quantité d'eau en couplage direct .....	71
Fig.4.11: Couplage avec commande MPPT.....	72
Fig.4.12: Schéma bloc d'un système de pompage PV (couplage indirect). ....	74
Fig.4.13 : Courbes de charge et de caractéristiques du système de pompage PV. ....	75
Fig.4.14 : Rendements de système de PPV .....	76
Fig. 4.15 : Quantités d'eau système de PPV .....	76
Fig.4.16 : schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous Matlab/Simulink .....	76



***INTRODUCTION***

***GÉNÉRALE***

## **Introduction Générale**

La production d'énergie est un défi très important pour les années à venir. Effectivement, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. D'autre part, les pays en développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. Aujourd'hui, une part importante de la production mondiale d'énergie provient de ressources fossiles telle que le pétrole, le charbon, le gaz naturel et même l'énergie nucléaire. La consommation de ces sources entraîne des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique jouent un rôle essentiel dans le développement humain, tant dans le passé que dans le présent, et continueront de le faire à l'avenir [16].

L'eau et le soleil sont des éléments de notre vie quotidienne, là où la demande en eau augmente, en particulier dans les zones reculées et désertiques, comme le sud de l'Algérie. Pour résoudre le problème du développement durable, l'utilisation de l'énergie solaire (photovoltaïque ou thermique) est efficace pour le problème du pompage de l'eau surtout par temps chaud, nous obtenons le plus d'énergie solaire[24].

L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus abondants au monde, avec une durée d'insolation dépassant les 2000 heures par an sur la quasi-totalité de son territoire et pouvant atteindre jusqu'à 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. La quantité d'énergie solaire reçue chaque jour sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est d'environ 5 kWh sur la majeure partie du pays, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud [23] . L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie propre et non polluante, offrant un approvisionnement en énergie inépuisable. Étant donné que l'accès à l'eau potable pour les besoins domestiques et l'irrigation reste une préoccupation quotidienne pour les habitants des zones enclavées et sahariennes, les systèmes de pompage photovoltaïque sont particulièrement adaptés pour fournir de l'eau à partir de puits ou de forages. Le pompage photovoltaïque est l'une des applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les régions isolées.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et à l'optimisation du fonctionnement d'un système de pompage d'eau utilisant l'énergie solaire. Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque et d'une charge, représentée par un moteur-pompe à aimant permanent. Ce type de moteur est de plus en plus utilisé dans les applications de pompage solaire en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de son rendement.

Nous avons souligné l'importance de la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire. Cette technique permet de faire fonctionner les systèmes photovoltaïques dans leur zone de puissance maximale, ce qui améliore leur efficacité.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté des notions générales sur l'énergie photovoltaïque, le fonctionnement du générateur PV, ainsi que la modélisation complète du générateur. Nous avons également examiné les différentes méthodes de pompage utilisées.

Le deuxième chapitre est consacré aux convertisseurs statiques utilisés dans le système, avec une présentation de leurs modèles mathématiques et de leurs caractéristiques. Nous avons choisi d'utiliser un convertisseur de type Boost et avons également abordé l'algorithme MPPT.

Le troisième chapitre porte sur la modélisation du système moteur-pompe. Nous avons présenté les caractéristiques des moteurs à aimant permanent et des pompes pouvant être utilisées dans les systèmes de pompage solaire. Les modèles mathématiques de ces composants ont été développés.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous avons effectué différentes simulations du système de pompage solaire, en mettant l'accent sur son optimisation. Nous présentons les résultats obtenus et discutons des implications. En conclusion, nous tirons les premières conclusions de ce travail et discutons des perspectives futures pour la recherche dans ce domaine.

Le mémoire se termine par une conclusion générale, où nous récapitulons les résultats obtenus et envisageons les directions possibles pour les travaux futurs.

# ***CHAPITRE 01***

## ***GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE***

## 1.1 Introduction

Le besoin en énergie pour les sites isolés (régions désertiques, régions montagneuses) où le raccordement au réseau électrique public est très coûteux, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) constitue la solution la plus avantageuse. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural. Où les populations sont réparties dans de petites communautés et la demande énergétique est relativement faible.

Dans nos jours, la demande d'eau est plus en plus importante. Le problème se multiplie en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs PV comme source d'électricité. La réalisation d'un système de pompage PV autonome, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier dans les régions désertiques et montagneuses. En effet, un système PV devient intéressant lorsqu'il est facile à installer avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service.

Dans ce chapitre on présente la structure physique d'une cellule PV et son principe de fonctionnement. Ensuite, on étudie la modélisation du générateur PV pour déterminer les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  ainsi que les influences des différents paramètres climatiques et autres sur ces dernières. Enfin, on présente les différents types des systèmes de pompage PV.

## 1.2 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

## 1.3 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV) est l'assemblage des cellules PV, des connexions, des pièces de protection et des supports etc... Ainsi, n'importe quel dispositif PV (cellules solaires, modules, panneaux...) peut être désigné par le terme " générateur PV ". Pratiquement, la cellule solaire PV ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de 0.5 à 1.5 V selon les technologies utilisées [1].

Pour obtenir une puissance plus élevée, généralement, on assemble les cellules PV en série encapsulées sous verre pour former un module. Les modules sont connectés en série et/ou en parallèle pour former un panneau. Plusieurs panneaux regroupés sur un même site forment un champ PV (Fig.1.1).

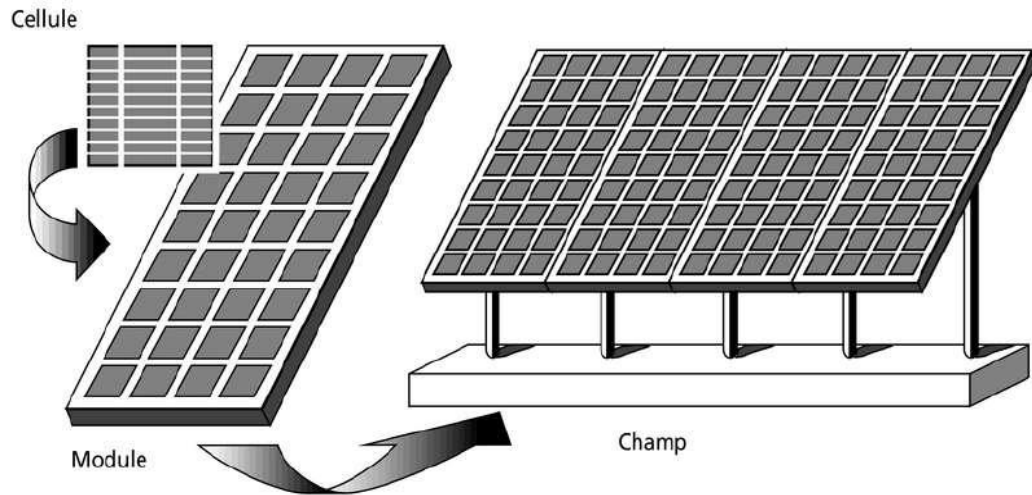


Fig.1.1 : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV [2].

### 1.3.1 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque également est un composant électronique qui est, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule photovoltaïque délivre un courant continu [3].

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïque. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant quel que soit le type, le rendement reste assez faible entre : 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Les cellules les plus utilisées sont :

- **Cellule monocristalline** : Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 10 % à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie [4].

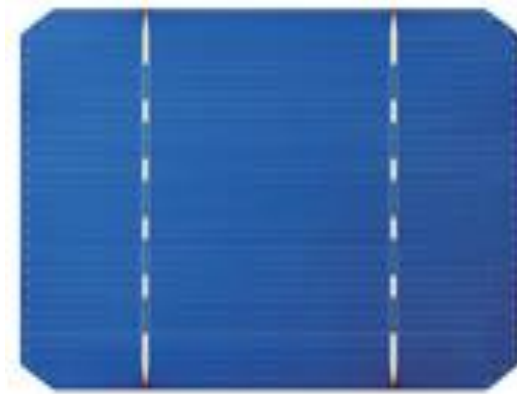


Fig.1.2 : Cellule de silicium monocristallin.

• **Cellule poly cristallin** : Les cellules poly cristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement moyen est de *11% à 13%* et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines.

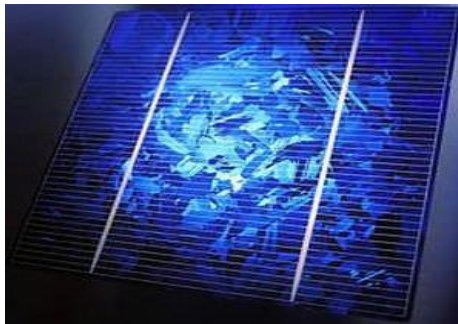


Fig.1.3 : Cellule de silicium poly cristallin.

• **Cellules amorphes** : Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. A l'origine, leur rendement était plus faible (*6 à 10%*), mais la technologie évolue rapidement, ils fonctionnent avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de *2 à 3000 lux*) [4].



Fig.1.4 : Cellule de silicium amorphe.

### 1.3.2 Principe de fonctionnement

La cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement. La figure (1.5) représente le principe de fonctionnement. [5].

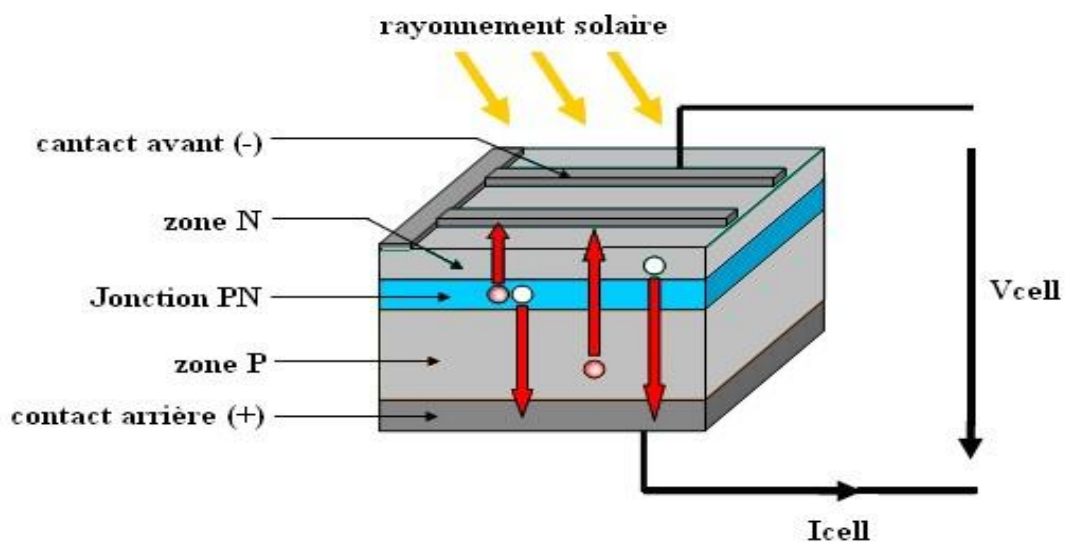


Fig1.5 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

### 1.3.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour représenter les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, on utilise souvent un circuit électrique équivalent. Différents modèles mathématiques existent pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, et ils varient en termes de méthode de calcul et du nombre de paramètres pris en compte dans la caractéristique courant-tension.



Dans notre étude, nous avons opté pour un modèle simple appelé modèle à cinq paramètres, où les valeurs des paramètres sont fournies par le fabricant.

Ce modèle est largement utilisé pour la modélisation des modules photovoltaïques car il permet d'obtenir des courbes I-V plus précises.

### 1.3.4 Circuit équivalent d'une cellule PV

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération. La figure (1.6) représente le schéma équivalent de ce modèle qui est composé d'un générateur de courant, dont la valeur du courant est proportionnelle à l'éclairement reçu à la surface de la cellule PV, d'une diode, d'une résistance parallèle (shunt) et d'une résistance série.

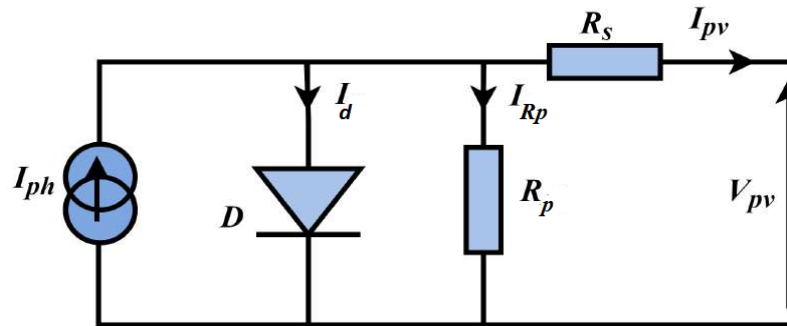


Fig.1.6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

- $R_s$  : est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point  $V_{oc}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ ).

- $R_p$  : est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant-tension au point  $I_{cc}$  représente l'inverse de la résistance shunt ( $1/R_{sh}$ ).

Dans la Figure (1.6) En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (1.1)$$

Avec :

$I_{ph}$  : courant généré par la lumière ou photo courant.

$I_d$  : courant direct d'obscurité de la jonction.

$I_{pv}$  : courant généré par la cellule et fourni à la charge.

$I_{Rp}$ : courant qui circule dans la résistance parallèle, est donné par l'équation :

$$I_{Rp} = V_d R_p = V + R_s I_{Rp} \quad (1.2)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique  $I - V$  est donnée par la relation suivante :

$$I_d = I_s \left[ \exp. \left( \frac{V_{pv}}{U_T} \right) - 1 \right] \quad (1.3)$$

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (1.4)$$

Avec :

- $q$  : charge de l'électron (  $1.6 \times 10^{-19}$  coul).
- $k$  : la constante de Boltzmann.
- $U_T$  : tension thermique.
- $I_s$  : courant de saturation.
- $T$  : température absolue (en kelvin).
- $V_{pv}$  : tension de sortie de la cellule.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{pv}} \right) \quad (1.5)$$

$$\Rightarrow I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{AU_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \right) \quad (1.6)$$

### 1.3.5 Paramètres des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $P_{max}$ ,  $A$ ,  $ff$  et  $\eta$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

- **Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )** : Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V = 0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire :

$$I_{cc} (V = 0) = I_{ph} \quad (1.7)$$

- **Tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ )** : La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

On peut écrire :

$$V_{co}(I = 0) = AU_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right) \quad (1.8)$$

**a- Puissance maximale :** La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée Pmax) pour un point de fonctionnement Pmax (Imax, Vmax) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et ICC et tension comprise entre 0 et Vco).

Donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit (V.I) ; c.à.d. :

$$P = V_{pv} \left( I_{ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{V_{pv}}{AU_T}\right) - 1 \right] \right) \quad (1.9)$$

Cette puissance fournie est maximale au point défini par :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial I}{\partial V} + I = 0$$

Soit :

$$I_{ph} - I_S \left( \exp\left(\frac{V_{pv}}{AU_T}\right) - 1 \right) - V_{pv} I_S \left( \frac{1}{AU_T} \right) \exp\left(\frac{V_{pv}}{AU_T}\right) = 0 \quad (1.10)$$

La tension  $V_{max}$  et le courant  $I_{max}$  correspondant au maximum de puissance, sont alors données par :

$$\left( 1 + \frac{V_{max}}{AU_T} \exp\left(\frac{V_{max}}{AU_T}\right) \frac{I_{ph}}{I_S} \right) \quad (1.11)$$

Donc :

$$I_{max} = I_S \frac{V_{max}}{AU_T} \exp\left(\frac{V_{max}}{AU_T}\right) \quad (1.12)$$

Le produit ( $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ ) [6].

### a) Facteur de qualité

Ce paramètre est appelé aussi paramètre d'ajustement. De nombreux auteurs discutent des méthodes d'estimation de la valeur correcte de cette constante. Habituellement, ce paramètre varie entre  $1 \leq A \leq 2$ , mais le choix dépend d'autres paramètres du modèle PV

### b) Facteur de forme

On appelle facteur de forme *ff* (*filling factor*), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ( $P_{max} = I_{max} \times V_{max}$ ) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit ( $I_{cc} \times V_{co}$ ). Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.13)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

### f) Rendement d'une cellule solaire

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident:

$$\eta_c = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solaire}} \quad (1.14)$$

### 1.3.6 Caractéristique du générateur PV

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire se met sous la forme mathématique de l'équation (1.15) qui peut être reformulée sous la forme :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{(V_{pv} + R_S I_{pv})}{AU_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{R_p}\right) \quad (1.15)$$

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1)[1 + K_0(T - T_1)] \quad (1.16)$$

$$I_{ph}(T_1) = I_{CC}(T_1 \cdot nom) \cdot \frac{E}{E_{nom}} \quad (1.17)$$

$$K_0 = \frac{(I_{CC}(T_2) - I_{CC}(T_1))}{I_{CC}(T_1) \frac{1}{T_1 - T_1}} \quad (1.18)$$

$$I_S = I_S(T_1) \left(\frac{T}{T_1}\right)^{3/A} \exp\left(\frac{-V_g}{\frac{AU_T}{T} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}\right) \quad (1.19)$$

$$I_S(T_1) = \frac{I_{CC}(T_1)}{\exp\left(\frac{V_{CO}(T_1)}{AU_T \frac{T_1}{T}}\right) - 1} \quad (1.20)$$

$$R_S = -\frac{dV_{pv}}{dI_{VCO}} - \frac{1}{X_V} \quad (1.21)$$

$$XV = I_S(T_1) \frac{1}{AU_T} \exp\left(\frac{V_{CO}(T_1)}{AU_T \frac{T_1}{T}}\right) \quad (1.22)$$

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées utilisant les données de fabrications de panneaux photovoltaïques et à partir des courbes  $I_{pv}(V_{pv})$  mesurées.

Quand la cellule est court-circuit, un courant est négligeable dans la diode. Le rapport entre le photo-courant et la température est linéaire, voire équation (1.16) et est déduit en notant le changement du photo-courant en fonction de la variation de la température.

Quand la cellule est en obscurité, la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  est donnée par l'équation de Shockley, Quand la cellule illuminée est en circuit ouvert, le photo-courant passe entièrement dans la diode. Les courbes  $I_{pv}(V_{pv})$  sont excentrées de l'origine par le photo-courant généré  $I_{ph}$ , équation (1.15). La valeur du courant de saturation à 25°C est calculée en utilisant la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit à cette température, équation (1.20).

Une estimation du facteur d'idéalité doit être faite. Cette valeur est entre 1 et 2, plus près de l'unité pour les courants élevés, et approchant la valeur 2 pour les bas courants.

L'équation de la caractéristique  $I(V)$  d'un générateur PV, composé de  $NP$  cellules en parallèle et  $NS$  cellules en série, peut être décrite comme suit :

$$I_{pv} = N_P I_{ph} - N_P I_S \left[ \exp\left(\frac{\left(V_{pv} + \left(\frac{NS}{NP}\right) R_S I_{pv}\right)}{NS AU_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv} + \left(\frac{NS}{NP}\right) R_S I_{pv}}{\left(\frac{NS}{NP}\right) R_p}\right) \quad (1.22)$$

Le module *BPSOLARMSX60* a été choisi pour la validation du modèle mathématique. Il contient 36 cellules en silicium poly-cristallin et fournit une puissance maximale de 60W. Les caractéristiques électriques de ce module PV sont données par le tableau 1.1:

Caractéristiques	Valeurs
Puissance maximale $P_{max}$	60W
Tension au point maximal $V_m$	17.1 V
Courant au point maximal $I_m$	3.5 A
Courant de court-circuit $I_{sc}$	3.8A
Tension de circuit ouvert $V_{co}$	21.1 V
Coefficient de température de $I_{sc}$	65 mA/ °C
Coefficient de température de $V_{opt}$	-80mV/ °C

Tableau 1.1 : Caractéristiques électriques typiques du module *BPSOLARMSX60*.

La figure (1.7) représente le modèle de simulation de GPV dans Matlab/Simulink.

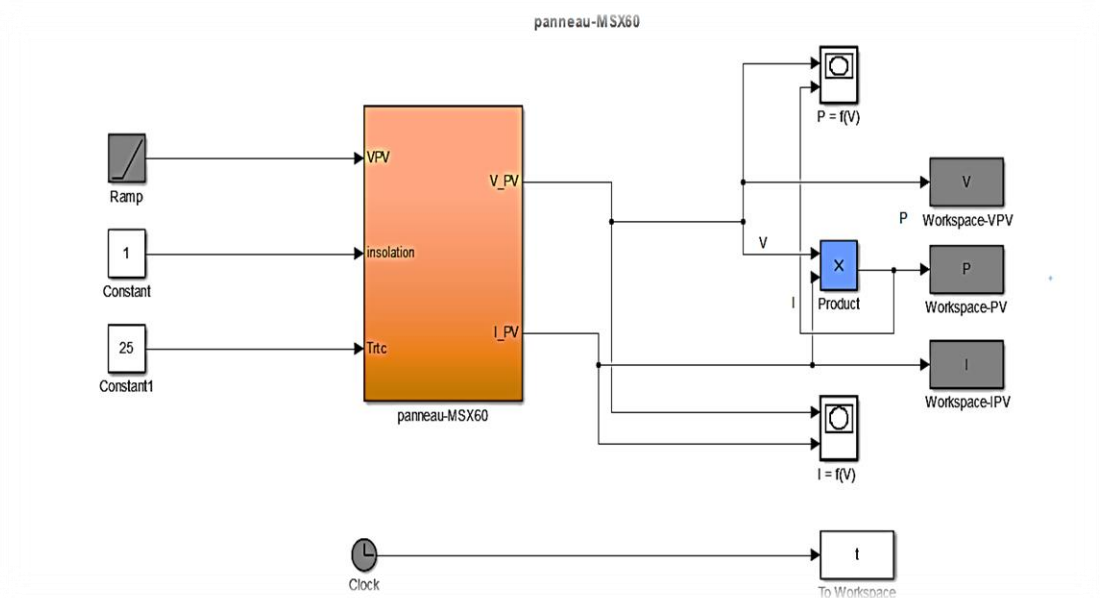


Fig.1.7 : Modèle de simulation de GPV.

La figures (1.8) montre les caractéristiques  $I_{pv} - V_{pv}$  et  $P_{pv} - V_{pv}$  du générateur PV considéré dans les conditions standards de température et d'ensoleillement ( $T = 25^{\circ}C$  et  $E = 1000W/m^2$ ).

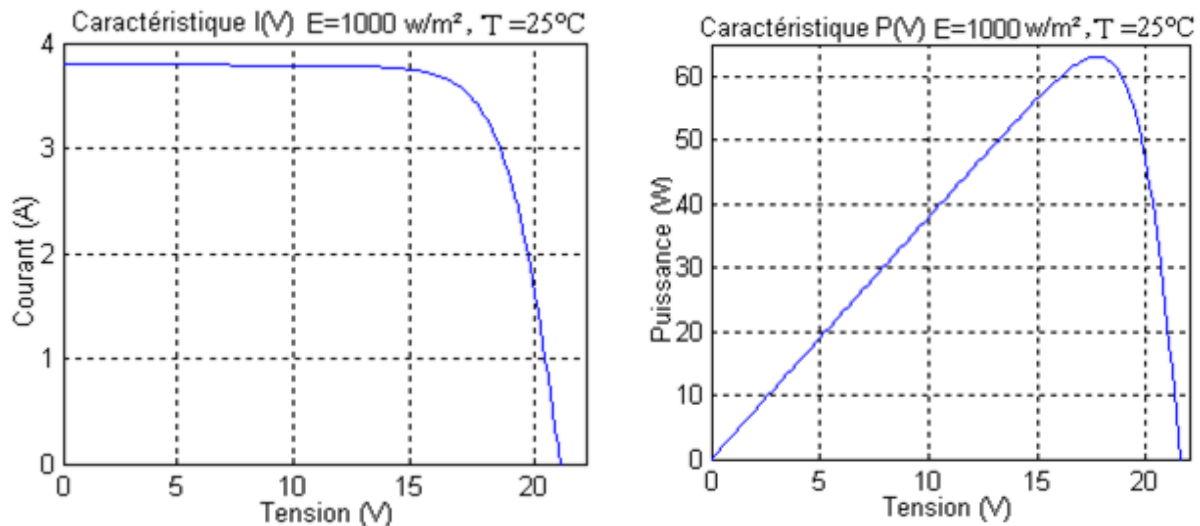


Fig.1.8 : Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV.

Avec les résultats de simulation retrouvés, nous avons pu valider le modèle à une diode. Les résultats des caractéristiques puissance-tension et courant-tension correspondent parfaitement au comportement d'un panneau photovoltaïque. Les valeurs  $I_{cc}$ ,  $I_m$ ,  $V_{co}$ ,  $V_m$  ainsi que  $P_m$  sont les valeurs exactes du Tableau 1.1 donné précédemment.

### 1.3.7 Les zones de Caractéristique d'un générateur photovoltaïque

La figure (1.9) représente trois zones essentielles :

La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone (2) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La zone (3) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

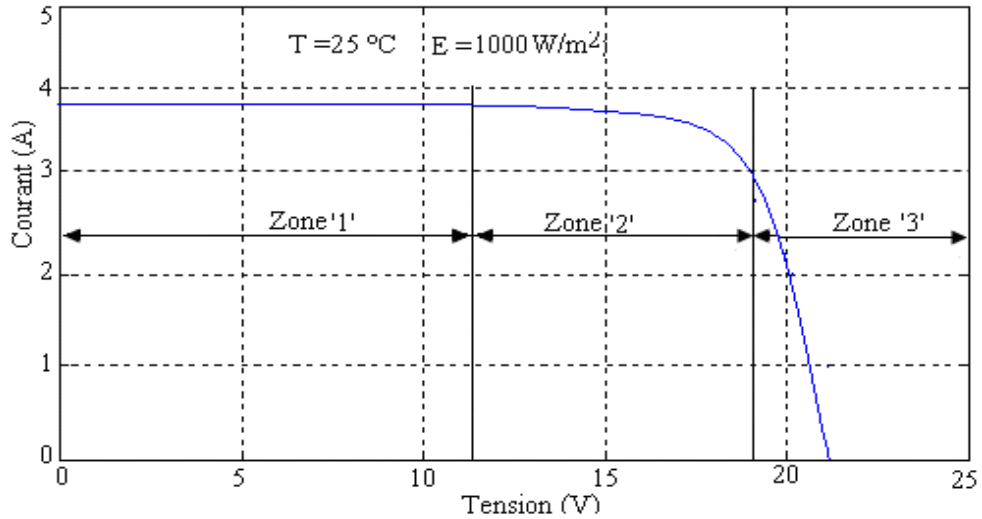


Fig.1.9 : Différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.

### 1.3.8 Les paramètres qui influent sur la caractéristique du générateur photovoltaïque

Plusieurs paramètres peuvent influencer sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  du générateur PV considéré comme nous allons le voir ci-dessous :

**a. Influence de l'éclairement :** La figure (1.10) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température constante.

On remarque que la tension  $V_{max}$  correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_{max}$  qui augmente fortement avec l'éclairement.

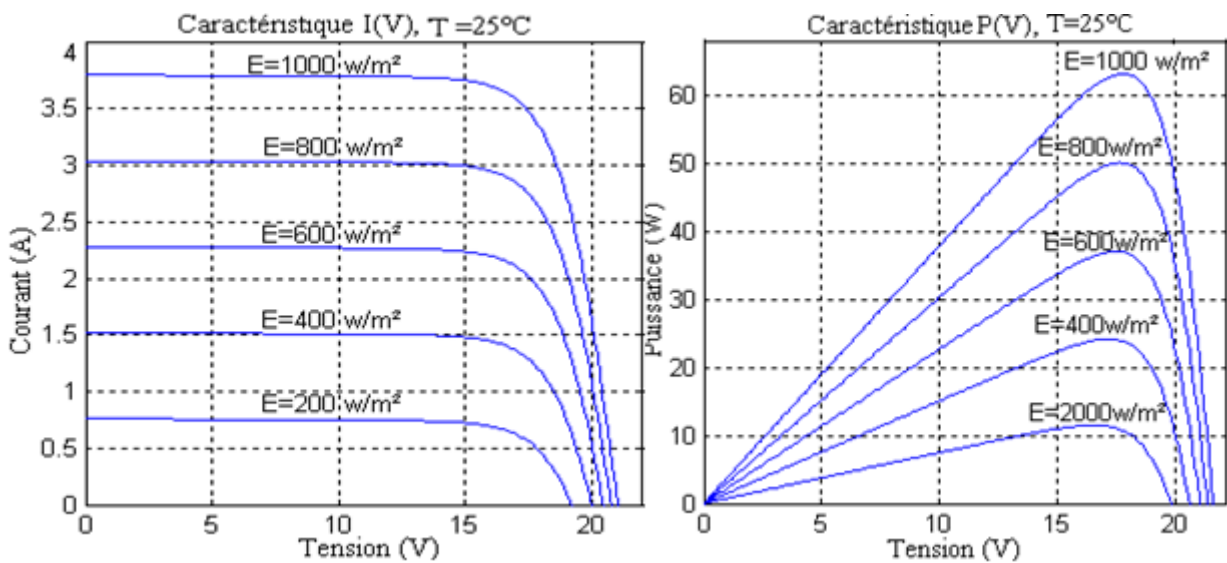




Fig.1.10 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques PV.

**b. Influence de la température :** La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. La figure (1.11) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, à un éclairement et constante.

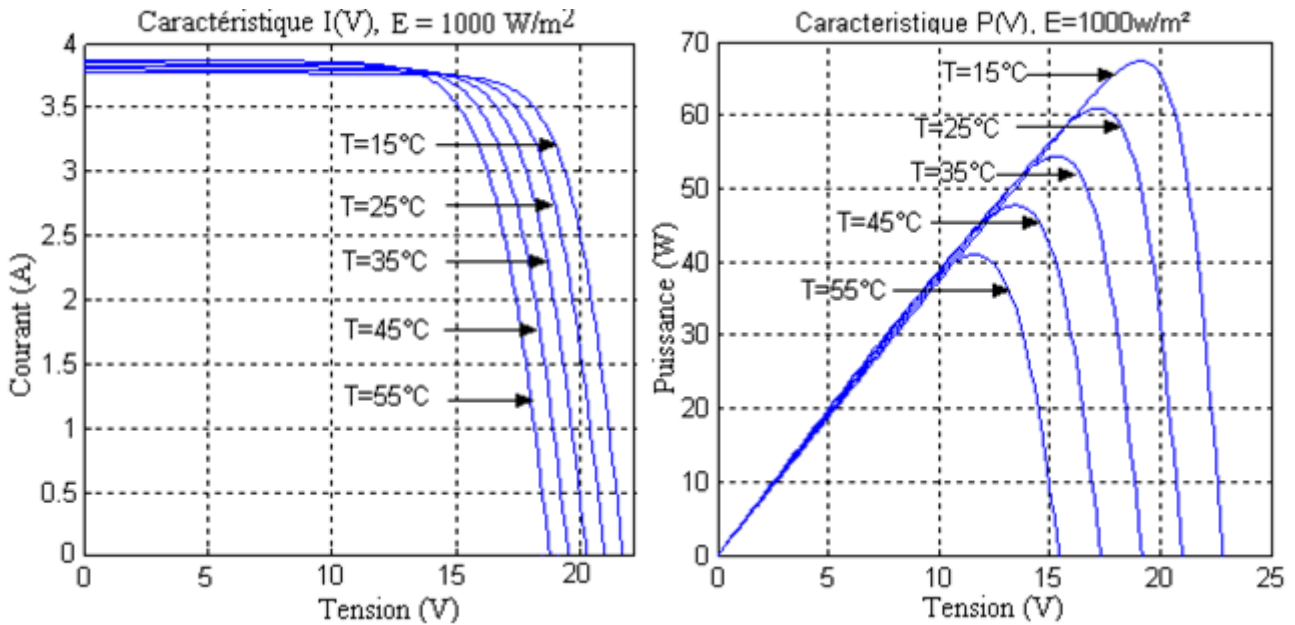


Fig.1.11 : Influence de la température sur les caractéristiques PV.

On remarque que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi que celle de la puissance maximale alors que le courant reste presque inchangé.

**c. Influence de facteur de qualité :** L'élévation du facteur de qualité (facteur d'idéalité) influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

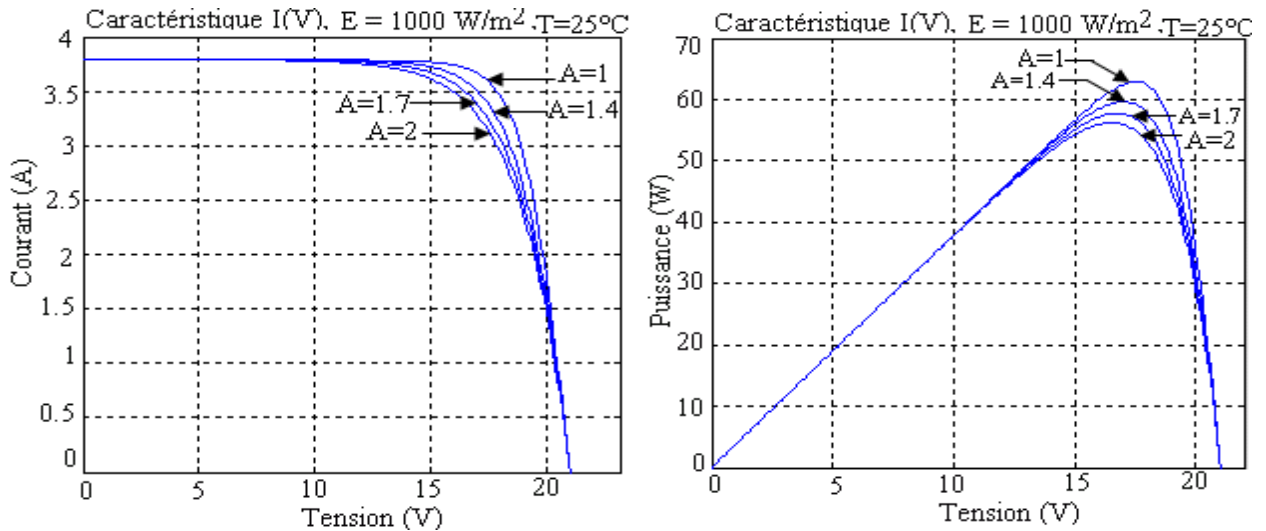


Fig.1.12 : Influence de facteur de qualité sur les caractéristiques PV.

#### 1.4 Association des modules PV

Pour pouvoir augmenter la tension, le courant et la puissance d'un générateur PV, on peut associer plusieurs modules PV en série ou en parallèle ou encore en mixte (série/parallèle).

##### 1.4.1 Association en série

L'association de  $N_s$  (nombre en série) des modules permet d'augmenter la tension du générateur PV. Cette association délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles des modules et un courant égal à celui d'un seul module.

Les caractéristiques d'un groupement de  $N_s$  modules PV en série sont représentées par les la figure suivante :

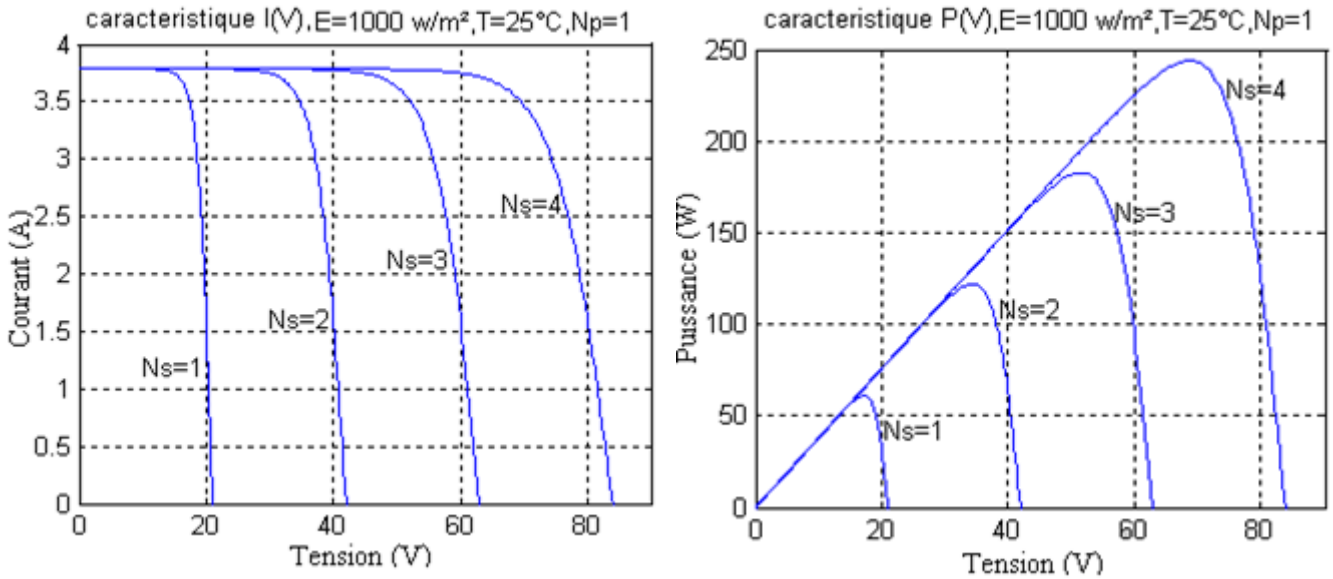


Fig.1.13 : Association en série des modules PV.

### 1.4.2 Association en parallèle

Pour augmenter le courant d'un générateur PV, on associe  $N_p$  (nombre en parallèle) des modules PV identiques. Dans ce groupement, le courant est égal à la somme des courants individuels des modules et la tension reste égale à celle d'un seul module. Les caractéristiques d'un groupement de  $N_p$  modules PV en parallèle sont représentées par la figure suivante :

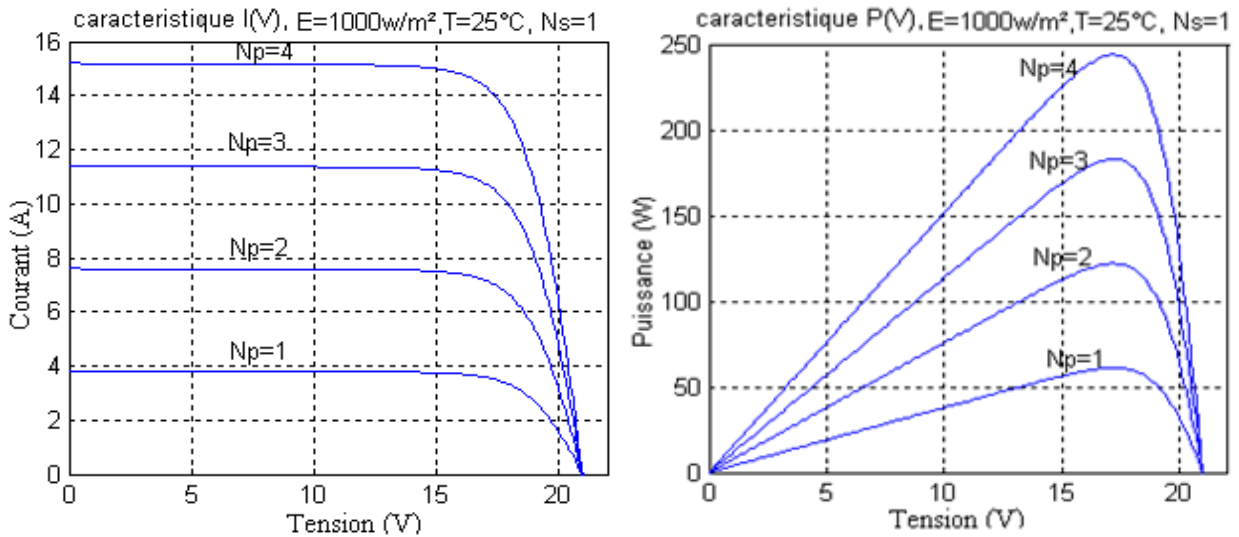


Fig.1.14 : Association en parallèle des modules PV.

### 1.4.3 Association mixte (série/parallèle)

Dans certains cas, la satisfaction des besoins en courant et en tension importants nécessite le recours à l'utilisation d'un groupement mixte (série/parallèle) de modules PV.

Les caractéristiques d'un groupement mixte des modules PV sont illustrées par la figure suivante :

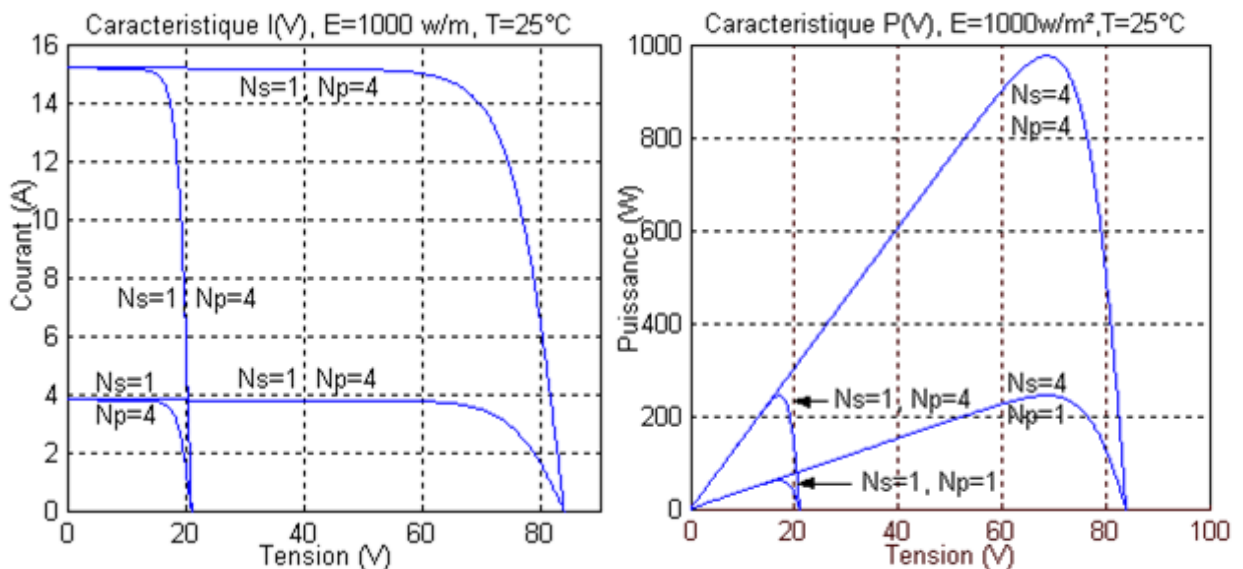


Fig.1.15 : Association mixte (série/parallèle) des modules PV.

### 1.5 Méthodes de pompages

De nombreuses personnes dans des zones isolées comme les zones rurales et les régions reculées souffrent du problème des pénuries d'eau, en particulier dans les zones désertiques, et même avec des puits de pompage de l'eau posent le problème de l'électricité pour les endroits qui n'atteignent pas le réseau électrique et afin de résoudre ce problème, le pompage photoélectrique est l'une des meilleures solutions où il adopte un principe relativement simplifié qui est la production d'électricité à travers des panneaux photovoltaïques grâce au rayonnement solaire pour alimenter la pompe, on rencontre deux types de base:

### 1.5.1 Pompage au fil du soleil

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a 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 [3], comme la montre la figure (1.16).

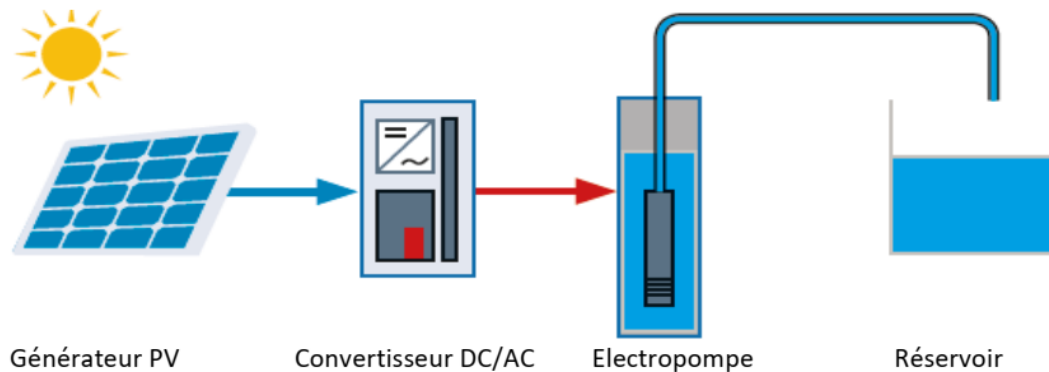


Fig1.16 : Système de pompage PV au fil du soleil [6].

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. Selon le type de l'actionneur, Les principaux constituants de ces systèmes sont :

- Avec un moteur à courant continu : un générateur PV, un convertisseur DC-DC (hacheur), moteur à courant continu et pompe.
- Avec un moteur courant alternatif : un générateur PV, un convertisseur DC-DC (hacheur), un convertisseur DC-AC (onduleur), moteur synchrone ou asynchrone et pompe.

### 1.5.2 Pompage avec stockage électrochimique (batteries)

Cette technique basée sur le stockage d'énergie via des batteries. Ces batteries stockent l'énergie produite par les cellules PV lors des périodes d'ensoleillement afin de pouvoir restituer cette énergie pour pomper l'eau en temps voulu. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin. Le pompage au fil du soleil doit être privilégié

systématiquement, compte tenu du coût des batteries et du maillon faible qu'elles représentent dans un système PV du fait de leur durée de vie limitée. Néanmoins, il présente certains inconvénients qu'il ne faut pas négliger lors de son choix [2].

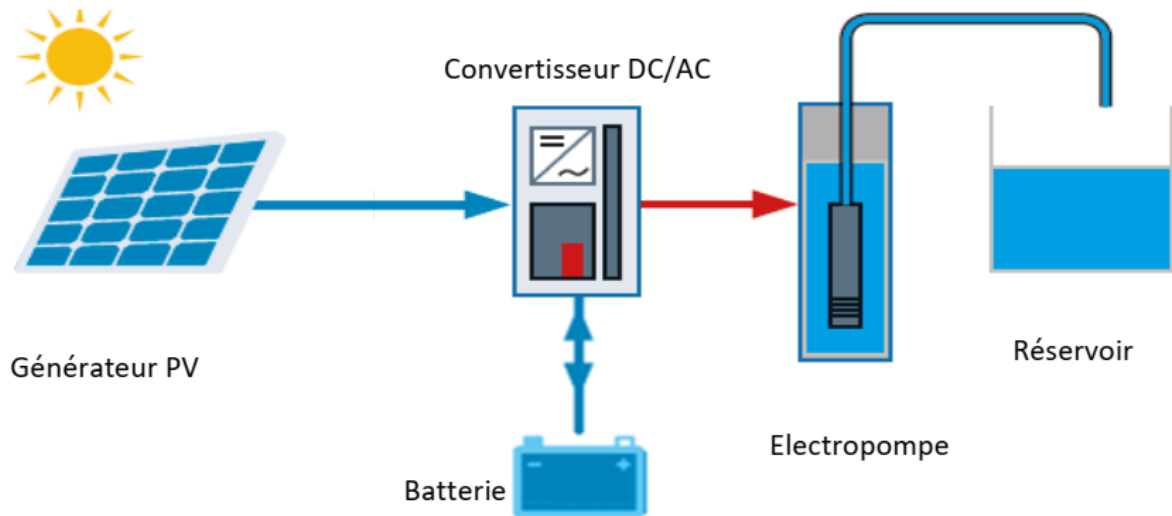


Fig1.17 : Système de pompage PV avec stockage.

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit et présenté la structure physique et le principe de fonctionnement d'une cellule PV. Ensuite on a présenté le modèle mathématique à simple diode d'une cellule PV pour la modélisation du générateur PV considéré. Puis, ce dernier a été simulé pour déterminer les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  ce qui nous a permis de présenter les influences des différents paramètres sur ces caractéristiques ainsi que le groupement série, parallèle ou mixte des modules PV pour l'augmentation de la tension et/ou le courant du module considéré a été abordé. Les différentes techniques de pompage PV a été présenté à la fin de ce chapitre.

# ***CHAPITRE 02***

***CONVERTISSEURS STATIQUES ET LES  
TECHNIQUES DE COMMANDE MPPT***

## 2.1 Introduction

Les convertisseurs DC-DC sont utilisés pour différentes applications devient de plus en plus importante en raison de leurs petites tailles et leur efficacité. Ils sont utilisés dans différentes applications : domestiques (téléphone mobile, ordinateur, électroménager,...), industrie automobile (avec l'apparition de véhicules hybrides et électriques), aéronautique (l'avion électrique) et surtout dans le domaine des énergies renouvelables (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes...). Dans ce contexte, ils sont utilisés pour maintenir le point de fonctionnement optimal des panneaux solaires, permettant ainsi une utilisation maximale de l'énergie produite.

Ce chapitre, est structuré en deux parties. Dans la première, la modélisation et la validation du convertisseur DC-DC sont présentées. La dernière partie est réservée au pour les techniques de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), où on donne un aperçu des différentes techniques MPPTs, on décrit leurs principes de fonctionnement et on met en évidence leurs avantages et leurs limites.

## 2.2. Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

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.

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation.

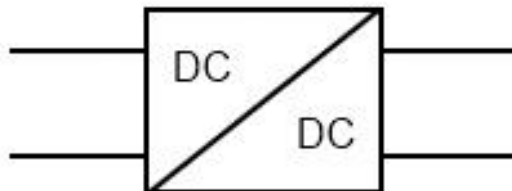


Fig.2.1:Symbole d'un convertisseur DC-DC. [8]



2.2.1 Différents types d'hacheurs

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC dont les plus connus sont :

- Convertisseur survolteur (boost).
- Convertisseur dévolteur (buck).
- Convertisseur dévolteur- survolteur (buck-boost).
- Convertisseur Buck [8]

Le convertisseur abaisseur, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP. La figure (2.2) montre le schéma du circuit d'un convertisseur Buck.

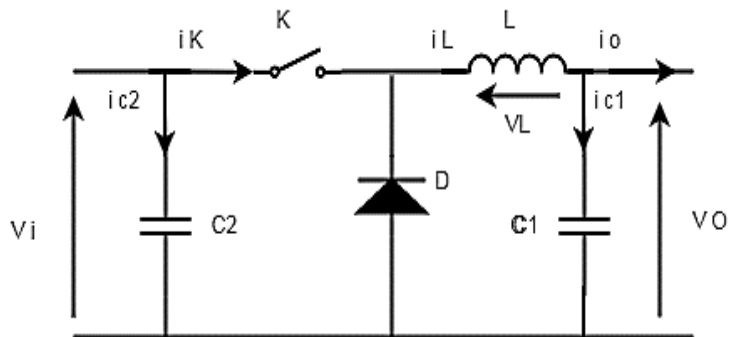


Fig.2.2 : Schéma électrique d'un hacheur Buck.

Pour comprendre le comportement réel nous devons représenter le circuit équivalent à travers les deux états du commutateur et de tirer un modèle mathématique des variables d'entrée/sortie. La figure (2.3) montre le schéma de circuit équivalent du convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant  $dT_s$  et l'interrupteur ouvert pendant  $(1-d) T_s$

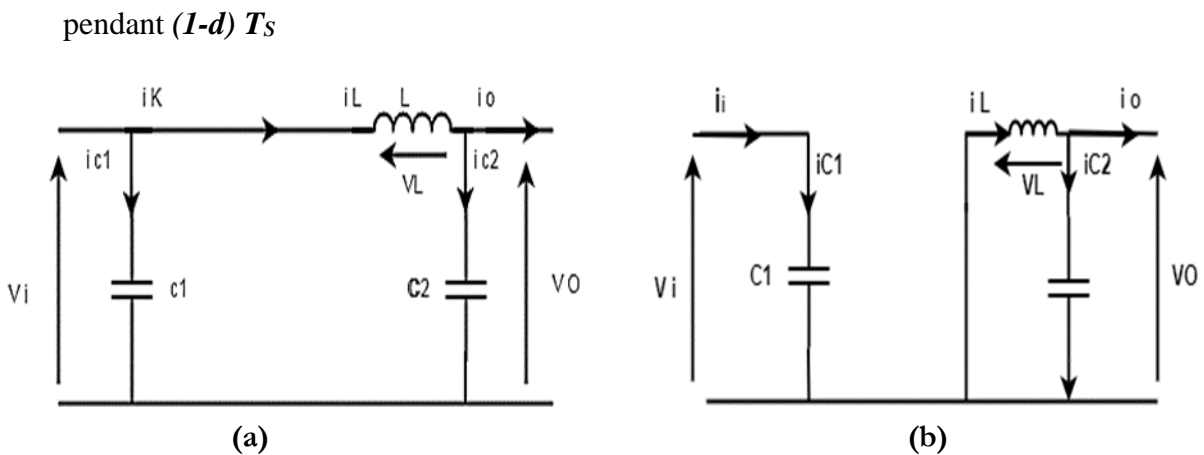


Fig.2.3 : Le Schéma d'un hacheur Buck fermé(a) : K fermé, (b) : K ouvert

Les calculs suivants sont obtenus en appliquant la loi de Kirchhoff aux circuits équivalents.

Pour la première période  $dT_s$  :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = L \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour la deuxième période (1-d)  $T_s$  :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \\ I_{c2}(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

Pour obtenir une représentation dynamique valide sur toute la période  $T_s$ , on utilise couramment l'expression suivante :

$$\left\{ \frac{dx}{dt} \right\} T_s = \frac{dx}{dt} d T_s + \frac{dx}{dt(1-d)} T_s (1-d) T_s \quad (2.3)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.2) et (2.1), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = d T_s (I_i - I_L) + (1+d) T_s I_i \\ C2 \frac{dV_o(t)}{dt} T_s = d T_s (I_L - I_o) + (1+d) T_s (I_L - I_o) \\ L \frac{dI_L}{dt} = d T_s (V_i - V_o) + (1-d) T_s (-V_o) \end{cases} \quad (2.4)$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = I_L(t) - C2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\ I_L(t) = \frac{1}{d} (I_i(t) - C1 \frac{dV_i(t)}{dt}) \\ V_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{dI_L}{dt} + V_o(t)) \end{cases} \quad (2.5)$$

### Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) [8]

Le convertisseur abaisseur-élevateurs combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de toute tension d'entrée afin d'obtenir toute tension de sortie souhaitée. La figure (2.4) montre le schéma de circuit électrique d'un Hacheur Buck-Boost :

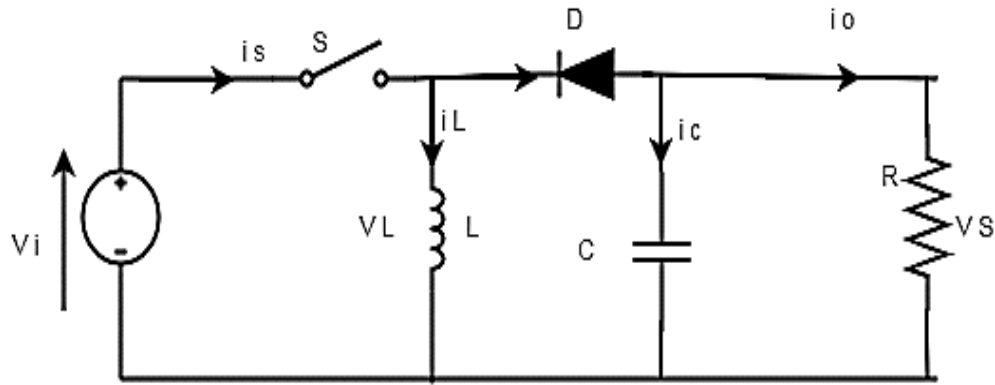


Fig.2.4 : Schéma de principe d'un hacheur dévolteur-survolteur

La figure (2.5) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles de fonctionnement

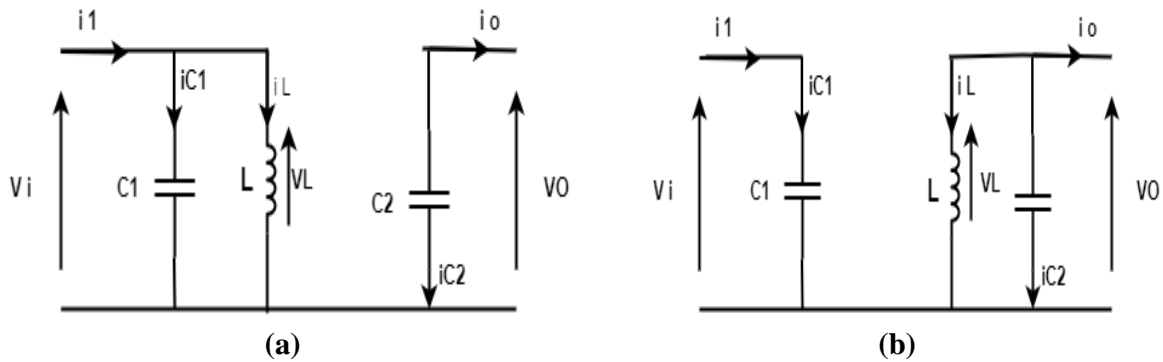


Fig.2.5: Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période  $dT_s$  :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t) \\ I_{c2}(t) = C2 \frac{dV_i(t)}{dt} = -I_0(t) \\ V_l(t) = L \frac{dI_l(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

Pour la deuxième période  $(1-d) TS$  :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \\ I_{c2}(t) = L \frac{dV_0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t) \\ V_l(t) = L \frac{dI_l(t)}{dt} = V_0(t) \end{cases} \quad (2.7)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.6) et (2.7), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur :

$$\begin{cases} Il(t) = \frac{1}{d} (Ii - C1 \frac{dVi(t)}{dt} \\ I0 = -(1-d)Il - C2 \frac{dV0}{dt} \\ Vi(t) = \frac{1}{d} (-(1-d)V0 + L \frac{dil}{dt} \end{cases} \quad (2.8)$$

Et finalement le système photovoltaïque produit une tension continue de faible amplitude qui doit être augmentée pour être utilisable. Pour y parvenir, on utilise un convertisseur appelé hacheur de type élévateur ou boost, qui permet d'augmenter efficacement la tension. En effet, le convertisseur boost est souvent considéré comme la méthode la plus simple et la plus efficace pour augmenter la tension d'une source de courant continu.

### Hacheur survolteur (Boost) [8]

Le convertisseur élévateur (Boost), ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP.

La figure (2.6) montre le schéma du circuit électrique d'un convertisseur élévateur. Son application courante consiste à convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie élevée.

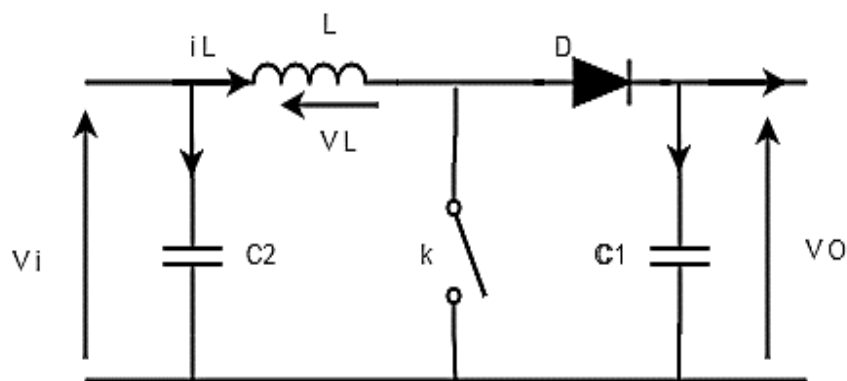


Fig.2.6 : Schéma électrique d'un hacheur Boost

Afin de pouvoir synthétiser la fonction du hacheur boost en régime établi, il est nécessaire de donner le schéma électrique équivalent de chaque position de l'interrupteur \$K\$. celui de la figure (2.7)

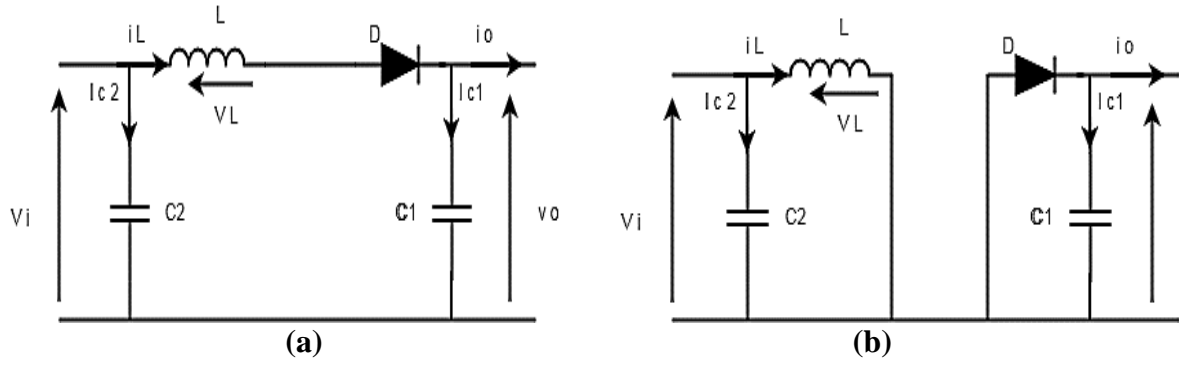


Fig.2.7 : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert

Les calculs suivants sont obtenus en appliquant la loi de Kirchhoff aux circuits équivalents.

Pour la première période  $dT_s$  :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C1 \frac{dVi(t)}{dt} = Ii(t) - Il(t) \\ I_{c2}(t) = C2 \frac{dVi(t)}{dt} = -I0(t) \\ Vl(t) = L \frac{dil}{dt} = -Vi(t) \end{cases} \quad (2.9)$$

Pour la deuxième période  $(1-d) T_s$

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C1 \frac{dVi(t)}{dt} = Ii(t) - Il(t) \\ I_{c2}(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = Il(t) - I0(t) \\ Vl(t) = L \frac{diL}{dt} = Vi(t) - V0(t) \end{cases} \quad (2.10)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.9) et (2.10), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur

$$\begin{cases} IL = Ii - C1 \frac{dVi(t)}{dt} \\ I0 = (1 - d)IL - C2 \frac{dVi(t)}{dt} \\ Vl(t) = L \frac{diL}{dt} + (1 - d)V0 \end{cases} \quad (2.11)$$

### 2.2.2 Simulation d'un convertisseur Boost

Afin de valider le convertisseur boost deux tests de simulation ont été effectués. Le premier test pour une tension d'entrée fixe  $Ve=12v$ . Le deuxième test pour une tension  $Ve$  variable. La figure (2.7) représente le modèle Simulink d'un convertisseur boost.

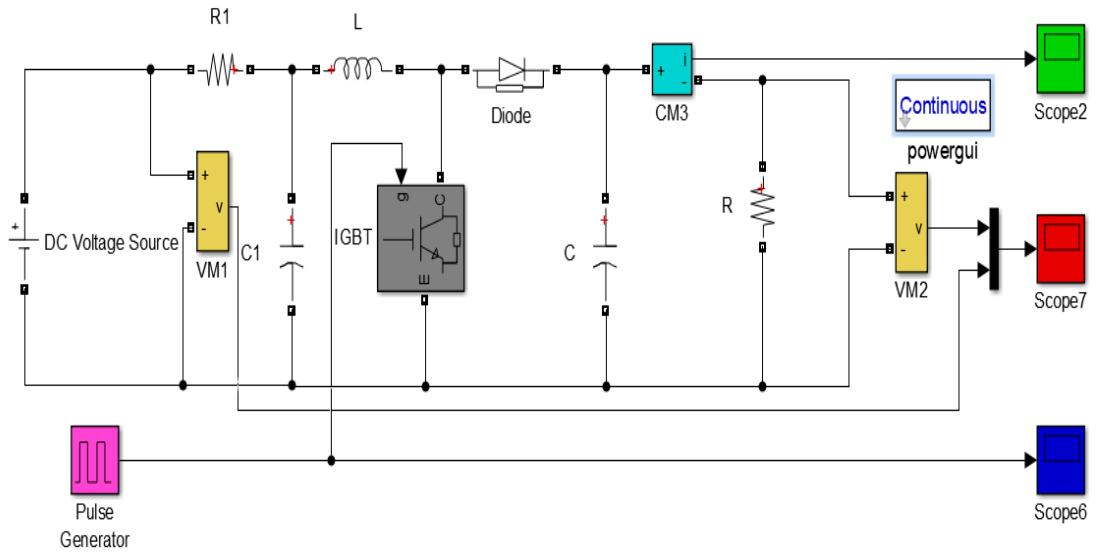


Fig.2.7 : Modèle Simulink d'un convertisseur boost

Pour cette simulation on choisit le rapport cyclique ( $d=0.5$ ).

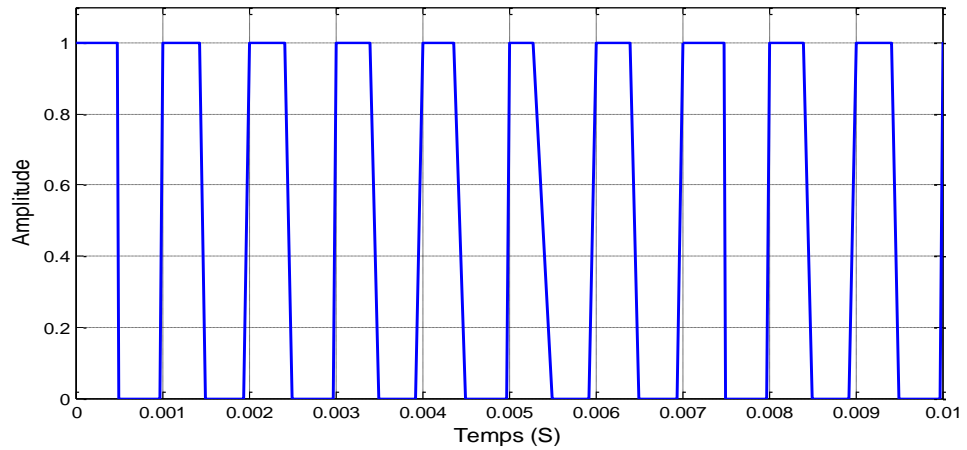


Fig.2.8 : Signal de commande du convertisseur DC-DC.

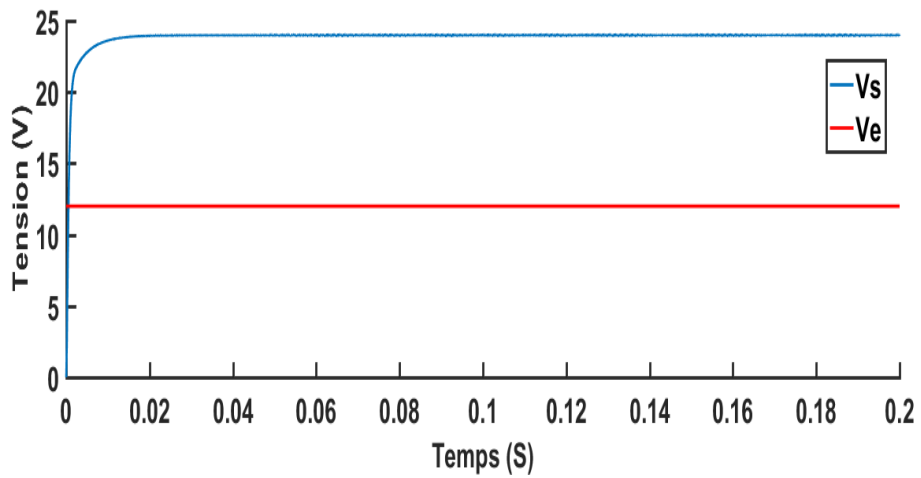


Fig.2.9 : caractéristique de sortie boost  $V_s$  et  $V_d$  en fonction de temps

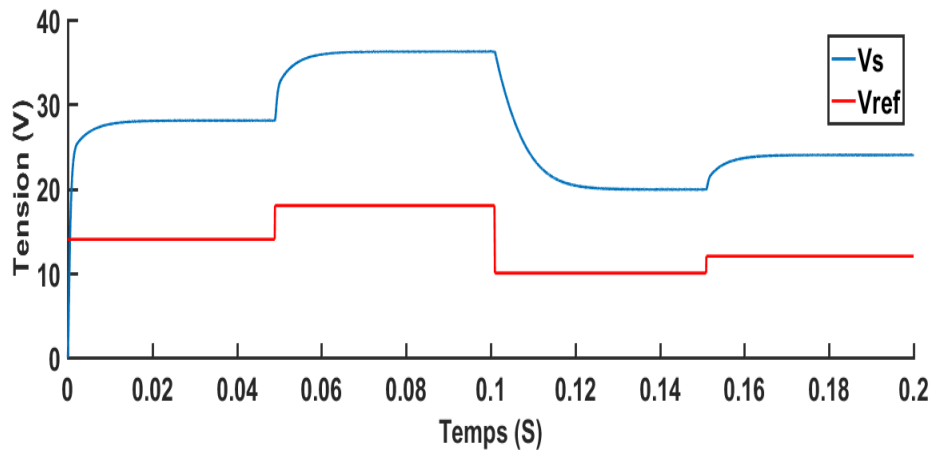


Fig.2.10: caractéristique de sortie boost  $V_s$  et  $V_d$  en fonction de temps.

Les résultats de simulation confirment que le convertisseur DC -DC fonctionne correctement.

## 2.3 La commande MPPT

### 2.3.1 Définition

Le MPPT, est l'abréviation "Maximum Power Point Tracker" en anglais, c'est une méthode pour suivre le point de puissance maximale d'un générateur non linéaire. Cette technologie est souvent utilisée en conjonction avec des générateurs photovoltaïques. Le suivi du point de puissance maximale c'est l'étape cruciale dans les systèmes photovoltaïques

Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens et plusieurs techniques ont été développées depuis la première loi de contrôle de ce type de PV, ces techniques se différencient entre elle par leur complexité, le nombre de capteurs requis, leur vitesse de convergence, leur coût, leur rendement et leur domaine d'application. [8]

### 2.3.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La maximisation du point de puissance maximale (MPPT) joue un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques. Depuis la publication de la première loi de commande en 1968, différentes techniques ont été développées pour optimiser les sources d'énergie renouvelable de type photovoltaïque (PV). Ces techniques varient en termes de complexité, du nombre de capteurs nécessaires, de la rapidité de convergence, du coût, de l'efficacité et du domaine d'application.

### 2.3.3 Principe Recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La commande MPPT, associée à une phase d'adaptation intermédiaire, permet de faire fonctionner un générateur PV de manière à produire en permanence de puissance maximal. Par conséquent, quelque soient les conditions météorologiques (température et luminosité),

Le contrôle du convertisseur mettra les systèmes au point de fonctionnement maximal ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ )

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (2.11). [8]

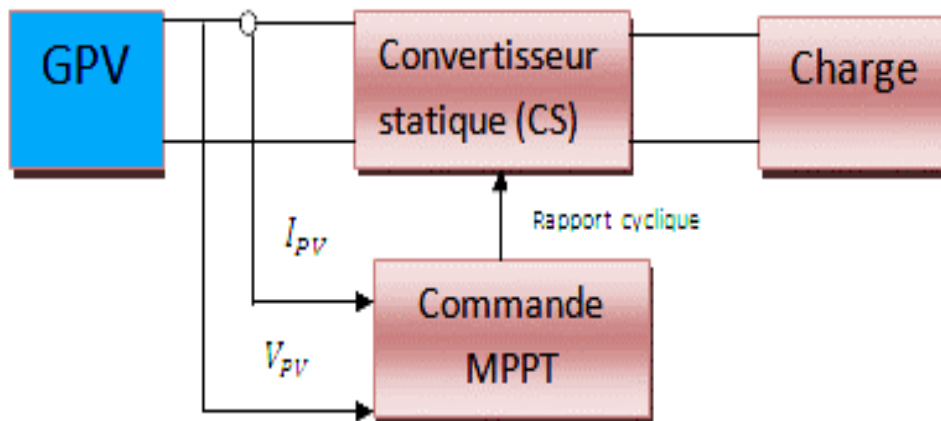


Fig.2.11 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

### 2.4 Gestion de la MPPT

La figure (2.12) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de Fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lier aux variations de température de fonctionnement du GPV Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande. [9]



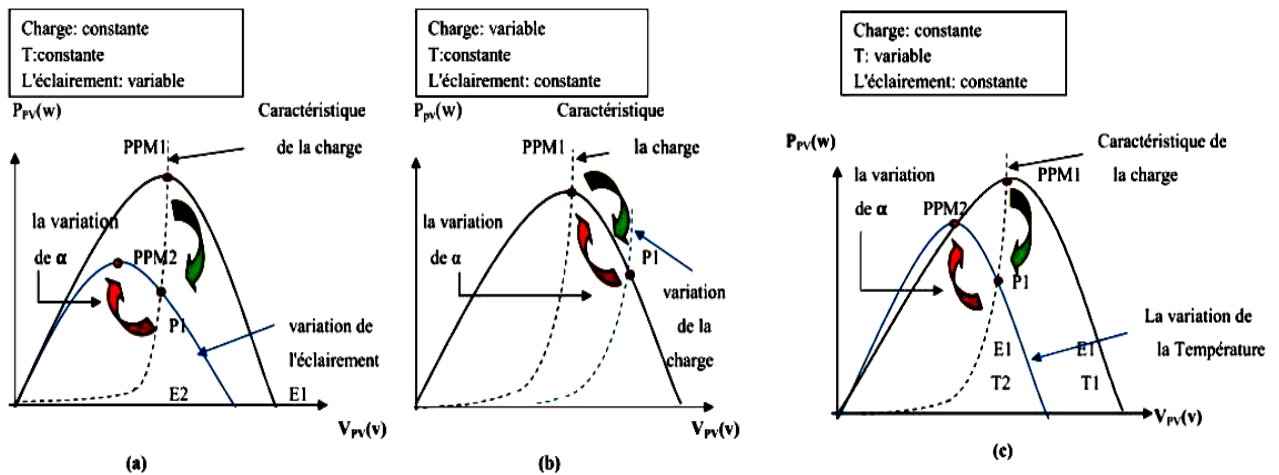


Fig.2.12 : Recherche et recouvrement du Point de 2 puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température. [9]

### 2.4.1 Les Différents types de commande MPPT

Pour atteindre le point de puissance maximale (PPM) réel, il est essentiel d'obtenir des informations sur la puissance réelle fournie par le panneau solaire. Cela peut être réalisé en mesurant la tension  $V_{pv}$  et le courant  $I_{pv}$  à la sortie du panneau, puis en calculant la puissance électrique à partir de la formule  $P = V_{pv} * I_{pv}$ . Différents algorithmes de contrôle peuvent ensuite être utilisés pour suivre le PPM du module PV. Trois options d'implémentation de la commande MPPT sont possibles :

- L'incrément de conductance (Inc.Cond).
- Perturb & Observ (P&O).
- Algorithmes MPPT basés sur la logique floue (LF).

### 2.4.2 La méthode Incrémentation des conductances (Inc. Cond)

Dans cet algorithme, la dérivée de la puissance de sortie du panneau solaire est calculée en utilisant la tension  $V$ , sa variation  $dV$ , le courant  $I$  et sa variation  $dI$ . Cette dérivée est utilisée pour déterminer la direction de recherche du point de puissance maximale.

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite. La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = IV \quad (2.12)$$

Plus précisément, la dérivée de la puissance de sortie est calculée en fonction des variations de tension et de courant

La dérivé partielle  $\frac{dP}{dV}$  est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \tag{2.13}$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} + \frac{dI}{dV} \tag{2.14}$$

Paracerque la tension V du panneau est toujours positive, les relations (2.15) expliquent que le point de puissance maximale MPPT est atteint si la conductance de la source G égale l'incrémentale conductance  $\Delta G$  de la source avec un signe négatif, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémentale conductance  $\Delta G$  et vice-versa, comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} > 0 & \text{ si } \frac{I}{V} > - \frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \text{ si } \frac{I}{V} = - \frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{ si } \frac{I}{V} < - \frac{dI}{dV} \end{aligned} \tag{2.15}$$

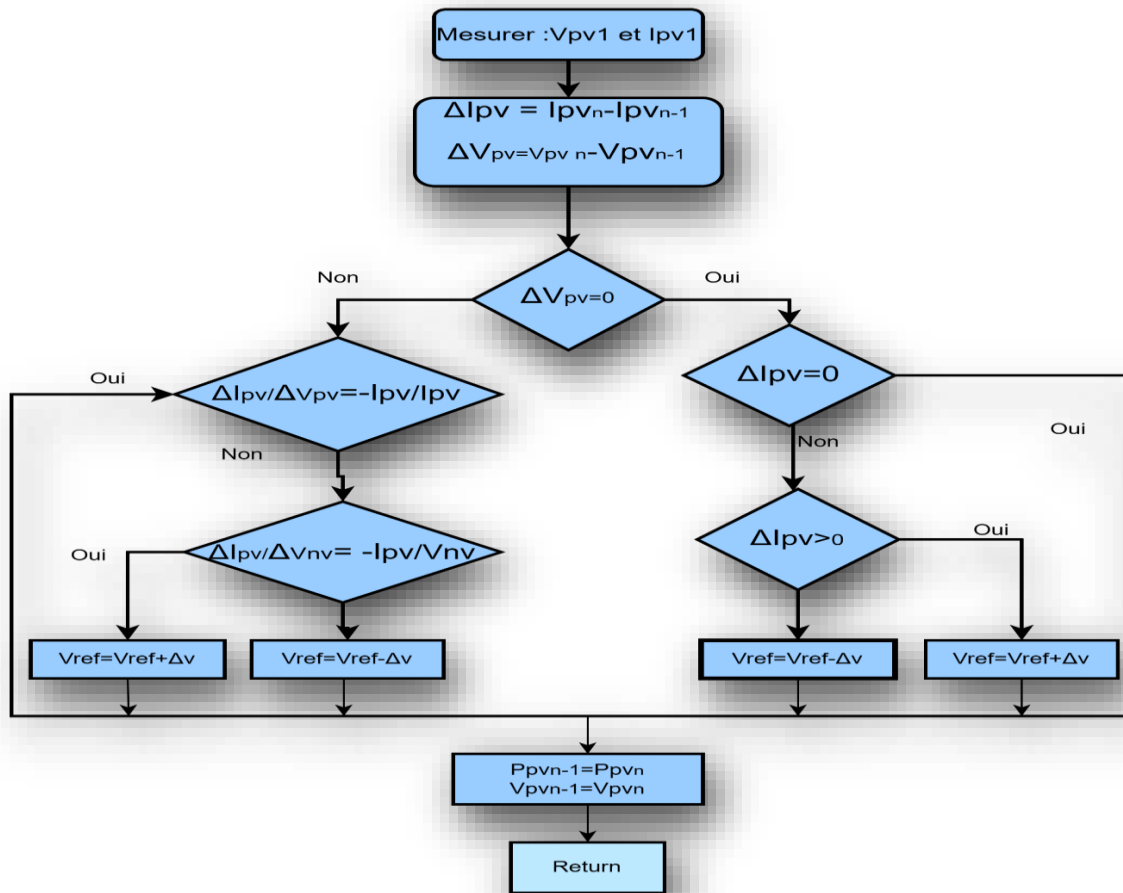


Fig.2.13 : Algorithme d'incrément de la conductance

La figure (2.14) présente le signe de  $\frac{dv}{dp}$  pour différentes zones de fonctionnement :

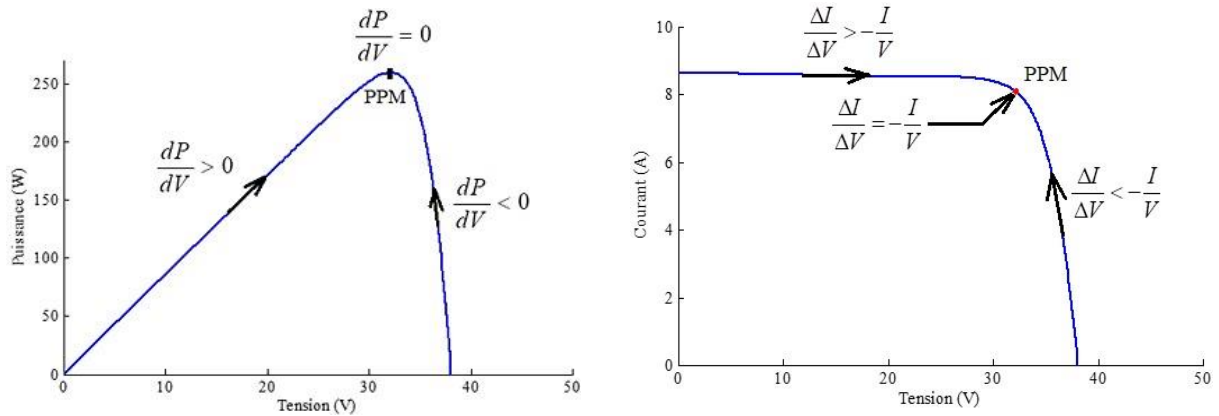


Fig.2.14 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G et de la puissance P

La tension et le courant du panneau solaire sont mesurés de manière discrète, ce qui permet au contrôleur de calculer la conductance et la conductance incrémentale afin de prendre des décisions quant à son fonctionnement. Cet algorithme nécessite un grand nombre de calculs de dérivées.

### 2.4.3 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

Premièrement nous étudions la méthode la plus importante c'est la méthode de type P&O qui consiste de perturbation pour la tension  $V(PV)$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résultante, comme indiqué la figure (2.15), nous pouvons en déduire que si une augmentation positive de la tension VPV produit une augmentation la puissance PPV, cela signifie que le point de.

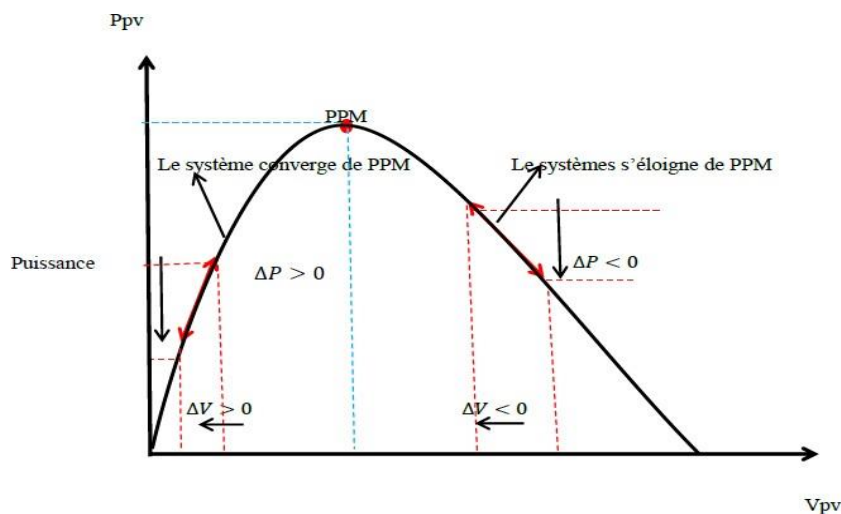


Fig.2.15 : Schéma de convergence vers le PPM par P&O

La puissance diminue ceci implique que le système a dépassé le PPM. [10]

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces différentes analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV (VPV), il est alors aisé de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers la puissance maximale par un ordre de commande.

La figure (2.16) indique l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, il y a deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

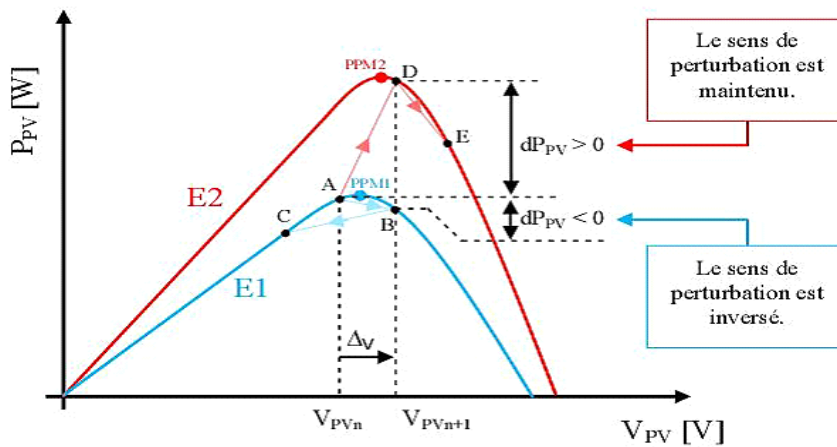


Fig.2.16 : Algorithme de la méthode d'incrément de conductance

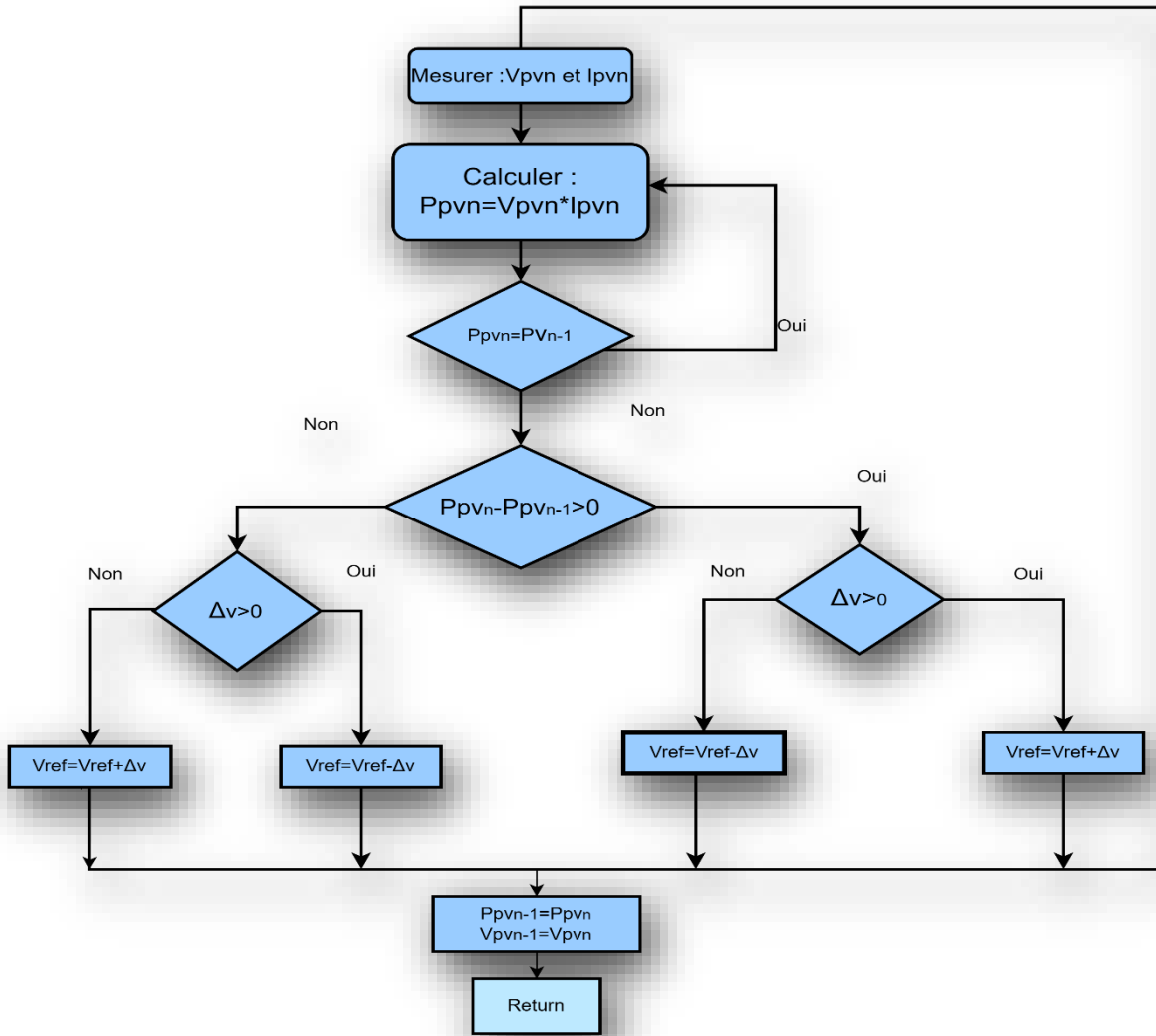


Fig.2.17 : Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation

#### 2.4.4 Algorithmes MPPT basés sur la logique floue (LF).

FL est une nouvelle approche basée sur l'intelligence artificielle. Selon la Figure (2.18), le FL représente une amélioration de l'algorithme classique de l'IC en termes de robustesse, de stabilité et la facilité d'implémentation

A l'instar des autres contrôleurs MPPT, la tâche principale du contrôleur FL est d'atteindre le MPP. Cependant, la performance de cette commande dépend essentiellement de l'expertise humaine L'approche de FL est issue de la décomposition d'une plage de variation d'une variable réelle sous forme de variables linguistiques et l'attribution de la fonction d'appartenance pour chaque variable. Les règles élaborées à partir de l'expertise de l'opérateur humain sont exprimées sous forme linguistique

Ces règles déterminent les performances dynamiques du contrôleur FL.

Le contrôleur FL proposé comprend quatre éléments de base : unité de fuzzification, règles de base, moteur d'inférence et défuzzification

L'unité de fuzzification porte sur la conversion de variables réelles à des variables floues.  $E(k)$  et  $CE(k)$  sont des entrées de contrôleur de la FL données par les équations (2.16, 2.17) :

$$E(k) = \frac{I(k) - I(k-1)}{V(k) - V(k-1)} + \frac{I(k)}{V(k)} \quad (2.16)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (2.17)$$

- $E(k)$  représente la dérivée de PPV(k).  $E(k)$  s'annule quand le point de fonctionnement atteint le MPP.
- $CE(k)$  c'est l'erreur de  $E(k)$ . La tension et le courant sont mesurés pour le calcul de la puissance PPV.

La sortie du contrôleur FL dD est le pas variable du rapport cyclique. [11]

#### 2.4.5 La Structure d'un contrôleur floue

L'application la plus couramment utilisée de la logique floue est la commande floue. La figure suivante illustre la structure générale d'un contrôleur flou :

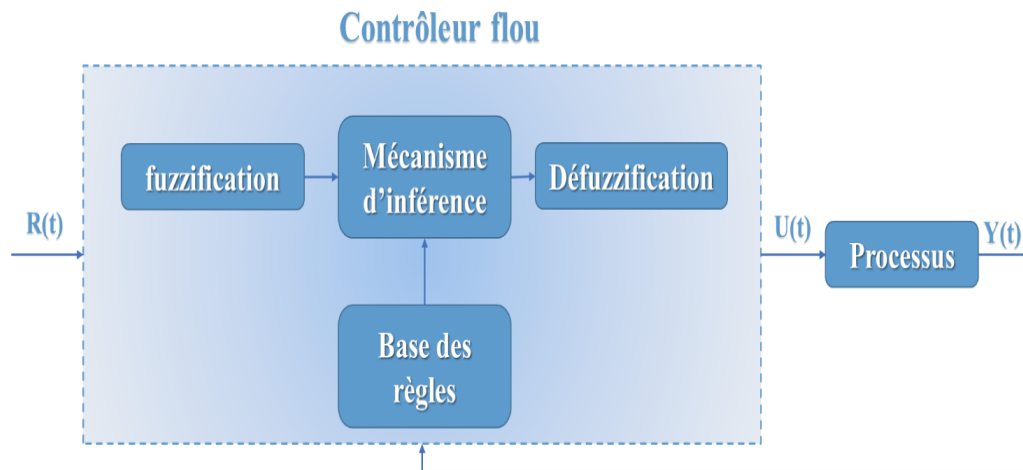


Fig.2.18 : Structure générale d'un contrôleur flou [12].

- $R(t)$  : est le signal de référence.
- $U(t)$  : est le signal de commande.
- $Y(t)$  : est la sortie du système à commander.

Le contrôleur flou comporte quatre parties : le bloc de fuzzification avec une base des règles et le mécanisme d'inférence et le bloc de défuzzification :

• **Fuzzification :**

Dans cette étape, les calculs à partir de variables numériques non floues de l'entrée sont convertis en variables linguistiques floues basées sur des sous-ensembles appelés fonction d'appartenance.

La fuzzification consiste à définir des fonctions d'appartenance pour diverses variables d'entrée et de sortie. Dans le cas des modifications par logique floue, des trapèzes et des formes triangulaires sont généralement utilisés pour les fonctions organiques. Par exemple pour traduire les changements de deux valeurs non constantes (température et distance), l'entrée floue est conçue comme trois variables floues de la première variable (température) on les appelle :

GT/ haute température

MT/ température moyenne

PT/basse température

Nous concevons également la deuxième variable (distance) et l'appelons:

GT / grande distance

MT/ Moyenne distance

PT/petite distance

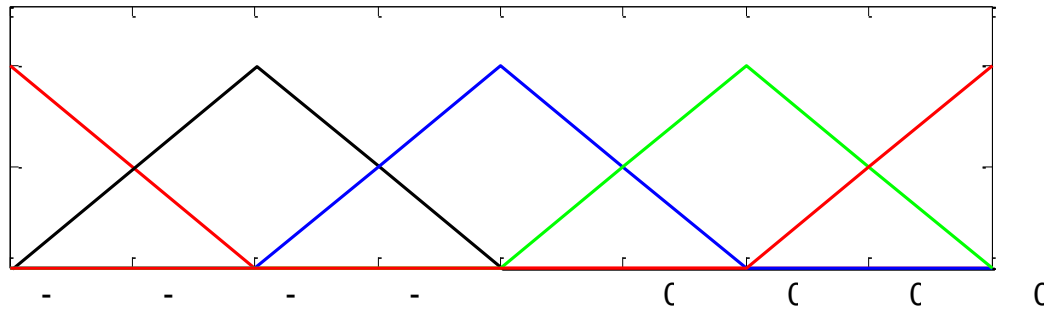
Nous concevons également la variable de sortie (vitesse) et l'appelons:

GV / grande vitesse

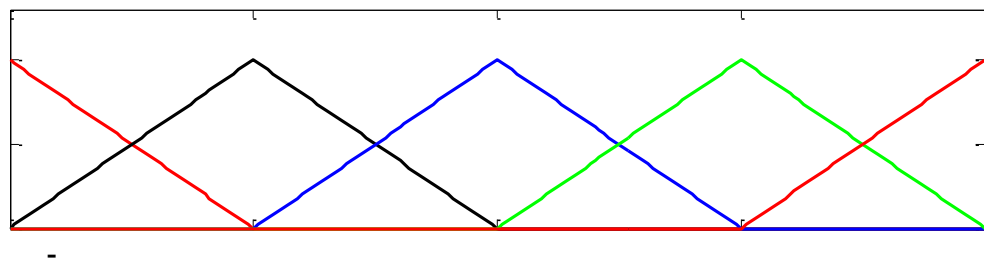
MV/ Moyenne vitesse

PV/petite vitesse

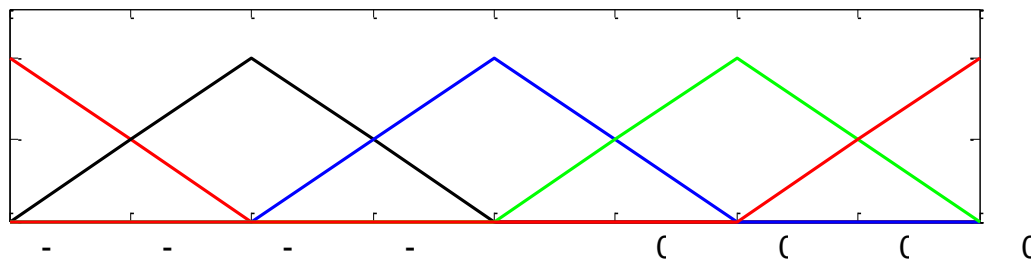
Le changement de température et de distance sont les variables d'entrée dans le système proposé et la sortie du contrôleur à logique floue est le changement de vitesse. Les limites de fonction d'appartenance entrée-sortie appliquée dans les systèmes ont déterminées par la connaissance préalable du système concerné par la variation des paramètres. [12]



Input variable E



Input variable CE



Output variable dD

Fig.2.19 : Fonctions d'appartenance des variables d'entrée (E, CE) et de sortie (dD). [11]

La Figure (2.19) montre les fonctions d'appartenance sélectionnées de E, CE et dD.

Parmi les différentes formes de fonctions d'appartenance (trapèze, gaussienne et triangulaire...),

La forme triangulaire symétrique est considérée comme la plus appropriée pour sa simplicité.

Les limites de la plage de variables floues sont habituellement normalisées entre  $-1$  et  $+1$  en introduisant un facteur de gain pour représenter les signaux réels



Dans cette étude, la forme triangulaire symétrique a été sélectionnée et les limites sont considérées comme  $[-0,04, 0,04]$  et  $[-100, 100]$  et  $[-0,04, 0,04]$  pour (E, CE et dD) respectivement.

L'inférence floue est effectuée à l'aide de la méthode de Mamdani Les variables sont exprimées comme (BP : grand positif (big positive)), (SP : petit positif (Small positive)), (ZE : zéro), (SN : légèrement négative (Small negative)), (BN : grand négatif (Big negative))

- Défuzzification

La défuzzification est l'étape qui consiste à transformer le sous-ensemble flou de sortie en une valeur non floue permettant la commande du procédé. L'entrée pour le processus de défuzzification est un ensemble flou et la sortie est un nombre unique qui doit être appliqué au système, pour la sortie finale souhaitée selon le système, une valeur non floue de sortie de contrôle est requise, donc une étape de défuzzification est obligatoire permettant la commande du procédé.

[12]

- Inférence floue et règles linguistiques

Changement de Rapport cycle D		Changement de puissance PV ( $dP / dt$ )							
		L N	M N	NS	Z	PS	M P	PL	
Changement de tension PV ( $dV / dt$ )	L N	L N	L N	M N	Z	M P	PL	PL	
	M N	L N	M N	M N	Z	M P	M P	PL	
	S N	L N	M N	NS	Z	PS	M P	PL	
	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	
	S P	S	P	PS	PS	Z	NS	M N	NL
	M P	M	P	P	PS	Z	NS	M N	NL
	L P	L	P	PL	M P	Z	M N	L N	NL

Tableau.2.1 : Les Règles de base utilisée en commande MPPT floue.[12]

Le Tableau 2.1 : expose les règles appliquées qui assurent la relation entre les entrées et la sortie du contrôleur FL.

La base de règles symétrique est habituellement utilisée pour les systèmes de croissance constante.

La défuzzification utilise la méthode centroïde pour calculer le dD de sortie qui est considéré comme le barycentre.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques convertisseurs DC-DC. Comme le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur nous concentrons sur le hacheur boost nous avons utilisé ce type qui fournit une tension constante. Ce convertisseur à l'avantage d'augmenter la tension, ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements de conditions météorologiques et d'extraire le maximum de puissance disponible sur la base du contrôleur numérique MPPT. Nous avons également présenté la commande MPPT pour trouver le point de la puissance maximal du générateur photovoltaïque dans d'efférentes condition de fonctionnement on a étudié quelques algorithme MPPT tels que l'algorithme P&O, l'algorithme incrémentation de conductance et l'algorithme basé sur la logique floue

# ***CHAPITRE 03***

***MODÉLISATION D'UN GROUPE***

***MOTEUR-POMPE***

### 3.1 Introduction

Afin de permettre le fonctionnement d'une pompe, il est nécessaire d'avoir un système d'entraînement qui génère sa rotation. Le choix du système d'entraînement de la pompe dépend de plusieurs facteurs tels que le type de pompe, sa puissance et son application. Dans le contexte du pompage photovoltaïque, on rencontre principalement deux familles de moteurs qui sont actuellement les plus utilisées sont les moteurs à courant continu et les moteurs asynchrones à cage d'écureuils

Étant donné que les panneaux solaires produisent un courant électrique continu, il est nécessaire d'utiliser une pompe à énergie solaire dotée d'un moteur à courant continu, à moins d'incorporer des composants électriques supplémentaires. Dans le cas où la pompe est équipée d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'ajouter un convertisseur pour transformer le courant continu produit par le panneau solaire en courant alternatif.

En raison de la complexité de cette solution, des coûts supplémentaires qu'elle exige et de l'efficacité réduite des systèmes à courant alternatif, la plupart des pompes à énergie solaire sont équipées d'un moteur à courant continu.

Le groupe Motopompe se décompose en deux parties : le moteur est à courant alternatif ou continu qui fournit l'énergie et la pompe centrifuge ou volumétrique Qui effectue le travail de déplacement du fluide.

### 3.2 Le moteur

La pompe est alimentée par un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils utilisent du courant alternatif ou du courant continu, et dans les systèmes photovoltaïques il existe trois types de moteur :

- Le moteur à courant continu.
- Le moteur à courant alternative.
- Le moteur à courant continu à aimant permanent sans balais.

Plusieurs critères sont pris en compte pour déterminer le choix optimal du moteur pour une pompe solaire :

- **Bon rendement** : Le moteur doit être capable de convertir efficacement l'énergie électrique en énergie mécanique pour assurer un fonctionnement économique de la pompe.
- **Souplesse de fonctionnement** : Le moteur doit être capable de s'adapter à différentes conditions de charge et de vitesse, offrant ainsi une flexibilité dans le fonctionnement de la pompe.
- **Robustesse du matériel** : Il est important que le moteur soit construit avec des composants solides et durables pour minimiser les besoins d'entretien et les risques de pannes, assurant ainsi une longue durée de vie de l'ensemble du système.

- **Fiabilité et autonomie de l'installation** : Le moteur choisi doit être fiable, garantissant un fonctionnement sans problème pendant de longues périodes, et doit être compatible avec le système solaire autonome pour assurer une autonomie énergétique.

- **Faible puissance au démarrage** : Il est préférable que le moteur ait une faible demande de puissance lors du démarrage, afin d'éviter des pics de consommation électrique et de faciliter le fonctionnement du système solaire.

En prenant en compte ces critères, il est possible de sélectionner le moteur le plus adapté pour assurer un fonctionnement efficace et fiable de la pompe solaire. Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients des moteurs mentionner ci-dessus.

Type de moteurs	Avantages	Inconvénients
<b>Moteur a courant alternatif</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponible dans le marché avec un coût bas.</li> <li>• Son entretien est nul de fait de l'absence complète de pièces en frottement.</li> <li>• Son utilisation augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation.</li> <li>• Disponible pour une large plage de charge.</li> <li>• Le rapport puissance / poids est élevé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessité d'utiliser un onduleur avec des spécifications photovoltaïques (coût supplémentaire).</li> <li>• Chute de rendement aux faibles puissances.</li> <li>• Appel de courant au démarrage qui peut atteindre cinq fois l'intensité normale.</li> </ul>
<b>Moteur à courant continu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicité et facilité de régulation (variation de vitesse, couple,) - Couplage direct avec le générateur (sans onduleur).</li> <li>• Rendement élevé pour les faibles charges.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Présence de balais et collecteur qu'il faut vérifier périodiquement.</li> <li>• Plus lourd et plus coûteux.</li> </ul>
<b>Moteur à courant continu Sans balais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement élevé pour une large gamme de vitesse.</li> <li>• Couplage directe avec le générateur photovoltaïque.</li> <li>• Moins de maintenance avec une bonne fiabilité.</li> <li>• Un rapport couple / poids élevé, d'où un volume modéré.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite un système de Commutation (coût supplémentaire).</li> </ul>

Tableau 3.1 : résume les avantages et les inconvénients des moteurs mentionner ci-dessus

Dans notre étude on a choisi les moteurs sans balais (Brushless DC en anglais) car ce type de moteurs présente de nombreux avantages par rapport aux autres types de moteurs. Les moteurs Brushless offrent un rapport performances élevé par rapport aux technologies

plus conventionnelles. Combiné avec un système électronique, les performances de cette technologie n'ont cessé d'être améliorées ces dernières années. Où il est devenu utilisé dans les véhicules électriques, les outils portables et les ventilateurs ou disques durs.

### 3.2.1 Le moteur à aimant permanent sans balais

Les moteurs sans balais fonctionnent en alternant la polarité des enroulements internes du moteur. Il s'agit essentiellement d'un moteur à balais inversé, qui ne nécessite aucun balai. Dans un moteur à courant continu sans balais, les aimants permanents sont installés dans le rotor et les électroaimants dans le stator, le régulateur de vitesse électronique régule la charge sur électroaimants du stator, permettre au rotor de se déplacer sur 360 degrés.

#### a) Description d'un moteur à aimant permanent sans balais

- **Le stator :** Ce compose généralement de 3 ou 6 ou 12 bobines de champ. Ceux-ci sont connectés en étoile mais peuvent également être connectés en triangle.
- **Le rotor :** Les pompes sont des machines servant à élever les liquides ou les mélanges de liquides d'un niveau inférieur à un niveau supérieur ou bien déplacer les liquides d'une zone de basse pression vers une zone de haute pression. Le fonctionnement d'une pompe consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (roue, piston ...etc.) de la pompe.

L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a lieu à la suite de la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

Il est constitué d'aimants permanents à 2 ou 4 ou 8 pôles alternant pôles Nord et Sud.

- **Les capteurs à effet Hall :** C'est un capteur qui détecte la position du rotor, qui est l'information nécessaire pour contrôler le moteur Brushless. Le nombre de ces capteurs est de trois capteurs placés au niveau du stator ou de disque spécial et qui sont décalé l'un de l'autre de 60° ou de 120°.
- **La Carte électronique :** Elle est utilisée pour piloter les moteurs à courant continu sans balais. C'est elle qui définit la direction et la force du champ en fonction de l'information fournies par les capteurs à effet Hall.

- **Paliers :** Ils sont le seul lien mécanique entre le stator et le rotor, La durée de vie de l'ensemble en dépend. Ces roulements à billes préchargés offrent une longue durée de vie au moteur. Cette durée de vie est également proportionnelle à la vitesse maximale, au déséquilibre résiduel et à la charge appliquée aux paliers créés pour fonctionner des dizaines de milliers d'heures.

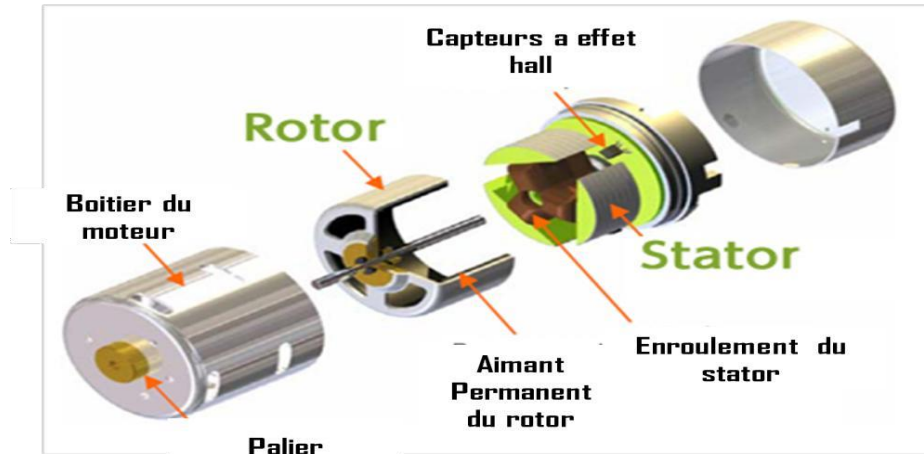


Fig.3.1 : la Constitution d'un moteur courant continu sans balais.

#### b) Principe de fonctionnement d'un moteur sans balais

Un moteur à courant continu sans balais se caractérise par l'absence de balais La Figure (3.4) montre l'architecture d'un moteur sans balais, où le rotor est constitué d'une seule paire de pôles et le stator est constitué de trois bobines décalées de  $120^\circ$  l'une de l'autre. Ces bobines sont alimentées en continu.

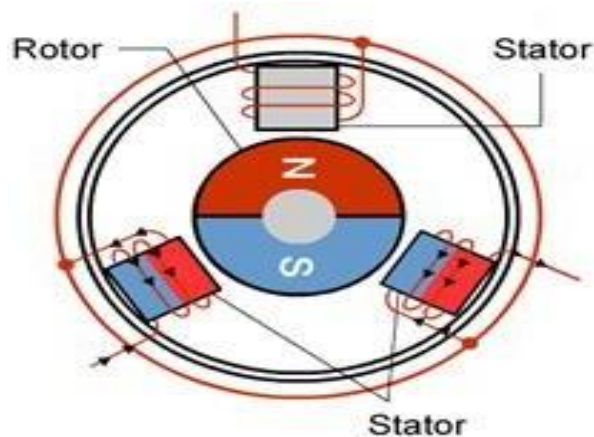


Fig.3.2 : l'Architecture d'un moteur sans balais.

Lorsque le moteur tourne, seules deux bobines voisines sont alimentées. L'une porte une tension positive (courant positif) et l'autre une tension négative (courant négatif), de sorte que les deux bobines génèrent des champs magnétiques de polarités différentes. Le choix des deux bobines à alimenter et leur polarité dépend de la position des pôles nord et sud du rotor. Les informations sur ces positions sont fournies par des capteurs à effet Hall.

### c) Modélisation du moteur à aimant permanent sans balais

La modélisation du moteur est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu. Le schéma technologique d'une MCC est représenté sur la figure (3.2) suivante :

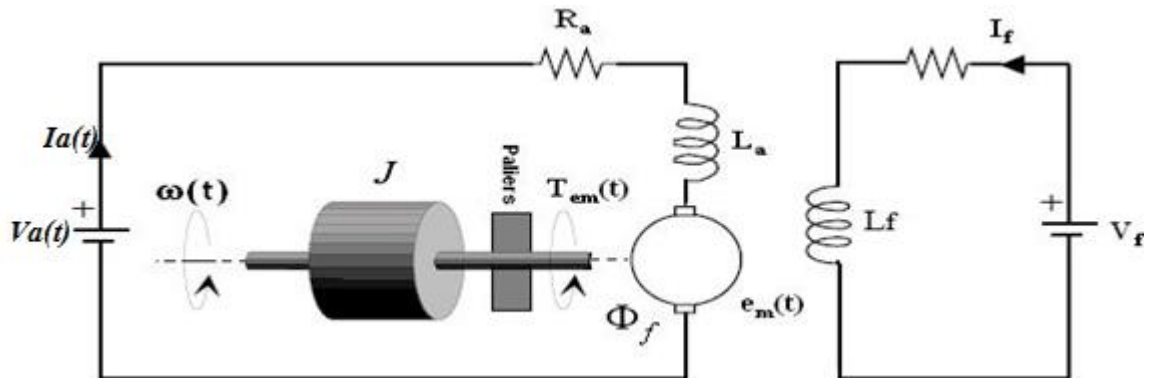


Fig.3.3 : Machine à courant continu a aimant permanent

La tension aux bornes de l'induit  $V_a(t)$  l'indice "a" correspond à Anker, c'est à dire induit en langue Allemande.

Le circuit électrique de l'induit, faisant apparaître :

- ✓  $R_a$  : La résistance de l'induit.
- ✓  $L_a$  : L'inductance de l'induit.
- ✓  $I_a$  : Le courant traversant le circuit de l'induit.
- ✓  $T_{em}$  : Le couple électromagnétique instantané  $t$  produit.
- ✓ L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation.

La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie  $J$ , frottement visqueux, de la transmission, etc.).

#### ➤ Equations électriques

L'équation de tension induite s'écrit :

$$V_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_m(t) \quad (3.1)$$

#### ➤ Equations électromagnétiques

La tension induite  $e_m t$  est donnée par :

$$T_{em}(t) = k_e(t) \cdot I_a(t) \quad (3.2)$$

$k_e$  : Constantes de tension

Le couple électromagnétique  $T_{em} t$  développé a pour expression :

$$T_{em}(t) = k_T(t) \cdot I_a(t) \quad (3.3)$$



$KT$ : constantes de couple de moteur.

➤ **Equations mécanique**

Le moteur en rotation est décrit par l'équation (de la dynamique) d'équilibre suivante :

$$Jt \frac{dw}{dt} = Tem(t) - Bm(t) - Tr - Tf \tag{3.4}$$

Où:

$Jt$  : Inertie totale entraînée (moteur  $Jm$  et charge  $Jch$ ).  $Bm$  : Coefficient de frottement visqueux.  $Tr$  : Couple résistant.  $Tf$  : Couple de frottement de coulomb.

La résolution du modèle mathématique de moteur est écrite en variable d'état sous la forme Matricielle suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \end{bmatrix}$$

**d) Résultats de simulation**

La figure suivante représente le modèle simulink d'un moteur à aimant permanent :

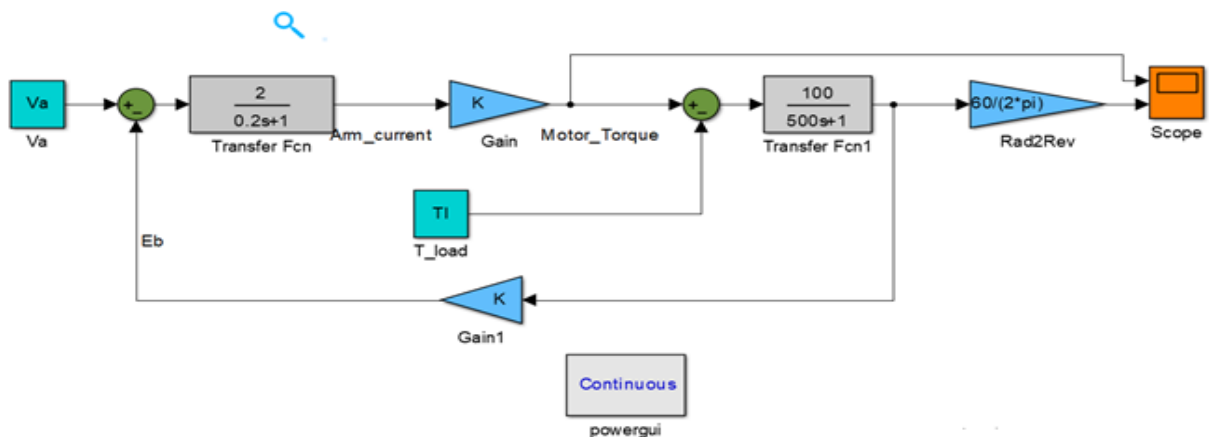


Fig.3.4: Modèle simulink du moteur à aimant permanent.

**3.2.2 Résultats de simulation de moteur à aimant permanent**

La variations du courant et de la vitesse du moteur en fonction de temps sont représentés par la figure (3.5). Ainsi que la variation du couple électromagnétique et du couple résistant du moteur en fonction de temps sont illustrés par la figure (3.6).

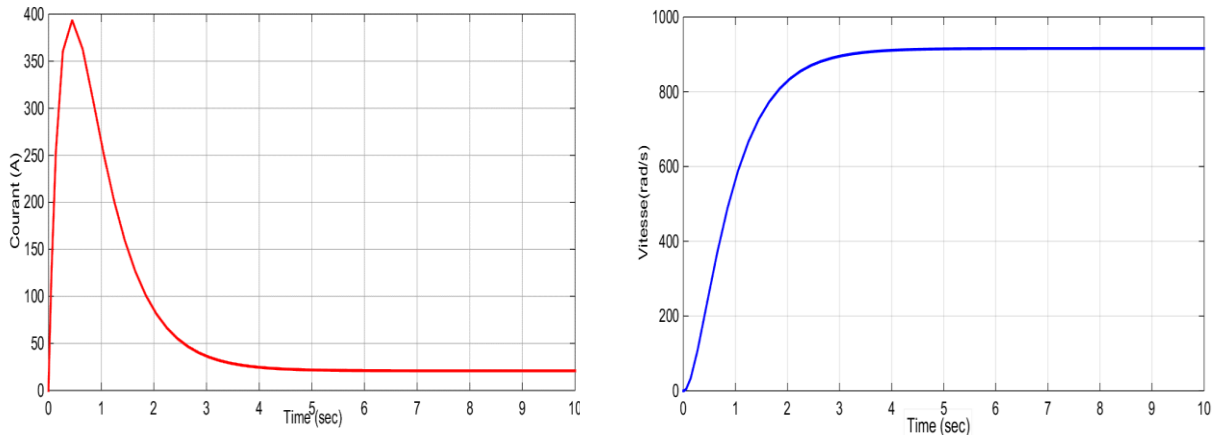


Fig.3.5 : Variation de courant et de la vitesse du moteur en fonction de temps.

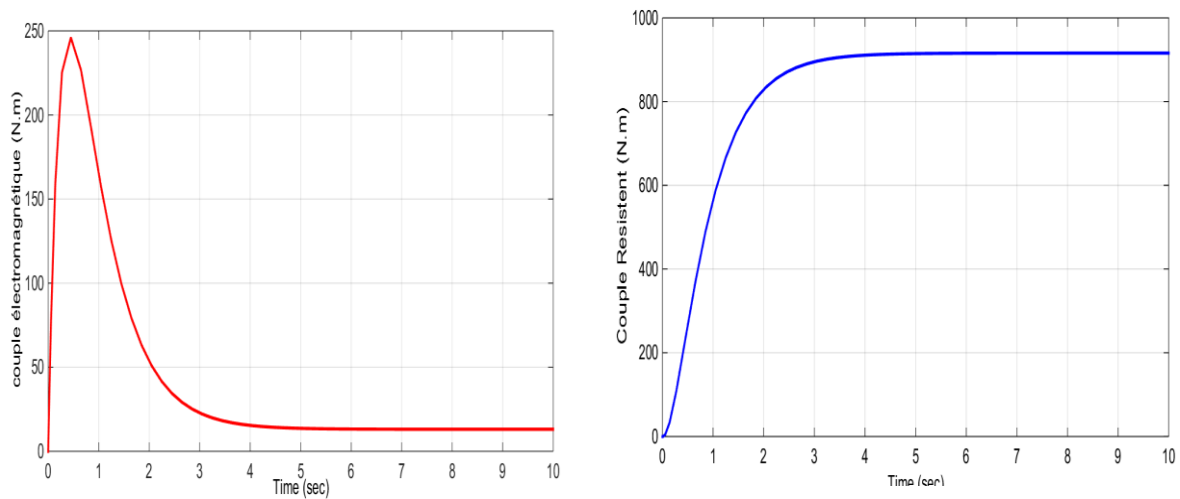


Fig. 3.6 : Variation du couple électromagnétique et du couple résistant.

### 3.3 Les pompes

Les pompes sont des machines servant à élever les liquides ou les mélanges de liquides d'un niveau inférieur à un niveau supérieur ou bien déplacer les liquides d'une zone de basse pression vers une zone de haute pression. Le fonctionnement d'une pompe consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (roue, piston ...etc.) de la pompe.

L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a lieu à la suite de la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

#### 3.3.1 Les différents types des pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, et selon l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée.

### 3.3.2 Selon l'emplacement de la pompe par rapport à l'eau pompée :

On a deux types de pompes en fonction de 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 9,8m (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7m.

#### a) La pompe à aspiration :

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.

#### b) La pompe à refoulement :

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.

### 3.3.3 Selon leur principe de fonctionnement :

Pour répondre à toutes les applications industrielles, il y a plusieurs types de pompes ont été mis au point. On regroupe toutes ces pompes sous deux grandes familles :

- Les pompes hydrauliques volumétriques.

Les pompes hydrauliques non volumétriques (roto-dynamique).

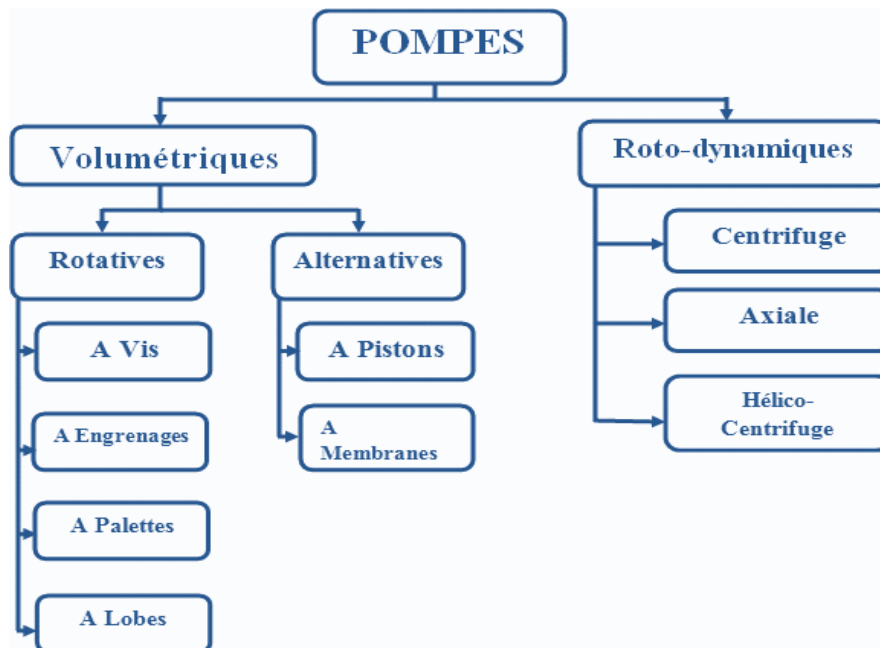


Fig.3.7 : Classification générale des pompes.

### 3.3.4 Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation Circulaire autour d'un axe, il tourne dans l'enveloppe et crée le mouvement du Fluide pompé par déplacement volumétrique de l'aspiration au refoulement On a cité quelque définition sur les types des pompes volumétrique :

#### a) Les pompes volumétriques alternatives

Ces pompes comportent des pièces mobiles entraînées par le mouvement choisir, les principaux types de pompes sont à membrane ou à piston :

- ✓ **Pompes à piston** : Le principe de fonctionnement consiste à utiliser les variations de volume occasionné par le déplacement d'un piston dans un cylindre. Ces déplacements Alternativement dans un sens ou dans l'autre produisent des phases D'aspiration et de refoulement.

Lorsque le piston se déplace dans une direction, le liquide est comprimé :

La fermeture du clapet d'admission et l'ouverture du clapet de refoulement. Le fonctionnement est inverse lors de l'aspiration du liquide dans la pompe. Une membrane est parfois liée au piston (Fig.3.9)



Fig.3.8 : Pompe à piston.

**Pompes doseuses** : Ces pompes fonctionnent essentiellement par le déplacement d'un piston ou d'une membrane. L'introduction d'un débit bien déterminé de liquides est rendue possible grâce à un dispositif précis de réglage de la Course du piston et de sa fréquence. Elles ont des débits relativement faibles (de quelques L/h à quelques m<sup>3</sup>/h) et peuvent mettre en œuvre des pressions au refoulement allant jusqu'à 300 bars. Elles sont auto-amorçant mais n'acceptent que des viscosités faibles.

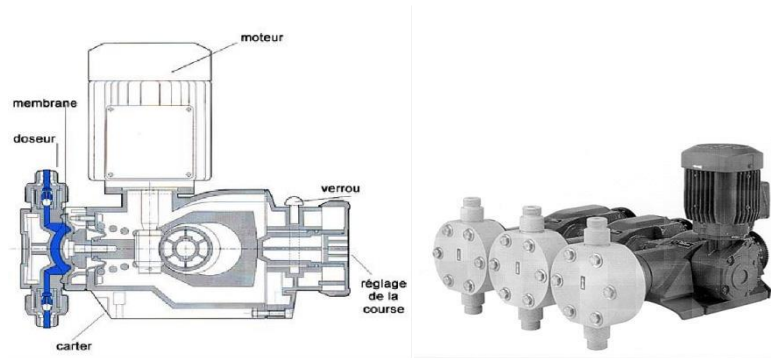


Fig.3.9 : Pompe doseuse à membrane sèche.

### b) Les pompes volumétriques rotatives

La partie mobile est animée d'un mouvement de rotation autour d'un arbre qui tourne dans le corps de pompe et produit le mouvement du liquide pompé à travers le déplacement volumétrique de l'aspiration au refoulement.

#### ❖ Pompes à palettes libres

Le principe est le suivant : un corps cylindrique dans lequel tourne un tambour excentré par rapport au corps de pompe entraîne des palettes libres (généralement six). Celles-ci sont plaquées contre le corps par la force centrifuge développée par la rotation du tambour ou par des ressorts qui poussent les palettes.

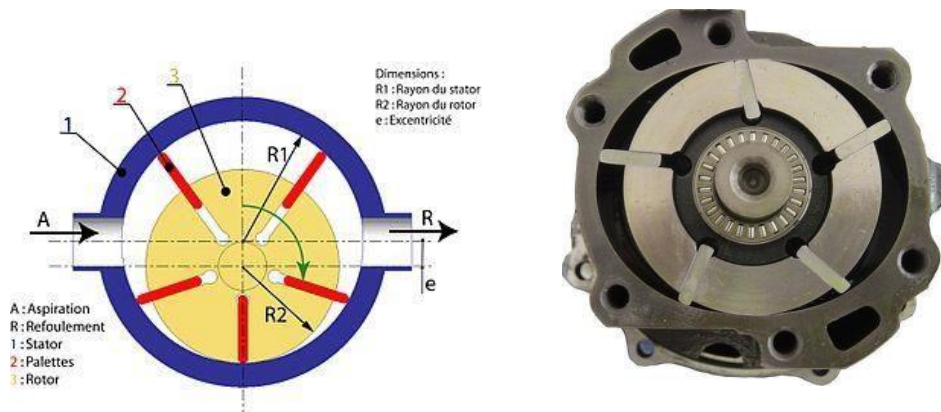


Fig.3.10 : Pompe à palettes.

### Pompes à engrenages

Il compose deux engrenages qui tournent à l'intérieur du corps de la pompe, son principe est d'aspirer le liquide dans l'espace entre deux dents consécutives et de le transporter vers la section d'évacuation du liquide. (Fig3.5)

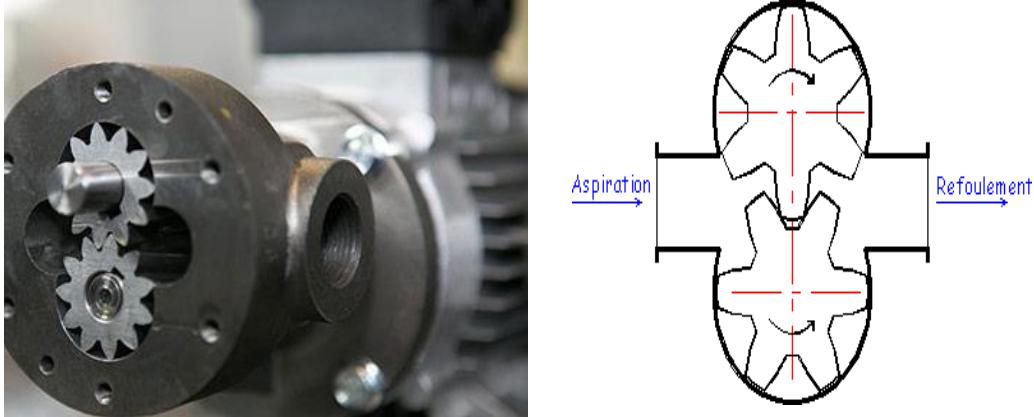


Fig.3.11 : Pompe à engrenage externe.

### Pompes à vis

Elles sont formées de deux ou trois vis suivant les modèles. Dans le cas d'une pompe à trois vis, la vis centrale est entraînée seul et les deux autres sont entraînées par la première vis.

Dans le cas d'une pompe à double vis, elles sont généralement toutes deux entraînées par un jeu de pignons extérieurs. Ces pompes peuvent fonctionner vite (3 000 tr/min). Ils sont silencieux et peuvent atteindre des pressions assez élevées (100bar). Par contre, elles n'admettent pas de particules solides.

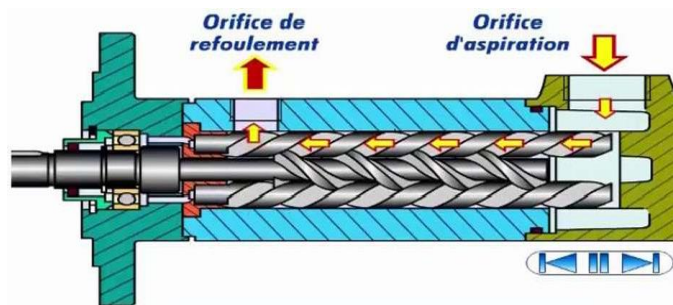


Fig. 3.12 : pompe à vis.

#### 3.3.5 Turbopompe

Les pompes hydrodynamiques sont construites de manière simple, composées principalement d'un rotor, également appelé roue ou hélice, qui tourne dans un carter appelé corps de pompe. Cette rotation transmet une certaine vitesse au fluide. Il existe différents types de turbopompes tels que les pompes centrifuges, les pompes hélico-centrifuges et les pompes à hélices. La distinction entre ces types de pompes réside principalement dans la direction de la vitesse transmise au fluide.

Les différents types des turbopompes sont :

**a) Pompes à hélice**

Elles sont destinées à générer un fort débit et une faible variation de pression, le liquide reste à une distance constante de l'axe de la pompe, elles sont utilisées généralement dans l'irrigation.

**b) Les pompes hélico centrifuges**

Elles sont adaptées à toutes les applications de pompages d'eau ou une pression à fournir et à des débits modérés avec les hauteurs totales d'élévation moyennes, le liquide s'éloigne de l'axe mais progresse axialement et parallèlement.

**c) Les pompes centrifuges**

**Les pompes centrifuges** sont des appareils qui sont utilisés pour transporter des fluides par la **conversion de l'énergie cinétique de rotation** à l'énergie **hydrodynamique** de l'écoulement de fluide. L'énergie de rotation provient généralement d'un **moteur électrique** ou d'une **turbine à vapeur** (dans le cas de pompes d'alimentation en eau actionnées par une turbine). Les pompes centrifuges sont utilisées dans plus d'applications industrielles que tout autre type de pompe. La pompe centrifuge la plus courante est la pompe à volute.

### **3.4 La constitution d'une pompe centrifuge**

La pompe centrifuge est constituée essentiellement par les éléments suivants :

- **La roue** : c'est l'organe essentiel de la pompe composée moyeu supporté par un arbre, qui est équipé de pales tournantes à l'intérieur de deux coquilles formant le corps de la pompe. Il existe différentes variantes de roues, notamment ouvertes et semi-ouvertes.
- **Collecteur (volute)** : Cet organe fixe a pour fonction de conduire le liquide de la section d'entrée de la machine à l'entrée du rotor, assurant une vitesse de grandeur et de direction adéquate.
- **Diffuseur** : Cet organe fixe collecte le fluide à la sortie de l'impulseur pour l'amener dans la section de sortie de la machine avec la vitesse désirée. Cette opération est conjuguée avec une transformation partielle en énergie de pression, de l'énergie cinétique que possède le fluide à la sortie de l'impulseur.
- **Un arbre**: a pour fonction de porter la roue, d'assurer son centrage dynamique et de transmettre la puissance.

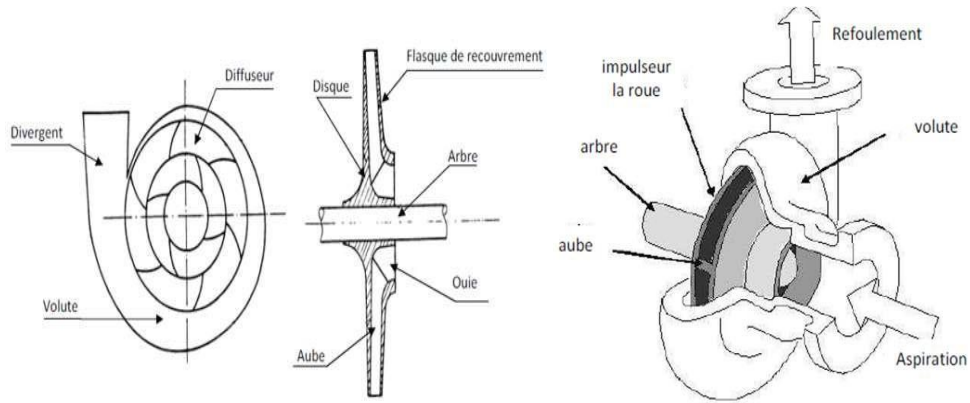


Fig. 3.13 : La constitution d'une pompe centrifuge.

### 3.4.1 Le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

La théorie du fonctionnement des pompes centrifuges démontre que l'énergie mécanique totale du fluide est augmentée entre l'entrée et la sortie de la roue de la pompe. Cette augmentation provient à la fois d'une augmentation de l'énergie de pression et d'une augmentation de l'énergie cinétique. La conversion de l'énergie cinétique en énergie de pression se fait progressivement grâce à une composante interne de la roue appelée limaçon, qui se termine par un cône divergent. Cette transformation permet d'obtenir un ralentissement du fluide et une augmentation de l'énergie de pression.

### 3.4.2 Modélisation de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge peut être décrit par trois paramètres clés : la hauteur, le débit et la vitesse. Ces paramètres sont liés par une équation qui exprime la relation entre eux :

$$F(H, Q, w) \quad (3.4)$$

Pour résoudre ce système d'équations, on peut considérer l'un des trois paramètres comme constant. En général, il est courant de supposer que la vitesse est constante. La hauteur totale de pompage dans ce contexte est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d \quad (3.5)$$

- ✓ H : Hauteur totale du pompage.
- ✓  $H_s$  : La hauteur statique est la distance entre le niveau d'eau statique dans le puits et le point le plus élevé où l'eau doit être pompée.
- ✓  $H_d$  : est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

#### a) Pertes de charges linéaires

Les pertes d'eau dans la tuyauterie peuvent être calculées à l'aide de la formule suivante :



$$\Delta H1 = \frac{L}{D} \lambda \frac{v^2}{2.g} \quad (3.6)$$

- ✓  $\lambda$  : 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 :

$$v = \frac{4.Q}{\pi D^2} \quad (3.7)$$

- ✓  $Q$ : débit (m<sup>3</sup>=s).

On a observé que les pertes de charge linéaires dans une canalisation sont directement proportionnelles à sa longueur, tandis que ces pertes diminuent lorsque le diamètre de la canalisation est augmenté.

#### b) Pertes de charges singulières (locales)

Les pertes de charge dans une canalisation sont principalement causées par les variations de section et peuvent être exprimées par l'expression suivante :

$$\Delta H2 = \varepsilon \frac{v^2}{2.g} = \frac{8(Q^2)}{(\pi^2)(D^4).g} \quad (3.8)$$

- ✓  $\varepsilon$  : Coefficient de pertes de charges locales

La hauteur dynamique est la somme des deux Pertes :

$$Hd = \Delta H1 + \Delta H2 \quad (3.9)$$

$$Hd = \frac{8(Q^2)}{(\pi^2)(D^4).g} + \left( \lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) = Kfr * Q^2 \quad (3.10)$$

- ✓  $Kfr$  : Constante de la canalisation

La hauteur totale de pompage est :

$$H = Hs + Kfr * (Q^2) \quad (3.11)$$

### 3.4.3 Les Caractéristiques de la pompe centrifuge

#### a) Caractéristique Débit -vitesse

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [53].

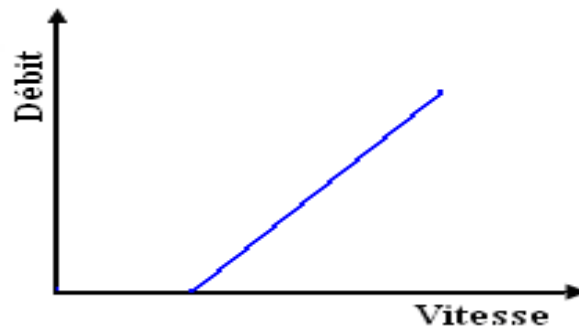


Fig. 3.14: Caractéristiques débit-vitesse d'une pompe centrifuge.

### b) Caractéristiques couple-vitesse

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit de départ non nul. Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$  :

$$C_r = K_r w^2 + C_s \quad (3.12)$$

Avec :  $K_r$  : coefficients de proportionnalité [(Nm/rad.s-1)<sup>2</sup>]

$C_s$  : le couple statique, très petite.

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_{méc} = K_r . w \quad (3.14)$$

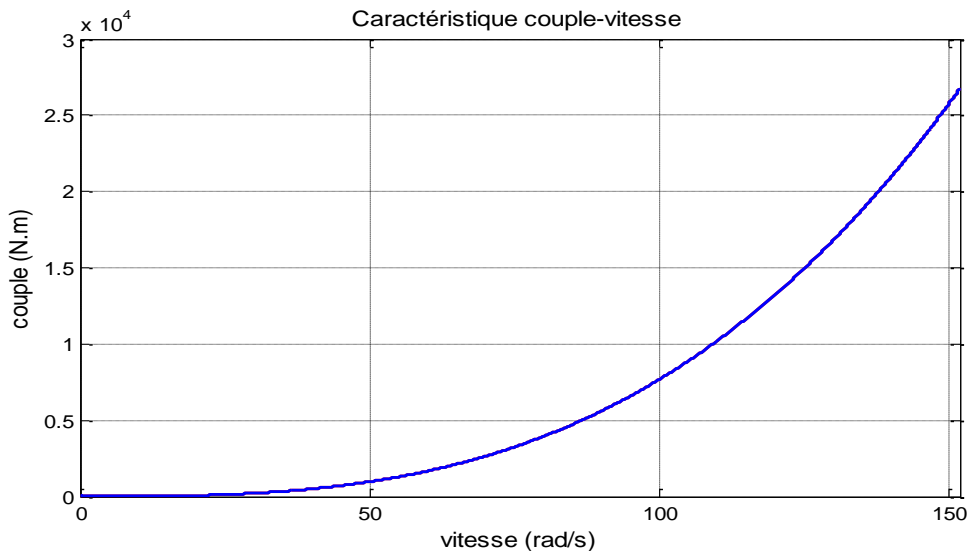


Fig. 3.16: Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.

### c) Caractéristiques débit–hauteur :

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction de débit. La charge du moteur est une pompe immergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale HMT en fonction du débit  $Q$ . En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN".

$$HMT = K_0 \cdot \omega^2 - k_1 \cdot \omega \cdot Q - K_2 \cdot Q^2 \quad (3.15)$$

Avec :  $k_0, k_1, k_2$  : des constantes propre de la pompe donnée par le constructeur.

$\omega$  : La vitesse (m/s)

HMT: la hauteur (mètre)  $Q$  : débit (l/min)

La courbe HMT( $Q$ ) est une parabole. Le point de rencontre de la courbe HMT( $Q$ ) avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul. C'est le point à vanne fermée ou encore point de barbotage.

[54] Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes : [50]

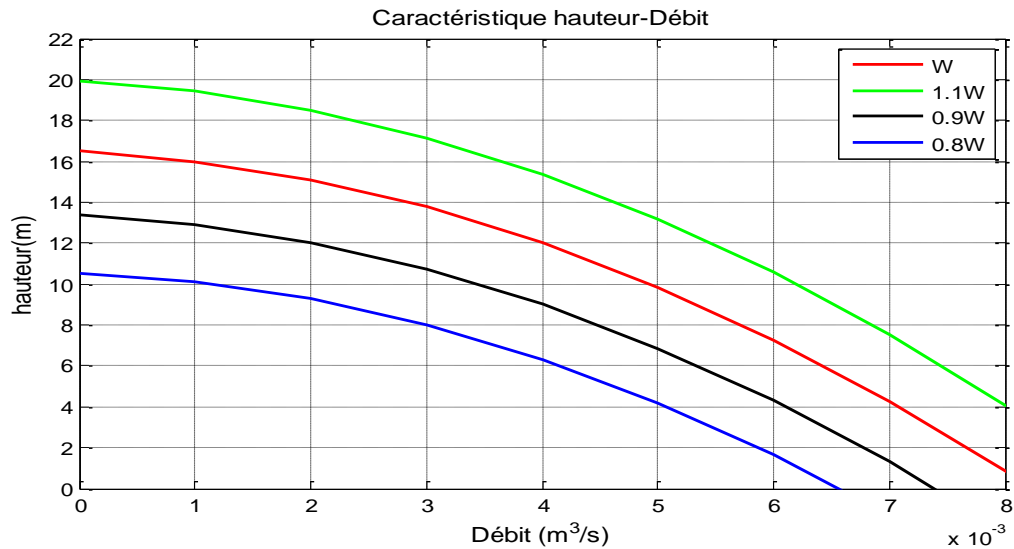


Fig. 3.17: Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation

**d) Caractéristique de la puissance :**

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

$$Ph = \rho . g . Q . Hm \quad (3.16)$$

$\rho$  : La masse volumique de l'eau étant de 1000kg/m<sup>3</sup>.  $g$  : Accélération de la pesanteur (9,81m<sup>2</sup>/s).  $Hm$  : Hauteur manométrique totale. [18]

La courbe de la figure (III.8), des puissances absorbées pour les différents débits est une branche de parabole qui peut présenter un maximum dans la plage utilisable.

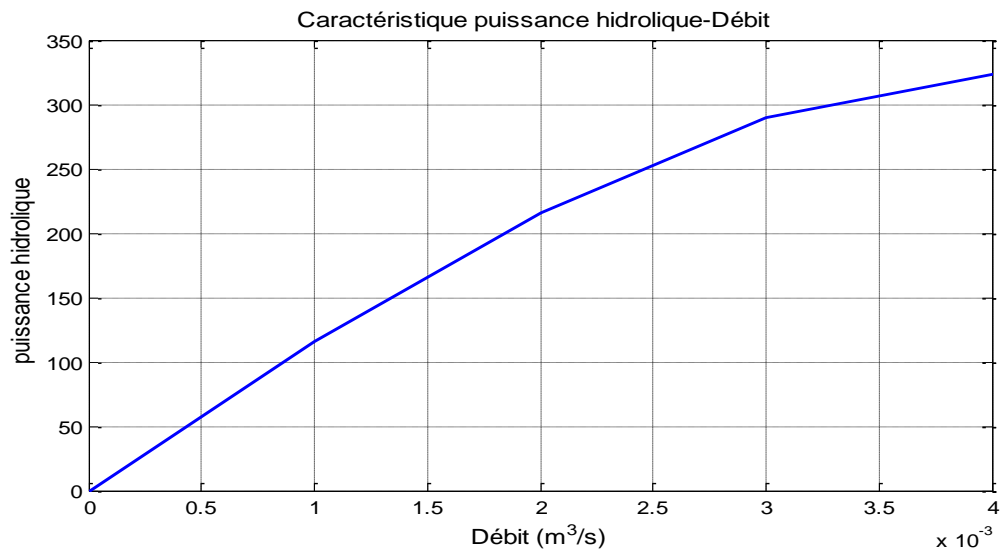


Fig. 3.18: Caractéristiques puissance hydrolrique - vitesse d'une pompe centrifuge.

**e) Caractéristique du rendement :**

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

$$nh = \frac{Ph}{Pab} \quad (3.17)$$

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 65% . Le schéma de la figure (III.9) présente les valeurs de rendement d'une pompe [51]

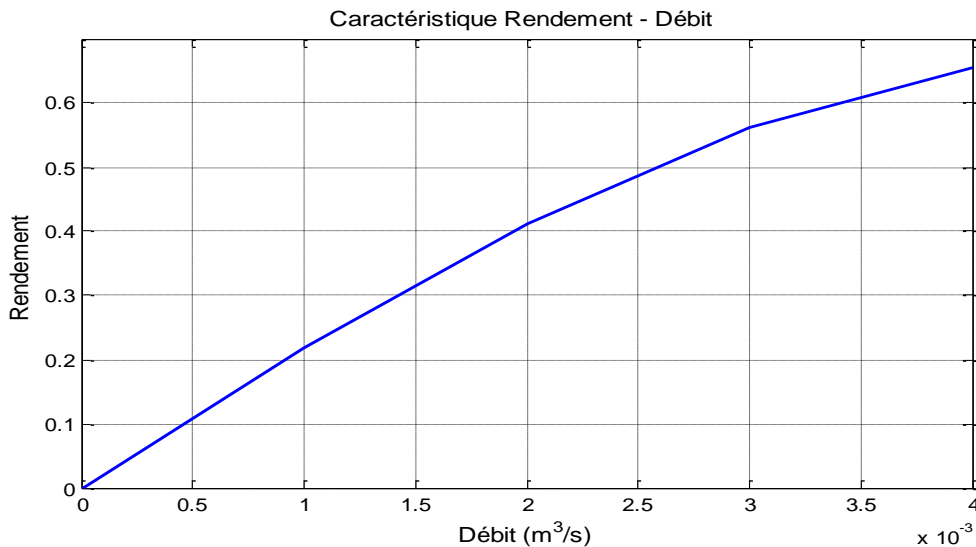


Fig. 3.19: Caractéristiques de rendement de la pompe centrifuge.

#### 3.4.4 Domaine d'application d'une pompe centrifuge

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans l'industrie car ils peuvent couvrir un large éventail d'utilisation pour leur simplicité et leur faible coût.

Leur utilisation est infiniment diversifiée, on ne s'intéresse donc ici qu'aux principales d'entre elles. Les grands domaines d'utilisations peuvent être cités comme suit :

- Hydro-électricité (barrage)
- Agriculture (irrigation des surfaces cultivées)
- Alimentation urbaine (réseau d'alimentation d'eau urbaine)
- Château d'eau
- Industrie hydrocarbure (production du pétrole)
- Transport des hydrocarbures liquides.
- Industrie de traitement des hydrocarbures.

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordés les machines à courant continu après les moteurs à aimants permanents sans balais, les équations de base et leurs caractéristiques, et ce qui nous a conduits à choisir ce type en raison de ses nombreux avantages. Ensuite, nous avons présentés les différents types des pompes ainsi que la pompe centrifuge qui sont les plus couramment utilisées dans les systèmes de pompes photovoltaïques, puis nous décrivons leur fonctionnement et leurs caractéristiques.

# ***CHAPITRE 04***

## ***OPTIMISATION D'UN SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE***

## 4.1 Introduction

Pour assurer de garantir un fonctionnement économique et rentable du générateur photovoltaïque, qui représente un investissement onéreux, il est primordial de l'utiliser de manière optimale et rationnelle. Cela signifie que nous devons exploiter le générateur PV dans la région où il produit sa puissance maximale, afin de maximiser son rendement. Dans le contexte du système de pompage PV, cela se traduit il est crucial de suivre en permanence le point de puissance maximale fournie par le générateur PV. Cette approche permet d'optimiser le système de manière à atteindre les meilleurs résultats possibles.

Le principal objectif de ce chapitre est d'optimiser le fonctionnement d'un système de pompage solaire. À cette fin, l'alimentation du groupe motopompe par un générateur photovoltaïque via un convertisseur est complétée par l'intégration d'un dispositif de suivi de la puissance maximale.

Dans le contexte des systèmes de pompage photovoltaïque il existe deux options de couplage possibles : le couplage direct (sans optimisation) où le moteur d'aspiration positive à entraînement mécanique est directement connecté au générateur photovoltaïque. Ce système est simple et moins coûteux. L'autre option est le couplage avec optimisation, qui nécessite une adaptation entre le générateur et la charge pour maximiser les performances du système.

L'algorithme d'optimisation de puissance et le contrôle MSAP sont vérifiés par simulation sous l'environnement logiciel MATLAB-Simulink 2014. Ces résultats de simulation seront effectués pour vérifier d'une part, que la maximisation de la puissance au niveau du générateur photovoltaïque par la méthode l'algorithme P&O

## 4.2 Dimensionnement du système photovoltaïque

Le dimensionnement d'un système de pompage solaire se fait en deux étapes : le dimensionnement de la charge (pompe) et le dimensionnement du générateur photovoltaïque. Il est essentiel de choisir la puissance de la pompe en fonction des besoins en eau, puis de déterminer la combinaison optimale de modules photovoltaïques pour fournir l'énergie nécessaire par le choix de la meilleure combinaison entre les types et les nombres des modules. Ce processus garantit un fonctionnement efficace et fiable du système de pompage solaire.

On commence tous d'abord par le dimensionnement de la charge (le groupe moto pompe); ensuite le générateur photovoltaïque.

### 4.2.1 Dimensionnement de la Motopompe [22]

Dans la première étape, le dimensionnement de la charge, il est nécessaire de déterminer les besoins en puissance de la pompe. Cela implique de prendre en compte des facteurs tels que le



débit d'eau requis et la hauteur de refoulement nécessaire. En fonction de ces paramètres, on sélectionne la pompe appropriée qui répond aux besoins spécifiques du système de pompage.

- **Le débit d'eau** : lié à la puissance mécanique absorbée par la pompe est donné par la relation suivante

$$Q = \frac{P_m \cdot \eta_p}{\rho \cdot g \cdot H_m} \quad (4.1)$$

Avec :

- $\rho$ : La masse volumique de l'eau étant de 1000 kg/m<sup>3</sup>.
- $g$ : Accélération de la pesanteur (9,81m/s<sup>2</sup>).
- $H_m$ : Hauteur manométrique totale.
- $\eta_p$ : Le rendement de la pompe.
- $P_m$ : Puissance mécanique du moteur.
- $Q$ : Quantité d'eau demandée.
- **Calcul du rendement** : Pour les groupes électropompes (pompe + moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement globale.

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} \quad \Rightarrow \quad \eta_m = \frac{P_u}{P_a} \quad (4.2)$$

- $P_a$ : Puissance électrique absorbée par la pompe.
- $P_u$ : Puissance électrique utile délivrée par le moteur.
- $\eta_m$ : Rendement du moteur.

Pour anticiper d'éventuels imprévus d'exploitation, il est recommandé de prévoir une marge de sécurité en majorant la puissance absorbée par la pompe. Selon les recommandations de référence, les marges de sécurité suggérées sont les suivantes :

- Une augmentation de 30 % pour une puissance absorbée inférieure à 4 kW.
- Une augmentation de 20 % pour une puissance absorbée comprise entre 4 et 20 kW.
- Une augmentation de 10 % pour une puissance absorbée supérieure à 20 kW.

Dans le cadre de notre étude, la puissance mécanique de la pompe est de 521 W. En appliquant une marge de sécurité de 30 %, cela signifie que la puissance mécanique du moteur doit être supérieure ou égale à 677 W. Cette marge de sécurité permet de garantir que le moteur dispose de la puissance nécessaire pour faire fonctionner la pompe dans des conditions de charge élevée ou des situations imprévues, assurant ainsi un fonctionnement fiable du système de pompage.

Dans notre cas on a choisie un moteur synchrone à aimant permanent dont la puissance mécanique est 680W.

Le rendement du moteur est estimé à 94.5%. Ainsi, la puissance électrique absorbée par le moteur ( $P_a$ ) peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$p_a = \frac{680}{0.945} = 719.57 \text{ W} \quad (4.3)$$

Cependant, il est important de prendre en compte le rendement du convertisseur. Si le rendement du convertisseur est estimé à 92.26%, la puissance électrique requise pour alimenter le moteur via le convertisseur ( $P_a$ ) doit être ajustée en conséquence. En utilisant la formule :

$$P_{pv} = \frac{P_a}{\eta_c} \quad (4.4)$$

- $\eta_c$  : est le rendement du convertisseur (0,95)
- $P_{pv}$ : est la puissance délivrée par le GPV pour alimenter le groupe motopompe via le convertisseur boost.

$$P_{pv} = \frac{719.57}{0,9226} = 780 \text{ W} \quad (4.4)$$

Ainsi, la puissance électrique absorbée par le moteur, en prenant en compte le rendement du convertisseur, serait de 780 W. Cela permet de prendre en compte les pertes associées au fonctionnement du convertisseur et d'ajuster la puissance électrique nécessaire pour alimenter efficacement la pompe

#### 4.2.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque [22]

Le dimensionnement du générateur photovoltaïque c'est-à-dire déterminer le nombre de modules qui le constituent pour alimenter le moteur.

Pour dimensionner le générateur photovoltaïque, il est nécessaire de prendre en compte la puissance nominale demandée par l'ensemble motopompe. Dans votre cas, la puissance nominale demandée par le moteur est de 780 W.

La puissance de sortie du module photovoltaïque ( $P_{op}$ ) peut être calculée en multipliant la tension de fonctionnement du module ( $V_{op}$ ) par le courant de sortie ( $I_{op}$ ). Selon l'équation (4.5),  $P_{op}$  est calculée comme suit :

$$P_{op} = V_{op} \cdot I_{op} = 17,14 \text{ V} * 3,5 \text{ A} = 60 \text{ W} \quad (4.5)$$

Pour le générateur photovoltaïque on a :

$$P_{pv} = P_{op} \cdot N_s \Rightarrow N_s = \frac{P_{pv}}{P_{op}} = \frac{780}{60} = 13 \quad (4.6)$$

$N_s$  : est le nombre des module en série.

Nous indiquons que le nombre de modules en série ( $N_s$ ) est de 13 et le nombre de modules en parallèle ( $N_p$ ) est de 1. Cela signifie que vous avez 11 modules en série de type MSX60.

### 4.3 Simulation du générateur PV

La figure suivante représente le modèle Simulink du GPV utilisé dans notre projet.

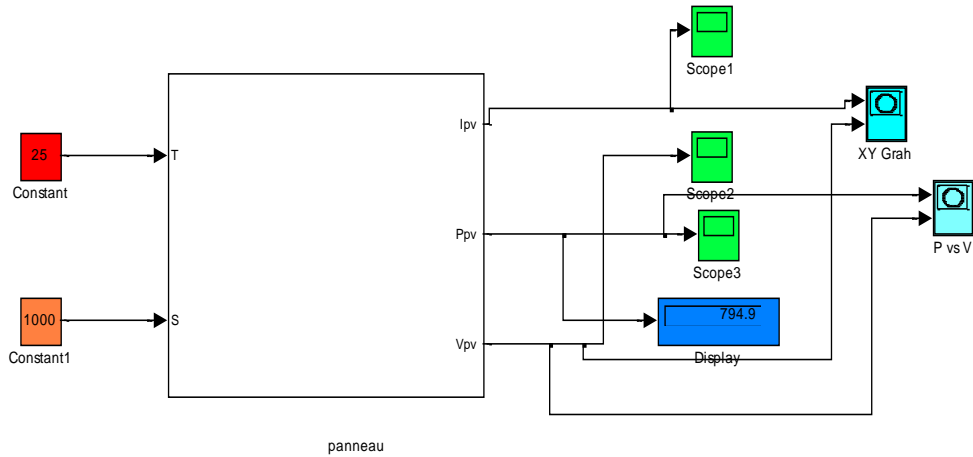


Fig.4.1 : Schéma bloc du GPV sous Matlab/Simulink

Les caractéristiques du GPV  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  aux conditions standards sont données par la figure (4.2).

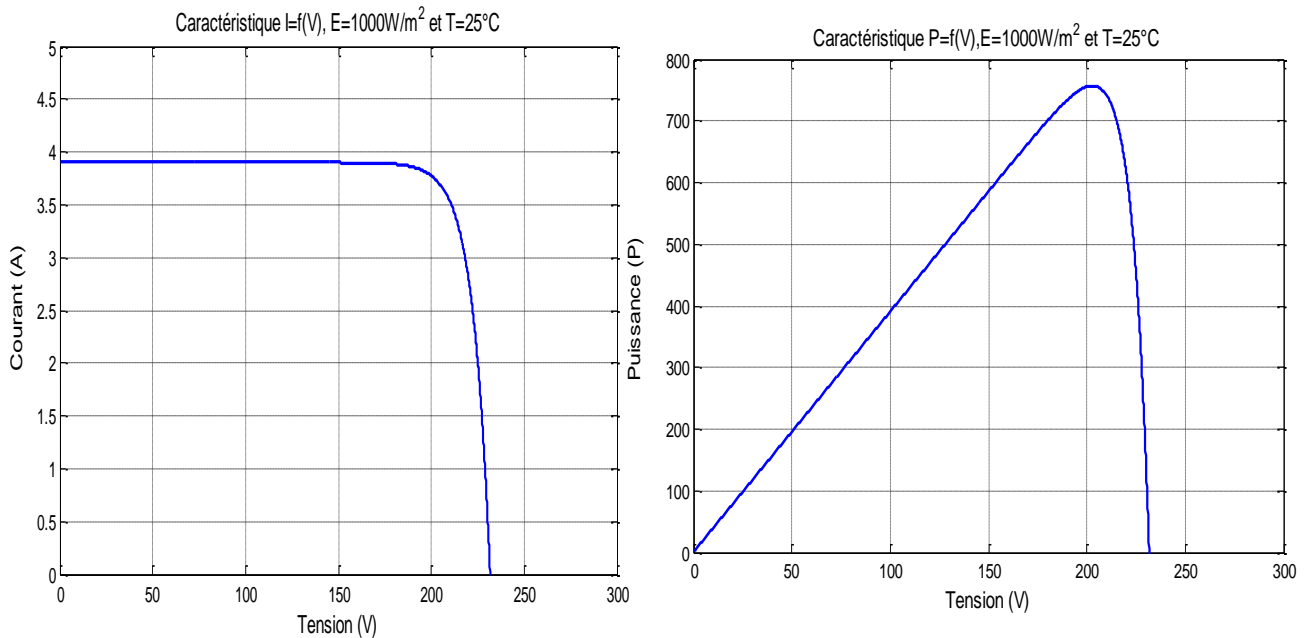


Fig.4.2 : Caractéristique électrique  $P(V)$  et  $I(V)$  du panneau aux conditions standards.

**4.3.1 Influence de la Température :**

La température est un paramètre important dans le comportement du générateur photovoltaïque. La figure (4.3) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximal

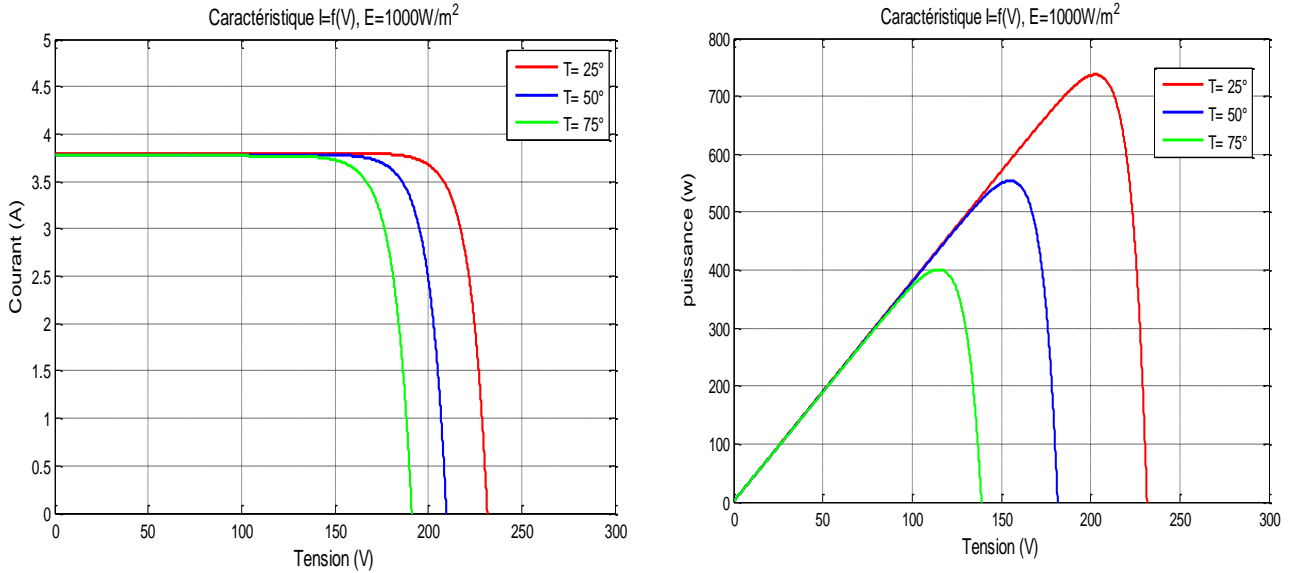


Fig.4.3 : Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) du GPV.

**4.3.2 Influence de l'éclairement :**

D'après la figure (4.4), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit, par rapport a l'éclairement (E) et une faible diminution de la tension circuit ouvert. On remarque aussi que l'éclairement Influence proportionnellement sur la puissance et la tension circuit ouvert du GPV.

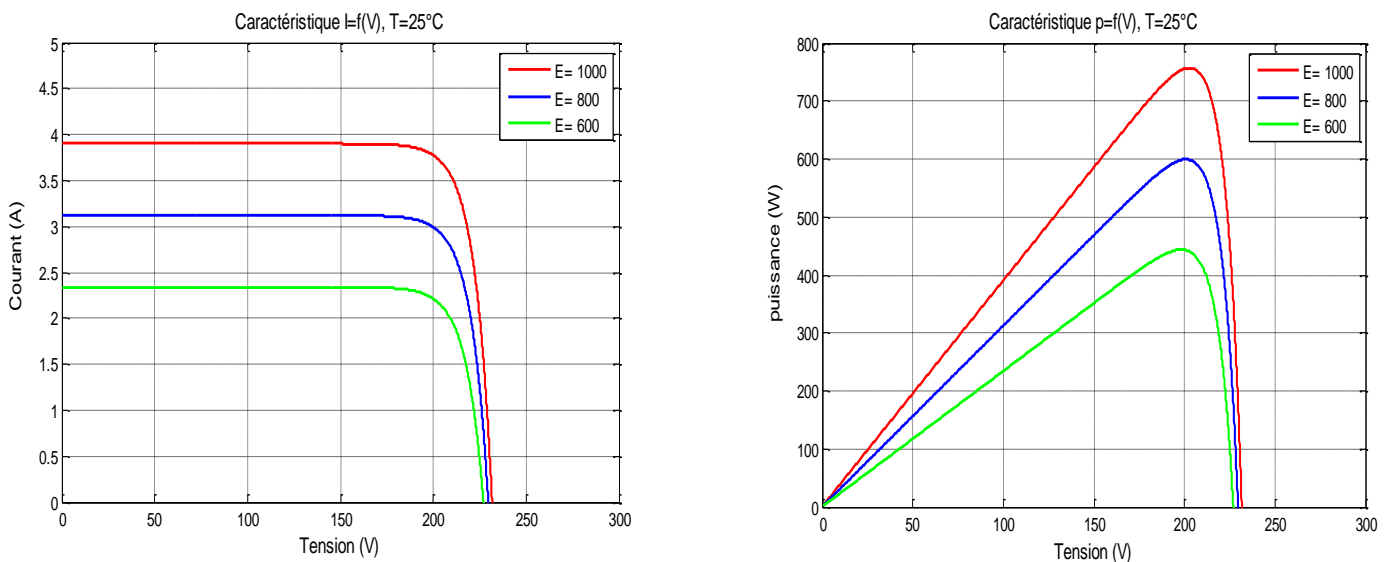


Fig.4.4 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques I(V) et P(V) du GPV.

#### 4.4 Le couplage direct [22]

Lorsque le groupe moteur-pompe est directement alimenté par le générateur photovoltaïque (GPV) dans un système de pompage photovoltaïque au fil solaire, certaines considérations doivent être prises en compte pour optimiser son fonctionnement. Ce couplage est illustré dans la figure suivante :

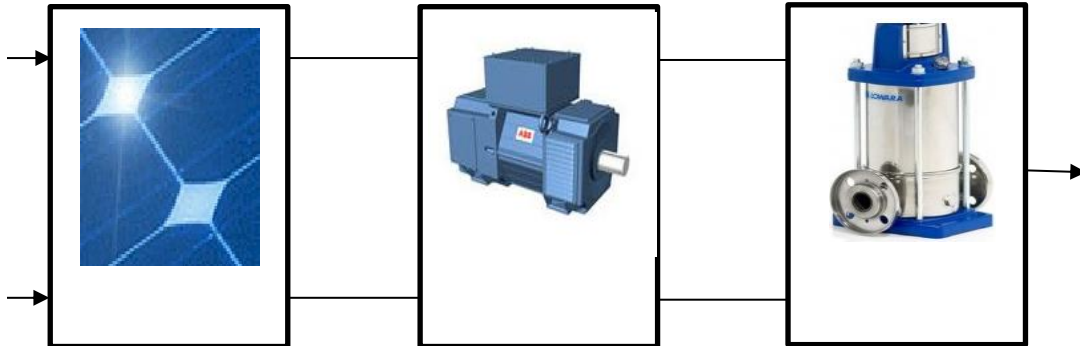


Fig. 4.5: Couplage direct d'un système de pompage PV.

Le niveau d'éclairement solaire varie continuellement, allant de valeurs minimales à des valeurs maximales pouvant atteindre  $1000 \text{ W/m}^2$ . Cependant, il a été observé que certains points de fonctionnement ne correspondent pas aux puissances optimales admissibles. Afin de maximiser la quantité d'énergie produite par le générateur, il est nécessaire de faire fonctionner le système à son maximum, en se basant sur la caractéristique puissance-tension (P-V) du générateur. Cela se traduit mathématiquement par la recherche du terme  $dV/dI$  le plus faible possible, où V représente la tension et I représente le courant.

Comme dans cette étude, le moteur à courant continu à aimant permanent est alimenté par un générateur PV, ce type de moteur lui aussi est caractérisé par des courbes, couple-courant. Le couple résistant  $C_r$  est déterminé par la pompe centrifuge et étant égal à couple moteur à l'état d'équilibre. Ainsi le moteur tourne avec une vitesse donnée pour chaque valeur d'éclairement en adaptation avec le générateur photovoltaïque. Autrement dit, le point de fonctionnement du système sera obtenu par l'intersection de la caractéristique du générateur  $I=f(V)$  et celle du groupe moteur-pompe.

Les conditions de couplage seront  $V_m \leq V_{co}$  et  $I_m \leq I_{cc}$ .

- Où  $V_m$  : la tension du moteur en régime nominal.
- $I_m$  : le courant du moteur en régime nominal.
- $V_{co}$  : la tension de circuit ouvert.
- $I_{cc}$  : le courant de court-circuit.

Si le courant et la tension du générateur sont égaux à l'intensité et la tension du moteur,

$$V_m = V_{pv} \tag{4.7}$$

$$I_m = I_{pv} \tag{4.8}$$

$$C_m = C_r \tag{4.9}$$

Le système d'équation (4.7), (4.8) et (4.9) permet de tracer les caractéristique  $I(V)$ ,  $I_{ch}(V)$  du générateur pour différent éclairement, la résolution de ces équations non linéaires du générateur photovoltaïque, le moteur et la pompe sont réalisées par la méthode de Newton Raphson sous logiciel MATLAB. Les résultats suivants ont été obtenus. Le programme est exécuté pour des différentes valeurs de l'éclairement reflétant ainsi les variations naturelles, l'éclairement maximal étant  $1000W/m^2$ .

Le couplage direct est modélisé sous Matlab/Simulink et montré par la figure (4.6).

Les figures (4.7) montrent les allures des tensions et des puissances lors de fonctionnement du système en couplage direct. Il est évident que l'ensemble Moteur-pompe centrifuge est bien adapté au système PV car il permet un démarrage pour des très faibles valeurs d'ensoleillement.

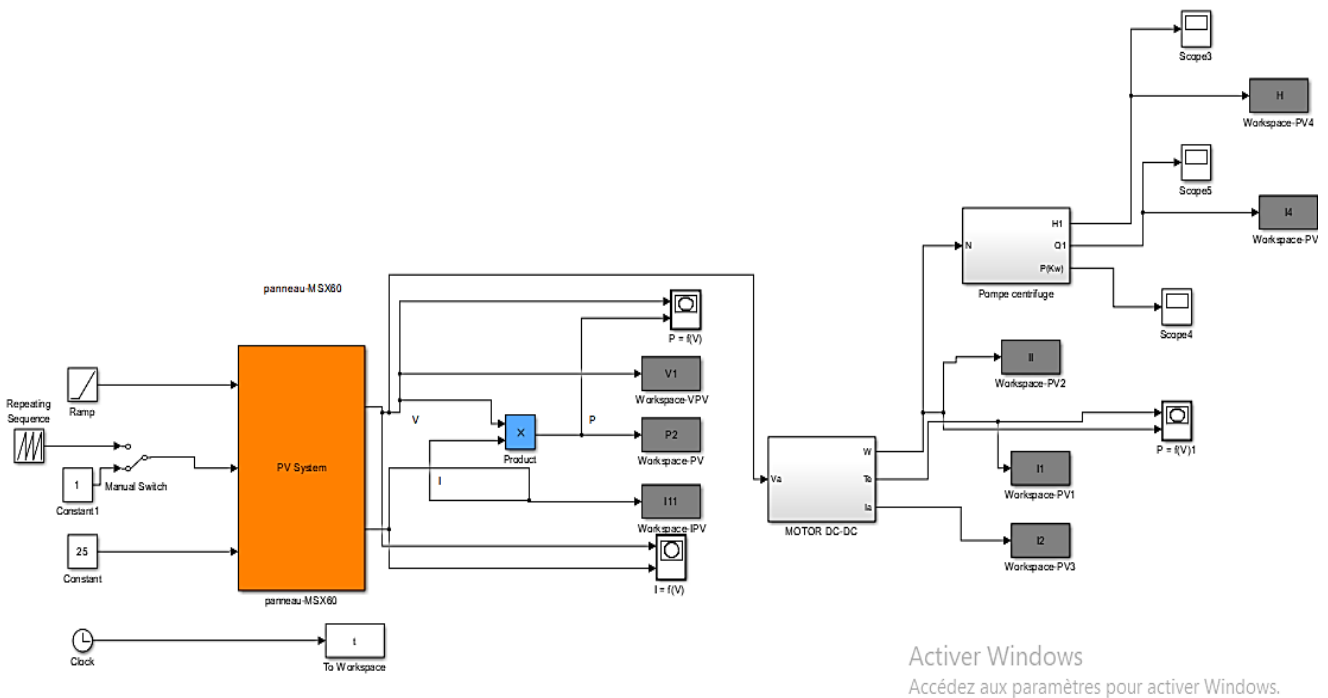


Fig.4.6: Schéma bloc d'un système de pompage(couplage direct).

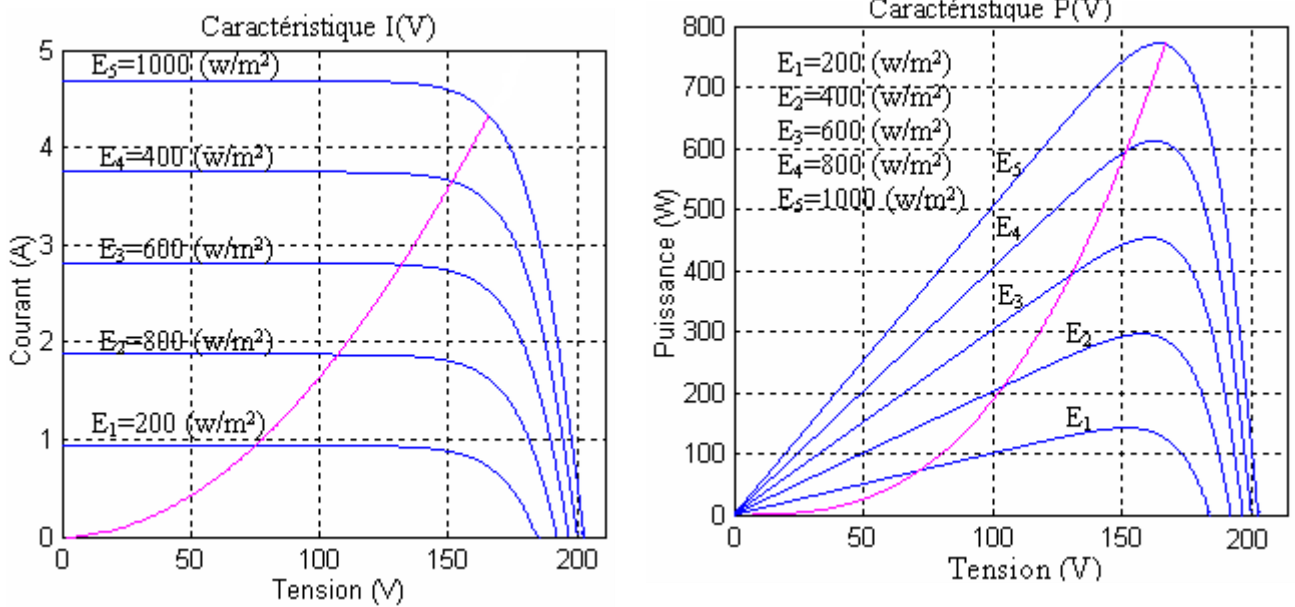


Fig.4.7 : Courbes caractéristique-charge en couplage direct.

**4.4.1 Rendement et quantité d'eau du système de pompage PV en couplage direct**

La qualité de l'adaptation en couplage direct est définie par le rendement du système.

$$\eta_{PPV} = \frac{P_h}{P_e} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m}{E \cdot N_s \cdot N_p \cdot S} \tag{4.10}$$

Avec Q : La quantité d'eau est donnée par la relation suivant :

$$Q = \begin{cases} 0 & \text{si } E < E_t \\ \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a(E-c)}}{2a} & \text{si } E > E_t \end{cases} \tag{4.11}$$

$E_t = 100 \text{ W/m}^2$  ;  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont des constants.

La figure 4.8 présente les variations du rendement en fonction de l'éclairement. D'après ces résultats, le système fonctionne dans la zone 3 seulement pour les valeurs d'éclairement élevé où la quantité d'eau est maximale et peut atteindre environ  $10.5 \text{ (m}^3/\text{s)}$  qui montrent dans la figure (4.10).

Pour les faibles valeurs d'éclairement les points de fonctionnement s'éloignent de la puissance optimale, et le système fonctionne sur la zone 1, où le rendement très faible, de l'ordre de 32%.

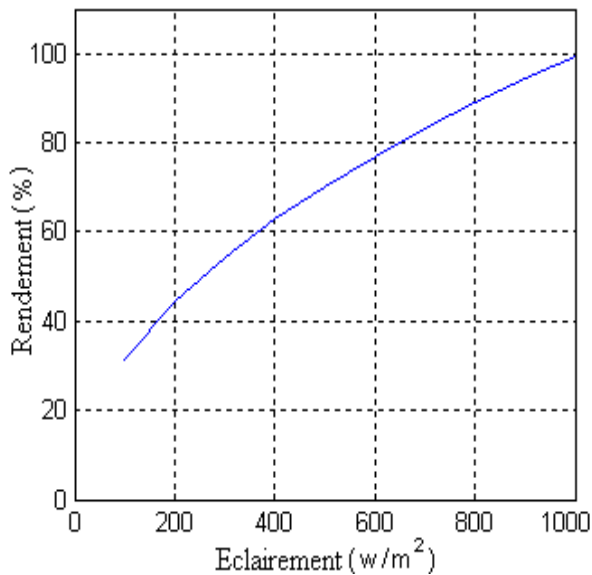


Fig.4.9 : Le rendement en couplage direct

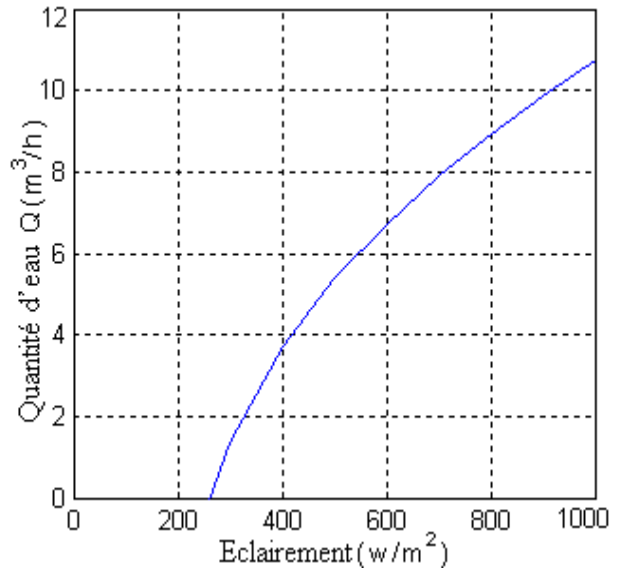


Fig.4.10 : Quantité d'eau en couplage direct

Malgré les avantages du couplage direct, la simplicité, le coût faible, et possibilité de bonnes performances, malheureusement, un tel couplage n'est possible que dans des conditions spécifiques (température, éclairement, type et paramètres de la charge). Alors, il faut faire appel à des techniques plus sophistiquées dans la majorité des applications.

#### 4.4.2 Optimisation du système de pompage photovoltaïque [16]

L'optimisation d'un système de pompage photovoltaïque désigne le processus visant à améliorer l'efficacité, les performances et la rentabilité globale du système et de maximiser la quantité d'eau pompée. Cela se traduit par la recherche de la vitesse d'entraînement maximale pour chaque niveau d'éclairement. Elle implique l'analyse et l'ajustement de divers paramètres et composants du système afin d'optimiser la quantité d'eau pompée, la consommation d'énergie, le rendement global et la durabilité.

Dans un système de pompage photovoltaïque, on utilise un convertisseur élévateur de type Boost pour ajuster la tension ou le courant entre le générateur photovoltaïque inséré avec la commande MPPT qui assure le suivi du point de puissance maximale avec un groupe motopompe composé d'un moteur à courant continu à aimant permanent, avec une pompe centrifuge.

Ainsi, l'ensemble du système fonctionne de manière coordonnée : le générateur photovoltaïque fournit l'énergie, le convertisseur élévateur ajuste la tension ou le courant, la commande MPPT optimise la puissance maximale et le groupe motopompe extrait et distribue l'eau de manière efficace. Le rapport cyclique  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) donne le ratio de la tension du panneau à la tension aux bornes de la charge.



La figure suivante présente notre système de pompage PV (couplage avec MPPT).

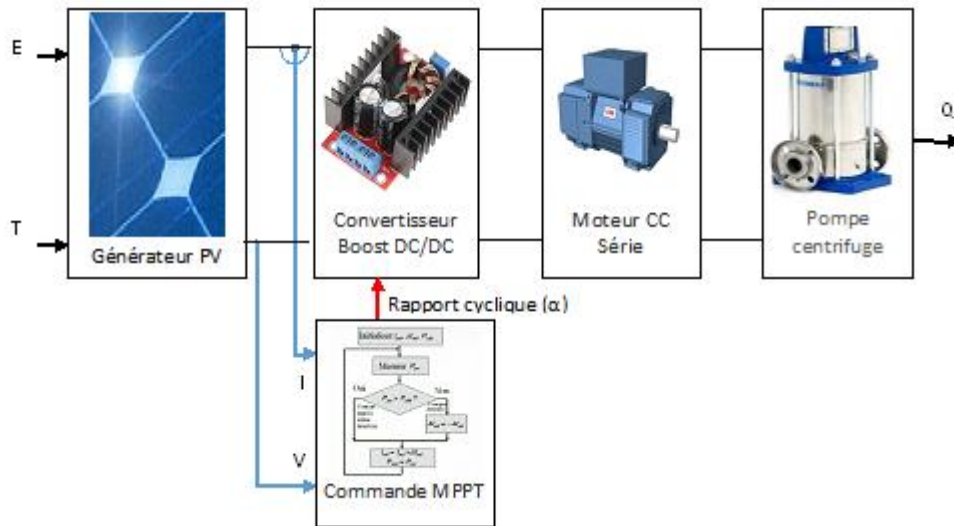


Fig.4.11: Couplage avec commande MPPT.

Nous considérons un moteur DC à flux constant, en négligeant la réaction d'induit et le phénomène de commutation, la tension du moteur sera égale à :

$$Vm = Ra.Im + La \frac{dIm}{dt} + Ke.\omega \quad (4.12)$$

Le couple du moteur :

$$Cm = Km * Im \quad (4.13)$$

La pompe centrifuge oppose un couple résistant :

$$Cr = Kr * W^2 + Cs \quad (4.14)$$

Ke (V/rad.s<sup>-1</sup>), km (Nm/Ampère) et Kr (Nm/rad.s<sup>-1</sup>) sont des coefficients de proportionnalité.

Ensuite on a l'équation mécanique d'une pompe centrifuge :

$$jm \frac{d\omega}{dt} = Cm - Cr \quad (4.15)$$

Avec :

Cr : couple résistant

Cm : couple du moteur

Jm : le moment d'inertie du groupe.

Si on suppose que le convertisseur est idéal, en fonctionnement optimal, la puissance

Maximale délivrée par le générateur sous un courant Iop et une tension Vop est :

$$Pop * Iop = Vm * Im \quad (4.16)$$

Le rendement générateur photovoltaïque - machine synchrone à aimant permanent est le rapport entre la puissance mécanique et la puissance de la radiation incidente captée par le GPV, il est définie par l'expression suivante :

$$\eta_{gm} = \frac{P_m}{N \cdot E \cdot S_g} \quad (4.17)$$

Avec :

$\eta_{gm}$  : le rendement GPV-MAP

$P_m$  : la puissance mécanique (w)

$N$  :  $N_s \cdot N_p$

$E$  : la radiation captée par le PV

$S_g$  : surface du générateur (m<sup>2</sup>)

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple qui est nécessaire pour son entraînement et qui est proportionnelle au carrée de sa vitesse  $\omega$ .

$$C_r = K_p \cdot W^2 \quad (4.18)$$

En supposant que le rendement de l'accouplement entre la machine d'aspiration positive (MAP) et la pompe est de 1, la puissance mécanique de la MAP est équivalente à la puissance absorbée par la pompe. La puissance mécanique de la MAP est définie comme.

$$P_m = K_p \cdot W^2 \quad (4.19)$$

$$\eta_{gm} = \frac{K_p \cdot W^2}{N \cdot E \cdot S_g} \quad (4.20)$$

$K$ : Coefficient de la pompe centrifuge.

#### 4.4.3 Technique de recherche de point de la puissance Maximal MPPT

En général, dans les couplages directs des charges avec les panneaux photovoltaïques, le point de fonctionnement ne correspond pas au point de puissance maximale (MPP) du panneau photovoltaïque. Cela signifie que les panneaux fonctionnent souvent en dehors de leur plage de puissance optimale, ce qui peut entraîner une sous-utilisation de leur potentiel.

Pour remédier à cela, il est courant de sur dimensionner les panneaux photovoltaïques afin d'assurer une puissance suffisante pour alimenter la charge. Cependant, cette approche conduit à un système excessivement coûteux et inefficace sur le plan de l'utilisation des ressources.

Pour résoudre ce problème, la technique de Tracking de la puissance maximale peut être utilisée. L'idée est de maintenir le fonctionnement du panneau photovoltaïque à son point de puissance maximale, même si les conditions d'éclairement solaire varient. Cela permet d'optimiser la production d'énergie et d'obtenir des performances maximales du système.

Dans ce projet, nous utilisons la méthode de perturbation et d'observation (P&O) pour le tracking de la puissance maximale. Cette méthode consiste à surveiller en continu la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque et à apporter des ajustements appropriés pour maintenir le panneau au point de puissance maximale. Cela garantit une utilisation optimale de l'énergie solaire et contribue à l'efficacité globale du système de pompage solaire

#### 4.5 Comparaison entre un système optimise et non optimise

Quelle que soit la nature du couplage du groupe motopompe au générateur photovoltaïque, avec ou sans critère d'optimisation, la caractéristique de charge, la puissance, le rendement et la quantité d'eau fournie par le système de pompage sont les principaux paramètres, permettent l'évaluation et la validation. Le couplage indirect à travers de convertisseur est modélisé sous Matlab/Simulink et montré par la figure (4.12) ci-dessous de l'exploitation du système de photovoltaïque.

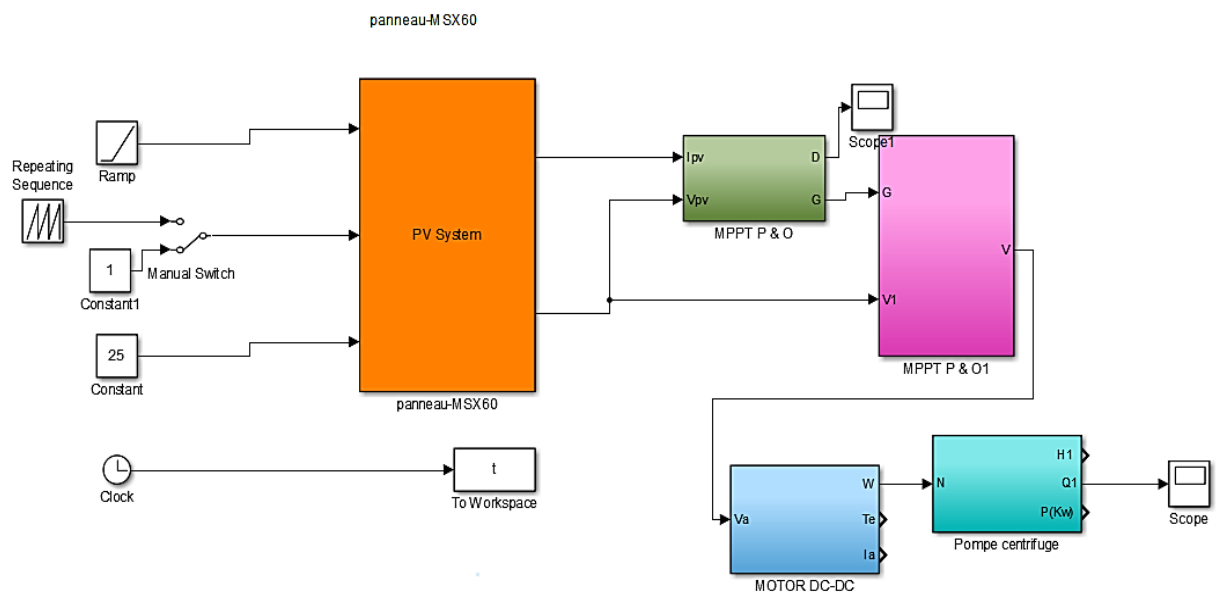


Fig.4.12: Schéma bloc d'un système de pompage PV (couplage indirect).

##### 4.5.1 Caractéristique de charge et de puissance

La figure (4.13) représente la caractéristique de charge du système. L'utilisation de la technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) améliore considérablement le fonctionnement du système par rapport au couplage direct.

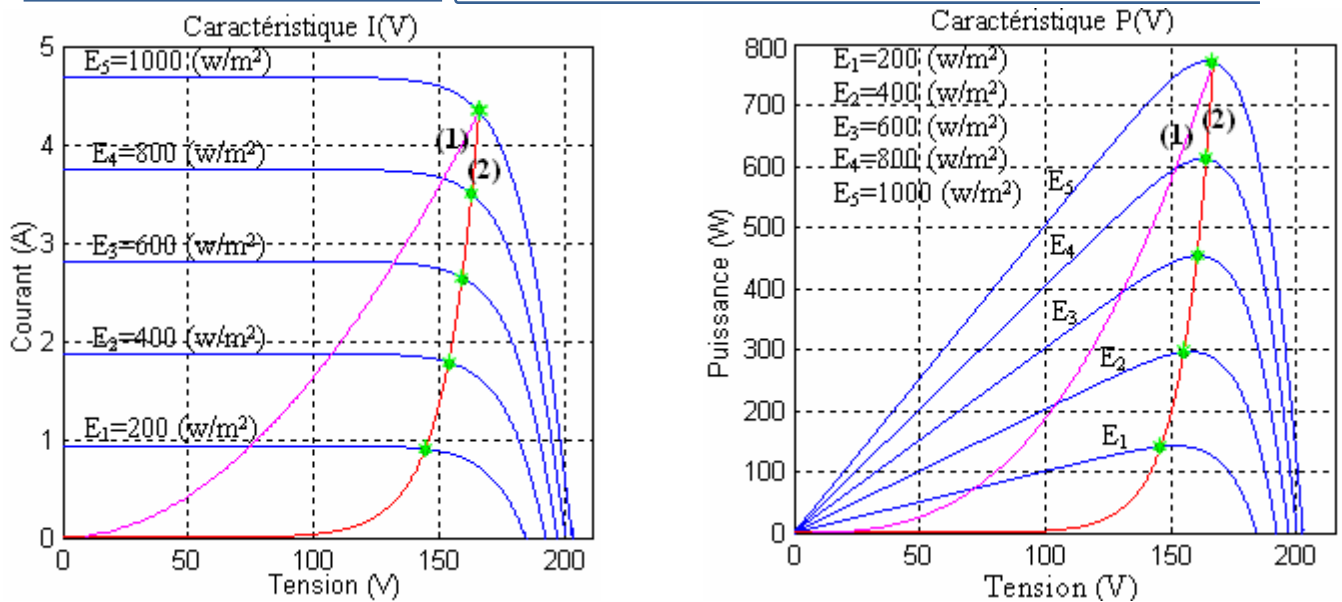


Fig.4.13 : Courbes de charge et de caractéristiques du système de pompage PV.

(1) Couplage direct, (2) Couplage avec MPPT

L'effet de la technique MPPT est particulièrement remarquable pour les faibles valeurs d'éclairement solaire. Par exemple, à un éclairement de 200 W/m<sup>2</sup>, la tension d'alimentation est augmentée de manière significative, passant de 75V en couplage direct à 140V grâce à la technique MPPT. Cela permet d'optimiser la conversion de l'énergie solaire en puissance électrique utilisable par le système.

Les puissances obtenues grâce à la technique MPPT sont les plus élevées possibles, ce qui indique un fonctionnement idéal du système. En utilisant la technique MPPT, la puissance globale du générateur photovoltaïque est pleinement exploitée, ce qui permet une utilisation optimale de l'énergie solaire disponible. Ces résultats démontrent l'efficacité et les avantages de l'application de la technique MPPT dans un système de pompage solaire

#### 4.5.2 Caractéristique du rendement et du débit du système de pompage PV

Le rendement calculé est défini par le rapport entre la puissance obtenue à la sortie de moteur et la puissance maximale disponible.

La figure (4.14) illustre l'allure du rendement, qui est 100% pour la technique MPPT idéalisée, par contre le couplage direct est caractérisé par un faible rendement, spécialement pour les faibles valeurs d'éclairement. Mais à partir de  $E=900$ W/m<sup>2</sup> et plus, les valeurs du rendement seront proches, ce rapprochement prouve la bonne adaptation entre le groupe motopompe et le générateur pour le couplage direct à des forts éclaircements.

La figure (4.15) représente les allures des débits, au couplage direct et avec la technique de MPPT en fonction de l'éclairement.



#### 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux méthodes de couplage du système de pompage photovoltaïque. Le premier est le couplage direct (Générateur PV – Moteur – Pompe) et le deuxième est le couplage indirect (Générateur PV – boost avec MPPT – Moteur – Pompe).

Ensuite on a fait une simulation du système complet en fonction de l'influence du changement de l'éclairement sur les caractéristiques électriques. On a terminé ce chapitre par une étude comparative entre les deux techniques direct est optimisé.

***CONCLUSION***

***GÉNÉRALE***

## **Conclusion générale**

Dans ce travail il s'agit de modéliser et simuler un module photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT, conçu spécifiquement pour le pompage photovoltaïque. Pour cela, nous avons entrepris une étude approfondie sur la conversion photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau PV. L'objectif était de simuler le fonctionnement du module et d'étudier l'influence de la température sur sa caractéristique courant-tension. Les résultats des simulations ont révélé une forte dépendance des performances du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques, en particulier de l'irradiation solaire et de la température du module.

Pour extraire la puissance maximale disponible aux bornes du module photovoltaïque et la transférer efficacement vers la charge, il est courant d'utiliser un étage d'adaptation entre le module PV et la charge. Cet étage agit comme une interface entre les deux éléments et assure, par le biais d'un contrôle approprié, le transfert de la puissance maximale fournie par le module afin qu'elle se rapproche autant que possible de la puissance maximale disponible. La solution couramment adoptée consiste à incorporer un convertisseur statique qui agit en tant qu'adaptateur source-charge et est directement commandé par la technique MPPT. Le choix de la structure de conversion dépend de la charge à alimenter. La deuxième partie de cette étude portait sur la commande des convertisseurs Boost, largement utilisés dans les chaînes de conversion photovoltaïque.

Dans l'objectif de faire fonctionner un module 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, nous avons intéressé particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation dans le contrôle des convertisseurs DC-DC. Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

Dans le but de garantir le fonctionnement optimal d'un module photovoltaïque et de maximiser en permanence sa puissance, il est essentiel de contrôler le convertisseur DC-DC associé à l'aide d'un algorithme de recherche du point de puissance maximale. Dans cette optique, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation pour le contrôle des convertisseurs DC-DC. Les résultats des simulations ont démontré de bonnes performances en termes de suivi de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

L'analyse des différents types des moteurs électriques, en termes d'excitation et de caractéristiques électriques telles que le couple et la vitesse, a révélé que le moteur à courant



continu à aimant permanent sans balais présente un comportement satisfaisant en fonction de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

L'optimisation du système proposé utilise la méthode MPPT «Perturbations et Observation». Les résultats présentés dans le mémoire présent montrent que l'utilisation de cette commande peut améliorer le rendement et l'efficacité de l'installation du pompage solaire

Finalement, les résultats des simulations ont montré que le système proposé permet d'améliorer l'efficacité du système de pompage photovoltaïque et les résultats obtenus permettent d'atteindre un rendement élevé.

# ***RÉFÉRENCES***

## Références

[1] Melle.Demmouche Fatna jihad, Simulation et commande d'une liaison photovoltaïque en regime du defaut, mémoire de master, Département d'électrotechnique, faculté des sciences et de la Technologie, 2022

[2] Jimmy Royer, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Le pompage photovoltaïque, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, NSTITUT DE L'ÉNERGIE DES PAYS CREPA AYANT EN COMMUN L'USAGE DU FRANÇAIS,

[3]dehouche karima, Etude et conception d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage électrochimique, mémoire de master, département de Génie électrique, faculté de technologie, 2014

[4]BOURAD Kahina, Dimensionnement d'un système photovoltaïque avec stockage, mémoire de master, Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie, Université A.MIRA-BEJAIA, 2021

[5]Chettouh Romaisa, Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur une cellule solaire InGaP/GaAs, mémoire de master, Faculté de Technologie, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2019

[6].Mr.Bendjoudi Faouzi, Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries, mémoire de master, département de génie électrique, université de Abderrahmane mira de Bejaia, 2014

Chapitre02

[8] HAMDANI Abderrahmane, « Etude et Simulation de Connection d'une Centrale Photovoltaïque au Réseau ElectriqueTriphasé » Mémoire de master, Département de Sciences Techniques, Université Ahmed Draïa Adrar, 2018

[9] Sahraoui Hocine, étude et simulation d'un système de chauffage photovoltaïque, mémoire de master, département de génie électrique, faculté des sciences et de la technologie , université de Mohamed khider de Biskra,2020

[10] GOAR Nouredine, «Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », mémoire de master, département de Génie Electrique, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, 2017

[11] AOUCHICHE NEDJMA, Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque, thèse de doctorat, THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE, Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques- SPIM, PREPAREE A Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2020

[12] Zaoui Abdelbassit, Contrôle MPPT dans les systèmes photovoltaïques pour des techniques intelligent « Logique Floue », mémoire de master, DEPARTEMENT DES SCIENCES DE TECHNOLOGIE, UNIVERSITÉ AHMED DRAIA-ADRAR, Faculté des Sciences et de la Technologie, 2021

[13] (NAIDJI Assia, commande de floue- glissant d'un moteur BLCD), mémoire de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, faculté de technologie, département de génie électrique, 2018

[14] <https://www.parvalux.com/fr/quelle-est-la-difference-entre-les-moteurs-a-courant-continu-a-balais-et-sans-balais/>

[15] HARMAT Brahim, Comparaison des contrôleurs P, PI etPID à la commande de la vitesse d'un moteur à CC sans balais (BLDC), FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE, DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE, UNIVERSITE AFRICAINE AHMED DRAYA D'ADRAR, 2020

[16] Mr. Abdessalam TITRAOUI,étude technico-economique d'un système pv application de pompage d'eau, mémoire de master,DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE, FACULTE DE TECHNOLOGIE,université mohamed BOUDIAF-M'SILA,2016

[17] Kedjough Ismail, Etude, Conception et simulation d'une pompe centrifuge, mémoire de master, Département de forage et de mécanique des chantiers pétroliers, faculté des hydrocarbures et des énergies renouvelable et sciences de la terre et de l'univers, université de kasdi merbeh ,2019

[18] CHERAYET Azzeddine, **Calcul de l'installation de ravitaillement d'une agglomération en eau potable**, mémoire de master, Département Electromécanique, Université Larbi Tebessi, Institut des Mines, 2021

[19] CHERAYET Azzeddine, **Calcul de l'installation de ravitaillement d'une agglomération en eau potable**, mémoire de master, Département Electromécanique, Université Larbi Tebessi, Institut des Mines, 2021

[20] Kedjough Ismail, Conception et simulation d'une pompe centrifuge, Mémoire de master, Département de forage et de mécanique des chantiers pétroliers, UNIVERSITE DE KASDI MERBEH, Faculté des hydrocarbures et des énergies renouvelable et sciences de la terre et de l'univers, 2019

[21] MEFTAH ALI, Etude de la cavitation dans une pompe centrifuge, Mémoire de master, département de mécanique, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, Faculté de Technologie, 2013-2014

[22] Alili Zakaria, Étude et simulation d'un pompage au fil solaire, mémoire de master, département de génie électrique, faculté de science et technologie, université Mohamed khaiderbiskra, 2020

[23] M. BESSEM ABDELGHANI, Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque, mémoire de master, Filière d'Electromécanique, Université badji mokhtar-Annaba, 2018