

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

**OPTION: COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES**

**THEME**

---

**ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN SYSTEME PV**

**APPLICATION AU POMPAGE D'EAU**

---

Proposé et dirigé par:

Mr. Abdelghani HARRAG

Présenté par:

Mr. Abdessalam TITRAOUI

Année Universitaire: 2015/2016

N° d'ordre : CSE\_204

# Remerciements

*A l'issue de ce projet de fin d'études nous adressons nos remerciements à **Dieu** tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné toutes ces longues années d'études.*

*Nos remerciements vont aussi à nos parents qui nous ont soutenus le long de notre cycle d'étude.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nous citerons en particulier **Mr. Abdelghani HARRAG** pour avoir dirigé ce travail et pour son continuel suivi tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nous le remercions encore une fois d'avoir relu, corrigé et stimulé avec grande patience des discussions autour de ce manuscrit.*

*Nous tenons à remercier également les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.*

# Sommaire

Sommaire.....	I
Introduction générale.....	1

## Chapitre I Modélisation d'un Système photovoltaïque

I.1. Introduction.....	3
I.2. Générateur photovoltaïque.....	3
I.3. Effet photovoltaïque.....	4
I.4. Cellules photovoltaïques.....	4
I.4.1. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques).....	6
I.4.1.1. Les cellules monocristallines.....	6
I.4.1.2. Les cellules poly cristallines.....	6
I.4.1.3. Les cellules amorphes.....	6
I.4.1.4. Autres technologies.....	6
I.4.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode.....	6
I.4.3. Modèle d'une cellule à deux diodes.....	8
I.4.4. Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	8
I.5. Puissance d'une cellule PV.....	11
I.5.1. Puissance maximale d'une cellule PV.....	11
I.5.2. Facteur de forme d'une cellule PV.....	12
I.6. Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	12
I.6.1. Association en série.....	12
I.6.2. Association en parallèle.....	13
I.7. Développement du modèle mathématique du module PV.....	13
I.7.1. Simulation du module (panneau) photovoltaïque.....	15
I.8. Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque.....	15
I.9. Comportement d'un module photovoltaïque.....	16
I.9.1. Influence de la température et l'ensoleillement sur le rendement.....	16
I.9.2. Influence de l'ensoleillement.....	16
I.9.3. Influence de la température.....	17
I.9.4. Influence de la température sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$ .....	18
I.10. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque.....	19
I.11. Conclusion.....	20

## *Chapitre II*

### *Commande du convertisseur boost*

<i>II.1. Introduction.....</i>	<i>21</i>
<i>II.2. Connexion directe source charge.....</i>	<i>21</i>
<i>II.2.1. Définition et étude de l'étage d'adaptation entre un GPV et une charge continue... </i>	<i>22</i>
<i>II.2.2. Convertisseurs DC-DC.....</i>	<i>24</i>
<i>II.2.3. Types des convertisseurs DC-DC.....</i>	<i>24</i>
<i>II.3. Convertisseur parallèle ( Boost).....</i>	<i>25</i>
<i>II.3.1. Principe de fonctionnement.....</i>	<i>26</i>
<i>II.3.2. Fonctionnement en mode de conduction continu (MCC).....</i>	<i>27</i>
<i>II.3.2.1. Calcul de la valeur de l'inductance et de la bobine.....</i>	<i>28</i>
<i>II.3.2.2. Formes d'ondes.....</i>	<i>30</i>
<i>II.3.2.3. Ondulation du courant.....</i>	<i>30</i>
<i>II.3.2.4. Ondulation de la tension.....</i>	<i>30</i>
<i>II.3.2.5. Dimensionnement des composants.....</i>	<i>31</i>
<i>II.3.2.6. Calcul de la capacité du condensateur de sortie.....</i>	<i>31</i>
<i>II.3.2.7. Calcul de la capacité du condensateur d'entrée.....</i>	<i>31</i>
<i>II.4. Principe du PWM.....</i>	<i>32</i>
<i>I.5. Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une charge.....</i>	<i>33</i>
<i>I.6. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....</i>	<i>34</i>
<i>I.6.1. Introduction.....</i>	<i>34</i>
<i>I.6.2. La méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&amp;O.....</i>	<i>34</i>
<i>I.6.3. Principe du contrôle MPPT.....</i>	<i>35</i>
<i>II.7. Résultats de simulation.....</i>	<i>37</i>
<i>II.8. Conclusion.....</i>	<i>38</i>

## *Chapitre III*

### *Modélisation du système motopompe*

<i>III.1. Introduction .....</i>	<i>39</i>
<i>III.2. Modélisation du groupe motopompe.....</i>	<i>39</i>
<i>III.2.1. Le Moteur.....</i>	<i>40</i>
<i>III.2.1.1. Le moteur à aimant permanent sans balais.....</i>	<i>40</i>
<i>III.2.2. Les pompes.....</i>	<i>42</i>
<i>III.2.2.1. Les types de pompes.....</i>	<i>43</i>
<i>III.2.2.2 .La pompe volumétrique.....</i>	<i>43</i>

III.2.2.2.1. Caractéristiques d'une pompe volumétrique.....	43
III.2.2.3. La Pompe centrifuge.....	44
a). Principe de fonctionnement.....	44
b). Constitution de la pompe centrifuge.....	45
III.3. Modélisation de la pompe centrifuge .....	45
III.3.1. Les pertes de charge.....	46
III.3.1.1. Les pertes de charge linéaires.....	46
III.3.1.2. Les pertes de charge singulières.....	46
III.3.2. Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	47
III.3.2.1. Caractéristique Débit -vitesse.....	47
III.3.2.2. Caractéristiques couple - vitesse.....	47
III.3.2.3. Caractéristiques Débit - hauteur.....	48
III.3.2.4. Caractéristique de la puissance.....	48
III.3.2.5. Caractéristique du rendement.....	49
III.4. Les différents types d'installation du groupe motopompes.....	50
III.5. Caractéristiques de la pompe centrifuge immergée.....	51
III.6. Conclusion.....	51

## *Chapitre IV*

### *Simulation et optimisation du système de pompage sous MATLAB/SIMULINK*

IV.1. Introduction .....	52
IV.2. Simulation du générateur photovoltaïque .....	53
IV.3. Simulation du moteur à courant continu.....	53
IV.4. Dimensionnement du système photovoltaïque.....	54
IV.4.1. Dimensionnement de la Motopompe .....	54
IV.4.2. Dimensionnement du générateur photovoltaïque .....	56
IV.5. Couplage directe du moteur au générateur PV .....	56
IV.6. Couplage à travers un convertisseur .....	56
IV.7. Optimisation du système de pompage photovoltaïque.....	57
IV.8. Simulation du système moteur _générateur Couplage indirecte(optimise).....	59
IV.9. Résultats de simulation.....	60
IV.5. Conclusion.....	65
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>66</b>

#### **Bibliographie**

#### **Annexe**

# Listes des figures

## Chapitre I: Modélisation d'un Système photovoltaïque

Figure I.1: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque.....	4
Figure I.2: Conduction dans les matériaux semi-conducteurs.....	5
Figure I.3: Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.....	5
Figure I.4: Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode.....	7
Figure I.5: Schéma équivalent de la cellule solaire à deux diodes.....	8
Figure I.6: Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension.....	12
Figure I.7: Puissances maximale idéale et pratique.....	13
Figure I.8: Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.....	13
Figure I.9: Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque MSX 60.....	16
Figure I.10: Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements.....	17
Figure I.11: Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements.....	17
Figure I.12 : Courbes I(V) d'un module PV pour différentes températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ .....	18
Figure I.13: Courbes P(V) d'un module PV pour différentes températures à $G=1000\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .....	19
Figure I.14: Schématisation d'un générateur photovoltaïque élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.....	19

## Chapitre II: Commande du convertisseur boost

Figure II.1: Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.....	22
Figure II.2: Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe....	23
Figure II.3: Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et la charge	23
Figure II.4: Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Boost.....	25
Figure II.5 : Circuit équivalent du convertisseur boost avec S fermé.....	26
Figure II.6 : Circuit équivalent du convertisseur boost avec S ouvert.....	26
Figure II.7 : Fonctionnement de boost en mode continu.....	27
Figure II.8: Frontière entre le mode continu et discontinu.....	28
Figure II.9 : Courant de sortie et celui de la bobine à la frontière ( $V_{dc}$ constant).....	29
Figure II.10: Formes d'ondes courants/tensions dans un convertisseur boost en mode continu.....	32
Figure II.11: Principe du PWM.....	33
Figure I.12: Etage d'adaptation d'un générateur PV _ charge.....	33
Figure I.13: Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau solaire.....	35

Figure I.14: Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.....	36
Figure II.15 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT.....	37
Figure II.16: Tension de sortie du convertisseur boost.....	37
Figure II.17: Courant de sortie du convertisseur boost.....	38

### **Chapitre III : Modélisation du système motopompe**

Figure III.1: Schéma synoptique simplifié de Pompage PV.....	40
Figure III.2 : Machine à courant continu a aimant permanent.....	41
Figure III.3: Caractéristiques débit-hauteur d'une pompe volumétrique.....	44
Figure III.4: Schéma de principe d'une pompe centrifuge.....	45
Figure III.5: Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	47
Figure III.6: Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.....	49
Figure III.7: Caractéristique de la puissance hydraulique de la pompe centrifuge.....	49
Figure III.8: Caractéristique de rendement de la pompe centrifuge.....	50
Figure III.9: Exemples d'installations de pompes solaires.....	50

### **Chapitre IV : Simulation et optimisation du système de pompage sous MATLAB/SIMULINK**

Figure IV.1: Schéma bloc du module BP MSX60 de BP Solaire sous Matlab/Simulink.....	53
Figure IV.2: Model du moteur à courant continu sous Matlab/Simulink.....	54
Figure IV.3: le courant délivré par le moteur à courant continu en fonction de temps.....	54
Figure IV.4: La variation de vitesse du moteur en fonction de temps.....	54
Figure IV.5: Schéma bloc d'un couplage directe GPV- MCC.....	57
Figure IV.6: schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous Matlab/Simlulink.....	59
Figure IV.7: La variation de vitesse en fonction de temps pour $G=1000w/m^2$ .....	59
Figure IV.8: le courant délivré par le moteur en fonction de temps pour $G=1000w/m^2$ .....	60
Figure IV.9: La variation de L'ensoleillement en fonction de temps.....	61
Figure IV.10: Variation de la vitesse en fonction de temps avant et après optimisation.....	61
Figure IV.11: Variation du courant en fonction de temps avant et après optimisation.....	62
Figure IV.12: Variation de puissance en fonction de temps avant et après optimisation.....	62
Figure IV.13: La variation de L'ensoleillement en fonction de temps.....	63
Figure IV.14: Variation de la vitesse en fonction de temps avant et après optimisation.....	63
Figure IV.15: Variation du courant en fonction de temps avant et après optimisation.....	64
Figure IV.16: Variation de puissance en fonction de temps avant et après optimisation.....	64

# *Listes des tableaux*

## *Chapitre I: Modélisation d'un Système photovoltaïque*

*Tableau I.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque MSX 60.....15*

## *Chapitre II: Commande du convertisseur boost*

*Tableau II.1: Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.....25*

# Nomenclature

$V_t$ :	tension thermique à la température T.
$K$ :	constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$ J/k)
$K_1$ :	constante ( $1.2 \text{ A/cm}^2 \text{K}^3$ )
$K_2$ :	constante ( $2.9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{K}^{\frac{5}{2}}$ )
$n$ :	facteur de non idéalité de la jonction
$T$ :	température effective de la cellule en Kelvin
$E_g$ :	énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV )
$I$ :	le courant fourni par la cellule.
$V$ :	la tension aux bornes de la cellule.
$a$ :	le coefficient de variation du courant en fonction de température
$T_{ref}$ :	la température de référence, 298K (25°C).
$P(W)$ :	Puissance fournie par la cellule PV.
$V(v)$ :	Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
$I(A)$ :	Intensité débitée par la cellule PV.
$V_{CO}$ :	La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule.
$I_{CC}$ :	L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.
$f$ :	Facteur de forme.
$I_{CC}$ :	Intensité de court-circuit.
$M$ :	indice affecté au module.
$n_s$ :	nombre de cellules en sérié.
$n_p$ :	nombre de cellules en parallèle.
$I_{SrM}$ :	Courant de saturation référence du module.
$I_{ccrM}$ :	Courant de court circuit référence du module.
$P_{max}$ :	Puissance maximale
$V_{Pmax}$ :	Tension à $P_{max}$
$I_{Pmax}$ :	Courant à $P_{max}$
$I_{CCr}$ :	Courant de court circuit de référence
$V_e$ :	La tension d'entrée.
$V_s$ :	La tension de sortie.
$D$ :	Le rapport cyclique du convertisseur .
$V(k)$ :	tension en sortie du panneau à l'itération k

$I(k)$ :	intensité en sortie du panneau à l'itération k
$P(k)$ :	puissance en sortie du panneau à l'itération k
$R_a$ :	La résistance de l'induit
$L_a$ :	L'inductance de l'induit
$e_m(t)$ :	Une tension appelée f.é.m. (force électromotrice).
$\omega(t)$ .:	la vitesse angulaire
$I_a(t)$ :	Le courant traversant le circuit d'induit
$T_{em}(t)$ :	Le couple électromagnétique instantané produit .
$\varphi_f$ :	L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique
$J_t$ :	Inertie totale entraînée (moteur $J_m$ et charge $J_{ch}$ ) .
$B_m$ :	Coefficient de frottement visqueux.
$T_r$ :	Couple résistant.
$T_f$ :	Couple de frottement de coulomb.
$\omega$ :	la vitesse angulaire de la pompe.
$k_q, k_h$ :	constantes données de la pompe.
$H$ :	Hauteur totale du pompage.
$H_s$ :	Hauteur statique
$H_d$ :	Est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :
$\lambda$ :	Coefficient de pertes de charges linéaires.
$L$ :	Longueur de la tuyauterie (m).
$D$ :	Diamètre de la tuyauterie (m).
$g$ :	Accélération de la pesanteur (m/s <sup>2</sup> )
$v$ :	Vitesse moyenne du fluide (m/s)
$\varepsilon$ :	Coefficient de pertes de charges locales .
$k_{fr}$ :	Constante de la canalisation .
$K_r$ :	Coefficients de proportionnalité [(Nm/rad.s <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup> ] .
$C_s$ :	Le couple statique, très petite.
$K_0, K_1, K_2$ :	Des constants propre de la pompe donnée par le constricteur
$\rho$ :	La masse volumique de l'eau étant de 1000kg/m <sup>3</sup> .
$g$ :	Accélération de la pesanteur (9,81m <sup>2</sup> /s) .
$\eta_{gm}$ :	le rendement GPV-MCC
$E$ :	la radiation captée par le PV.
$S_g$ :	surface du générateur (m <sup>2</sup> ).

# *Lexique*

PV:	Photovoltaïque.
GPV:	Générateur Photovoltaïque.
FF:	Facteur de forme.
MPPT:	Maximum Power Point Tracking.
P&O:	Perturbation et Observation.
DC:	Courant Continu (Direct Current).
AC:	Courant Alternatif (Alternative Current).
MAS:	Moteur asynchrone.
MCC:	Moteur à courant continu.
HMT :	Hauteur manométrique totale

# *Introduction générale*

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelle réduise les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

À la différence des énergies fossiles les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et la biomasse offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement sans pollution et dans une moindre dépendance des ressources et doivent jouer un rôle important pour atteindre cet objectif. Dans ce contexte, l'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital. L'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentielle d'exportation de l'énergie électrique solaire.

À l'ère du développement durable, l'énergie photovoltaïque connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. En effet, plus de 22 GW ont été produites en 2010 contre 0.4 GW en 1998. Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible en plus du coût élevé des panneaux solaires et de leur installation. Pour amortir le coût de l'utilisation des systèmes solaires on met en œuvre des techniques d'optimisation.

Dans ce travail nous sommes intéressés à l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque dédié au pompage d'eau. Ce système intègre un générateur photovoltaïque et une charge (moteur-pompe) et un étage de conditionnement de puissance dans le cas d'un couplage indirect. En fait, la MPPT (Maximum Power Point Tracker) reste une bonne approche dans la résolution des problèmes de la conversion de l'énergie solaire, elle consiste à faire fonctionner les systèmes photovoltaïques dans leur zone de puissance maximale.

De ce fait, le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous.

Nous aborderons dans le premier chapitre le principe de fonctionnement le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que la modélisation complète du générateur photovoltaïque (GPV). Cet aspect de modélisation est développée dans le but d'étudier le comportement du générateur vis-à-vis les conditions climatiques plus particulièrement la température et l'irradiation;

- Le deuxième chapitre quant à lui présente l'algorithme MPPT Perturbation-Observation (P&O) ainsi que son application pour la commande d'un convertisseur DC-DC de type boost alimentant une charge résistive;
- Le troisième chapitre présente la modélisation du système motopompe. La première partie de ce chapitre donne un aperçu théorique sur le moteur à aimant permanent et les pompes qui peuvent être utilisées dans le pompage PV. La deuxième quant à elle, présente le modèle mathématique de chacun de ces composants;
- Le quatrième chapitre présentes les différentes simulations réalisées avec et sans optimisation d'un système de pompage solaire. Il présente les résultats obtenues, et à travers les discussions, dresse les premières conclusions de ce travail;
- En fin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux

# Chapitre I

## *Modélisation d'un Système photovoltaïque*

### **I.1. Introduction**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprises dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (cellules Photovoltaïque PV ). L'association de plusieurs cellules PV en série et /ou parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV). Ce GPV a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du générateur PV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ . La détermination du point de fonctionnement du GPV (Générateur Photovoltaïque) dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. Ce point de fonctionnement est plus ou moins éloigné du PPM qui est caractérisé par le courant et la tension optimaux)[1].

### **I.2. Générateur photovoltaïque**

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit.

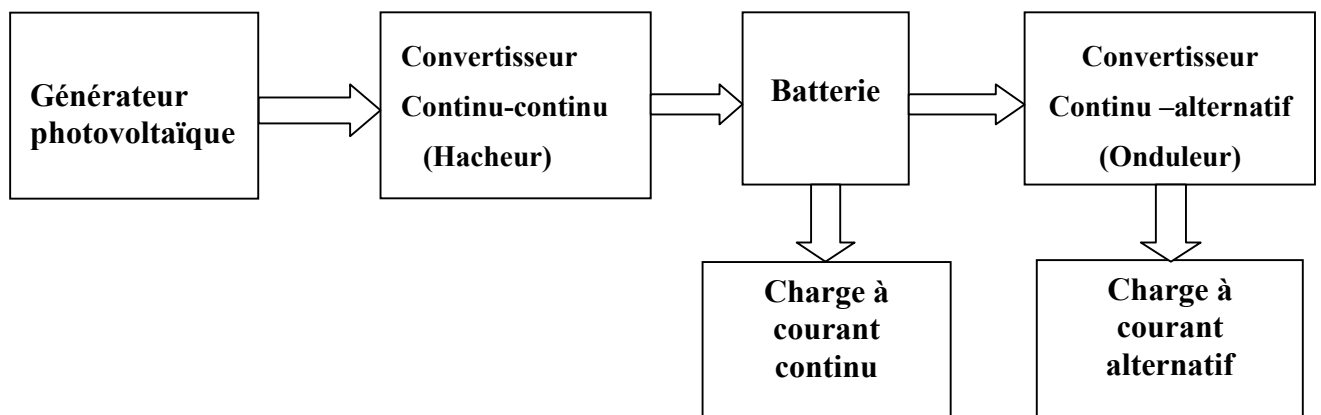
très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu. Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif (cas par exemple des applications connectées au réseau).

### I.3. Effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toute fois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [2].



**Figure I.1:** Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque

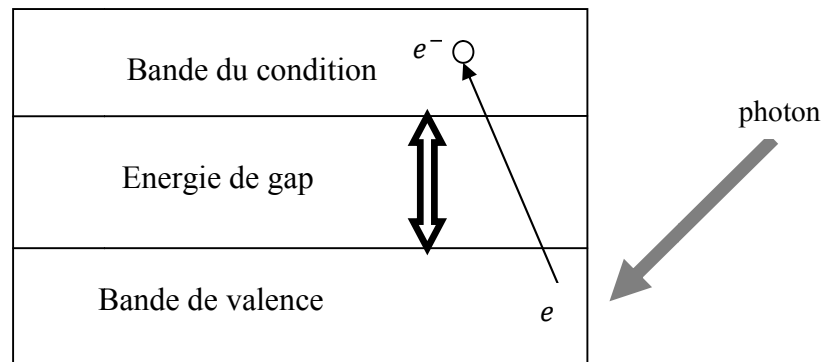
### I.4. Cellules photovoltaïques

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du " bande gap ",  $E_g$  en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin, et de 1.7 eV pour le silicium amorphe. La figure I.2 montre le phénomène de conduction dans les matériaux semi-conducteurs.

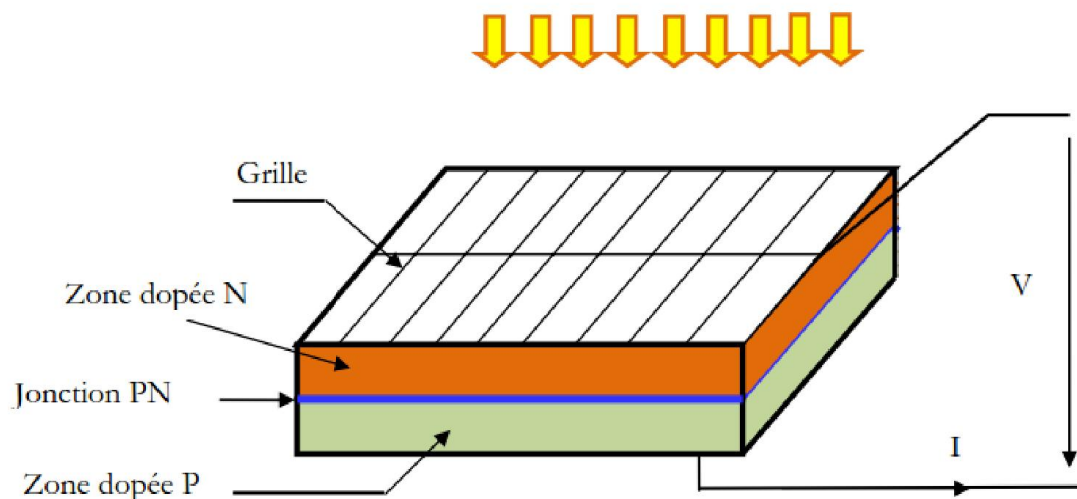
Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule. Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite vont libérer un électron négatif, laissant un " trou " positif. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique,  $E$ , de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du dopage par des impuretés. Deux méthodes de dopage sont possibles : Dopage de type n, qui consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal; Dopage de type p utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire.



**Figure I.2:** Conduction dans les matériaux semi-conducteurs

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés (Figure I.3).



**Figure I.3:** Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard [3]

### **I.4.1. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)**

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [3]:

**I.4.1.1. Les cellules monocristallines :** Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.

**I.4.1.2. Les cellules poly cristallines :** Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

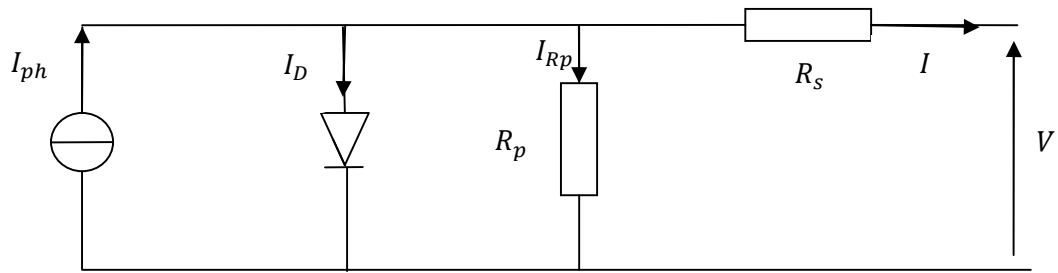
**I.4.1.3. Les cellules amorphes :** Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclaircissement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

#### **I.4.1.4. Autres technologies**

Entre matériaux cristallisés et couche minces amorphe, il existe une autre famille de matériau, beaucoup moins répandu, il s'agit des couches minces polycristallines. Le silicium polycristallin en couche mince serait intéressant notamment s'il pouvait allier le rendement du silicium cristallin à fort éclaircissement et la simplicité de fabrication des films minces. Mais ce matériau ne fait pour le moment que l'objet d'étude de laboratoire. Les autres films polycristallins déjà commercialisées sont à base d'autres semi-conducteurs comme le tellure de cadmium (CdTe) et les alliages à base de cuivre d'indium et de sélénium (CIS ou CIGS) [4].

### **I.4.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode**

Le choix du modèle à cinq paramètres, permet d'effectuer une analyse et une évaluation des performances du module photovoltaïque, les plus proches de la réalité. Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série  $R_S$  représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt  $R_P$  représente le courant de fuite. Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN (figure I.4) :



**Figure I.4:** Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode

A partir du circuit équivalent de la figure I.4, on peut écrire :

$$I_{Ph} = I_D + I + I_{Rp} \quad (I.1)$$

Le courant qui passe dans la résistance  $R_p$  est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (I.2)$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_s \left[ e^{\frac{(V + IR_s)}{nV_t}} - 1 \right] \quad (I.3)$$

avec  $I_s$ : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{KT}} \quad (I.4)$$

Où:

$V_t = \frac{KT}{q}$  : tension thermique à la température  $T$ .

$q$ : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19} C$ )

$K$ : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J/k$ )

$K_1$ : constante ( $1.2 A/cm^2 K^3$ )

$n$ : facteur de non idéalité de la jonction

$T$ : température effective de la cellule en Kelvin

$E_g$ : énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV)

Donc l'expression de la caractéristique  $I(V)$  est:

$$I = I_{Ph} - I_s \left[ e^{\frac{(V + IR_s)}{nV_t}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (I.5)$$

### I.4.3. Modèle d'une cellule à deux diodes

La figure I.5 présente le circuit équivalent de la cellule solaire à deux diodes.

L'expression du courant basé sur ce modèle s'écrirait:

$$I = I_{Ph} - I_{S1} \left[ e^{\frac{(V+IR_S)}{n_1 V_t}} - 1 \right] - I_{S2} \left[ e^{\frac{(V+IR_S)}{n_2 V_t}} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (I.6)$$

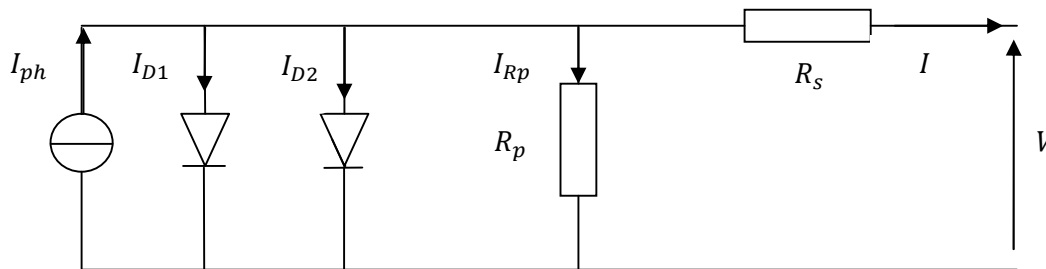
Tel que :

$$I_{S1} = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad \text{et} \quad I_{S2} = K_2 T^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

Avec :

$K_1$ : constante ( $1.2 \text{ A/cm}^2 \text{K}^3$ ).

$K_2$ : constante ( $2.9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{K}^{\frac{5}{2}}$ ).



**Figure I.5:** Schéma équivalent de la cellule solaire à deux diodes

Où le premier terme de l'exponentielle correspond à des phénomènes de conduction des électrons de la zone neutre de la jonction (diffusion et recombinaison) avec  $n_1 \approx 1$  et le seconde terme de l'exponentiel correspond à la recombinaison des porteurs dans la zone de charge avec  $n_2 \approx 2$  [5].

### I.4.4. Modélisation de la cellule photovoltaïque

Rappelons l'équation donnant la caractéristique  $I(V)$  de la cellule basée sur le circuit équivalent à une diode :

$$I = I_{Ph} - I_S \left[ e^{\frac{(V+IR_S)}{n V_t}} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (I.7)$$

**Calcul de  $I_{ph}$** : Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  représente le courant maximum généré par la cellule. Il est produit lorsqu'elle est soumise à un court circuit  $V = 0$ . Comme  $R_s \ll R_p$ , on peut admettre que  $I_{ph} \approx I_{cc}$  pour ( $G=1000W/m^2$ ). L'équation (I.7) devient :

$$I = I_{cc} - I_s \left[ e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (I.8)$$

**Calcul de  $I_s$** : La tension en circuit ouvert  $V_{CO}$  est calculée lorsque le courant est nul [9], comme suit:

$$V_{CO} = nV_T \ln \left( 1 + \frac{I_{cc}}{I_s} \right) \quad (I.9)$$

Comme  $I_{cc} \gg I_s$ , il est possible aussi de calculer  $V_{CO}$  par la relation suivante :

$$V_{CO} = nV_T \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} \right) \quad (I.10)$$

Le courant de saturation inverse de référence de la diode  $I_{sr}$  est donné par :

$$I_{sr} = I_{ccr} / \left[ e^{\frac{V_{CO}}{nV_{Tref}}} - 1 \right] \quad (I.11)$$

avec:

$V_{Tref}$  : la tension thermique pour une température de référence  $T_{ref}$

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ( $R_p = \infty$ ), l'équation (I.8) se simplifiée à :

$$I = I_{cc} - I_s \left[ e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} - 1 \right] \quad (I.12)$$

Où

$I$ : le courant fourni par la cellule.

$V$ : la tension aux bornes de la cellule.

**Calcul de la résistance série dans le point  $V_{co}$** : La différentiation de l'équation (I.12), donne :

$$dI = 0 - I_s \left( \frac{dV + R_s dI}{nV_t} \right) e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} \quad (I.13)$$

Ce qui en résulte:

$$R_s = -\frac{dV}{dI} - \frac{nV_t}{I_s e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}}} \quad (I.14)$$

En circuit ouvert la tension est  $V = V_{co}$  et l'équation (I.14) devient :

$$R_s = -\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} - \frac{nV_{Tref}}{I_{sr} e^{\frac{nV_{Tref}}{V_{co}}}} \quad (I.15)$$

Où  $\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}}$  est la pente de la courbe  $I(V)$  dans le point  $V = V_{co}$  (calculer à partir de la courbe  $I(V)$  dans la fiche technique du module puis diviser par le nombre de cellules en série) [6].

On réécrit l'équation (I.12) sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{cc} - I - I_s \left[ e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_T}} - 1 \right] \quad (I.16)$$

La méthode de newton est utilisée généralement pour résoudre l'équation non linéaire (I.16). Rappelons que la méthode de newton est exprimée par [7] :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (I.17)$$

Où :

$f'(x_n)$  : dérivée de la fonction  $f(x_n)$  .

$x_n$  : valeur actuelle de  $x$ .

$x_{n+1}$  : valeur prochaine de  $x$ .

L'application de la méthode de newton permet de calculer la valeur du courant  $I$  pour chaque itération par :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_n - I_s \left[ e^{\frac{(V+R_s I_n)}{nV_T}} - 1 \right]}{-1 - I_s \left( \frac{R_s}{nV_T} \right) \cdot \left[ e^{\frac{(V+I_n R_s)}{nV_T}} \right]} \quad (I.18)$$

Les équations établies jusqu'à présent ne sont valables que pour un mode de fonctionnement spécifique en termes d'éclairement et de température. Pour généraliser la modélisation pour différents éclaircements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

Alors la nouvelle valeur du courant de court circuit  $I_{cc}$  pour une irradiation  $G$  et une température  $T$  données est calculé selon l'équation suivante :

$$I_{cc}(G, T) = I_{ccr} \frac{G}{1000} [1 + a(T - T_{ref})] \quad (I.19)$$

Avec :

$I_{ccr}$  : le courant de court-circuit mesuré sous une irradiation  $1000W/m^2$

$a$ : le coefficient de variation du courant en fonction de température ( $a=0.65e-3$ ).

$T_{ref}$  : la température de référence, 298K (25°C).

Le courant de saturation de la diode dépend de la température. Sa valeur pour une température  $T$  donnée est calculée par :

$$I_s(T) = I_{sr}(T_{ref}) \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 e^{\left(\frac{-qE_g}{nk}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)} \quad (I.20)$$

## I.5. Puissance d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique  $P(W)$  disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = VI \quad (I.21)$$

$P(W)$  : Puissance fournie par la cellule PV.

$V(V)$  : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I(A)$  : Intensité débitée par la cellule PV.

### I.5.1. Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{max,idéale}$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :

$$P_{max,idéale} = V_{co} I_{cc} \quad (I.22)$$

avec:

$P_{max,idéale}(W)$  : La puissance fournie par la cellule PV.

$V_{co}(V)$  : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I_{cc}(A)$  : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (figure I.6), et la tension au point de puissance maximale  $V_{PMax}$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , de même que le courant fourni  $I_{PMax}$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{cc}$ . L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{Max} = V_{PMax} I_{PMax} \quad (I.23)$$

### I.5.2. Facteur de forme d'une cellule PV

On appelle facteur de forme  $f$  le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule  $P_{Max}$ , dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

$$f = \frac{P_{Max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.24)$$

Avec :

$f$ : Facteur de forme.

$P_{Max}$  (W) : Puissance maximale fournie par une cellule PV.

$V_{CO}$  (V) : Tension de circuit ouvert.

$I_{cc}$  (A) : Intensité de court-circuit.

Le facteur de forme  $f$  est de l'ordre de 70 % pour une cellule de fabrication industrielle.

### I.6. Constitution d'un générateur photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

#### I.6.1. Association en série

En additionnant des cellules (modules) identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [8].

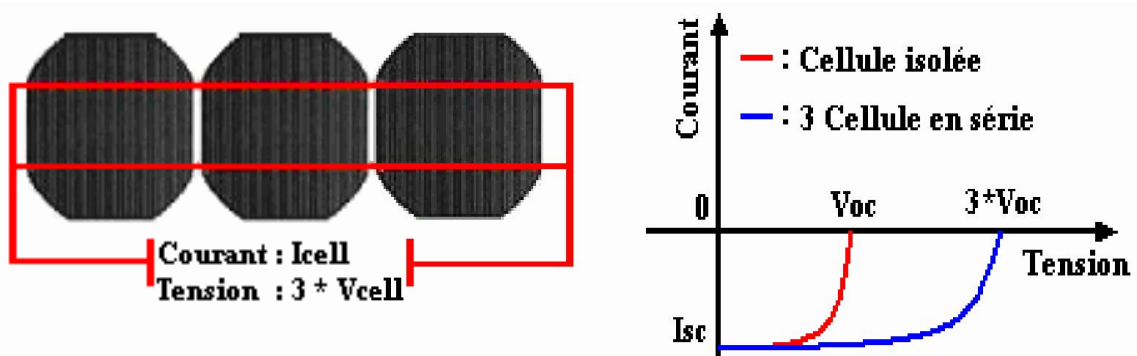


Figure 1.6: Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension

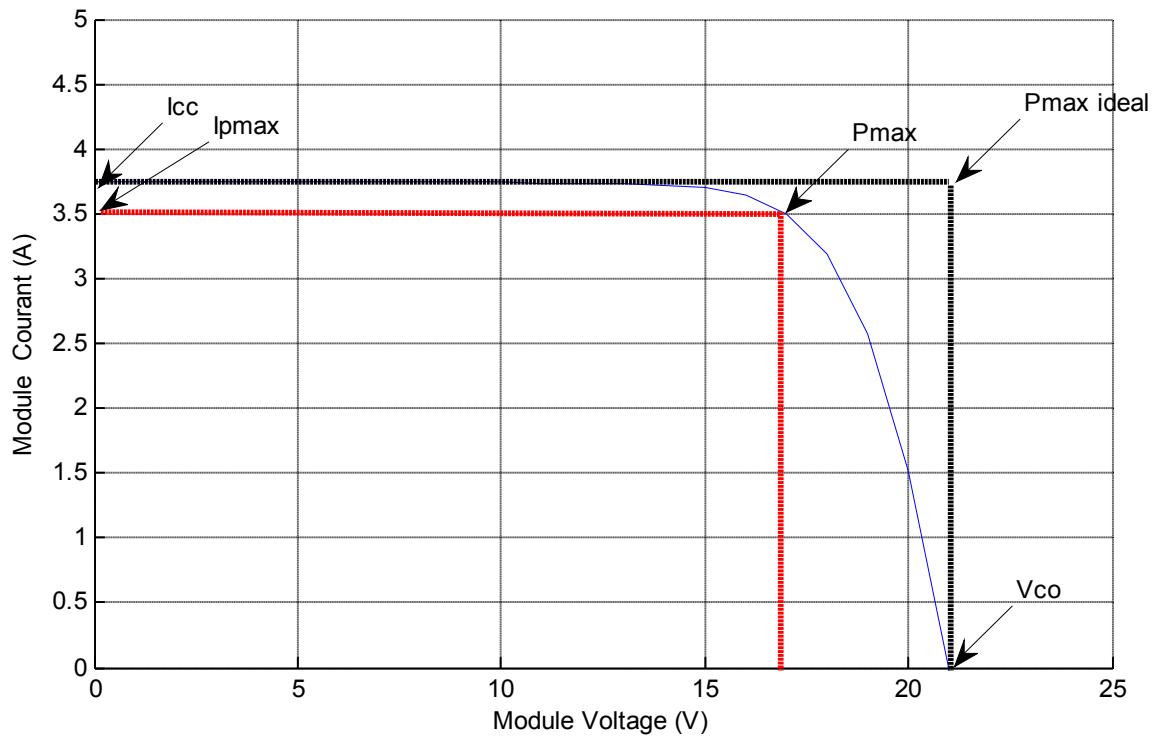


Figure I.7 : Puissances maximale idéale et pratique

### I.6.2. Association en parallèle

En additionnant des cellules (modules) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en parallèle dans la branche [9].

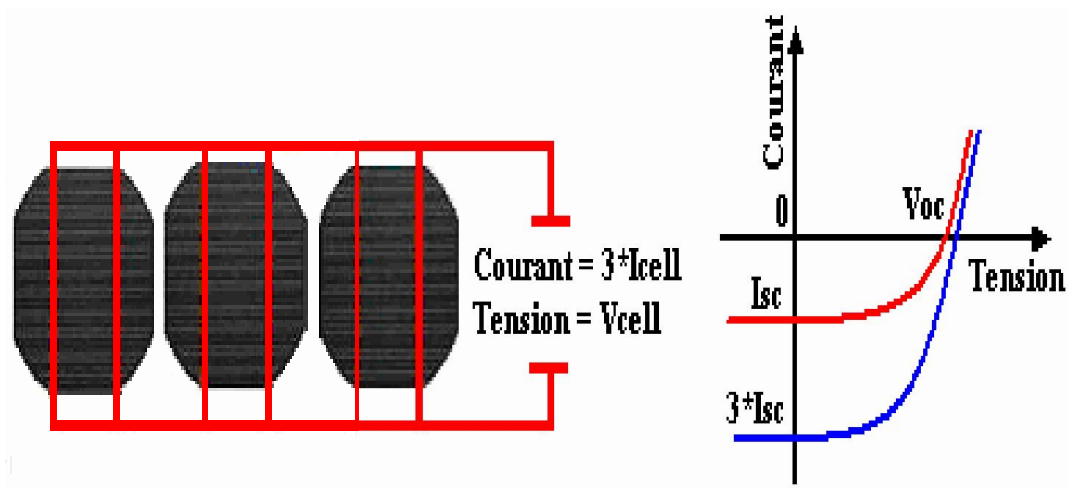


Figure 1.8 : Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension

### I.7. Développement du modèle mathématique du module PV

Les principales équations utilisées dans le modèle mathématique du module sont les suivantes [10] :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_M = n_p I \\ I_{ccM} = n_p I_{cc} \\ V_M = n_s V \\ V_{coM} = n_s V_{co} \\ I_{sM} = n_p I_s \end{array} \right. \quad (I.25)$$

Avec :

M: indice affecté au module.

$n_p$  : nombre de cellules en sérié.

$n_s$  : nombre de cellules en parallèle.

Ce qui donne pour un module :

$$I_M = I_{ccM} - I_{sM} \left[ e^{\frac{(V_M + I_M R_{sM})}{n_s n V_T}} - 1 \right] \quad (I.26)$$

Avec :

$R_{sM} = \frac{n_s}{n_p} R_s$  : résistance série du module.

En circuit ouvert et ( $T=T_{ref}$ ) partir de l'équation (I. 26) le courant  $I_{srM}$  peut s'écrire pour un module comme suit :

$$I_{srM} = \frac{I_{ccrM}}{\left[ e^{\frac{(V_{coM})}{n_s n V_{tref}}} - 1 \right]} \quad (I.27)$$

Avec :

$I_{srM}$  : Courant de saturation référence du module.

$I_{ccrM}$  : Courant de court circuit référence du module.

Pour généraliser la modélisation pour différentes éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

la nouvelle valeur du courant de court circuit du module  $I_{ccM}$  pour une irradiation G et une température T données est calculé selon l'équation suivante :

$$I_{ccM}(G, T) = I_{ccrM} \frac{G}{1000} [1 + a(T - T_{ref})] \quad (I.28)$$

Le courant de saturation dépend  $I_{sM}$  de la température. Sa valeur pour une température T donnée est calculée par :

$$I_{sM}(T) = I_{srM}(T_{ref}) \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\left( \frac{-qE_g}{nk} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (I.29)$$

### I.7.1. Simulation du module (panneau) photovoltaïque

Pour réaliser cette simulation, nous avons choisi le module photovoltaïque MSX 60 de BP Solaire. La série MSX fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe des charges à courant continu, ou des charges à courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 36 cellules solaires multicristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 60W. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau (I.1) [11] :

**Tableau I.1** : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque MSX 60

Puissance maximale	$(P_{max})$	60 W
Tension à $P_{max}$	$(V_{Pmax})$	17.1 V
Courant à $P_{max}$	$(I_{Pmax})$	3.5 A
Tension à circuit ouvert	$(V_{CO})$	21.1V
Courant de court circuit de référence	$(I_{CCr})$	3.8 A
Coefficient de la température de $V_{CO}$		$-80 \pm 20 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
Coefficient de la température de $I_{CC}$ (a)		$0.065 \pm 0.015\% / ^\circ\text{C}$
Coefficient de la température de la puissance		$-0.5 \pm 0.05\% / ^\circ\text{C}$
Température nominale d'opération de la cellule (NOCT)		$47 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$

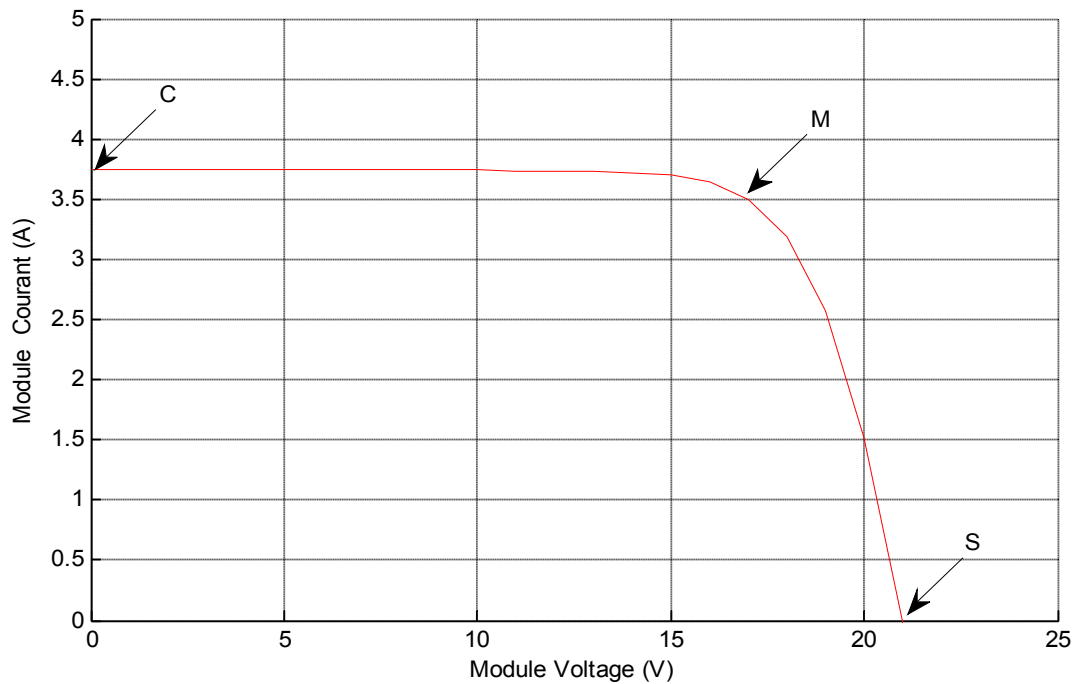
### I.8. Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque

La caractéristique courant-tension illustrée dans la figure (I.9) décrit le comportement du module photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (niveau d'éclairement  $G=1000 \text{ W}/\text{m}^2$  et température ambiante  $T=25^\circ\text{C}$ ).

La courbe  $I(V)$  du module photovoltaïque passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit  $I_{ccM}$  en C.
- La tension de circuit ouvert  $V_{coM}$  en S.
- La puissance maximale  $P_{max}$  en M.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_{max}$  où la puissance se trouve maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_{max}$ .



**Figure I. 9:** Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque MSX 60

## I. 9. Comportement d'un module photovoltaïque

De par sa constitution, un module PV aura un comportement plus ou moins optimisé et pourra ainsi produire plus ou moins de puissance.

Dans la suite de l'étude, nous supposons que les connexions inter-cellules sont idéales et que chaque cellule est identique à l'ensemble dans son comportement, sa température et ses caractéristiques. L'objectif est ici de montrer l'influence d'un certain nombre de paramètres extérieurs sur le module PV.

### I. 9.1. Influence de la température et l'ensoleillement sur le rendement

On peut remarquer que la caractéristique I(V) d'un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'insolation et de la température. Ceci devient très évident en évaluant l'équation (I.28) pour des valeurs choisies de la température et de l'insolation et en traçant les résultats.

### I. 9. 2. Influence de l'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangé. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire  $I_{CCM}$  proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{coM}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  du panneau solaire vers les puissances inférieures

Les graphes suivants représentent les caractéristiques P(V) et I(V) respectivement d'un module photovoltaïque pour une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et un ensoleillement variable.

### I.9.3. Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 25°C à 50°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer que l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV.

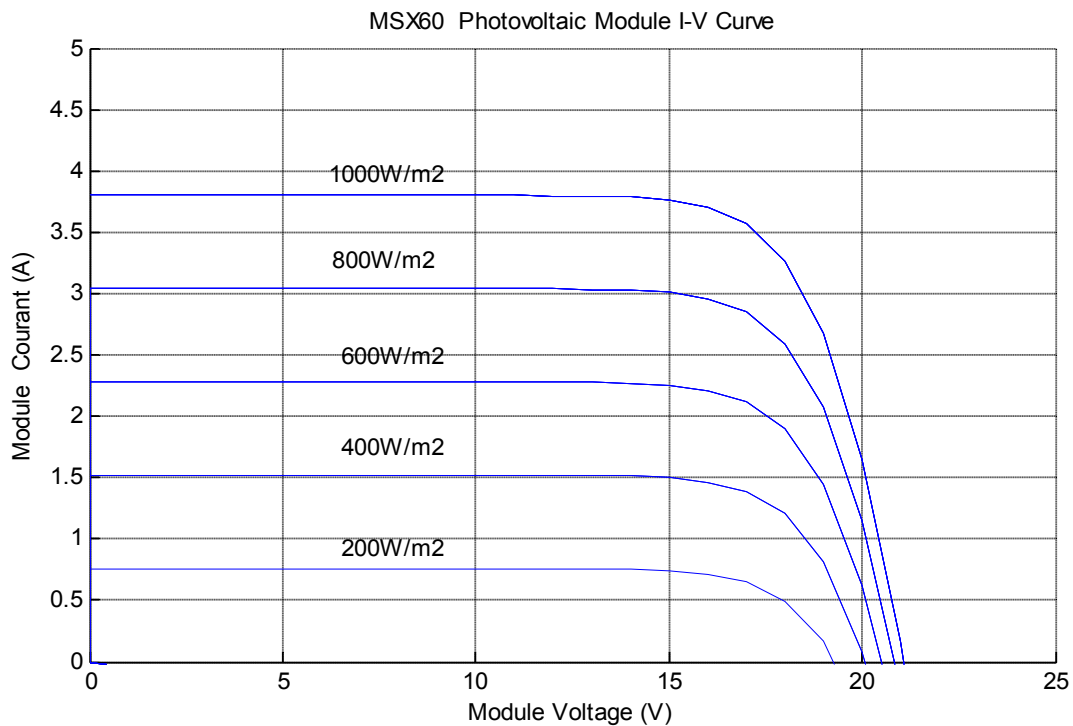


Figure I.10: Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements

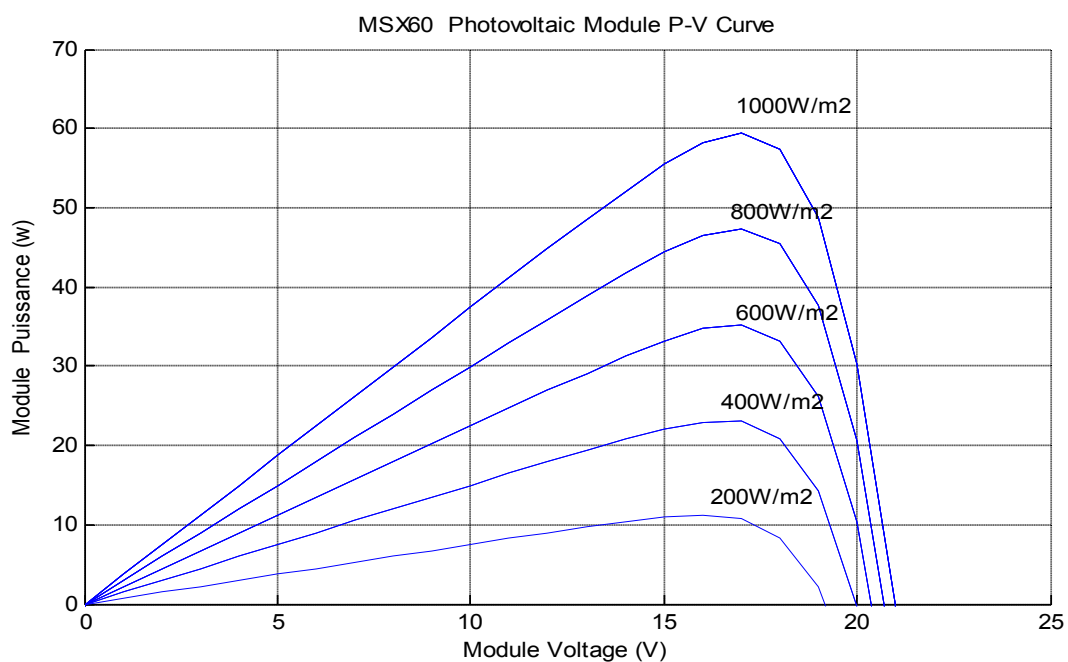


Figure I.11: Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements.

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

Ceci implique donc que :

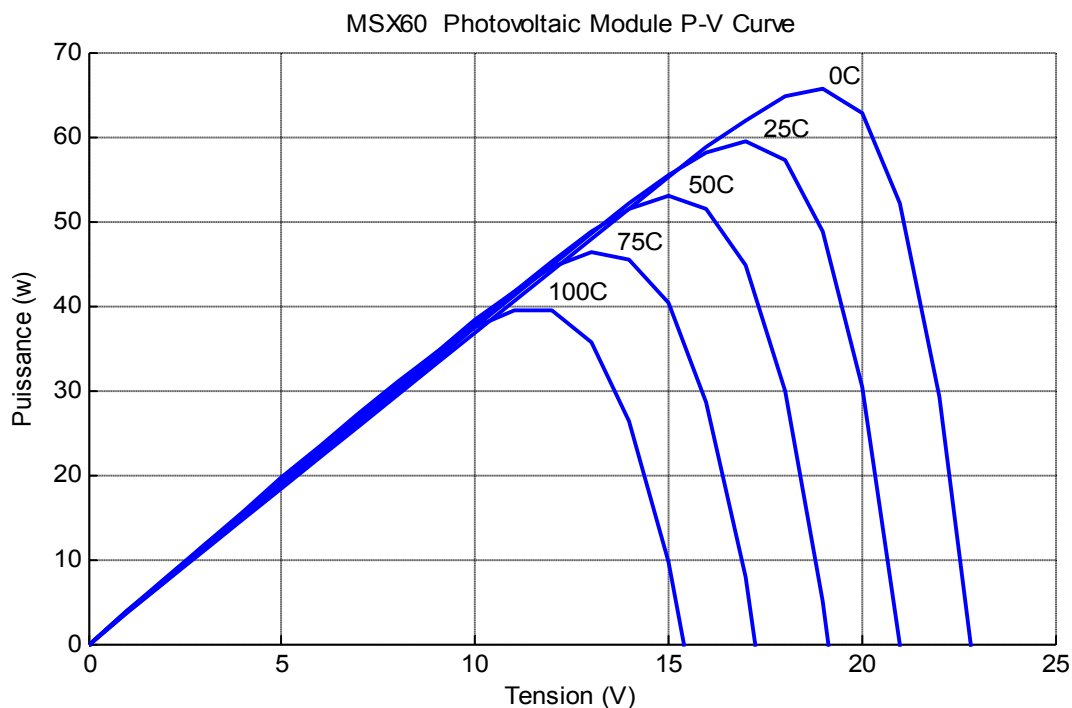
- La puissance optimale de la cellule ( $P_{max}$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

#### I.9.4. Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)

La figure (I.12) présente des courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C.

Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que  $100 \text{ W/m}^2$ , la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique). Seules les photopiles au silicium amorphe permettent un fonctionnement dans ces conditions, grâce à une tension encore assez élevée. C'est pour cette raison que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel, contrairement au silicium cristallin. Ceci va beaucoup contribuer dans notre choix de cellules.



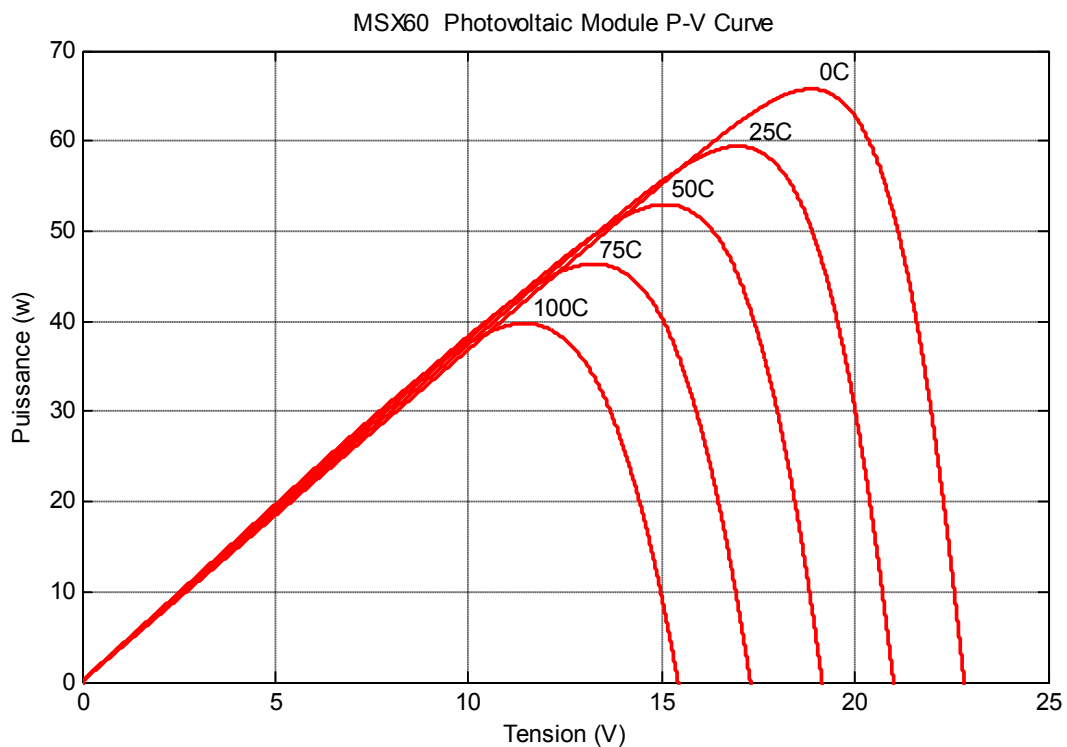
**Figure I.12** : Courbes I(V) d'un module PV pour différentes températures à  $G=1000 \text{ W/m}^2$

### I.10. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

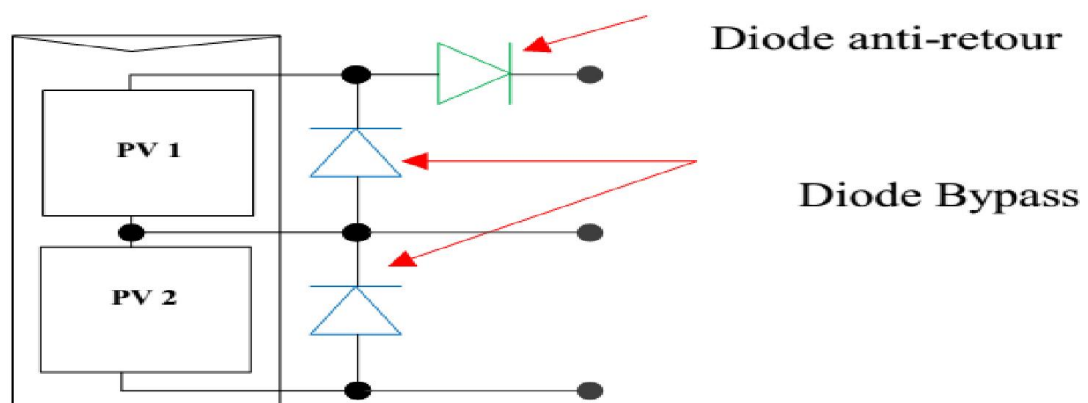
Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules photovoltaïques pour éviter les courants négatifs dans le générateur photovoltaïque (diode anti-retour) ;
- la protection lors de la mise en série de modules photovoltaïques permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

La figure (I.14) montre la schématique classiquement adoptée pour la protection du GPV élémentaire [13].



**Figure I.13** : Courbes P(V) d'un module PV pour différentes températures à  $G=1000W/m^2$



**Figure I.14** : Schématisation d'un générateur photovoltaïque élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

### **I.11. Conclusion**

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 la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de la conversion photovoltaïque, la modalisation d'une cellule, d'un module photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque.

L'association de plusieurs cellules en série et/ou en parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et/ou en parallèle pour construire le générateur photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

Nous avons présenté également l'influence des conditions climatiques (irradiation solaire, degré de température) et l'influence de la résistance série sur les courbes I-V et PV du module photovoltaïque.

# *Chapitre II*

## *Commande du convertisseur boost*

### **II.1. Introduction**

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. On a vu dans le chapitre précédent que les caractéristiques I-V et P-V du générateur dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique commandé permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont, connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) [13].

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi dans ce contexte, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées [14].

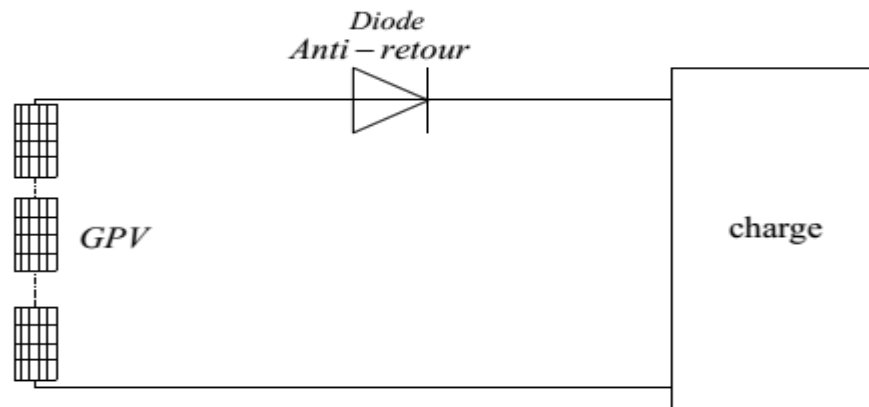
Dans ce chapitre l'étude sera focalisée principalement sur un méthodes de recherche de point de puissance maximale (MPP) du générateur photovoltaïque. Il s'agit des algorithmes perturbation. ils seront appliqués sur un convertisseur DC-DC de type boost.

### **II.2. Connexion directe source charge**

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et au très haut degré de fiabilité.

La configuration d'une connexion directe du générateur photovoltaïque (GPV)-Charge par le biais d'une diode anti-retour est illustrée sur la figure (II.1). Dans le cas où, la charge est une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur. La batterie pourrait donc se décharger sur le GPV et entraîner par conséquent un endommagement irréversible. De ce fait, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge.

L'inconvénient de cette configuration, est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de  $P_{\max}$  disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti [15].



**Figure II.1:** Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour

En effet, le point de fonctionnement du GPV résulte de l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et la caractéristique I-V de la charge. Il est à noter que dans ce type de connexion directe la nature de la charge est continue (DC) car une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion directe du fait que le GPV fournit un courant continu. Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, nous avons obligatoirement besoin d'un étage d'adaptation spécifique de type onduleur.

Trois types de charges DC existent à savoir : charge purement résistive, charge de type source de tension et charge de type source de courant.

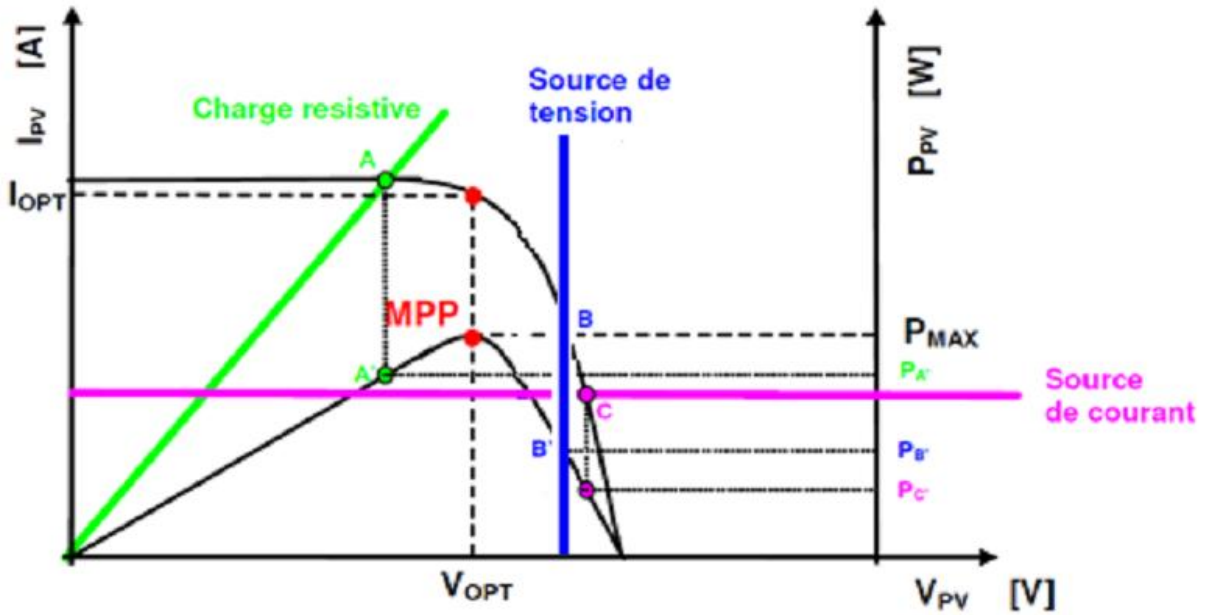
Sur la figure (II.2), nous avons représenté les caractéristiques I-V et P-V d'un GPV ainsi que les caractéristiques I-V pour les trois types de charges. Le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale ( $P_{\max}$ ) pour un courant optimal ( $I_{\text{pot}}$ ) et une tension optimale ( $V_{\text{pot}}$ ) est le point d'intersection entre les caractéristiques I-V du GPV et celles des trois types de charges :

- ✓ point A pour une charge résistive ;
- ✓ point B pour une charge de type source de tension ;
- ✓ point C pour une charge de type source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{\max}$ . Ce qui nous permet de dire qu'une perte d'une partie de la puissance délivrable aux bornes du générateur PV entraînant à la longue des pertes de production énergétiques importantes [16].

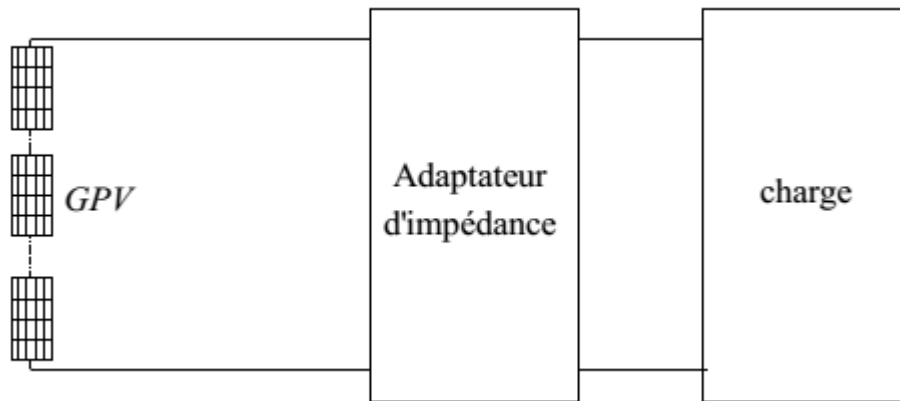
### II.2.1. Définition et étude de l'étage d'adaptation entre un générateur et une charge continue

Il est connu qu'un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires avec des MPP. Ces caractéristiques dépendent entre autres du niveau d'éclairement et de la température des cellules. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.



**Figure II.2:** Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique la plus usuelle consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge (figure (II.3)). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{\max}$  disponible [17].



**Figure II.3:** Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée  $P_{\max}$  ( $P_{\max} = I_{\text{opt}} \cdot V_{\text{opt}}$ , où  $I_{\text{opt}}$  et  $V_{\text{opt}}$  représentent respectivement la tension et le courants optimaux du générateur photovoltaïque pour une courbe I-V donnée) tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

Pour que le GPV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge.

## II.2.2. Convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les convertisseurs DC-DC ont de bons rendements. Généralement, le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé. Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance ; s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite. Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation  $f_s$  fixe et un rapport cyclique  $D$  variable.

## II.2.3. Types des convertisseurs DC-DC

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Elles sont classées par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence. Elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le flyback, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [18].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [18]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck);
- Elévateurs (Boost);
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

La topologie buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur buck est habituellement employé come chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau de service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension tel que le buck-boost, le cuk, et le sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vu comme des transformateurs DC-DC.

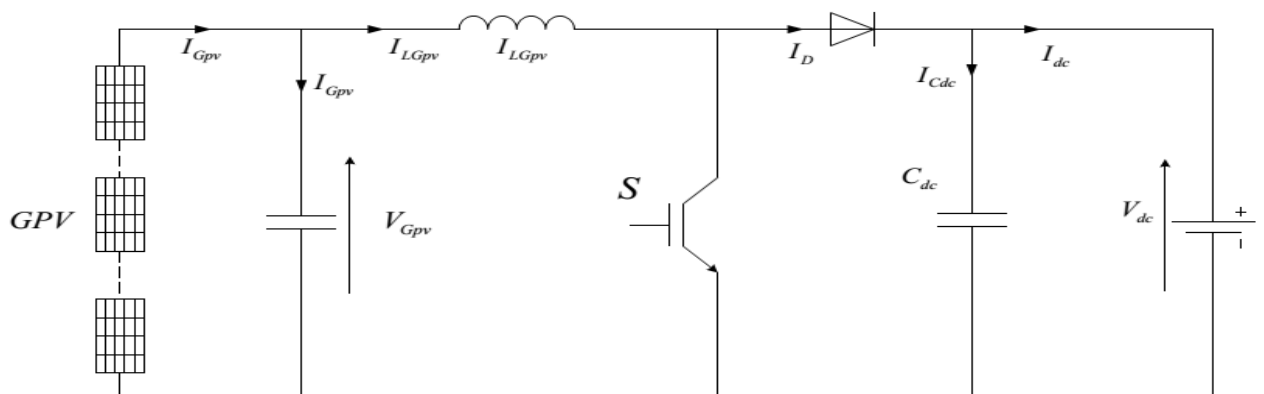
Le tableau II.1 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques avec et sans isolement galvanique. Où  $D$  désigne le rapport cyclique du convertisseur et  $K$  le rapport de transformation du transformateur d'isolement [19].

**Tableau II.1:** Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC

Convertisseur	Rapport de transformation en fonction de (D)	Isolement galvanique
Buck	D	Non
Boost	$\frac{1}{1-D}$	Non
Buck-Boost	$\frac{-D}{1-D}$	Non
Cuk	$\frac{-D}{1-D}$	Non
SEPIC	$\frac{D}{1-D}$	Non
Flyback	$K \frac{D}{1-D}$	OUI
Push-pull	KD	OUI
Forward	KD	OUI

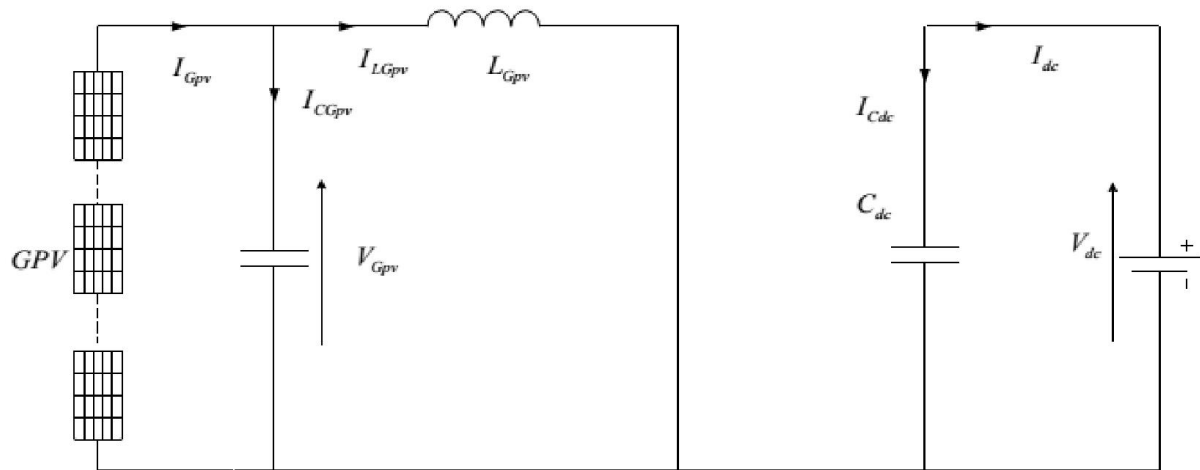
### II.3. Convertisseur parallèle ( Boost)

Dans le convertisseur boost, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, d'où son nom (survolteur). Cette structure demande un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (MOSFET, IGBT) et une diode (amorçage et blocage spontanés) comme il est illustré dans la figure (II.4).

**Figure II.4:** Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Boost

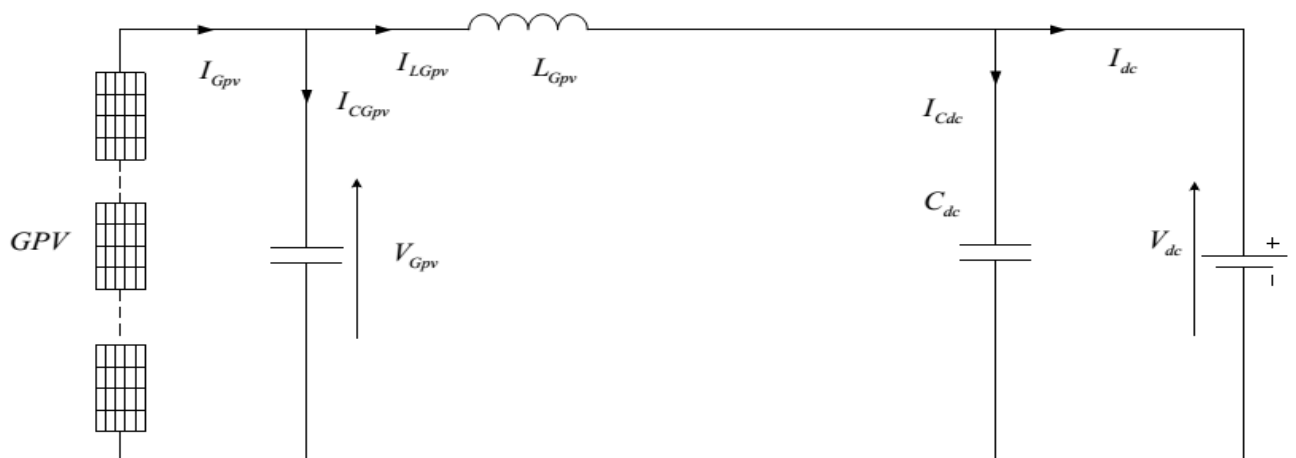
### II.3.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un boost est basé sur la position du commutateur S ouvert/fermé. Pendant l'intervalle de temps  $T_{ON} = DT_s$ , où D est le rapport cyclique l'interrupteur fermé connecte l'entrée (à travers l'inductance) à la masse, et donc la puissance stockée dans la bobine augmente (par l'augmentation du courant la traversant). La diode est alors bloquée, ainsi aucun courant ne peut charger la batterie comme le montre la figure (II.5).



**Figure II.5 :** Circuit équivalent du convertisseur boost avec S fermé

Lorsque l'interrupteur est ouvert sur l'intervalle  $T_{OFF} = (1 - D)T_s$ , l'étage de sortie reçoit l'énergie emmagasinée dans la bobine ainsi que celle provenant directement de l'entrée (du module photovoltaïque). En régime établi, le condensateur de sortie est supposé avoir une capacité suffisante pour assurer une tension de sortie constante  $V_{dc}$  (et donc le courant traversant le condensateur de sortie est supposé nul) comme il est illustré dans la figure (II.6) [20].



**Figure II.6 :** Circuit équivalent du convertisseur boost avec S ouvert

### II.3.2. Fonctionnement en mode de conduction continu (MCC)

En régime établi, ce mode se caractérise par le fait d'avoir en permanence  $I_{LGpv} > 0$ .

Lorsque l'interrupteur est fermé nous avons :

$$V_{LGpv} = V_{Gpv} \quad (\text{II.1})$$

Tandis que lorsque l'interrupteur est ouvert, la loi des mailles fournit :

$$V_{LGpv} = V_{Gpv} - V_{dc} \quad (\text{II.2})$$

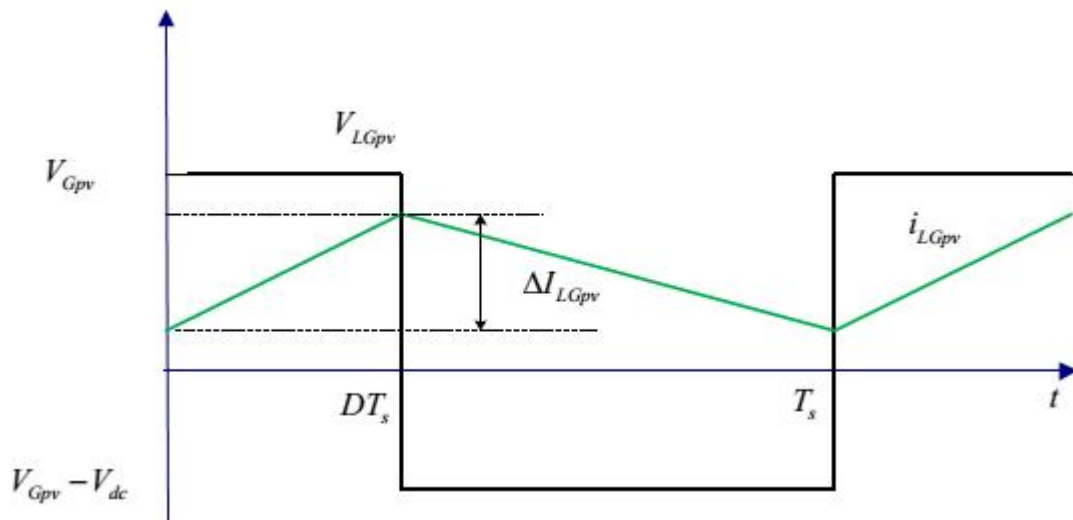
La tension aux bornes de la bobine est donnée par :

$$V_{LGpv} = L_{Gpv} \frac{di_{LGpv}}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Donc le courant de la bobine s'écrit comme :

$$i_{LGpv} = \int_0^{DT_s} \frac{di_{LGpv}}{L_{Gpv}} dt + \int_{DT_s}^{T_s} \frac{V_{LGpv} - V_{dc}}{L_{Gpv}} dt \quad (\text{II.4})$$

Le tracé représentatif du courant qui traverse la bobine et la tension à ces bornes est donné par la figure (II.7).



**Figure II.7 :** Fonctionnement de boost en mode continu

Où

$\Delta I_{LGpv}$  représente l'ondulation du courant  $i_{LGpv}$ . Nous supposons plus tard que notre MPPT travaillera toujours en mode continu, alors il est nécessaire de faire fonctionner le convertisseur dans ce mode.

La tension moyenne aux bornes de l'inductance  $L_{Gpv}$  étant nulle, ce qui en résulte :

$$V_{Gpv} T_{ON} = T_{OFF} (V_{dc} - V_{Gpv}) \quad (\text{II.5})$$

Ceci conduit à :

$$V_{dc} = \frac{1}{1-D} V_{Gpv} \quad (\text{II.6})$$

En supposant que les pertes sont négligeables, nous obtenons :

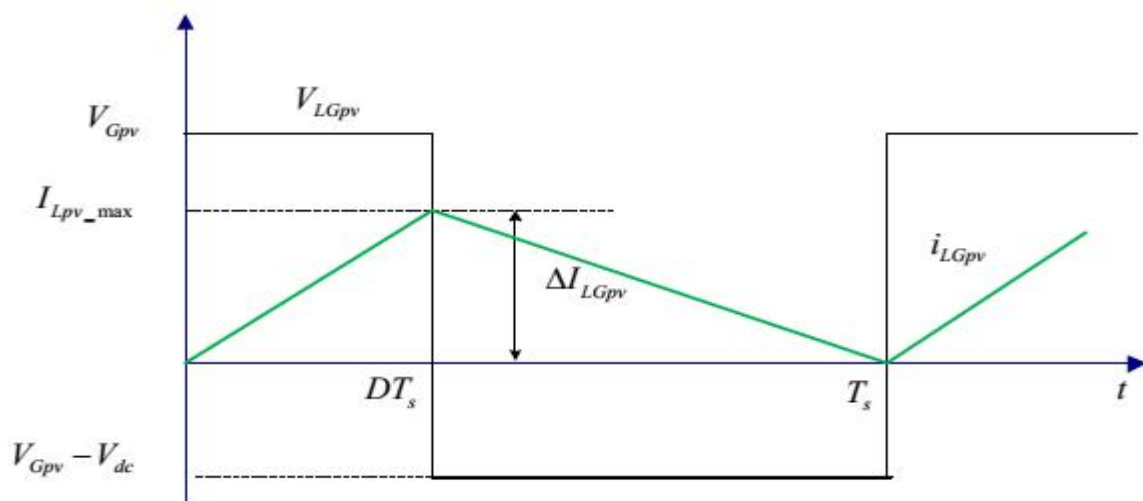
$$V_{Gpv} I_{Gpv} = V_{dc} I_{dc} \quad (\text{II.7})$$

D où, d'après l'équation (II.6) on trouve :

$$I_{Gpv} = (1 - D) I_{dc} \quad (\text{II.8})$$

### II.3.2.1. Calcul de la valeur de l'inductance de la bobine assurant un fonctionnement en mode continu

A la frontière entre le mode continu et le mode discontinu le courant traversant l'inductance part de, et revient à, 0 sur une période  $T_s$  comme le représente la figure (II.8) [16].



**Figure II.8:** Frontière entre le mode continu et discontinu

Dans cette situation, le courant moyen à la frontière parcourant la bobine vérifie :

$$I_{LGpv} = \frac{I_{LGpv\_max}}{2} \quad (\text{II.9})$$

Ce qui revient à écrire :

$$I_{LGpv} = \frac{DT_S V_{Gpv}}{2L_{Gpv}} \quad (\text{II.10})$$

A partir de (II.6) et (II.10) on trouve :

$$I_{LGpv} = \frac{D(1-D)T_S V_{dc}}{2L_{Gpv}} \quad (\text{II.11})$$

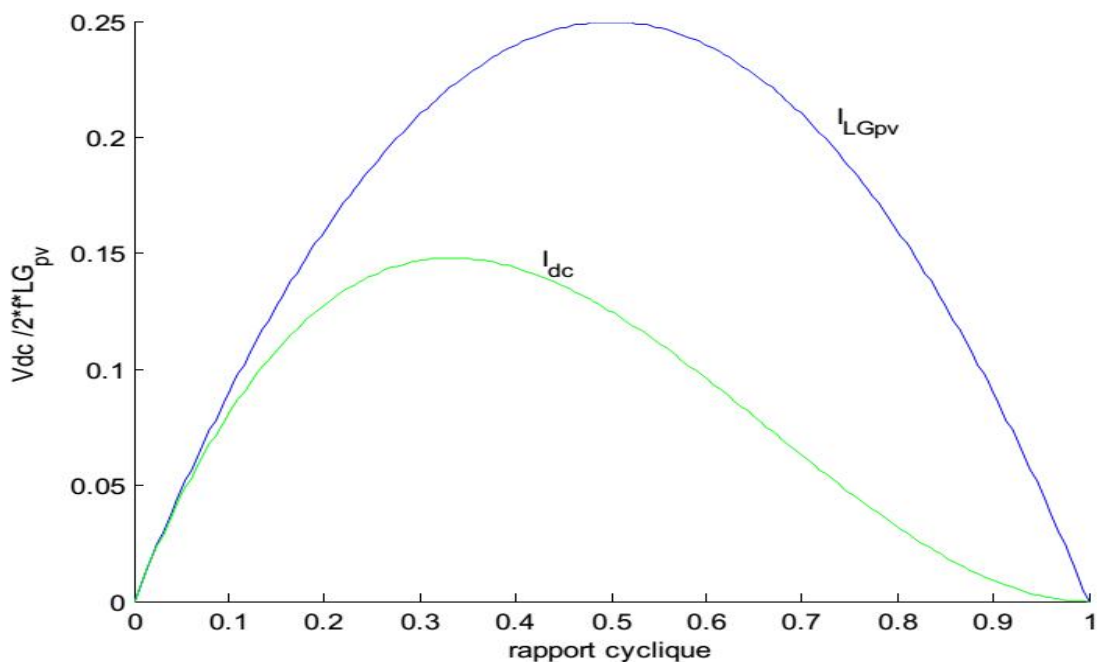
Sachant qu'en régime permanent le courant moyen parcourant le condensateur d'entrée est nul, il vient donc :

$$I_{Gpv} = I_{LGpv} \quad (\text{II.12})$$

Et à partir de (II.8), (II.11), et (II.12), on trouve :

$$I_{dc} = \frac{D(1-D)^2 T_S V_{dc}}{2L_{Gpv}} \quad (\text{II.13})$$

En considérant  $V_{dc}$  comme constant, il est alors possible de tracer l'évolution du courant de sortie et celui traversant la bobine dans le cas limite en fonction du rapport cyclique :



**Figure II.9 :** Courant de sortie et celui de la bobine à la limite ( $V_{dc}$  constant)

La figure (II.9) illustre que pour un rapport cyclique  $D$  donné, à  $V_{dc}$  constant, si le courant moyen de sortie descend en dessous de la courbe de  $I_{dc}$  (ou si le courant moyen dans la bobine passe en dessous de la courbe de  $I_{LGpv}$ ), alors le convertisseur passera en mode discontinu.

Ce tracé est important dans le sens où il donne, le courant limite pour être en mode continu, qui est le mode dans lequel on espère de faire fonctionner le convertisseur DC-DC [22].

Le calcul des dérivées des équations (II.11) et (II.13) permet de calculer les valeurs maximales des courants  $I_{dc}$  et  $i_{LGpv}$  respectivement à  $D = \frac{1}{3}$ ,  $D = \frac{1}{2}$ , ce qui donne :

$$I_{dc\_max} = \frac{2 T_S V_{dc}}{27 L_{Gpv}} \quad (\text{II.14})$$

$$I_{LGpv\_max} = \frac{T_S V_{dc}}{8 L_{Gpv}} \quad (\text{II.15})$$

Les équations (II.14), (II.15) peuvent être utilisées pour calculer la valeur d'inductance minimale qui permet de fonctionner le convertisseur en mode de conduction continue. La valeur de cette inductance peut être calculée par l'une des deux équations suivantes :

$$L_{Gpv\_min} = \frac{2 T_S V_{dc}}{27 I_{dc\_max}} \quad (\text{II.16})$$

$$L_{Gpv\_min} = \frac{T_S V_{Gpv}}{8 I_{Gpv\_max}} \quad (\text{II.17})$$

### II.3.2.2. Formes d'ondes

La figure (II.10) donne les formes d'ondes du convertisseur boost dans le cas où S est fermé (figure II.14) ou S est ouvert (figure II.15).

### II.3.2.3. Ondulation du courant

L'ondulation de courant  $\Delta I_{LGpv}$  vérifie, la loi d'ohm aux bornes de  $L_{Gpv}$  pendant le temps  $T_{ON}$  donnée par :

$$V_{LGpv} T_{ON} = L_{Gpv} \Delta I_{LGpv} \quad (\text{II.18})$$

Soit donc :

$$\Delta I_{LGpv} = \frac{V_{Gpv}}{L_{Gpv} f_s} D \quad (\text{II.19})$$

### II.3.2.4. Ondulation de la tension

A partir de la figure (II.10) on peut calculer l'ondulation de la tension comme suit [16] :

$$\Delta V_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} D T_S \quad (\text{II.20})$$

Et à partir (II.8) et (II.20) on trouve :

$$\Delta V_{dc} = \frac{I_{Gpv} D (1-D)}{f_s C_{dc}} \quad (\text{II.21})$$

### II.3.2.5. Dimensionnement des composants

De la figure (II.4) le convertisseur boost est alimenté par la tension du générateur photovoltaïque. Cette tension est égale la tension d'un module au point de puissance maximale multipliée par le nombre des modules en série  $M_S$ .

$$L_{Gpv} = \frac{V_{Gpv} D}{\Delta I_{LGpv} f_s} \quad (\text{II.22})$$

L'ondulation du courant est maximale pour  $D = 1/2$ , Pour  $N_s=8$  et  $N_p=3$ , on a on a :

$V_{Gpv} = 136.8 \text{ V}$ ,  $I_{LGpv} = 10.5 \text{ A}$ . En imposant une ondulation  $\Delta I_{LGpv} = 1\% I_{LGpv}$  avec  $f_s = 50 \text{ kHz}$ , on trouve  $L_{Gpv} = 13.03 * 10^{-3} \text{ H}$ .

### II.3.2.6. Calcul de la capacité du condensateur de sortie

A partir de l'équation (II.21), on calcul la valeur de la capacité  $C_{dc}$  pour une ondulation imposée à la tension aux bornes du condensateur de sortie, tel que :

$$C_{dc} = \frac{I_{Gpv\_moy} D (1-D)}{f_s \Delta V_{dc}} \quad (\text{II.23})$$

L'ondulation du courant est maximale pour  $D = 1/2$ . En choisissant:  $\Delta V_{dc} = 1\% V_{dc}$ , avec  $V_{Gpv} = 136.8$ ,  $I_{LGpv} = 10.5 \text{ A}$ ,  $f_s = 50 \text{ kHz}$  et  $V_{dc} = (1 - D)V_{Gpv}$  alors la valeur minimale est  $C_{dc} = 76.75 * 10^{-6} \text{ F}$ .

### II.3.2.7. Calcul de la capacité du condensateur d'entrée

La valeur de la capacité du condensateur d'entrée est donnée par [23] :

$$C_{Gpv} = \frac{D I_{Gpv\_moy}}{f_s \Delta V_{Gpv}} \quad (\text{II.24})$$

avec:

$V_{Gpv} = 136.8 \text{ V}$ ,  $I_{LGpv} = 10.5 \text{ A}$ ,  $f_s = 50 \text{ kHz}$ ,  $\Delta V_{Gpv} = 1\% V_{Gpv}$ ,  $D = 1/2$   
alors la valeur minimale est  $C_{Gpv} = 76.75 * 10^{-6} \text{ F}$ .

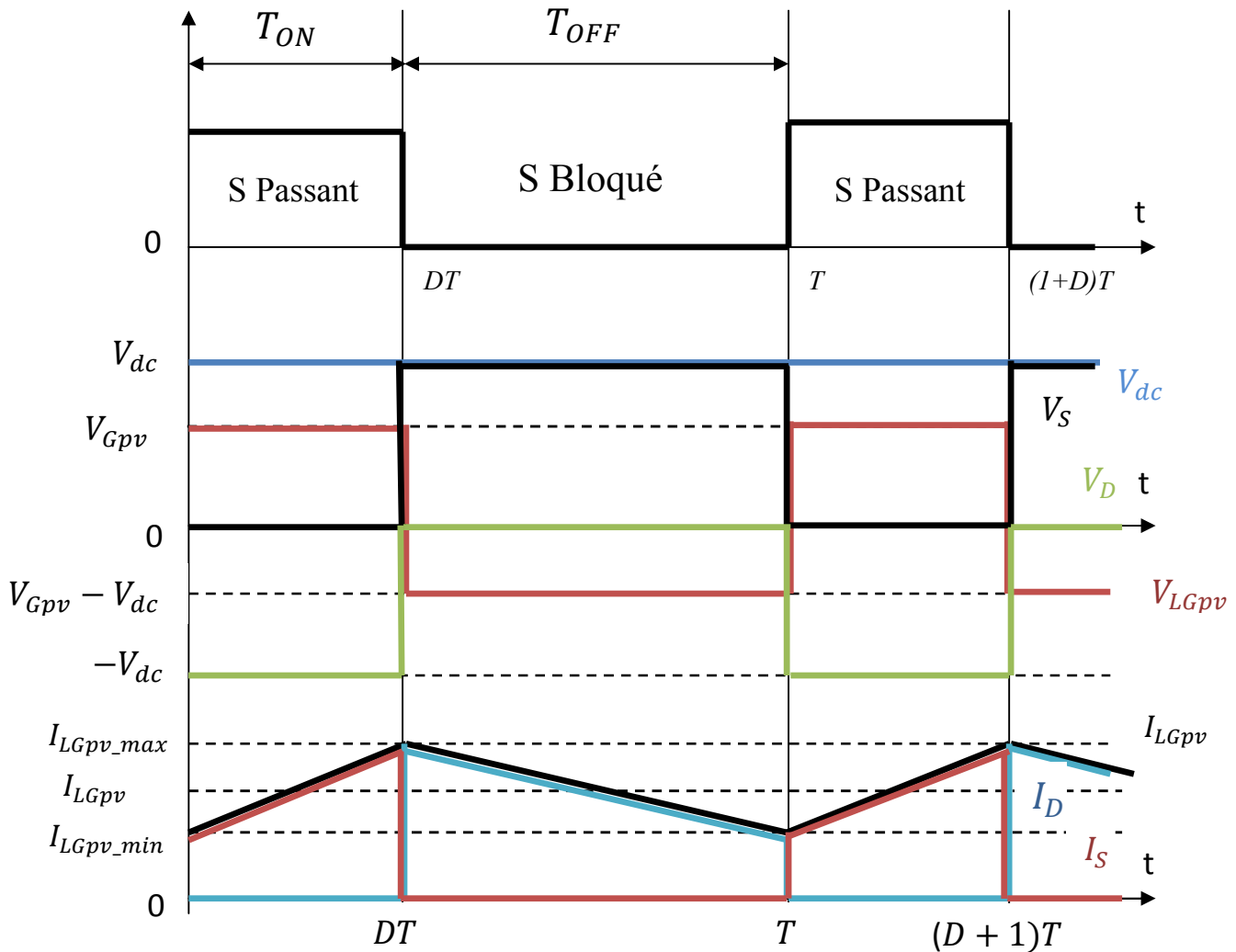


Figure II.10: Formes d'ondes courants/tensions dans un convertisseur boost en mode continu

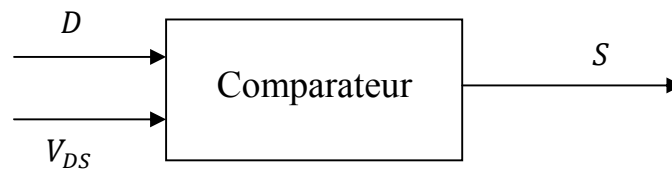
#### II.4. Principe du PWM

Dans les convertisseur DC-DC, la tension de sortie doit être réglée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation  $V$  et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

Une méthode pour réguler la tension de sortie  $V_0(t)$  afin d'obtenir une tension moyenne  $V_{0moy}$  fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur  $D = \frac{t_{ON}}{T}$  sans modifier  $T$ .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur  $S$  devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique  $D$  et une tension en dents de scie  $V_{DS}$  comme suite :



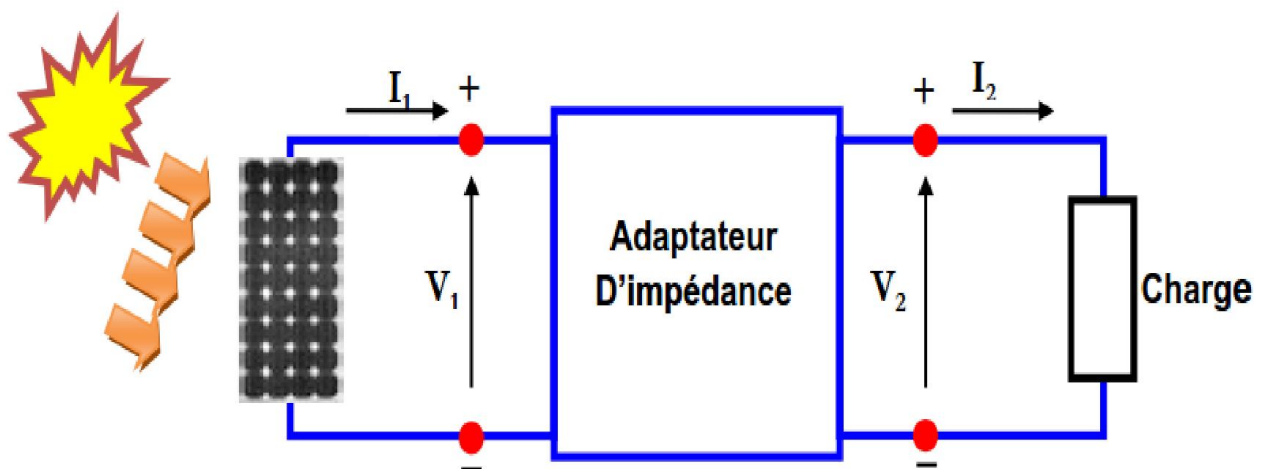
**Figure II.11:** Principe du PWM

- Lorsque  $D > V_{DS}$ :  $S = 1$ , l'interrupteur  $S$  est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque  $D < V_{DS}$ :  $S = 0$ , l'interrupteur  $S$  est commandé à l'ouverture (état OFF).

### I.5. Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une charge

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.1, un générateur PV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des PPM. La production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le générateur PV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge, la technique adoptée classiquement consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge comme décrit dans la figure I.14 ci-dessous. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible [24].

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur GPV à son point de puissance maximale PPM, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction des conditions climatiques.



**Figure I.12:** Etage d'adaptation d'un générateur PV – charge

## I.6.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

### I.6.1 Introduction

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking: MPPT) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules. A noter que la caractéristique d'une cellule est affectée par l'éclairement et de la température.

Notre système doit donc pouvoir évoluer, rapidement et efficacement, en fonction des changements d'illuminations et variation du point de puissance maximale (Maximum Power Point : MPP) [1]. Une possibilité aurait été de fixer un point de fonctionnement, en abaissant la tension du panneau et dans un même temps en augmentant le courant. Or ceci n'est plus valable lorsque le point de puissance maximale change. Ainsi le système MPPT doit suivre le point de fonctionnement optimal du panneau [26].

Dans le domaine de la conversion d'énergie, la commande MPPT contrôle le convertisseur DC-DC assurant l'interface de puissance du générateur photovoltaïque et la charge. Cette commande permet au générateur d'énergie de produire une puissance maximale [27].

Dans ce contexte plusieurs méthodes de poursuite et algorithmes ont été mis en application, chacun présente des avantages comme des inconvénients. Ce chapitre donne une représentation générale des méthodes de poursuite du point de puissance maximale les plus répondues.

### I.6.2. La méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O

La méthode P&O est sans doute la plus naturelle qui vient à l'esprit pour faire une recherche du point maximal de puissance PPM. En effet, dans le cas d'une application photovoltaïque, il s'agit concrètement d'un algorithme qui [28] :

- ✓ Pour une tension  $U(k)$  fixée va mesurer la puissance correspondante  $P(k)$  délivrée par le générateur.
- ✓ Après un certain temps, l'algorithme impose une tension  $U(k+1) = U(k) + \Delta U$  et mesure également la puissance correspondante  $P(k+1)$ ,
- ✓ Si  $P(k+1)$  est supérieure à  $P(k)$  : l'algorithme cherche à imposer une tension plus grande  $U(k+2) = U(k+1) + \Delta U$ . Si non l'algorithme cherchera au contraire à abaisser la tension  $U(k+2) = U(k+1) - \Delta U$

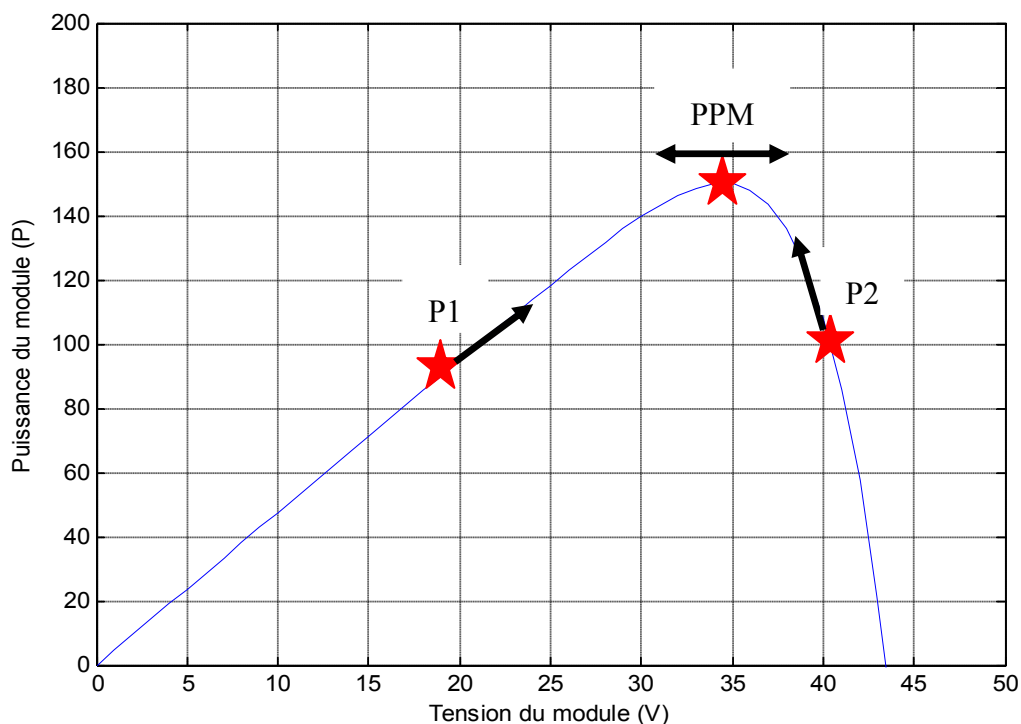
La trajectoire de la variation de ces points est représentée sur la figure I.13

De cette manière, le système adapte en permanence la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin de se rapprocher du point de puissance maximum, mais sans jamais l'atteindre précisément. D'autres algorithmes différents existent aussi et des solutions entièrement analogiques parfois assez simples à mettre en œuvre.

Les étapes de la recherche (du point optimal) sont illustrées dans le diagramme de la figure I.14.

### I.6.3. Principe du contrôle MPPT

Le MPPT commande un étage d'adaptation qui permet de relier aisément un générateur photovoltaïque à une charge de type continue (DC) pour avoir un rendement de conversion très élevé. Pour utiliser le concept du transformateur DC avec rapport de transformation variable pour l'adaptation d'un générateur PV à une charge DC, il suffit de faire varier le rapport de transformation  $n(D)$  pour trouver le point d'adaptation optimal entre le générateur PV et la charge de manière à transférer le maximum de puissance du générateur. Etant donnée la caractéristique du générateur PV, cette variation doit suivre les ordres de commande délivrées par une commande de type MPPT. L'action de contrôle provenant de la commande MPPT va induire la variation de rapport de transformation qui va indirectement correspondre à une variation de rapport cyclique du convertisseur statique DC-DC [28].



**Figure I.13:** Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau solaire

$$V_s = n(D) \cdot V_e$$

Si on prend l'exemple du convertisseur DC-DC (SEPIC), la tension d'entrée du convertisseur :  $V_e = V_s(1 - D)/D$

$V_e$  : La tension d'entrée.

$V_s$  : La tension de sortie.

$D$  : Le rapport cyclique du convertisseur .

L'impédance vue par le générateur PV est  $R_e$ .

$$R_e = R_{ch}(1 - D)^2/D^2$$

Si  $D$  augmente  $R_e$  diminue, la tension diminue aussi,

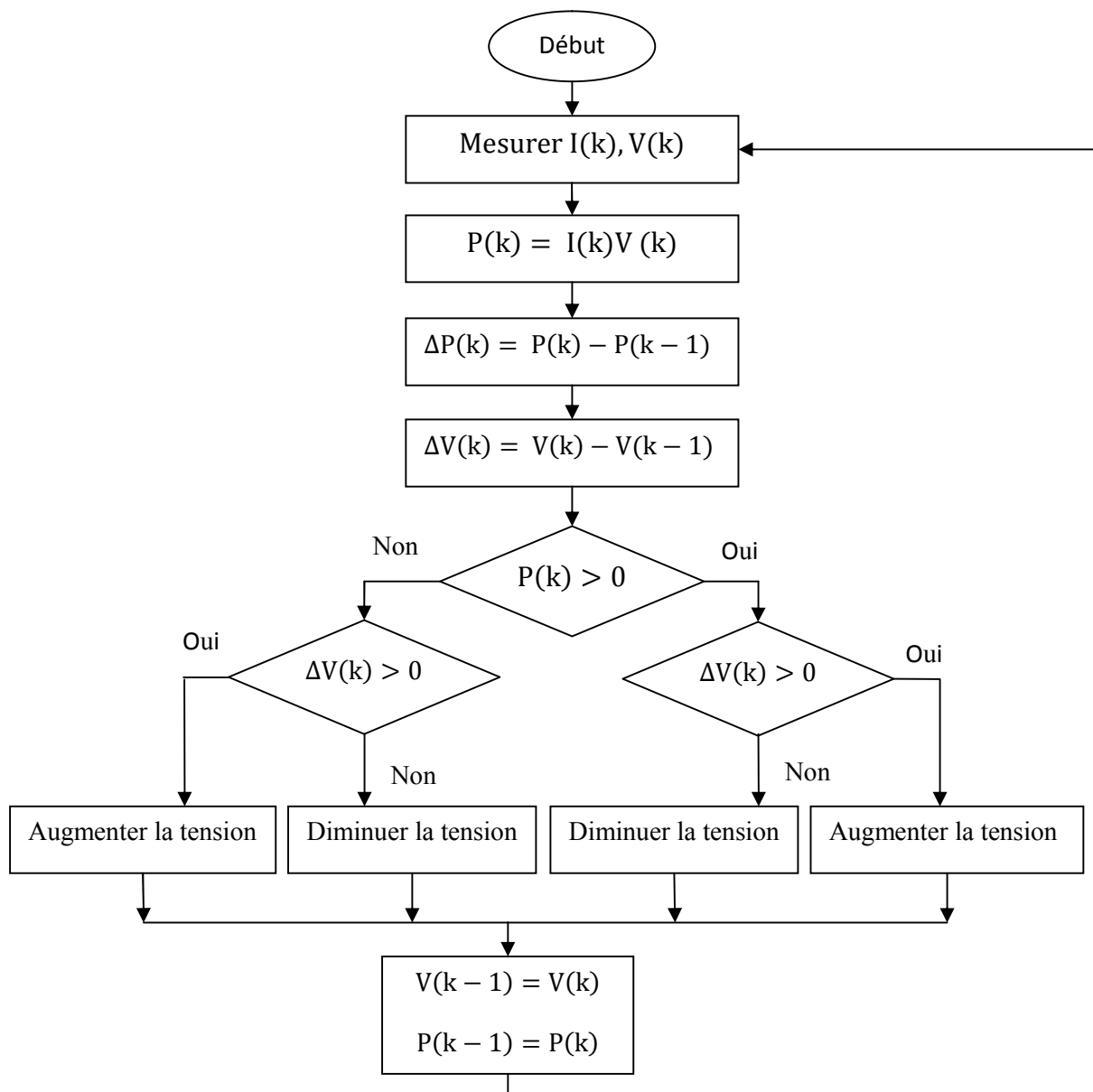
Si  $D$  diminue  $R_e$  augmente, la tension augmente aussi,

**Légende :**

$V(k)$  : tension en sortie du panneau à l'itération  $k$

$I(k)$  : intensité en sortie du panneau à l'itération  $k$

$P(k)$  : puissance en sortie du panneau à l'itération  $k$



**Figure I.14:** Organigramme de l'algorithme perturbation et observation [29].

Le contrôle MPPT (Figure I.17) fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, qui influe sur le sens de la variation de tension de telle sorte que la puissance fournie par le générateur PV soit la puissance maximale disponible à ses bornes.

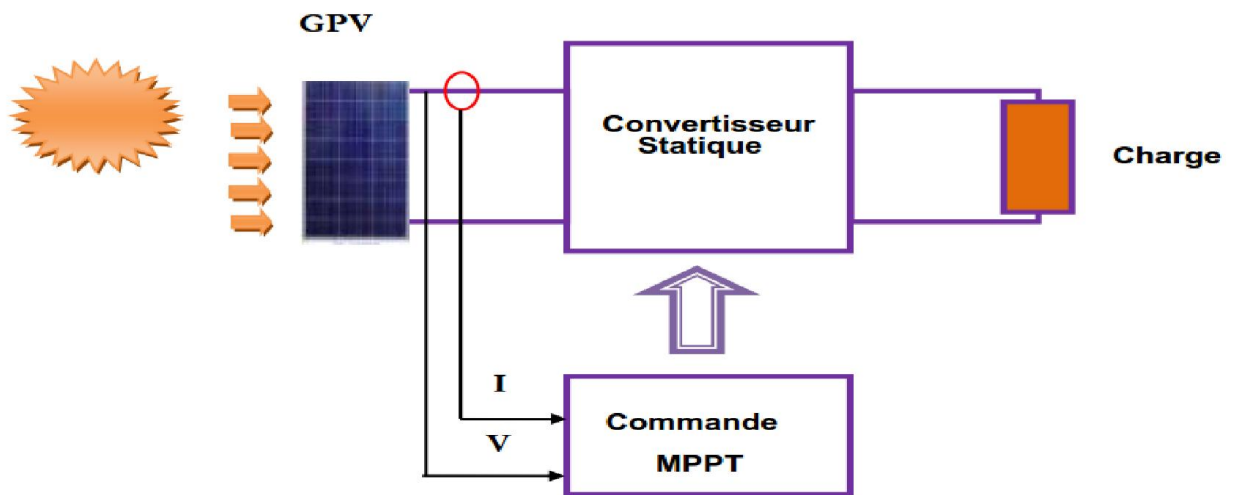


Figure II.15 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT.

## II.7. Résultats de simulation

les paramètres de simulation du convertisseur boost et les données du contrôle utilisés par les algorithmes de commande MPPT (P&O) sont :

le nombre de module en série est  $N_s=8$

le nombre de modules en parallèle est  $N_p=3$ .

Tension d'entrée  $V_{Gpv} = 136.8 \text{ V}$

Courant d'entrée  $I_{LGpv} = 10.5 \text{ A}$

$L_{Gpv} = 95 \cdot 10^{-6} \text{ H}$

$C_{dc} = 217.5 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

$C_{Gpv} = 217.5 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

$D = 0.5$

$f_s = 50 \text{ kHz}$

$R = 13 \Omega$

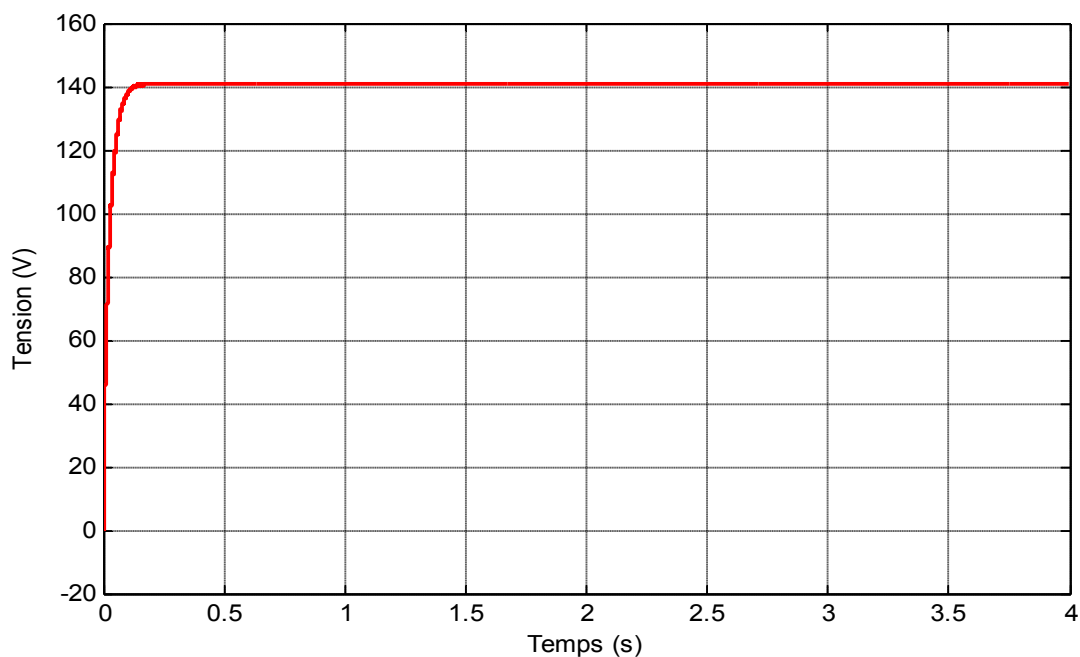
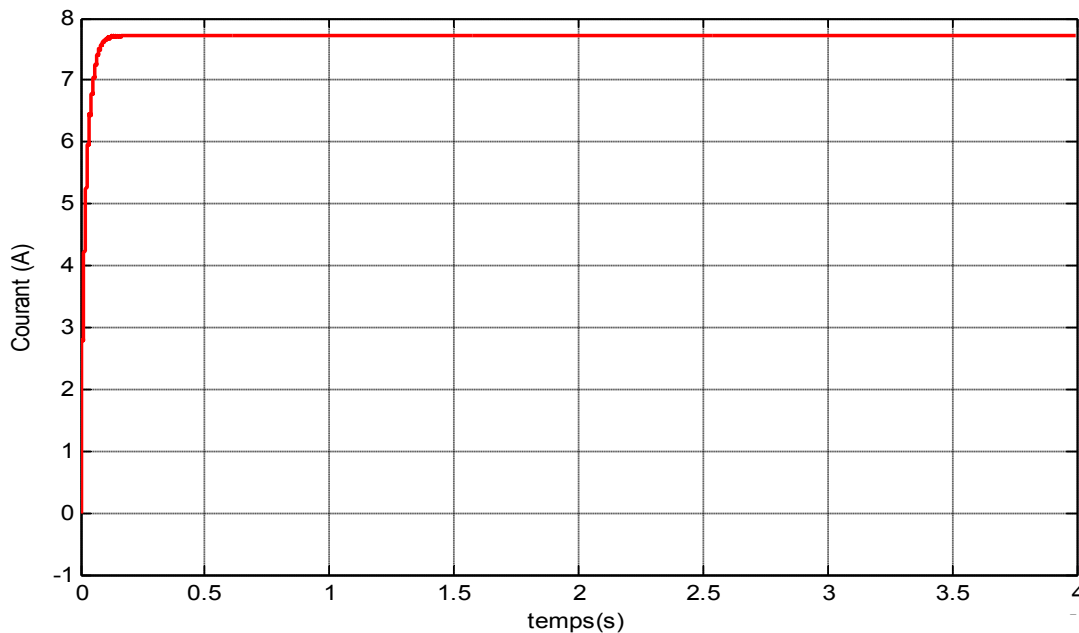


Figure II.16: Tension de sortie du convertisseur boost



**Figure II.17:** Courant de sortie du convertisseur boost

De la figure II.16 on remarque que la tension de sortie est supérieure par rapport à celle de l'entrée. Par contre, dans la figure II.17 on remarque que le courant de sortie est inférieur par rapport au courant du panneau photovoltaïque du fait de la conservation de puissance de part et d'autre du convertisseur.

## II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement des convertisseurs DC-DC les plus utilisés avec les systèmes photovoltaïques.

Il s'agit des convertisseurs de type buck, boost et cuk. L'ensemble des équations qui régissent le fonctionnement de convertisseur boost sont établis, ont incité les exploitants à chercher pour tirer le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV. Nous avons également montré comment nous pourrions optimiser la puissance fournie par le GPV par le biais d'un étage d'adaptation avec fonction de recherche du point de puissance maximale MPPT.

Les résultats de simulation ont montré la validité de la méthode adoptée pour le dimensionnement des composants.

# *Chapitre III*

## *Modélisation du système motopompe*

### **III.1 Introduction**

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

Ce chapitre traite plus particulièrement les éléments théoriques permettant de dimensionner du groupe motopompe d'un système photovoltaïque.

### **III.2 Modélisation du groupe motopompe**

Les systèmes de pompage photovoltaïques comportent nécessairement, outre le générateur, un "sous-système" constitué au moins d'un moteur électrique destiné à faire fonctionner une pompe . La figure (III.1) représente les différents éléments essentiels (et optionnels) d'un système de pompage solaire photovoltaïque . Comme un générateur photovoltaïque fournit un courant continu , il faut donc que le moteur électrique soit à courant continu .

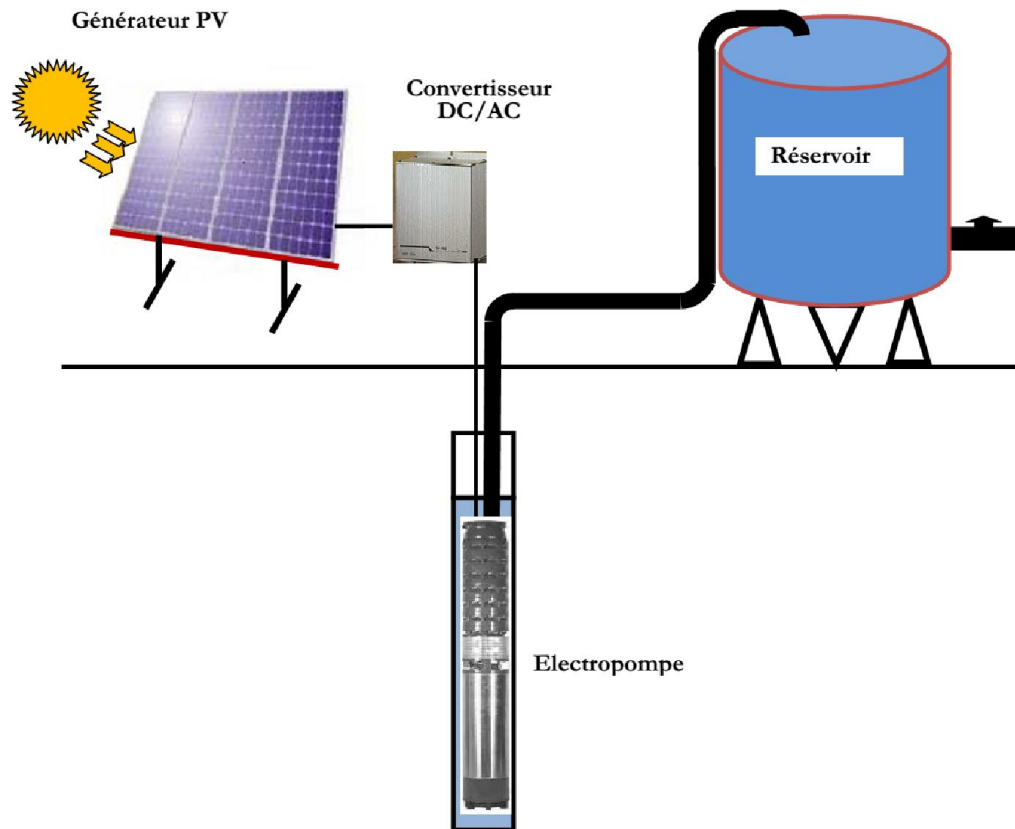


Figure III.1: Schéma synoptique simplifié de Pompage PV[30]

### III.2.1 Le Moteur :

Les pompes sont alimentées par un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils fonctionnent soit en alternatif, soit en continu. Parmi les moteurs à courant continu nous distinguons , trois types de moteurs qui sont utilisés dans les systèmes de pompage PV :

- Les moteurs à courant continu.
- Les moteurs à courant alternatif .
- Les moteurs à courant continu, sans balais, à commutation électronique (Brushless permanent magnetic DC Motors) [31].

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants [32] :

- Bon rendement.
- Souplesse de fonctionnement.
- Robustesse du matériel afin de limiter au maximum l'entretien et les risques de pannes.
- Fiabilité et autonomie de l'installation.
- Faible puissance au démarrage.

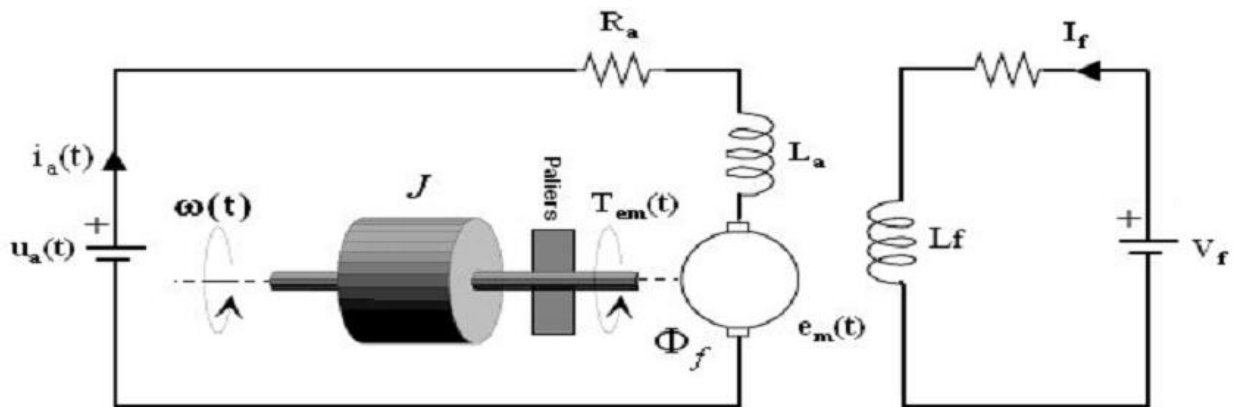
#### III.2.1.1. Le moteur à aimant permanent sans balais :

Le moteur à courant continu sans balais diffère du moteur à courant continu conventionnel en ce sens qu'il est composé d'un aimant permanent au rotor. Cette configuration ne permet plus

d'effectuer la commutation avec l'ensemble collecteur/balais puisque le champ magnétique est fixe même sans alimentation. De plus, l'alimentation des bobines situées au stator est faite, comme son nom l'indique en tension continu [32].

Les performances de plus en plus élevées et les avantages que présentent les aimants permanents font que ces derniers sont des éléments de base dans l'industrie moderne. Leurs utilisations dans les machines électriques sont de plus en plus fréquentes. Cependant, les performances des machines utilisant des aimants permanents dépendent des propriétés magnétiques de ceux-ci. Les critères de l'aimant sont à la fois technique et économique [33].

Le principal défaut des moteurs à courant continu est la présence des balais qui engendrent des frottements, des parasites, et limitent la durée de vie du moteur par leur usure. Pour éviter tous ces problèmes, on utilise des moteurs sans balais. Le schéma technologique d'une MCC est représenté sur la figure suivante :



**Figure III.2 :** Machine à courant continu à aimant permanent

Les signaux y intervenant sont les suivants:

La tension aux bornes de l'induit  $u_a(t)$  l'indice "a" correspond à Anker, c'est à dire induit en langue allemande, Le circuit électrique de l'induit, faisant apparaître :

- La résistance de l'induit  $R_a$
- L'inductance de l'induit  $L_a$
- Une tension  $e_m(t)$  appelée f.é.m. (force électromotrice), proportionnelle à la vitesse angulaire  $\omega(t)$ .
- Le courant traversant le circuit d'induit  $I_a(t)$
- Le couple électromagnétique instantané  $T_{em}(t)$  produit .
- L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation  $\Phi_f$
- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie J , frottement visqueux, élasticité de la transmission, etc.).

#### a) Equations électriques :

L'équation de tension induite s'écrit :

$$u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_m(t) \quad (\text{III.1})$$

**b) Equations électromagnétiques :**

La tension induite  $e_m(t)$  est donnée par :

$$e_m(t) = K_e \omega(t) \quad (\text{III.2})$$

$K_e$ : Constantes de tension

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

$$T_{em}(t) = K_t \cdot I_a \quad (\text{III.3})$$

$K_t$ : constantes de couple de moteur

**c) Equations mécanique:**

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

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - B_m \omega(t) - T_r - T_f \quad (\text{III.4})$$

Où:

$J_t$ : Inertie totale entraînée (moteur  $J_m$  et charge  $J_{ch}$ ) .

$B_m$ : Coefficient de frottement visqueux.

$T_r$ : Couple résistant.

$T_f$ : Couple de frottement de coulomb.

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

$$[\dot{X}] = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \quad (\text{III.5})$$

**III.2.2. Les pompes**

Une pompe est une machine servant à véhiculer un fluide qui peut être de l'eau ou quelconque (pétrole, huile...) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression [34].

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux techniques sont possibles :

- Dans la première technique, l'énergie solaire est consommée en « temps réel » ; On parle alors d'un « **pompage au fil du soleil** ». Cette solution nécessite un stockage de l'eau dans un réservoir (l'eau pompée pendant la journée est stockée afin d'être utilisée plus tard, le soir par exemple).

La deuxième méthode consiste à utiliser un stockage de l'énergie, cette fois-ci, via des batteries. L'énergie stockée dans la journée peut être utilisée plus tard pour pomper l'eau [35].

Les critères qui guident le choix d'une pompe sont les suivants: [36]

- La nature du liquide pompé, viscosité, température, présence de corps solides.
- Le débit et la pression souhaités.
- L'énergie consommée.

### **III.2.2.1. Les types de pompes**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres [37] .

### **III.2.2.2. La pompe volumétrique**

Une pompe volumétrique est une pompe dans laquelle l'écoulement du liquide est en proportion constant avec le déplacement d'un organe mobile du corps de la pompe. Les pompes volumétriques sont deux sortes:

- Les pompes volumétriques alternatives .
- Les pompes rotatives .

#### **III.2.2.2.1. Caractéristiques d'une pompe volumétrique**

##### **III.2.2.2.1.1. Caractéristiques débit- vitesse**

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et il est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse [38].

##### **III.2.2.2.1.2. Caractéristique puissance- vitesse**

La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multiples[39].

### III. 2.2.2.1.3. Caractéristiques débit- hauteur

Le débit  $Q$  de la pompe volumétrique est donné par : [30]

$$Q = k_q \omega + k_h H_m \quad (\text{III.6})$$

Où :

$\omega$  : la vitesse de la pompe.

$k_q, k_h$  : constantes données de la pompe.

### III.2.2.3. La Pompe centrifuge

Les principes des pompes centrifuges sont la technologie la plus utilisée dans les systèmes de pompage photovoltaïques. Les pompes centrifuges sont conçues pour une tête fixe et leur rendement en eau augmente avec la vitesse de rotation. Les pompes centrifuges sont simples, à prix réduit et sont disponibles pour une large gamme de débit [31].

Dans la présente étude, le principe de base d'opération de la pompe centrifuge et le modèle mathématique sont développés pour décrire son comportement opérationnel.

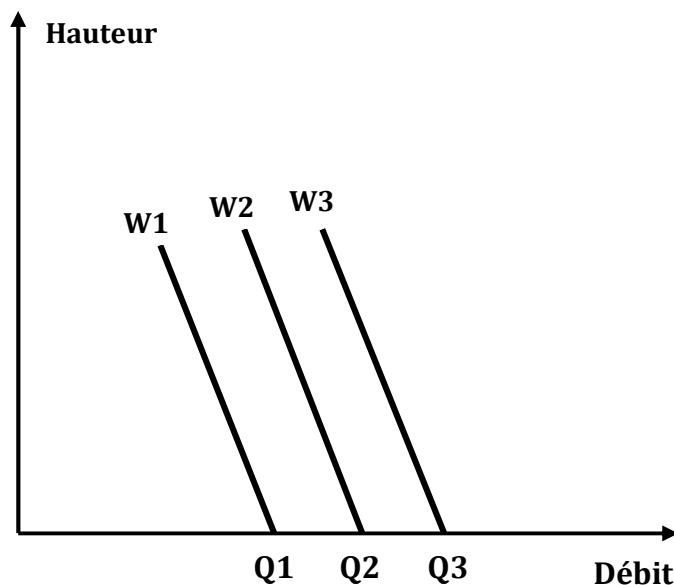


Figure III.3: Caractéristiques débit-hauteur d'une pompe volumétrique

#### a) Principe de fonctionnement

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

##### •L'aspiration :

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

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

### •L'accélération:

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

### b) Constitution de la pompe centrifuge

Les pompes centrifuges sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation le rotor appelée aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelée corps de pompe ou volute.

Ces machines comprennent donc :

- un distributeur (arrivée du liquide)
- l'ouïe d'aspiration
- le corps de la pompe ou volute
- le refoulement qui va s'élargir
- l'ouïe de refoulement

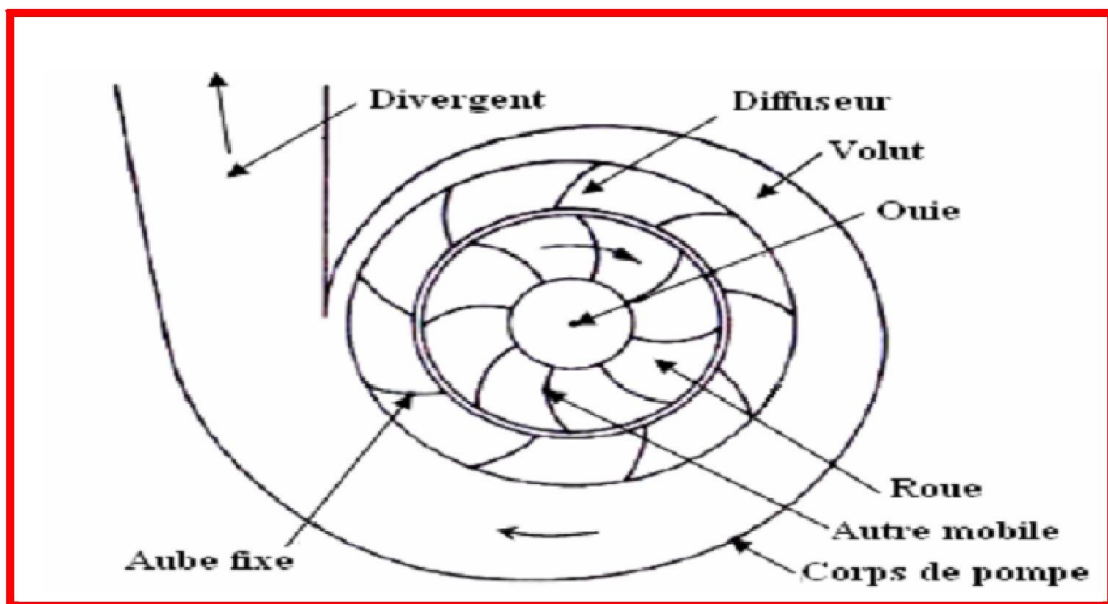


Figure III.4: Schéma de principe d'une pompe centrifuge.

### III.3. Modélisation de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [41] :

$$f(H, Q, W) = 0 \quad (\text{III.7})$$

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

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

$$H = H_S + H_d \quad (\text{III.8})$$

avec:

**H** : Hauteur totale du pompage.

**H<sub>S</sub>** : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau.

**H<sub>d</sub>**: Est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

### III.3.1. Les pertes de charge

Représentent les pertes de pression dues aux différents obstacles s'opposant au déplacement du fluide pompé. On distingue:

#### III.3.1.1. Les pertes de charge linéaires

Produites par le frottement du fluide sur les parois des conduites .Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H = \lambda \frac{L v^2}{D 2g} \quad (\text{III.9})$$

avec:

**λ** :Coefficient de pertes de charges linéaires.

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

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

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

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

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{III.10})$$

avec **Q** : débit (m<sup>3</sup>/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{III.11})$$

On remarque que les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation.

#### III.3.1.2. Les pertes de charge singulières

Produites par tout phénomène local tel que changement de section ou de direction dans la conduite, vanne,.etc. . Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \cdot \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \cdot \frac{8.Q^2}{\pi^2.D^4.g} \quad (\text{III.12})$$

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

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes :

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (\text{III.13})$$

$$H_d = \left( \lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \cdot \frac{8.Q^2}{\pi^2.D^4.g} = k_{fr} \cdot Q^2 \quad (\text{III.14})$$

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

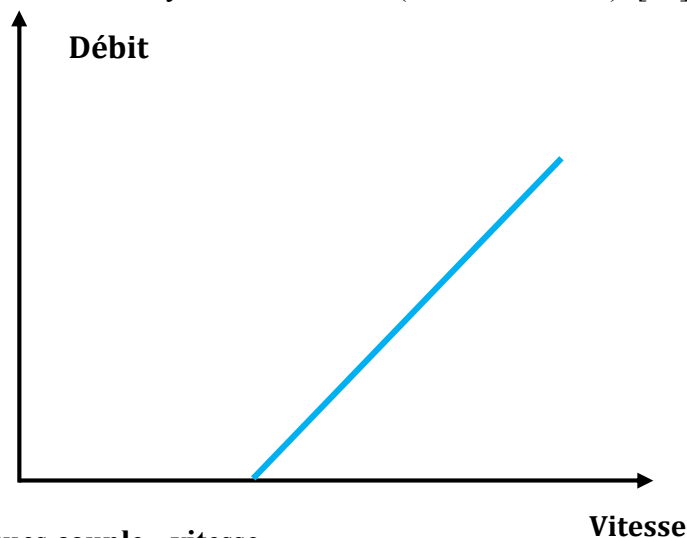
La hauteur totale de pompage est :

$$H_d = H_s + k_{fr} \cdot Q^2 \quad (\text{III.15})$$

### III.3.2. Caractéristiques d'une pompe centrifuge

#### III.3.2.1. 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). [42]



#### III.3.2.2. Caractéristiques couple - vitesse

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en 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. [43]

Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$  :

$$C_r = K_r \omega^2 + C_s \quad (\text{III.16})$$

$K_r$  : Coefficients de proportionnalité  $[(\text{Nm}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})^2]$  .

$C_s$  : 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 :

$$P_{méc} = K_r \omega \quad (\text{III.17})$$

### III.3.2.3. Caractéristiques Débit - hauteur

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction de débit [44,45] .

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".[46]

$$HMT = K_0 \cdot \omega^2 - K_1 \cdot \omega \cdot Q - K_2 \cdot Q^2 \quad (\text{III.18})$$

$K_0, K_1, K_2$ : Des constants propre de la pompe donnée par le constructeur.

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. [47]. Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes de la figure III.6:

### III.3.2.4. Caractéristique de la puissance

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

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m \quad (\text{III.19})$$

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

$g$  : Accélération de la pesanteur ( $9,81\text{m}^2/\text{s}$ ) .

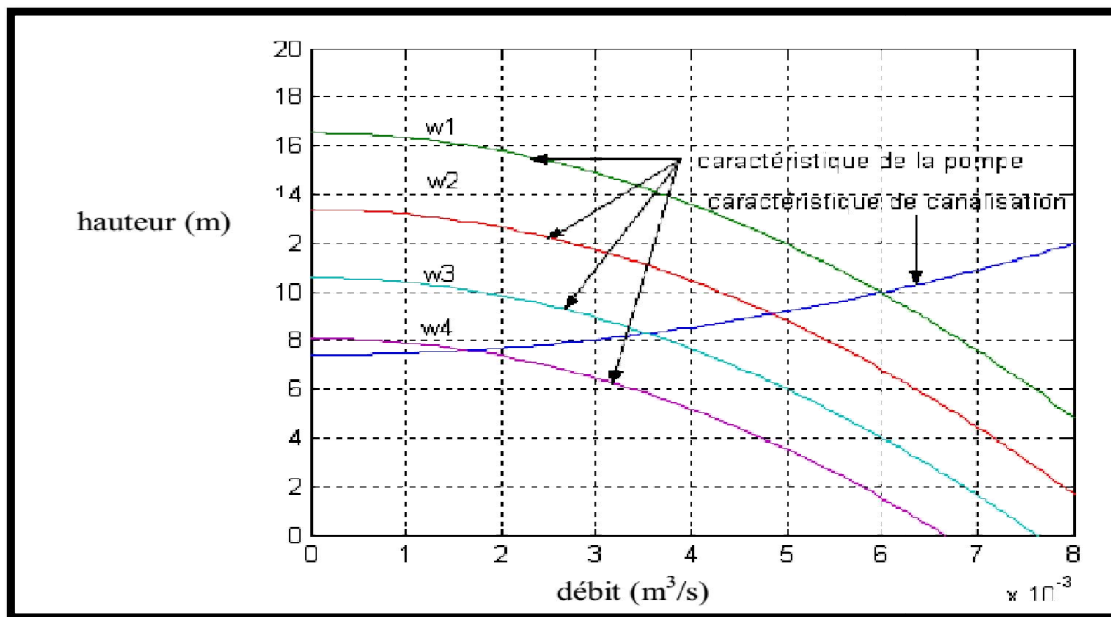


Figure III.6: Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation

La courbe de la figure (III.7), des puissances absorbées pour les différents débits est une branche de parabole qui peut présenter un maximum dans la plage utilisable.

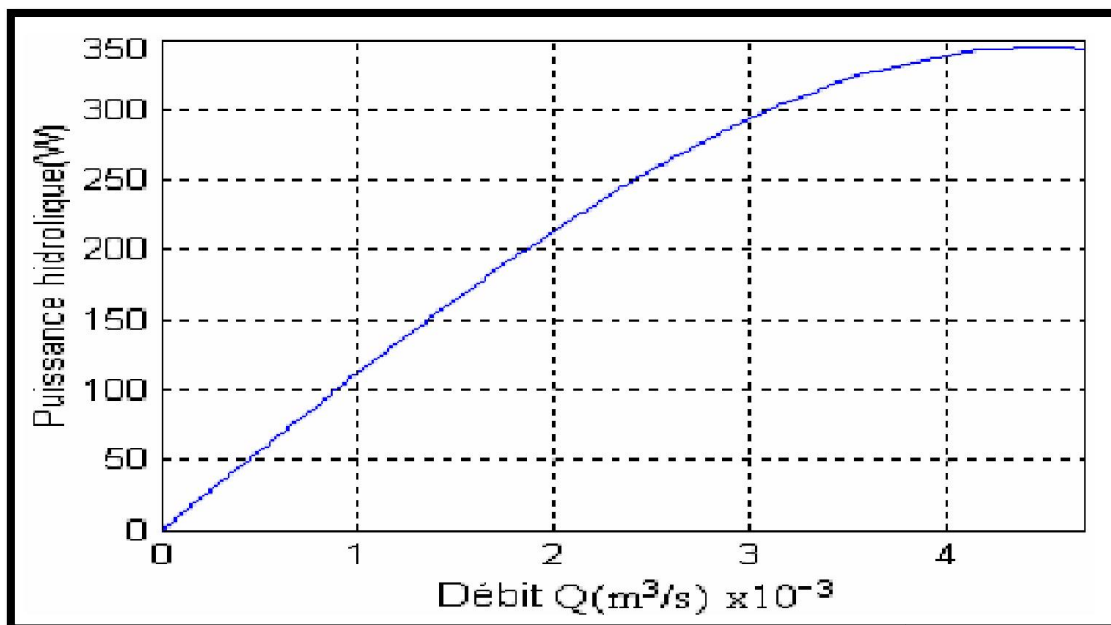


Figure III.7: Caractéristique de la puissance hydraulique de la pompe centrifuge

### III.3.2.5. 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 la formule : [48]

$$\eta_{PV} = \frac{P_h}{P_{ab}} \quad (III.20)$$

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 72%. Le schéma de la figure (III.8) présente les valeurs de rendement d'une pompe [49].

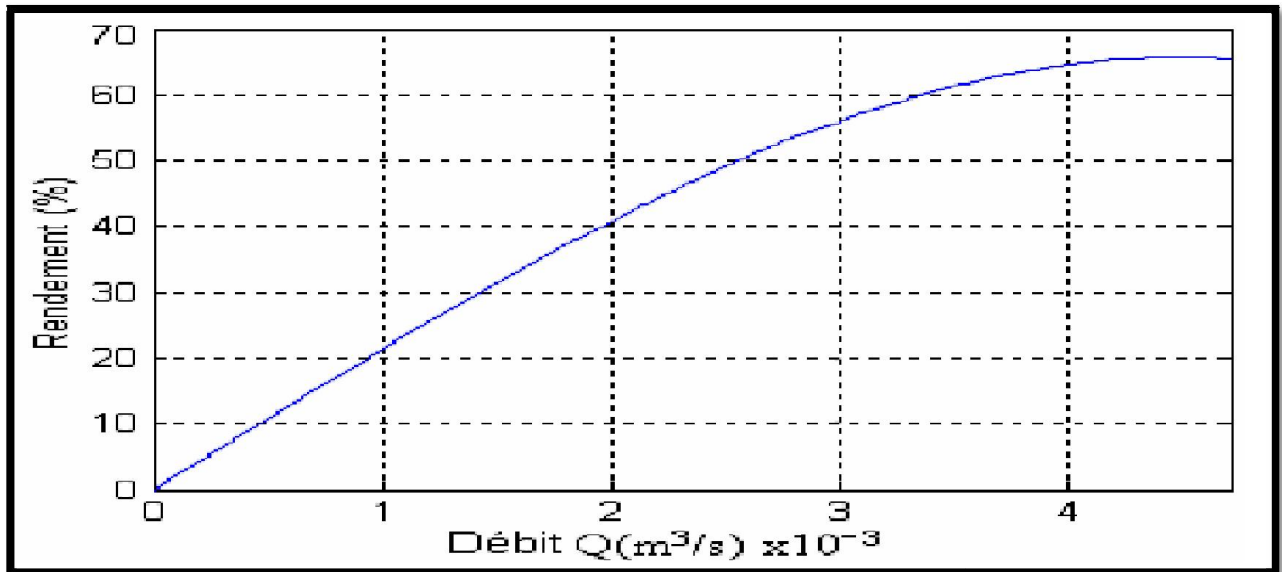


Figure III.8: Caractéristique de rendement de la pompe centrifuge

#### III.4. Les différents types d'installation du groupe motopompes

La figure (III.9) représente différents types d'installations courantes de systèmes photovoltaïques de pompage.

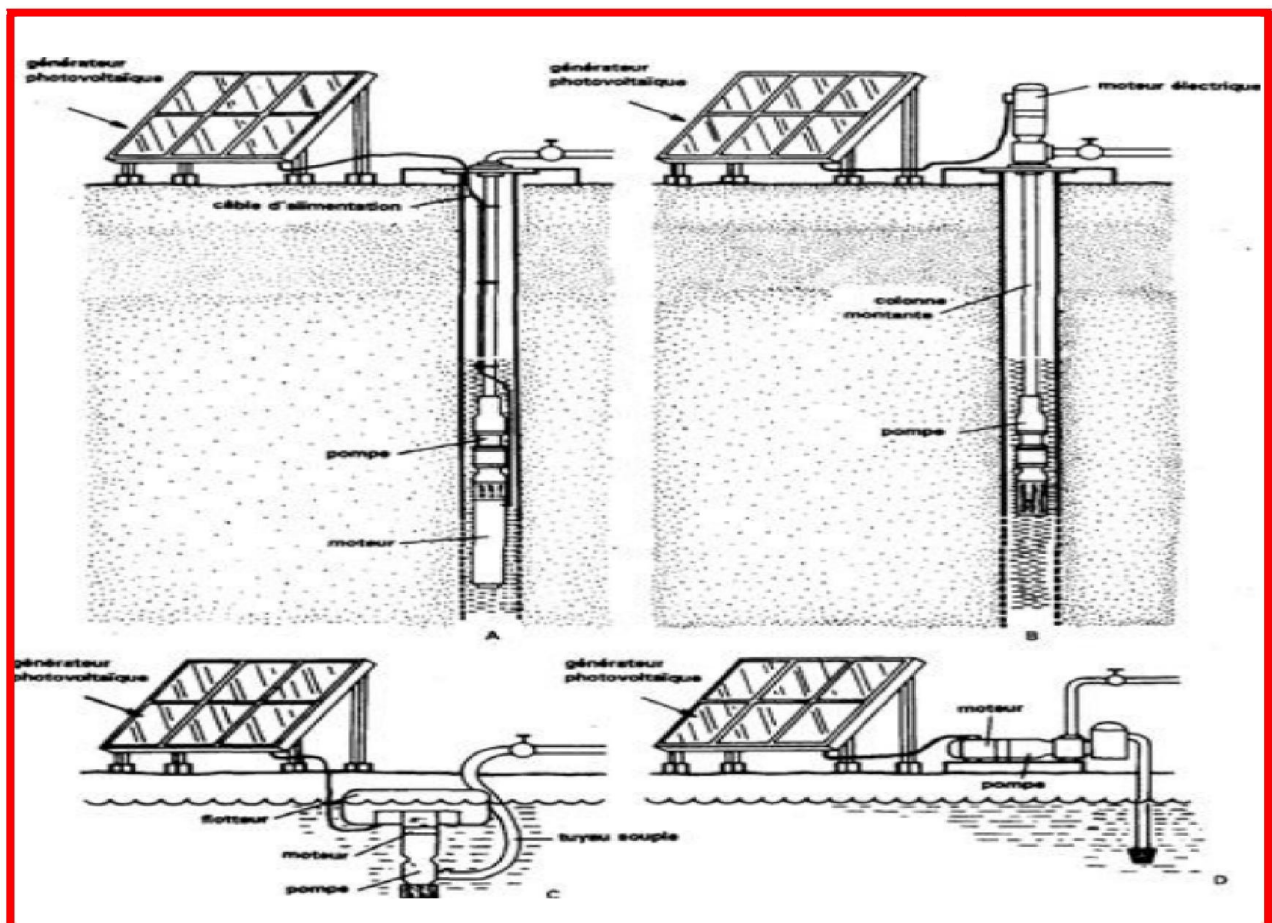


Figure III.9: Exemples d'installations de pompes solaires

- A. groupe motopompe immergé
- B. pompe immergée avec moteur en surface
- C. groupe motopompe flottant
- D. moteur et pompe installés en surface.

Dans notre étude on utilise une pompe centrifuge immergée . qui a les caractéristiques suivants :

- Son diamètre est soit de 4" (95 mm), soit de 6" (142 mm).
- Le corps de pompe est en acier inoxydable, les roues et les diffuseurs étant soit en acier inoxydable, soit en matériau synthétique. Ces matériaux présentent une très bonne résistance à l'abrasion.
- Le corps d'aspiration est protégé par une crépine contre les grosses impuretés (> à 3mm). Un clapet anti-retour est intégré à la tête de pompe, qui est taraudée pour le raccordement au tuyau de refoulement. La lubrification est assurée par l'eau pompée.
- Le nombre d'étages est lié à la hauteur manométrique totale de refoulement.
- Le type d'aubage de chaque étage est lié à la puissance hydraulique à fournir pour la HMT nominale.
- La durée de vie peut être estimée entre 5 et 7 ans (elle est fortement liée à la qualité de l'eau).

### III.5. Caractéristiques de la pompe centrifuge immergée

La pompe centrifuge immergée est caractérisée par les paramètres suivants :

- Son diamètre est soit de 4" (95 mm), soit de 6" (142 mm).
- Le corps de pompe est en acier inoxydable, les roues et les diffuseurs étant soit en acier inoxydable, soit en matériau synthétique. Ces matériaux présentent une très bonne résistance à l'abrasion.
- Le corps d'aspiration est protégé par une crépine contre les grosses impuretés supérieures à 3 mm).
- Un clapet anti-retour est intégré à la tête de pompe, qui est taraudée pour le raccordement au tuyau de refoulement. La lubrification est assurée par l'eau pompée.
- Le nombre d'étages est lié à la hauteur manométrique totale de refoulement.
- Le type d'aubage de chaque étage est lié à la puissance hydraulique à fournir pour la Hm nominale.
- Les rendements hydrauliques des pompes solaires sont élevés (utilisation de technologies de pointe). Ils sont de l'ordre de 55% à 60 % au point de fonctionnement nominal.
- La durée de vie peut être estimée entre 5 et 7 ans (elle est fortement liée à la qualité de l'eau).
- L'entretien courant consiste au nettoyage des étages (boue, sable, déchets si la pompe est installée dans un puits). La fréquence de celui-ci dépend de la qualité de l'eau pompée. [34]

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordée le système Motopompe, à commencer par la modélisation de la MCC en se basant sur les équations électriques et mécaniques qui régissent le comportement de la machine, ensuite pour la deuxième partie de ce chapitre nous avons reporté le principe et les différents types des pompes, ainsi qu'une modélisation de la pompe centrifuge en tenant comptes des perte de charges linéaires et singulières.

# *Chapitre IV*

## *Simulation et optimisation du système de pompage sous MATLAB/SIMULINK*

### **IV.1. Introduction**

Le coût élevé du générateur photovoltaïque nous impose une utilisation optimale et rationnelle de ce dernier, afin d'aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, nous devons utiliser le générateur photovoltaïque dans la zone où il délivre sa puissance maximale, donc il est indispensable de connaître ses points de puissance optimale pour différents éclairagements et températures.

Le but de ce chapitre est l'optimisation de fonctionnement de système de pompage solaire, à cet effet, l'alimentation du groupe motopompe par un générateur photo voltaïque via un convertisseur est complétée par l'intégration d'un dispositif de suivie de la puissance maximale.

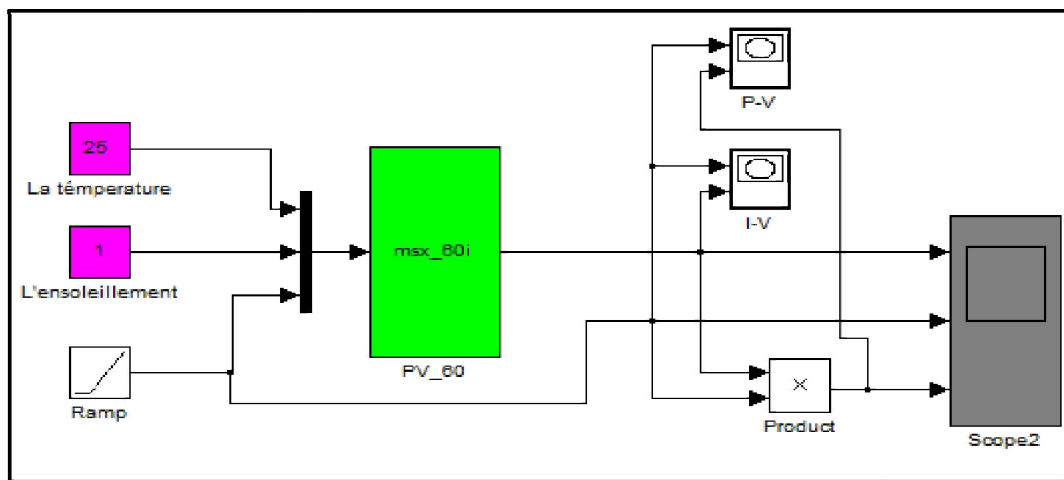
Pour les systèmes de pompage photovoltaïque, on a deux choix de couplage : soit le couplage directe (sans optimisation) dans lequel le MCC AP est couplée directement au générateur photovoltaïque, ce système est simple et moins coûteux , soit le couplage avec optimisation. qui nécessite une adaptation entre le générateur et la charge.

La simulation digitale d'un système photovoltaïque sert afin de comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux. Depuis la simulation de la performance d'un système, on peut tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie.

Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB 2012.

Dans ce chapitre nous avons fait le traitement numérique du modèle mathématique global de l'association de tous les éléments de la chaîne (générateur photovoltaïque, convertisseurs et le groupe motopompe). Ce qui va nous permettre de déduire les points de fonctionnement optimums donnant des vitesses maximales pour différents paramètres climatiques. La technique d'optimisation utilisée, est la méthode de perturbation et observation. Cette technique consiste en la maximisation de puissance électrique.

#### IV.2. Simulation du générateur photovoltaïque :



**Figure. (IV.1):** Schéma bloc du module BP MSX60 de BP Solaire sous Matlab/Simulink

#### IV.3. Simulation du moteur à courant continu :

Les caractéristiques du moteur à courant continu sont données dans l'Annexe. Les figures (IV.2),(IV.3) montrent la variation du courant et de la vitesse du moteur en fonction de temps.

On remarque que le courant du moteur est égale à la valeur nominale indiqué par le constructeur qui est  $I=9.2$  A. Ainsi que la vitesse  $\omega = 157.1$  (rad/s).

En régime permanent la puissance de sortie ne change pas si le panneau solaire travail toujours dans les mêmes conditions initiales.

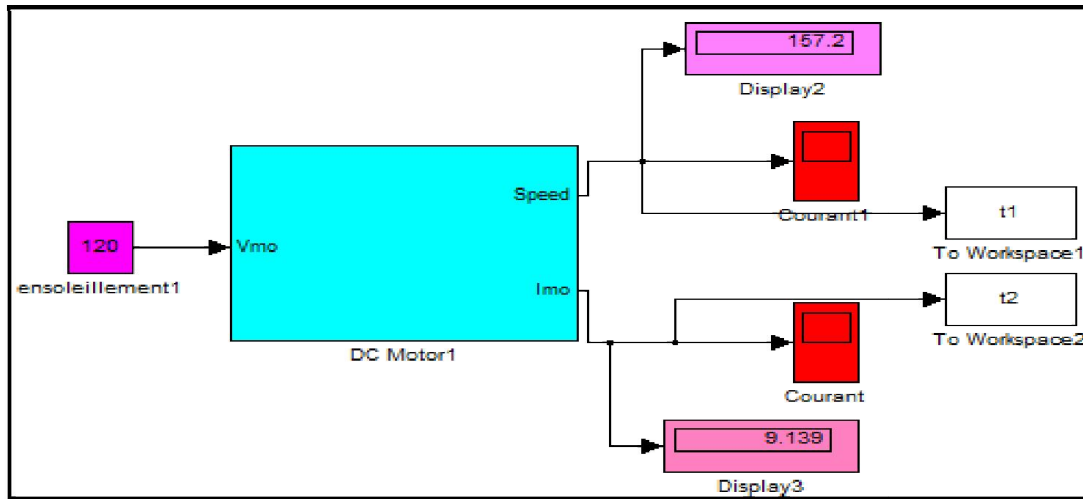


Figure.(IV.2) : Model du moteur à courant continu sous Matlab/Simulink

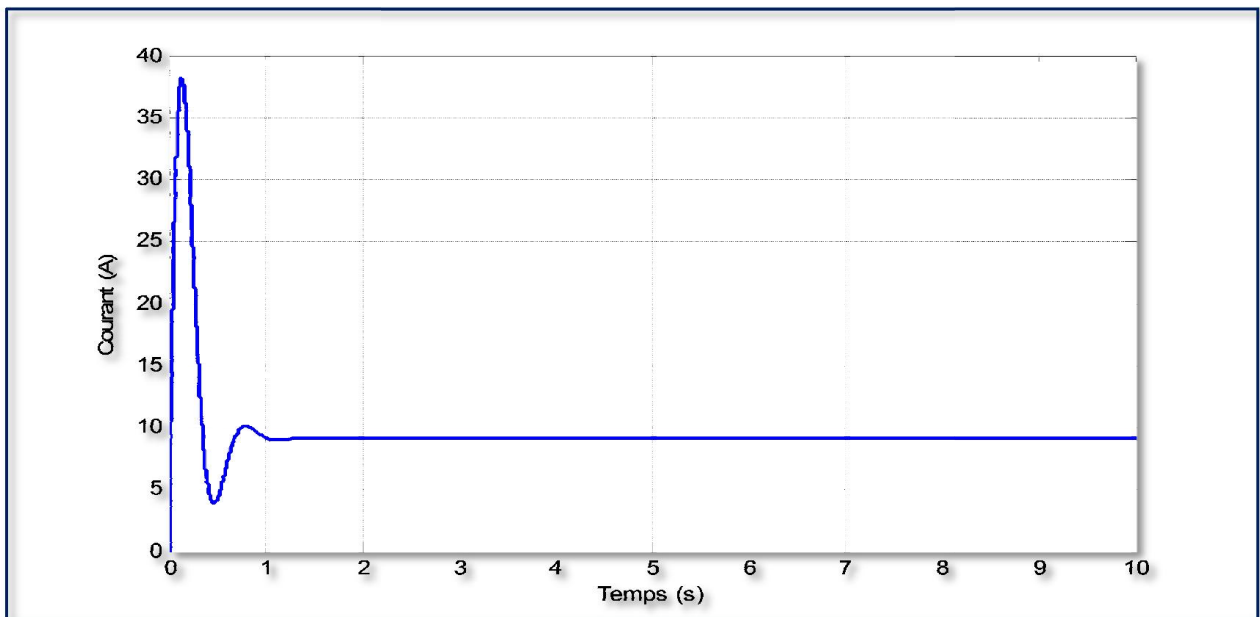


Figure. (IV.3) : le courant délivré par le moteur à courant continu en fonction de temps

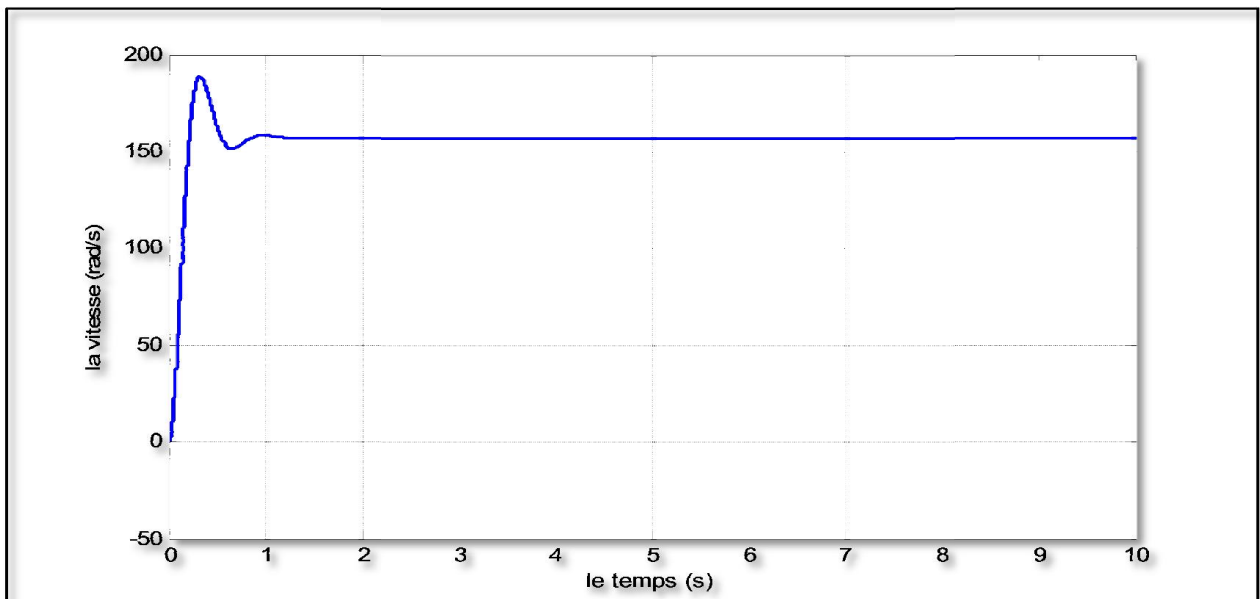


Figure. (IV.4) : La variation de vitesse du moteur en fonction de temps

#### IV.4. Dimensionnement du système photovoltaïque :

Selon le choix de la puissance de la pompe et pour avoir la quantité d'eau pompée pour un éclairage et une température donnée, on peut dimensionner le générateur photovoltaïque par le choix de la meilleure combinaison entre les types et les nombres des modules .on commence tous d'abord par le dimensionnement de la charge ( le groupe moto pompe ) ; ensuite le générateur photovoltaïque.

##### IV.4.1. Dimensionnement de la Motopompe :

Le moteur qui entraîne la pompe peut être dimensionné selon la quantité d'eau demandée. Le débit d'eau lié à la puissance mécanique absorbée par la pompe est donné par la relation suivante:

$$Q = \frac{P_p \eta_p}{\rho \cdot g \cdot H} \quad (\text{IV.1})$$

Où

$\rho$  : 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.

$P_p$ : Puissance mécanique du moteur.

$Q$  : la quantité d'eau demandée.

Si on suppose que le rendement de l'accouplement est égal à 1, alors la puissance mécanique du moteur (utile) est égale à la puissance absorbée par la pompe.

Connaissant le rendement du moteur, la puissance électrique absorbée par le moteur est :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} \quad (\text{IV.2})$$

avec:

$P_a$ : Puissance électrique absorbée par la pompe .

$P_u$ : Puissance électrique utile délivrée par le moteur .

$\eta_m$ : Rendement du moteur .

Pour prévoir certains imprévus d'exploitation, il serait prudent de majorer la puissance absorbée par la pompe des quantités suivantes [51] :

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

Dans notre étude la puissance mécanique de la pompe est 850 W, on applique alors une marge de sécurité de 30 %. Ce qui veut dire que la puissance mécanique du moteur doit être supérieure ou égale à 1105 W . Dans notre cas on a choisie un moteur cc à aimant permanent dont la puissance mécanique est 1140 W.

Le rendement du moteur est : 0.83 .

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} = \frac{1140}{0.83} = 1373.49w \quad (IV.3)$$

Le rendement du convertisseur est de l'ordre de 0.95 [52] :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_c} = \frac{1373.49}{0.95} = 1445.26w \quad (IV.4)$$

#### IV.4.2. Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

La puissance que doit fournir le générateur photovoltaïque sera déterminée par la puissance nominale demandée par l'ensemble motopompe. La puissance nominale demandée par le moteur est de 1445.26w On doit dimensionner le générateur PV, c'est-à-dire déterminer le nombre de modules qui le constituent pour alimenter le moteur.

$$P_{op} = V_{op} \cdot I_{op} \quad (IV.5)$$

$$P_{Gpv} = P_{op} * N_p * N_p = 60 * 24 = 1440 w \quad (IV.6)$$

#### IV.5. Couplage directe du moteur au générateur PV:

Pour qu'une connexion, générateur photovoltaïque-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des deux caractéristiques électriques doit exister.

Le moteur est lui aussi caractérisé par des courbes de couple-courant. Le couple résistant est déterminé par la pompe centrifuge et étant égal au couple moteur à l'état d'équilibre, le générateur photovoltaïque n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, c'est la charge elle-même qui fixe le point de fonctionnement. [52].

Quand le groupe moteur-pompe est alimenté par le GPV on a les égalités suivantes :

$$V_m = V_{Gpv} ; I_m = I_{Gpv} ; C_m = C_r \quad (IV.7)$$

$$C_r = K_p \omega^2 \quad (IV.8)$$

Le point de fonctionnement du système sera obtenu par l'intersection de la caractéristique I(V) du générateur et la caractéristique mécanique du moteur.

Le couplage directe est modélisé sous Matlab/Simulink et montré par la figure (IV.5) ci dessous :

#### IV.6. Couplage à travers un convertisseur

La puissance continue possède un maximum dépendant des conditions climatiques, pour convertir l'énergie disponible avec le meilleur rendement, il est donc indispensable de travailler autour d'un point de fonctionnement optimal qui correspond à la puissance maximale fournie par

le générateur. Cela est possible en adaptant en permanence le générateur à sa charge grâce au convertisseur qui joue le rôle d'une impédance adaptative. Cette procédure est dite technique de poursuite du point de puissance maximal (MPPT) [53].

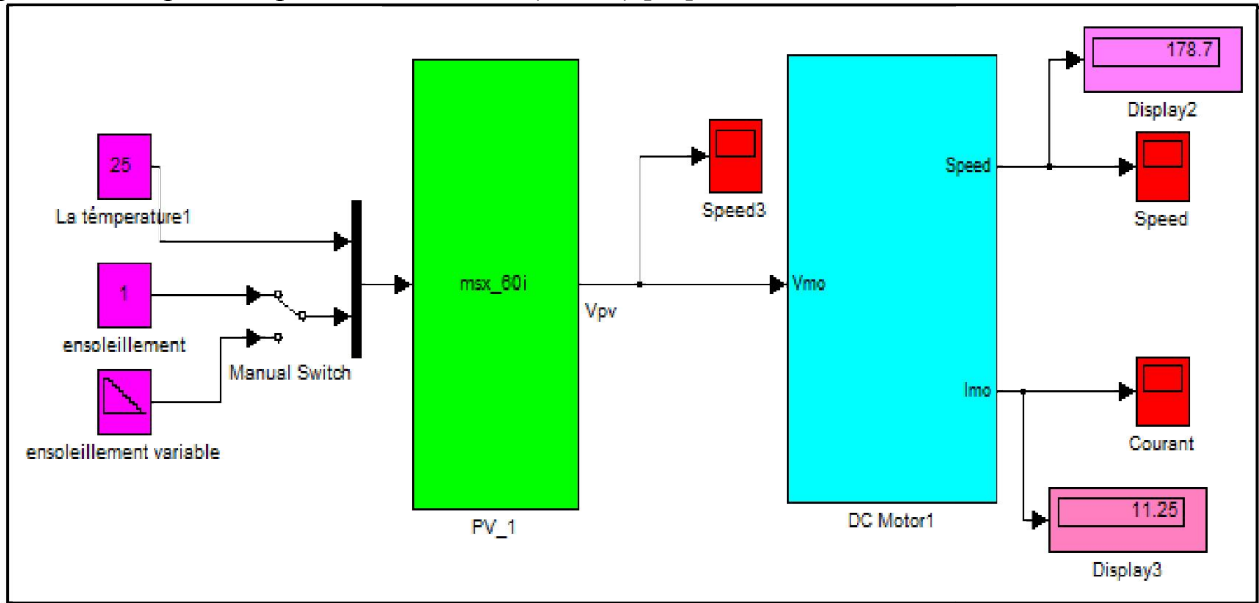


Figure. (IV.05) : Schéma bloc d'un couplage directe GPV- MCC

#### IV.7. Optimisation du système de pompage photovoltaïque :

L'optimisation du système de pompage photovoltaïque consiste à maximiser la quantité d'eau pompée, ce qui revient à maximiser la vitesse d'entraînement pour chaque éclaircissement, ou le rendement générateur photovoltaïque-moteur.

Pour cela on insère un convertisseur MPPT DC-DC de type boost entre le générateur photovoltaïque et le groupe motopompe . Un convertisseur MPPT est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le générateur photovoltaïque peut fournir.

Le rapport cyclique  $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$  donne le ratio de la tension du panneau à la tension aux bornes de la charge [53].

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:

$$V_m = R_a I_m + L_a \frac{dI_m}{dt} + K_e \omega \tag{IV.8}$$

Et le couple du moteur :

$$C_m = K_m I_m \tag{IV.9}$$

La pompe centrifuge oppose un couple résistant:

$$C_r = K_r \omega^2 + C_s \tag{IV.10}$$

$K_e$ : [V/rad. s-1],  $K_m$  : [Nm/Ampère] et  $K_r$ : [(Nm/rad.s-1)<sup>2</sup>] sont des coefficients de proportionnalité .

D'autre part nous avons l'équation mécanique :

$$J_m \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r \quad (\text{IV.11})$$

Avec  $J_m$ , 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  $I_{op}$  et une tension  $V_{op}$  est :

$$P_{op} = V_{op} \cdot I_{op} = V_m \cdot I_m \quad (\text{IV.12})$$

Le rendement générateur photovoltaïque - MCC à aimant permanent est le rapport entre la puissance mécanique et puissance de la radiation incidente captée par le générateur photovoltaïque , il est définie par l'expression suivante [54]:

$$\eta_{gm} = \frac{P_m}{N.E.S_g} \quad (\text{IV.13})$$

avec:

$\eta_{gm}$ : le rendement GPV-MCC .

$P_m$ : la puissance mécanique (W).

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  $\omega$  .:

$$C_r = K_p \omega^2 \quad (\text{IV.14})$$

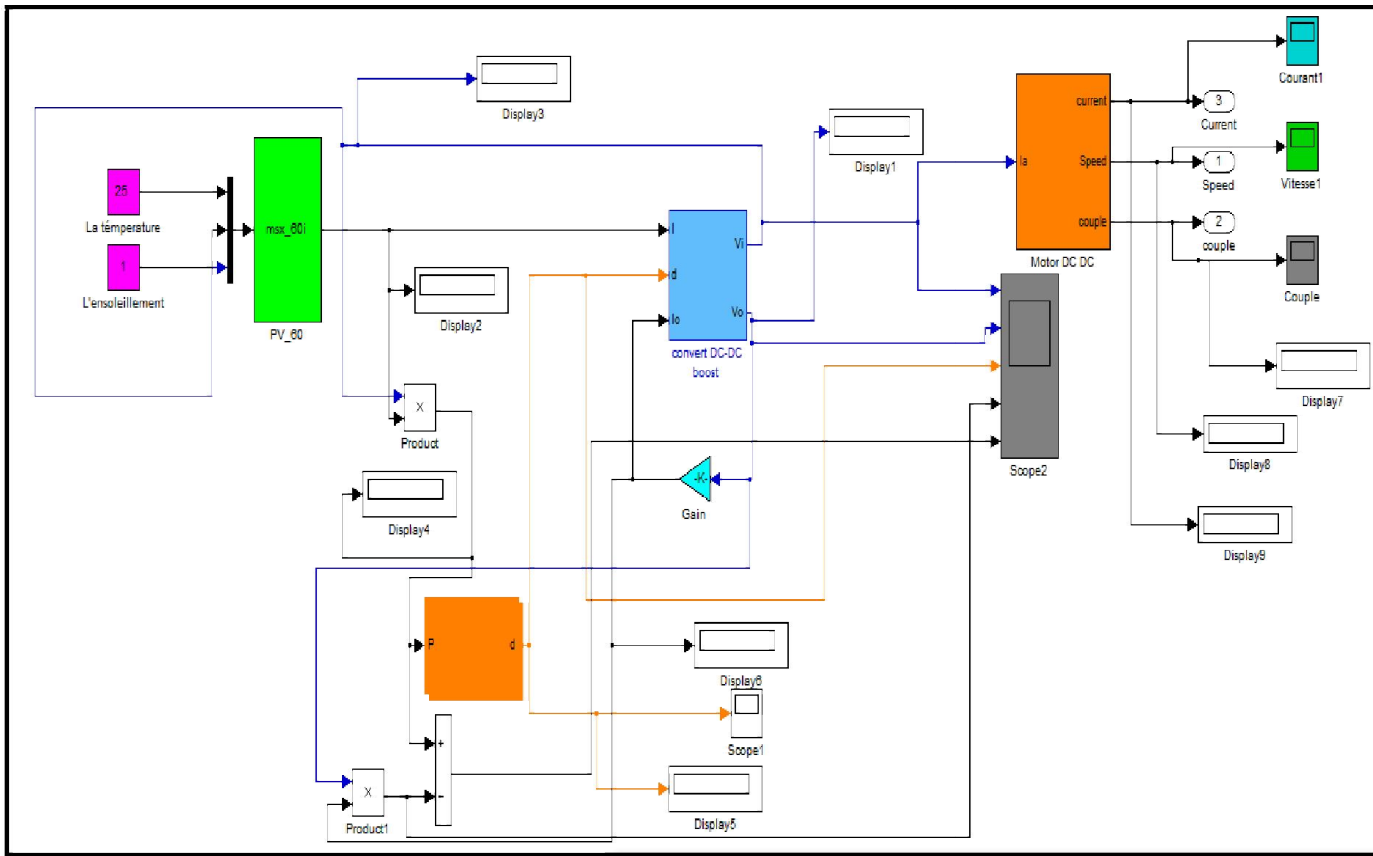
Si on suppose que le rendement de l'accouplement entre la MCC et la pompe est égale à 1, alors la puissance mécanique de la MCC est égale à la puissance absorbée par la pompe. La puissance mécanique de la MCC est définie par :

$$P_m = K_p \omega^2 \quad (\text{IV.15})$$

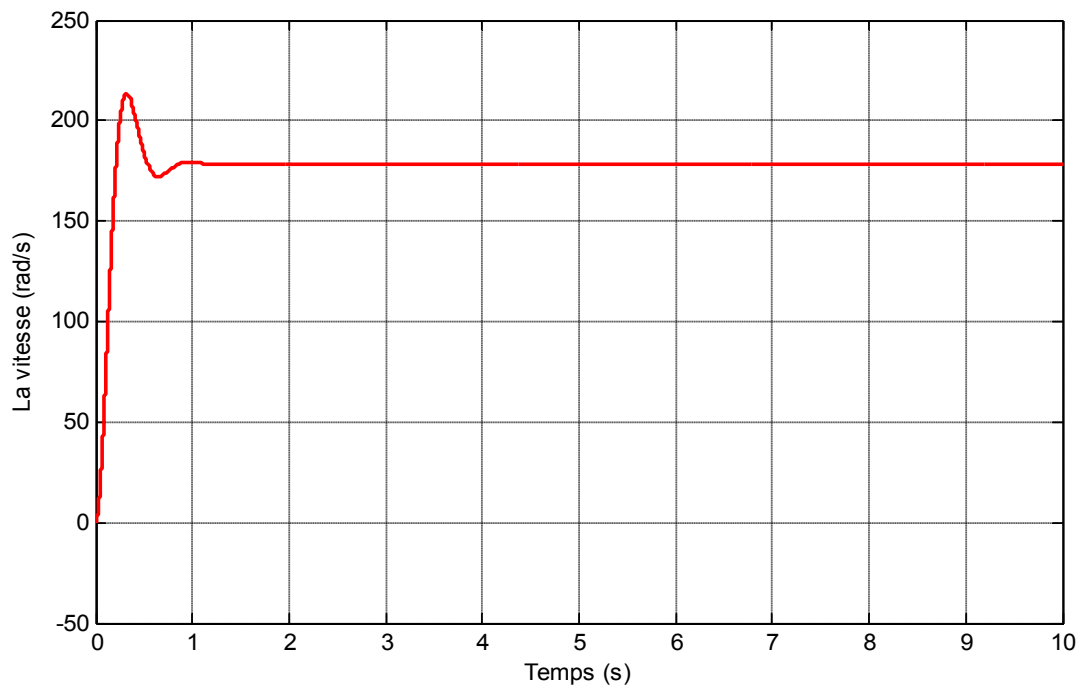
$$\eta_{gm} = \frac{K_p \omega^2}{N.E.S_g} \quad (\text{IV.16})$$

**IV.8. Simulation du système moteur \_ générateur Couplage indirecte(optimise)**

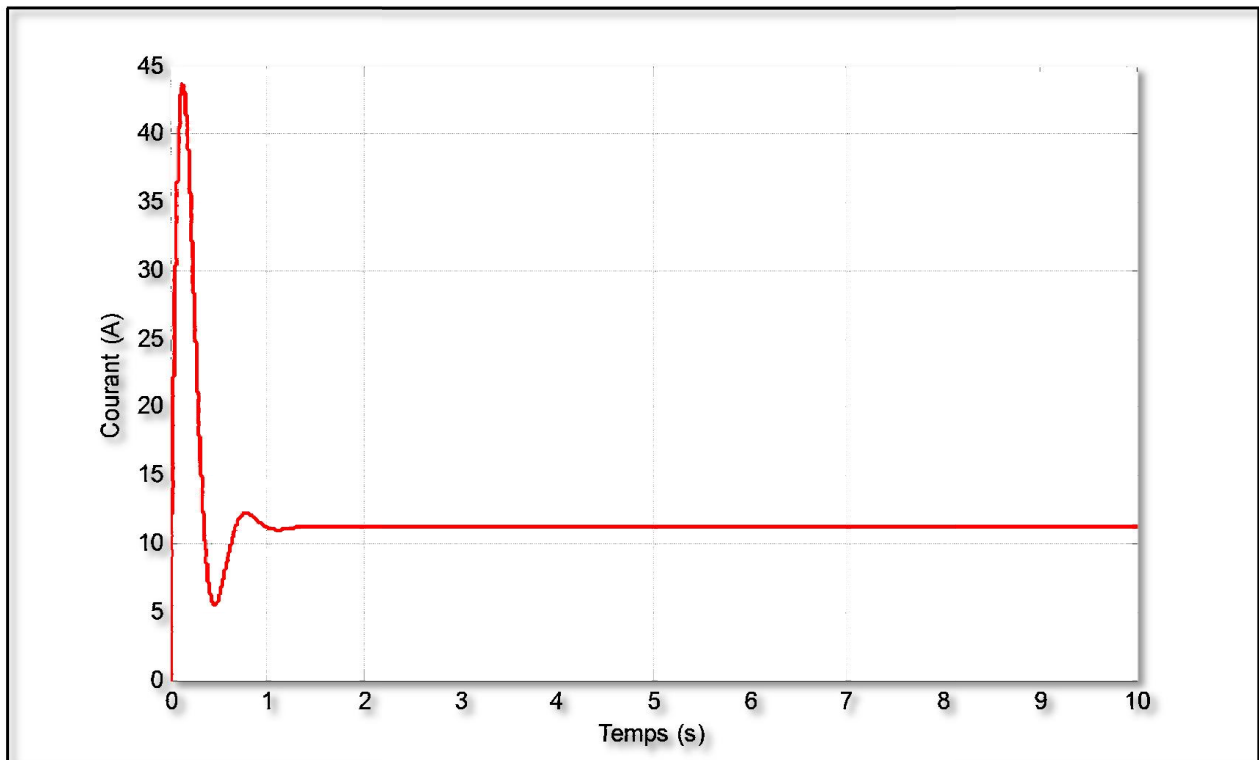
la figure IV.6 donne le blok simulink de la simulation du moteur - générateur en couplage direct.



**Figure. (IV.06)** : schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous Matlab/Simulink .



**Figure. (IV.7)** : La variation de vitesse en fonction de temps pour  $G=1000w/m^2$



**Figure. (IV.8) :** le courant délivré par le moteur en fonction de temps pour  $G=1000\text{w/m}^2$

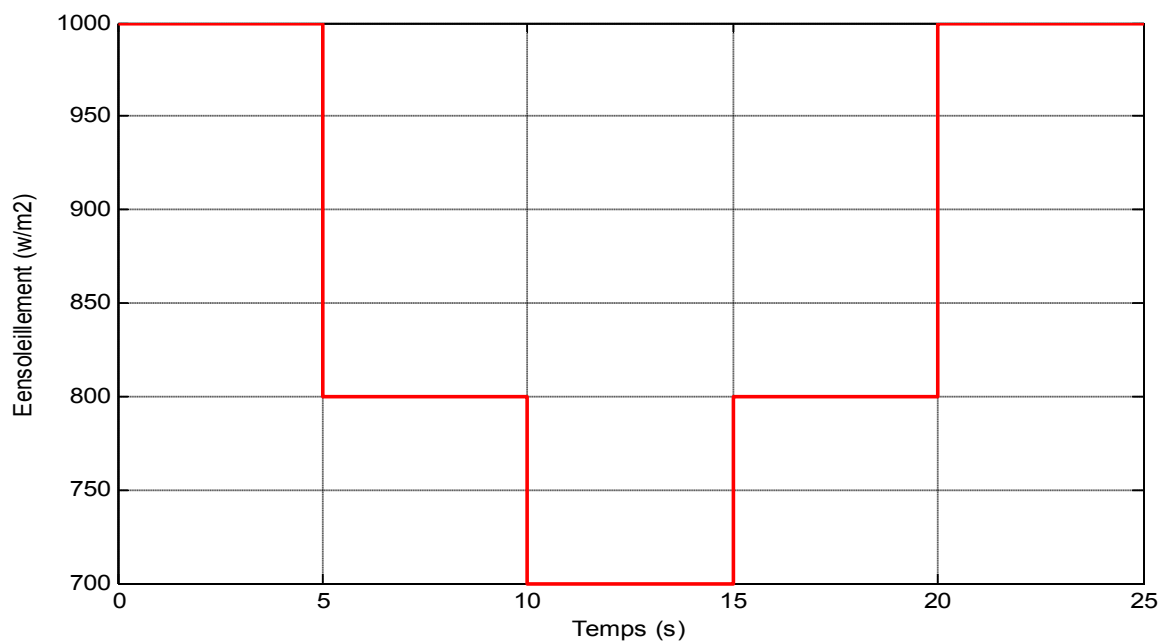
En régime permanent la puissance de sortie ne change pas si le panneau solaire travail toujours dans les mêmes conditions initiales.

#### IV.9. Résultats de simulation :

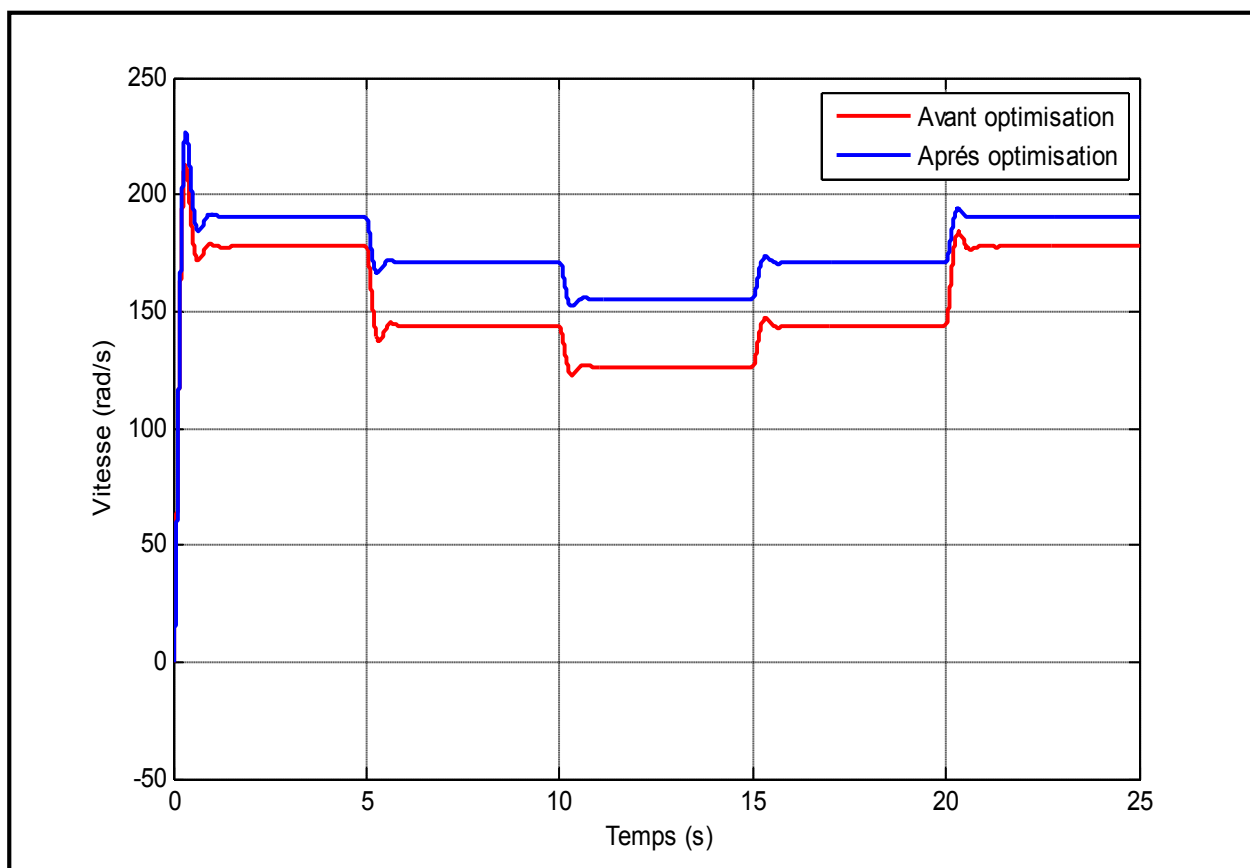
- **1<sup>ere</sup> cas:** Dans ce cas, on endente par module photovoltaïque une association de 36 cellule solaires en série.

La charge moteur-pompe est alimentée par un GPV constitué d'un nombre de modules  $N_t=24$ . Ces modules sont disposés en une configuration de branches  $N_p=3$  groupées en parallèle. Chaque branche comporte un nombre  $N_s=8$  de nombre disposés en série.

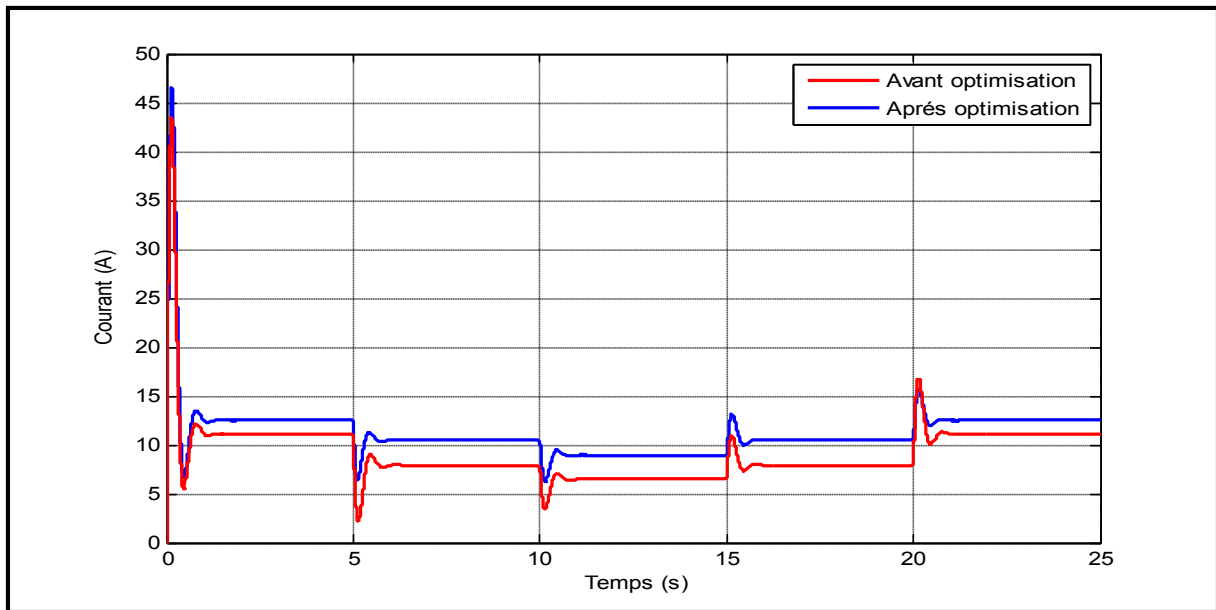
Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de couplage directe et indirecte (optimisé) de GPV avec moteur cc à aimant permanent, pour :  $T=25\text{C}^\circ$  et  $G=(700,800\text{et}1000\text{W/m}^2)$ .



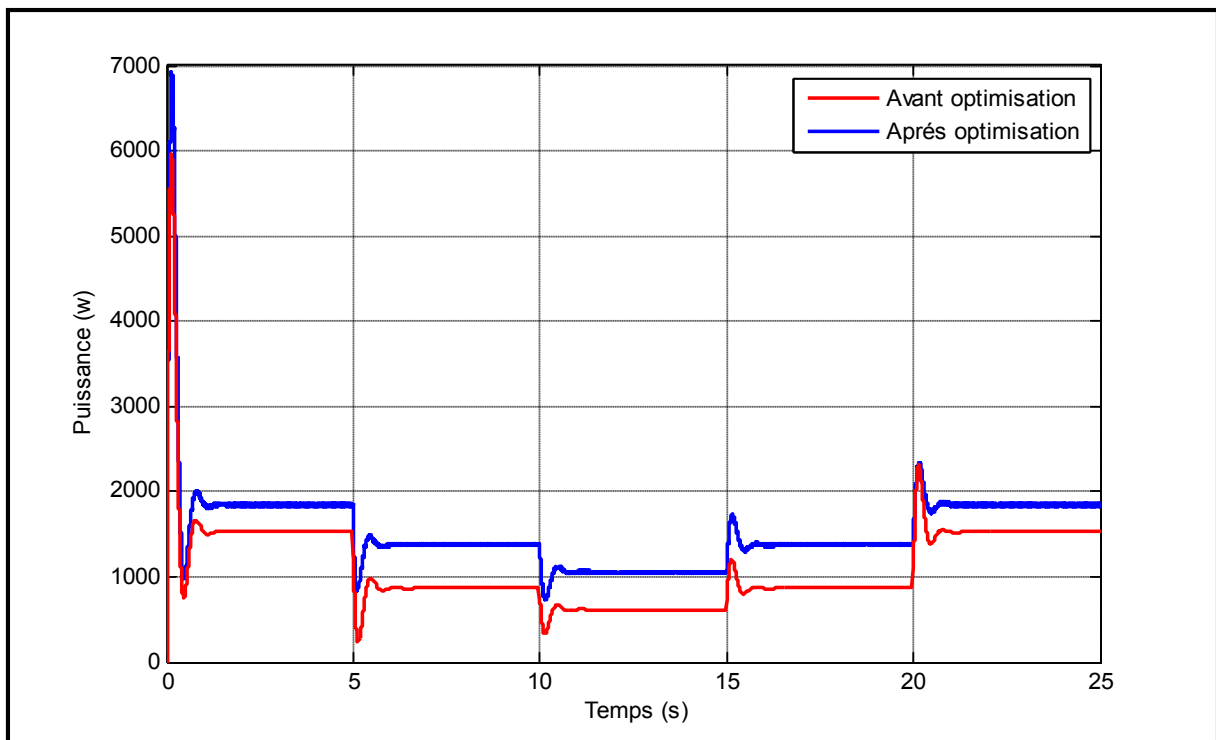
**Figure IV.09** : La variation de L'ensoleillement en fonction de temps .



**Figure IV.10**: Variation de la vitesse du moteur en fonction de temps avant et après optimisation



**Figure IV.11:** Variation du courant du moteur en fonction de temps avant et après optimisation



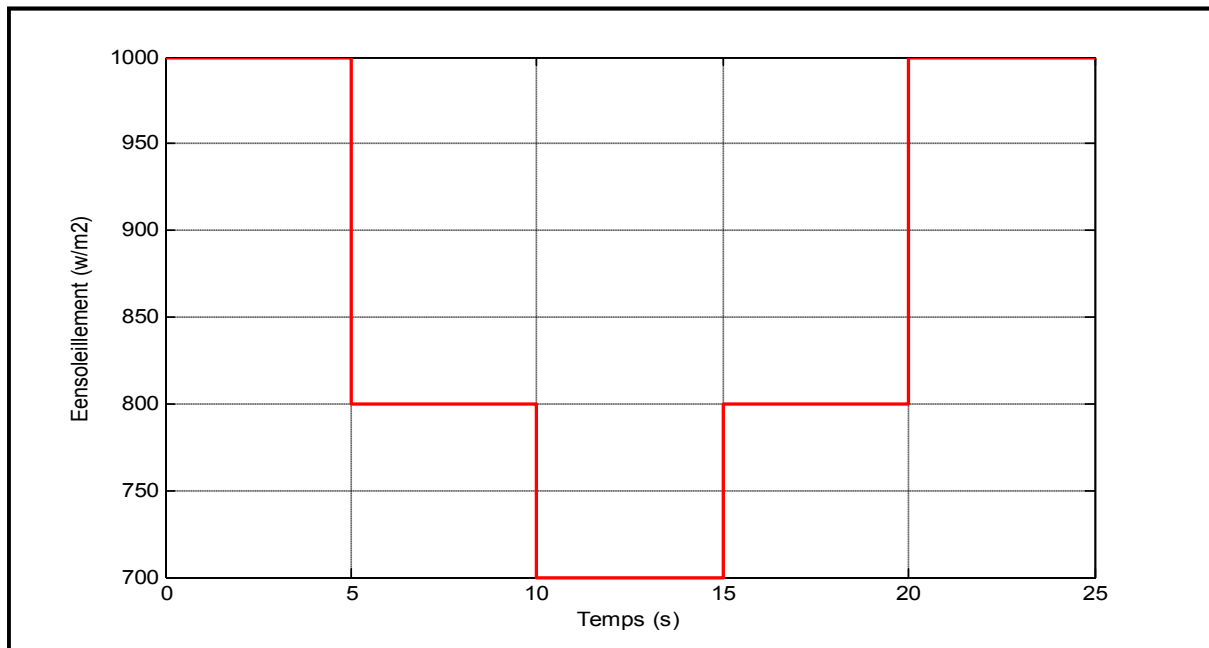
**Figure IV.12:** Variation de puissance du moteur en fonction de temps avant et après optimisation

- ✓ Après un régime transitoire très bref, la vitesse, le courant et la puissance du moteur augmente rapidement pour atteindre le niveau demandé dans le cas d'un couplage indirecte par rapport à un couplage directe du système . Toute fois, le bloc du contrôleur MPPT contenue a ajusté le rapport cyclique très rapidement jusqu'à l'obtention d'une valeur de sortie maximale et stable.
- ✓ La puissance d'entrée illustrée par la figure IV.12 est égale à la puissance maximale que peut fournir le panneau photovoltaïque ceci prouve évidemment l'efficacité de l'algorithme MPPT utilisé

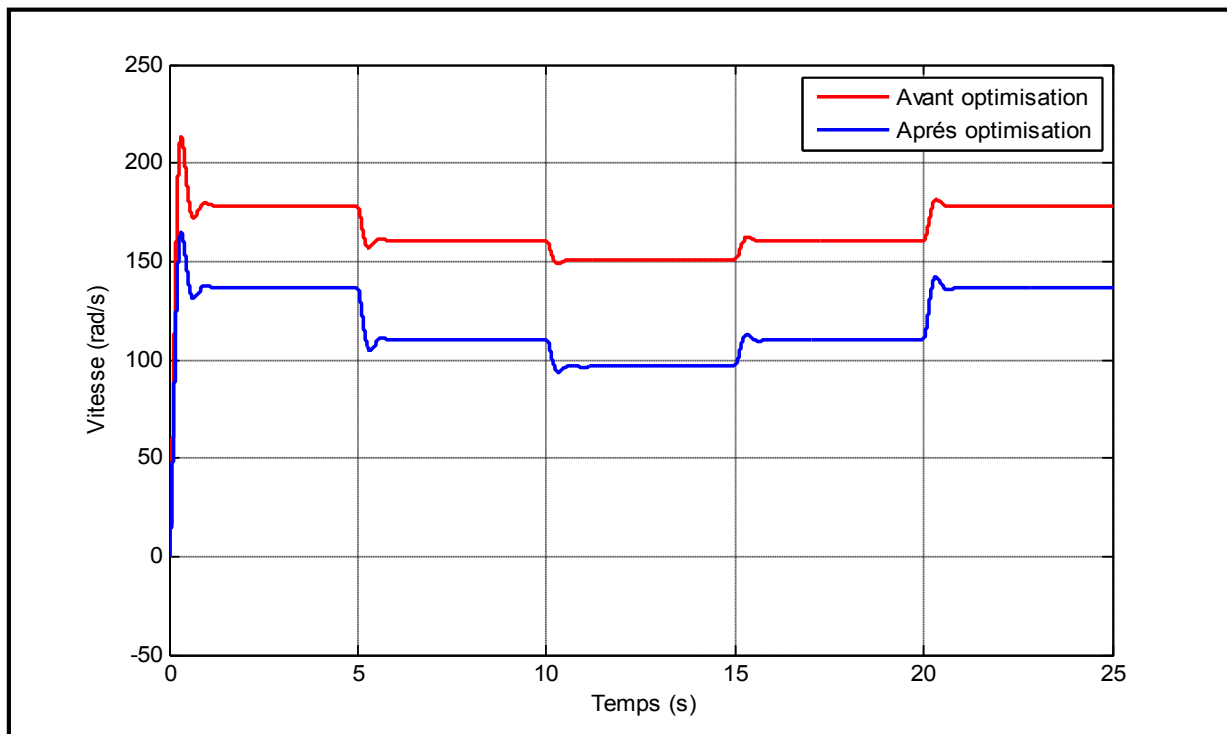
- **2<sup>ere</sup> cas:** Dans ce cas, on entend par module photovoltaïque une association de 36 cellule solaires en série.

la charge moteur-pompe est alimentée par un GPV constitué d'un nombre de modules  $N_t=24$ . Ces modules sont disposés en une configuration de branches  $N_p=4$  groupées en parallèle. Chaque branche comporte un nombre  $N_s=6$  de nombre disposés en série.

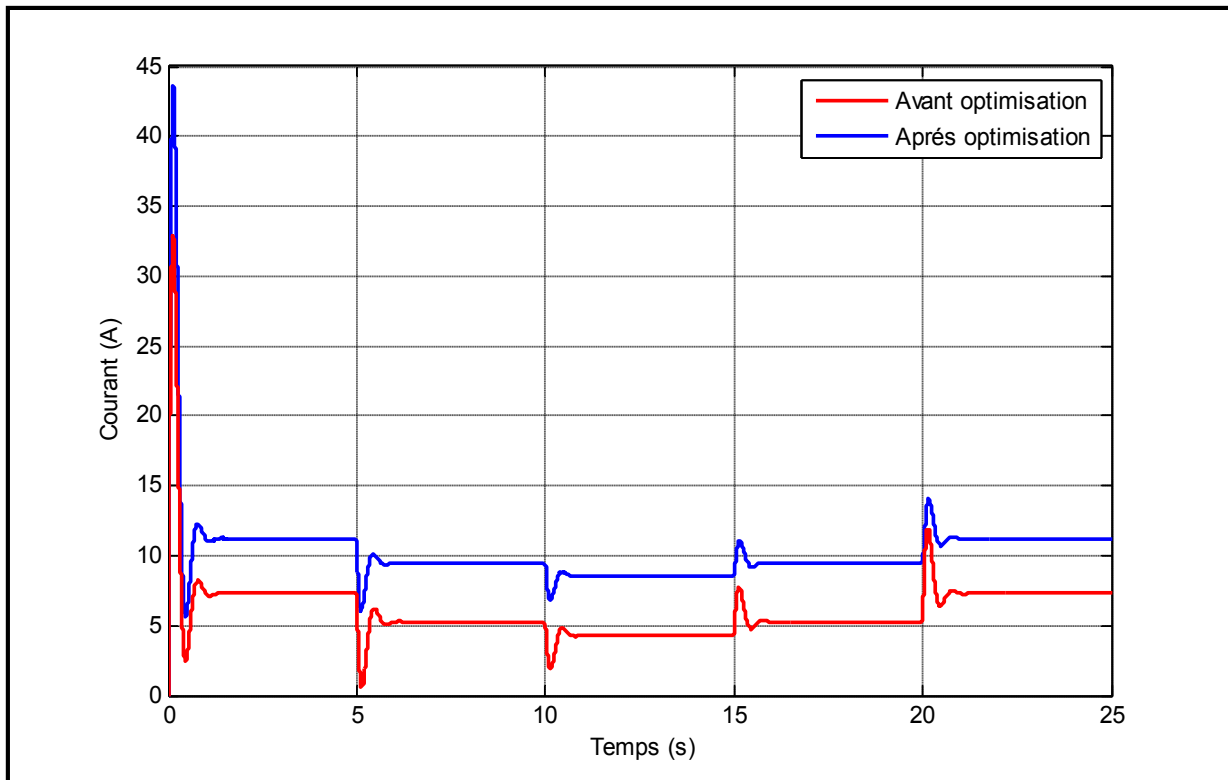
Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de couplage directe et indirecte (optimisé) de GPV avec moteur cc à aimant permanent, pour :  $T=25C^\circ$  et  $G=(700,800\text{et}1000\text{W/m}^2)$



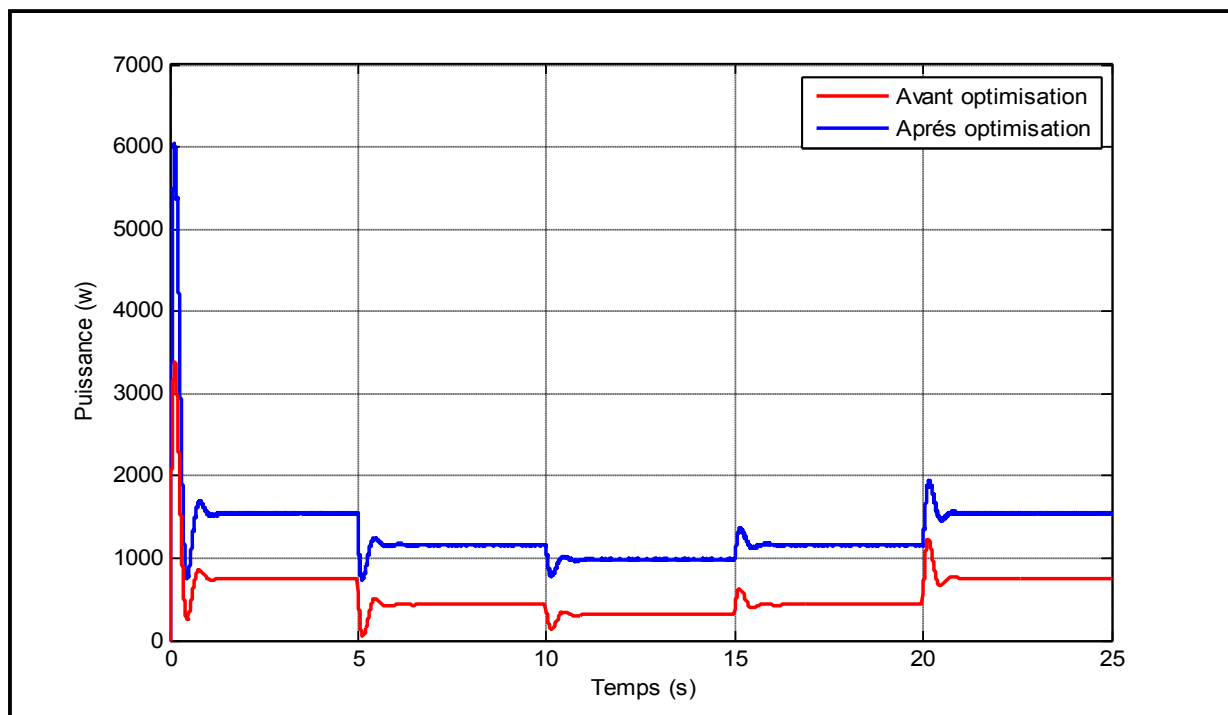
**Figure IV.13 :** La variation de L'ensoleillement en fonction de temps .



**Figure IV.14:** Variation de la vitesse du moteur en fonction de temps avant et après optimisation.



**Figure IV.15:** Variation du courant du moteur en fonction de temps avant et après optimisation



**Figure IV.16:** Variation de puissance du moteur en fonction de temps avant et après optimisation

Les figures (IV.10) , (IV.11) et (IV.12) montrent une augmentation intéressante de la vitesse, courant du moteur et la puissance d'un couplage indirecte par rapport à un couplage directe du système de pompage solaire. Après un régime transitoire très bref, ce qui explique le rôle de l'optimisation du système photovoltaïque.

De la figure IV.12, IV.16 et on remarque que la puissance du système soit couplage directe ou indirecte pour la configuration de branchement ( $N_p=3$  et  $N_s=8$ ) et supérieur par rapport a la configuration de branchement ( $N_p=4$  et  $N_s=6$ ),ce que fait l'influence de la configuration du modules sur le rendement du système de pompage photovoltaïque.

#### **IV.10. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présentés les différentes simulations des composants du système de pompage solaire tel que le générateur PV; le convertisseur et le groupe motopompe Ensuite on a fait une simulation du système complet en fonction de l'influence du changement de l'éclairement sur les caractéristiques électriques. et on a terminer par une étude comparative entre le système direct est optimisé par du déférant configuration.

Associer une configuration adéquate à la charge est une condition impérative pour avoir un système globale performant. Le dimensionnement du GPV étant donnée une charge se fait d'après les besoins énergétiques de cette dernière.

# *Conclusion générale*

Dans ce travail, il s'agit de modéliser et simuler un module photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT, destiné à pompage photovoltaïque. Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau PV en se basant sur un circuit équivalent à une diode. L'objectif était la simulation du fonctionnement du module et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension. A l'issue des simulations effectuées, nous avons constatés une forte dépendance des performances du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module.

Afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du module et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le module PV et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le module pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale. La solution fréquemment adoptée est l'incorporation d'un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge commandé directement par la technique PWM. Le choix de la structure de conversion est fonction de la charge à alimenter. La deuxième partie de ce mémoire était l'objet de la commande des convertisseurs Boost, communément utilisés dans les chaînes de conversion photovoltaïque. L'étude par simulation effectuée a montré la validation du calcul théorique des éléments passifs constituant ces convertisseurs.

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 montrés de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

L'étude des différents moteurs électriques du point de vue excitation et leurs caractéristiques électriques : couple - vitesses a montré que le MCC à aimant permanent présente un bon comportement 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 permet d'améliorer le rendement de l'installation du pompage solaire ; mais elle présente un inconvénient majeur lorsqu'une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau. Ce qui limite sa robustesse.

Il existe d'autres techniques modernes, insensibles et robustes, basées sur l'intelligence artificielle qui permettent une optimisation en temps réel du système de pompage tel que la logique flou et les réseaux neurones.

Finalement, les résultats des simulations ont montré que le système proposé permet d'améliorer l'efficacité du système de pompage.

# *Bibliographie*

- [1] ANGEL CID Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.
- [2] IBRAHIM Yassine, "Système hybride photovoltaïque éolien diesel Sans stockage Etudes, modélisation et contrôle en matlab/simulink", Mémoire d'Ingénieur de l'Université de Libanaise, 2013.
- [3] S. MASOUM Mohamed A., B adejani Seyed Mahdi Mousavi and Fuchs Ewald f., "Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for photovoltaic application", Vol. 19, September 2004
- [4] ABADA, Sofiane, " Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur Sepic ", Mémoire de Magister de l'Université LAVAL QUEBEC.2011
- [5] F. Lasnier, T. G. Ang, " Photovoltaic Engineering Handbook ", IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4
- [6] B. Flèche, D. Delagnes, " Energie solaire photovoltaïque ", juin 2007, STI ELT Approche générale.
- [7] MICHEL Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 2<sup>ème</sup> édition, le Moniteur, 2005.
- [8] BOUKHTOUCHE CHERFA Farida, "Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connecte au réseau de distribution électrique BT", Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique 2004.
- [9] S. MASOUM Mohamed A., BADEJANI Seyed Mahdi Mousavi and FUCHS Ewald f., "Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for photovoltaic application", Vol. 19, September 2004.
- [10] AKIHIRO Oi, "Design and simulation of photovoltaïque water pumping système", Thèse de Master de l'université California, Septembre 2005.
- [11] FORTIN André, Analyse numérique pour ingénieurs, 2<sup>ème</sup> édition, Presses internationales polytechnique, 1996
- [12] JIMMY Royer, THOMAS Djiako, BOCAR Sada Sy et ERIC Schiller, Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999 .
- [13] MESSAOUDI Salah et GOUGA Adel, "Étude comparative de quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque," Mémoire d'Ingénieur de l'Université Mohamed Khider de Biskra, 2007
- [14] M.ISSAADI Salim, "Commande d'une poursuite du pointe de puissance maximale MPPT par les réseaux de neurones", Mémoire de Magistère de l'Université de Bejaia, 2006.
- [15] CID PASTOR Angel, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse de Doctorat de l'Institut Nationale des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.
- [16] THANH PHU Nguyen, "Solar panel maximum power point tracker," Undergraduate Thesis, University of Queensland, 2001
- [17] FERNANDO Lessa Tofoli, Júlio César Schönell, Carlos Alberto Gallo, Sergio Manuel Rivera Sanhueza, "A Low cost single-phase grid-connected photovoltaic system with reduced complexity", Power Electronics Conference COBEP 09, Brazil, 2009.

- [18] MAKHEBI Charaf-Eddine et Toumert Mhand, "Etude et réalisation d'un régulateur analogique et numérique de la charge/décharge d'une batterie associée à un système photovoltaïque," Mémoire d'Ingéniorat de l'école Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [19] CHEKIREF Fatahya, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA", Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique 2008
- [20] V. Di Dio, D. La Cascia, R. Miceli and C. Rando, "A mathematical model to determine the electrical energy production in photovoltaic fields under mismatch effect," IEEE-ICCEP 2009 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italia, pp.46-51.
- [21] ABOUCHABANA Nabil, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT", Mémoire de Magister de l'Ecole National Polytechnique, 2008.
- [22] L.Protin et S.Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Techniques de l'Ingénieur, Edition 2003.
- [23] NECHE Kamal, "Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque", Mémoire d'Ingéniorat de l'Ecole National polytechnique, Juin 2008.
- [24] ADOUANE Mabrouk, "Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique", Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique 2008
- [25] AIT-CHEIKH Salah Mohamed, "Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques", Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique, Décembre 2007.
- [26] HART Daniel, Introduction to power electronics, Prentice Hall Inc , 1996.
- [27] CORINNE Alonso, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", Mémoire HDR de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, Décembre 2003.
- [28] MUKIND R . Patel, Wind and solar power systems, CRC Press, 1999.
- [29] Sy M. Mansour Niang & Souleymane Diop Institut Supérieur de Technologie Industrielle DIT Electrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation .2008
- [30] DEBILI Narimene, " Etude et optimisation en environnement matlab/simulink d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister de l'Université de Constantine1,2014
- [31] Mr. MEFLAH Aissa. " Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister université ABOU BEKR BELKAID - Tlemcen. 2011
- [32] M. MOULAY-Amar et M. Loghouini, " Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque ", Mémoire d'ingéniorat, de l'université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [33] S. BELAKEHAL. " Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ", 2010.
- [34] D.BOUKHERS " optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage ",Mémoire de magister université de Constantine 2007
- [35] S. Ameziane " Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien ", thèse de Magistère en Electrotechnique de l'Université de Batna.2009
- [36] A. Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister ,de l'Université de Biskra, 2000.
- [37] R. Chenni , L. Zarour , A. Bouzid and T. Kerba che " Comparative study of photovoltaic pumping systems using a permanent magnet synchronous motor and an asynchronous motor ", Rev. Energ. Ren. Vol. 9 (2006) 17 – 28

- [38] R.chenni , "Etude techno-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire " , thèse de doctorat de l'université de Constantine .2007 .
- [39] M.BOUKLI Hacene. " conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique " , mémoire de magister , de l'Université Aboubaker belkaid ,Tlemcen.2011
- [40] HINDMARSCH J, Electrical machine and their applications, 4th ed. New York: Pergamon press; 1984
- [41] M . BOURIB Samira, "Conception et réalisation d'un système de contrôle à base de pic 16F876 pour accumulateurs au plomb", Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2005.
- [42] M. Masour niang & Souleymane Diop, " Les pompe solaires : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher" , Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT électrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation.2008.
- [43] CHERAITIA El foudil, "Etude et réalisation d'une alimentation d'un centre de transmission à travers une source d'énergie photovoltaïque", Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Nationale Polytechnique, 2004.
- [44] E. Koutoulik, K. Kazantzakis, Member, IEEE, and Nicholas C. Voulgaris " Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", IEEE transactions on power electronics, 2001
- [45] Corinne Alonso, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie," Thèse Doctorat de l'Université de Paul Sabatier, Toulouse III, 2003.
- [46] Anca Hansen, Poul Sørensen, Lars Hansen and Henrik Bindner, "Models for a standalone PV System,"Rapport de Ris National Laboratory, Denmark, 2000.
- [47] N. Hamrouni, M. Jraïdi, and A. Chérif, "New control strategy for 2-stage gridconnected photovoltaic power system, " Renewable Energy, Vol.33, 2008, pp. 2212-2221.
- [48] Abdessalem Titraoui, Ahmed Sahroui et Mohamed Nadir, "Etude d'une chaine de conversion photovoltaïque," Mémoire d'Ingénieur de l'Université de M'sila, 2010.
- [49] Maria Carmela Di Piazza, Antonella Ragusa, Massimiliano Luna and Gianpaolo Vitale, "A dynamic model of a photovoltaic generator based on experimental data," International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada, Spain, March 2010.
- [50] Ahmed Hessien, kotaro, Hirasawa, jinglu Hu and junichi Murat, "The dynamic performance of photovoltaic supplied DC motor Fed from DC-DC converter and controller by neuronal network," International Joint Conference, Vol. 1, No. 2, Août 2002, pp. 607-612
- [51] A. C. Pastor, " Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse de doctorat de l'Institut National de Science Appliquée de Toulouse.
- [52] N. Abouchabana, "Etude d'une nouvelle topologie buck-Boost appliquée à un MPPT " ; Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009
- [53] Cours "PIPVoitureSolaire.pdf", <http://das.ensica.fr> .
- [54] M.Masour niang & Souleymane Diop. " Les pompe solaires :Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher " Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT électrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation.2008.

# Annexe

## 1/ CARACTERISTIQUE DE LA MCC A AIMANT PERMANENT [50]

<b>La tension nominale</b>	$U_n$	120	V
<b>Le courant nominale</b>	$I_n$	9.2	A
<b>La vitesse nominale</b>	$n$	1500	tr/min
<b>Le moment d'inertie</b>	$J$	0.02365	Kg.m <sup>2</sup>
<b>La résistance d'induit</b>	$R_a$	1.5	$\Omega$
<b>L'inductance d'induit</b>	$L_a$	0.2	H
<b>Constante de tension</b>	$K_e$	0.67609	Nm.A <sup>-1</sup>
<b>Couple de frottement</b>	$C_f$	0.2	Nm
<b>Coefficient de frottement visqueux</b>	$B_m$	0.002387	Nm.s.rad <sup>-1</sup>
<b>Coefficients de proportionnalité</b>	$K_r$	0.00059	Nm.s.rad <sup>-1</sup>

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

**SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES**

Année Universitaire:2015/2016

**Proposé et dirigé par :** Mr Abdelghani HARRAG

**Présenté par:** Mr TIITRAOUI Abdessalam

## **Thème**

### **ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN SYSTEME PV APPLICATION AU POMPAGE D'EAU**

#### **Résumé :**

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. Dans ce contexte, l'utilisation des systèmes photovoltaïques ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible, de plus le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile ce qui minimise les coûts récurrents d'opération et de maintenance. Néanmoins, la nature variantes des conditions météorologique et atmosphérique ainsi que d'autres problèmes technique tel que l'ombrage ou les défauts imposent une optimisation de la puissance des systèmes photovoltaïques, dans le but d'augmenter le rendement de ces systèmes. en réalisant une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge.

L'objectif de cet mémoire est étude d'un système photovoltaïque et présenter une méthode d'optimisation de système de pompage photovoltaïque, puis la comparaison entre le couplage direct et la technique de poursuite du point de puissance maximale MPPT,... etc. Cette étude est dédiée au pompage d'eau, elle intègre entre autre une analyse comparative des deux modes de couplage direct et indirect. Ce dernier utilisant la technique de poursuite du point de puissance maximale MPPT, s'avère plus que nécessaire. les résultats de simulation réalisées prouvent l'efficacité du couplage indirect sous différentes conditions d'utilisation .

**Mots Clés:** GPV, Convertisseur DC-DC, PWM, MPPT, Hacheur boost MPPT, -Motopompe, MCC, HMT

N° d'ordre : CSE\_204.