

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

Faculté des Sciences de la Technologie
Département d'Electronique

N°d' ordre :

SERIE :



THESE

PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

Magister en Electronique

Option: Matériaux et nanoélectronique

Présentée par :

M^{elle} DEBILI Narimene

Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque

Devant le jury :

Président : Mohamed REMRAM

Professeur UCI

Rapporteur : Abdesselam HAOUAM

Maître de conférences A . UCI

Examineurs : Tahar KERBACHE

Professeur UCI

Rachid CHENNI

Professeur UCI

Année 2014/2015

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur A.HAOUAM, maître de conférence classe A, de l'université Constantine 1 qui a permis de réaliser ce travail sous sa direction et pour son soutien précieux tout le long du travail.

Je remercie vivement :

- Monsieur M.RAMRAM, professeur à l'université Constantine 1 qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

- Monsieur T.KERBACHE, Professeur à l'université Constantine 1 pour son accord d'être examinateur de cette thèse .

- Monsieur R.CHENNI, professeur à l'université Constantine 1 , pour son intérêt accru dans ce domaine et pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je souhaite remercier aussi Monsieur L.ZAAROUR pour toute l'aide qu'il m'a apporté .

Dédicace

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir
donné la force et le courage.*

Je dédie cette thèse à ...

*A l'âme de mon grand Père Salah : Aucune dédicace ne saurait exprimer
l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien
au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien
être ; que la terre lui soit légère, amen.*

*A l'âme de ma grande mère (MiMi) je te remercie pour toute l'affection et la
gentillesse que tu as sommée en mon cœur, la joie de vivre, et les conseils si doux que
je n'ai jamais entendu.*

*A l'âme de ma mère Nazifa. qui a toujours souhaité que je réussisse dans mes
études et dans ma vie Je prie le Tout Puissant ALLAH pour le repos de son âme,
amen !*

*A ma chère grande mère maternelle Nadia : Tu représentes pour moi le symbole de
la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a
pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*A mon très cher oncle Ahmed pour tous qu'il m'a donné , pour sa
compréhension : Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel, ta gentillesse sans*

égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études. Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.

A mon père hamid pour son soutien et sa présence : Votre affection et votre soutien m'ont été d'un grand secours au long de ma vie professionnelle et personnelle. Veuillez trouver dans ce modeste travail ma reconnaissance pour tous vos efforts.

A ma soeur souheila et son mari Abdelghani et leurs petites filles Maha et Rafif

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de

l'affection que je porte pour vous.

Je vous dédie ce travail avec tous mes voeux de bonheur,

de santé et de réussite.

A mes sœurs et frères : Hind ,Hala ,Maroine et Akram

; Je vous remercie pour votre aide sans égal et votre affection si sincère.

A tous mes amis et a tous ceux qui me sont chers ;

Debili Narimene

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES	
I-1- Introduction	3
I-2- Le Rayonnement solaire	3
I-2-1 Le spectre du rayonnement....	4
I-2-2 La durée d'insolation.....	5
I-3 Conversion photovoltaïque.....	6
I-3-1 L'effet photovoltaïque	6
I-3-2 Le principe de la conversion photovoltaïque.....	6
I-3-3 La cellule photovoltaïque	7
I-3-2 Les types des cellules	7
I-3-3 Rendement des cellules.....	7
I-4 Le module photovoltaïque.....	8
I-5 Classification des systèmes photovoltaïques.....	9
I-5-1 Les systèmes isolé ou autonome	9
I-5-2 Les systèmes raccordés au réseau	9
I-6 Utilisation des systèmes solaire	9
I-7 Avantages et inconvénients des Systèmes photovoltaïques	10
I-7-1 Avantages.....	10
I-7-2 Inconvénients.....	10
I-8 Conclusion	11
CHAITRE II : GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES	
II-1 Introduction.....	11
II-2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	11
II-3 Les paramètres d'une cellule solaire.....	12
II-3-1 La Tension en circuit ouvert V_{oc}	12
II-3-2 Le Courant de court-circuit I_{sc}	12
II-3-3 La Puissance maximale P_{max}	12
II-3-4 Le Facteur de qualité.....	13
II-3-5 Le Facteur de forme ff	13

II-3-6 Rendement énergétique maximum η	13
II-4 Les paramètres qui influent sur la caractéristique I(V).....	13
II-4-1 L'influence de la résistance série.....	14
II-4-2 Influence de l'éclairement.....	14
II-4-3 Influence de la température.....	15
II-5 Générateur photovoltaïque.....	15
II-5-1 Le module photovoltaïque.....	16
II-5-1-1 Association des Modules.....	16
II-5-1-1-1 Association en série.....	16
II-5-1-1-2 Association en parallèle.....	17
II-5-1-1-3 Association mixte des Générateurs photovoltaïques.....	17
II-6 Conclusion.....	18
CHAPITRE III :MODELISATION DU SYSTEME POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE	
III-1 Introduction	19
III-2 La modélisation du générateur photovoltaïque.....	19
III-2-1 Modalisation d'une cellule solaire	19
III-3 Modélisation d'un module BP MSX60 de BP Solaire.....	23
III-3-1 Caractéristique courant- tension, puissance– tension.....	23
III-3-2 Influence de la température.....	23
III-3-3 Influence de l'éclairement.....	24
II-3-4 Influence de l'éclairement et la température.....	25
II-3-5 Influence de la résistance série.....	25
II-3-6 Influence du Facteur de qualité	26
III-3-7 L'influence de l'association en parallèle ,série ,mixte des modules.....	27
III-3-8 Zone de fonctionnement du module solaire	27
III-4 Adaptation du générateur photovoltaïque à la charge.....	28
III-4-1 Connexion directe source-charge	28
III-4-2 Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	29
III-4-3 Les convertisseurs DC-DC.....	29
III-4-3-1 Convertisseur dévolteur (Buck - converter).....	30
III-4-3-2 Convertisseur survolteur (Boost - converter)	32
III-4-3 Le convertisseur Buck-Boost.....	33
III-5 Modélisation du groupes motopompe d'un système photovoltaïque.....	35

III-5-1 Le Moteur.....	35
III-5-1-2. Le moteur à aimant permanent sans balais.....	36
III-5-1-4 Résultats de simulation de moteur à aiment permanent.....	36
III-5-2 Les pompes	38
III-5-2-2 Types des pompes.....	39
III-5-2-2-1 Pompe volumétrique	39
III-5-2-2-1-1 Caractéristiques Débit-vitesse.....	39
III-5-2-2-1-2 Caractéristiques puissance- vitesse.....	40
III-5-2-2-1-3 Caractéristiques débit -hauteur	40
III-5-2-3 La pompe centrifuge.....	40
III-5-2-3-1 Principe de fonctionnement	41
III-5-2-3-2 Constitution d'une pompe centrifuge	41
III-6 Modélisation de la pompe centrifuge	42
III-6 -1 Les pertes de charge.....	42
III-6-1-1 Pertes de charges linéaires	42
III-6 -1-2 Pertes de charges singulières	42
III-6 -2-Les caractéristiques de la pompe centrifuge	43
III-6 -2-1 La caractéristique débit- vitesse	43
III-6 -2-2 La caractéristique couple-vitesse.....	44
III-6 -2-3 La caractéristique débit- hauteur.....	44
III-6 -2-4 La caractéristique de puissance.....	45
III-6 -2-5 La caractéristique du rendement	46
III-7 Les différents types d'installation du groupe motopompes.....	46
III-8 Conclusion	48
 Chapitre IV: Simulation et optimisation du système de pompage sous MATLAB/SIMULINK	
IV-1 Introduction	49
IV-2 Simulation du générateur photovoltaïque.....	49
IV-2-1 Modèle d'un module PV	49
IV-3 Simulation d'un moteur à courant continu	52
IV-4 Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.....	53
IV-4-1 Dimensionnement du motopompe	54
IV-4-2 Dimensionnement du générateur PV	55

IV-5 Couplage directe d'un moteur à courant continu au générateur PV.....	55
IV-6 Couplage à travers un convertisseur.....	56
IV-6-1 Principe de la recherche MPPT.....	57
IV-6-2 Les algorithmes du point de puissance maximale.....	57
IV-6-2-1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	57
IV-6-2-2 Méthode de l'incrément de Conductance.....	58
IV-6-2-3 Algorithme capacité- parasite (PC).....	60
IV-7 Optimisation du système de pompage photovoltaïque.....	61
IV-8 Simulation du système globale.....	62
IV-9 Résultats de simulation	63
IV-10 Conclusion	69
Conclusion générale	70
Liste des figures.....	71
Annexe	74
Nomenclature.....	79
Références Bibliographiques	82
Résumé	85

Introduction générale

Le réchauffement climatique et la pollution de l'environnement d'une part et l'épuisement dans les décennies à venir des ressources à base de combustibles fossiles d'autre part sont aujourd'hui les deux principales préoccupations dans le monde entier. Les énergies renouvelables sont une solution pour remplacer les sources d'énergie classiques qui sont polluantes et tendent à disparaître.

L'utilisation de l'énergie solaire dans notre pays est largement justifiée, et surtout dans le domaine du pompage solaire dans les régions isolées et arides (Sahara Algérien).

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.

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.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque, 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 des généralités sur la technologie photovoltaïque. En commençant par des notions sur le rayonnement solaire, dans deuxième temps nous montrons les différents types de systèmes photovoltaïques, et on terminera avec les Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le second chapitre nous allons étudier le générateur photovoltaïque. En commençons par l'étude des caractéristiques et des paramètres électriques d'une cellule solaire, ainsi que l'influence des différents paramètres électriques, mécaniques, et de la température sur les caractéristiques du module.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des éléments du système de pompage photovoltaïque (champ photovoltaïque, convertisseur et groupe motopompe). Dans une première étape, en exposant d'une manière détaillée la modélisation mathématique, le principe de fonctionnement et la caractéristique $I=f(V)$ du générateur. Dans une seconde étape, un aperçu

théorique sur le moteur à aimant permanent et les pompes qui peuvent être utilisés dans le pompage PV. Il présente aussi le modèle mathématique de chacun de ces composants.

Et pour parvenir au quatrième chapitre, qui se résume une simulation complète avec et sans optimisation d'un système de pompage solaire.

En fin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.

I-1 Introduction :

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m², lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau [1]. Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend des facteurs suivants:

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses .

I-2 Rayonnement solaire

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

✓ Le rayonnement direct :

La conversion du rayonnement direct E_D est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

✓ Le rayonnement diffus :

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

✓ Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

✓ Le rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous figure (I.1) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

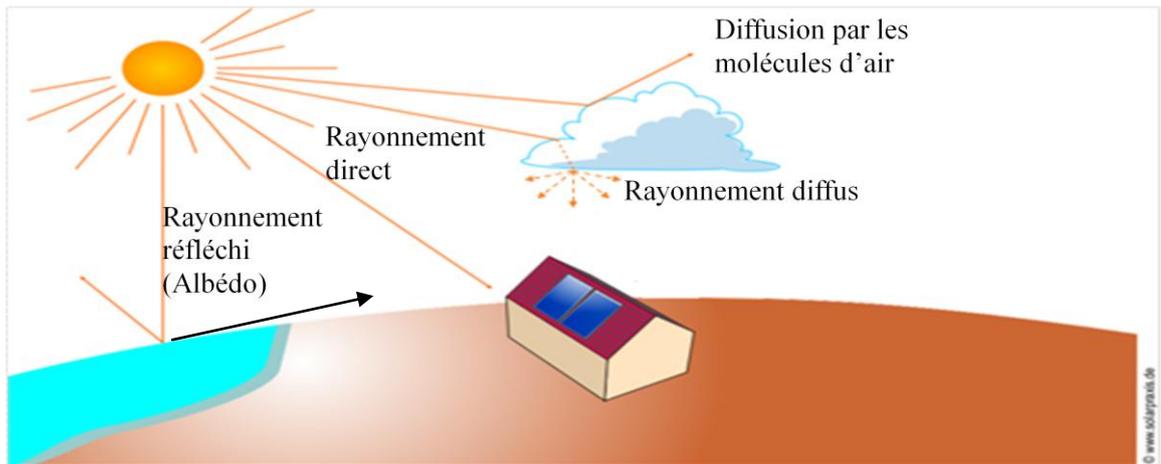


Fig. (I.1) : Types de rayonnement solaire reçus au sol.

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [2]:

Dans la figure (I.2) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil.

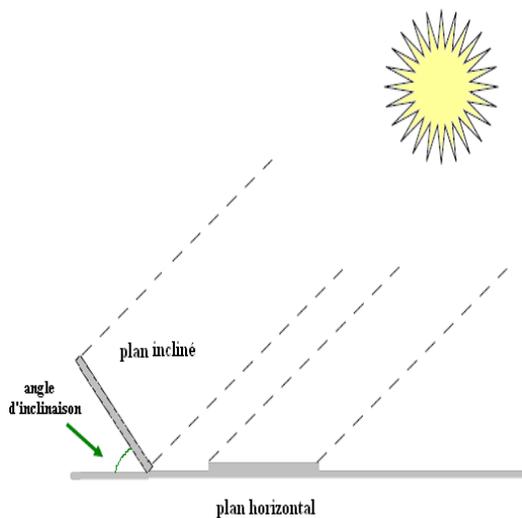


Fig. (I.3): Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné

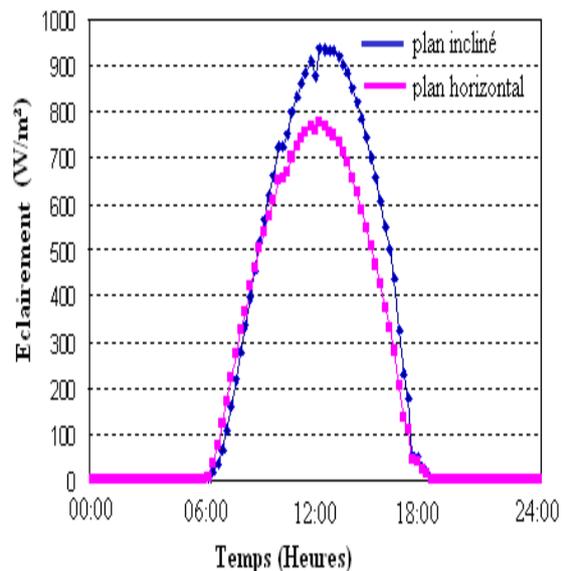


Fig. (I.2): Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné

I-2-1 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ ; elle est donnée par la formule suivante :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

où :

h : La constante de Planck. égale à $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$

C : La vitesse de propagation égale à $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

La figure (1.4) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en [3]:

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	6.4%.
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%.
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%

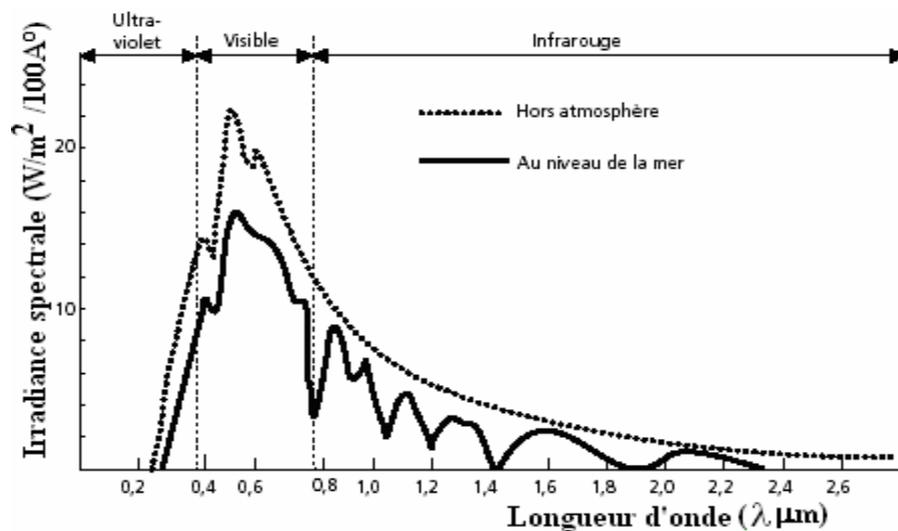


Fig. (I.4) : Analyse spectrale du rayonnement solaire.[8]

I-2-2 Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui elle-même dépend de la période de l'année considérée [3].

I-3 La conversion photovoltaïques :

1-3-1 L'effet photovoltaïque :

Il s'agit de transformer l'énergie contenu dans la lumière du soleil en énergie électrique à travers d'un capteur constitué de matériaux sensible à l'énergie contenue dans les photons .Ce capteur présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule PV .L'effet photovoltaïque fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel [4].Toutefois ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell , aux Etats-Unis parvinrent à fabriquer la première photopile ; l'élément primaire ou de base de la conversion photovoltaïque [4] .

I-3-2 Le principe de la conversion :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.[5].

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée [8,10]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron - trou . Si une charge est placée aux bornes de la cellule , les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure , donnant naissance à une différence de potentiel [8,10,12] . Voir la figure (I.5).

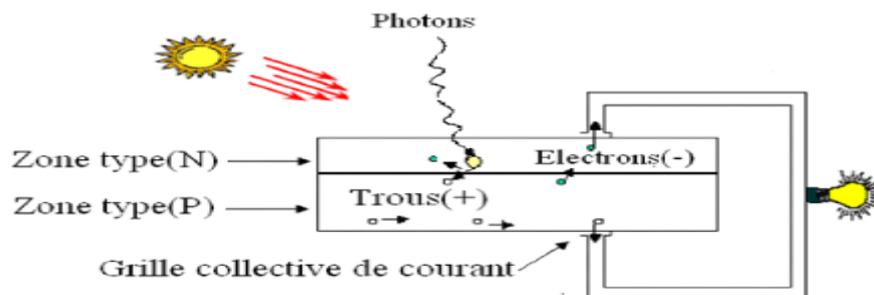


Fig. (I.5) : Présentation schématique d'une cellule solaire.

I-3-3 La cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs électronique réalisées à l'aide des composants semi-conducteurs qui possèdent la particularité de produire l'électricité quand 'ils sont éclairés . Elle sont généralement faites du silicium sous ses différentes formes.

I-3-3-1 Types des cellules :

La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial , sont à base de silicium, soit du type mono , poly cristallin ou amorphe.

Les cellules monocristallines : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le cout le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

Les cellules poly cristallin : Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.

Les cellules amorphes : Elles ont un faible rendement, 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.

I-3-3-2 Rendement d'une cellule :

Le tableau suivant (1-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement

Tableau 1-1.Les différents types des cellules avec leur rendement.

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5-9%
Silicium poly cristallin (p-Si)	19,8%	11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%	13 à 17%

$$\eta_{TC} = \frac{P_m}{E_{STC} \times S_{cellule}} \quad (I. 2)$$

η_{TC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque

P_m : La puissance produite par le générateur PV

E_{STC} : L'éclairement absorbé par la cellule

$S_{cellule}$: La surface de la cellule [m²].

Ce rendement dépend plusieurs facteurs [18]:

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

I-4 Le module photovoltaïque

Un module est constitué des cellules associées en série/parallèle encapsulées et protégées de l'humidité par un matériau qui enrobe les cellules c'est le l'Acétate d'éthylène-vinyl (EVA).

La face avant du module doit être en verre qui a les caractéristiques suivante :

- Bonne transparence.
- Résistance à l'impact et à l'abrasion.
- Etanchéité à l'humidité.

La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits «bi-verre») soit en composite tedlar/alu/tedlar (polyéthylène).

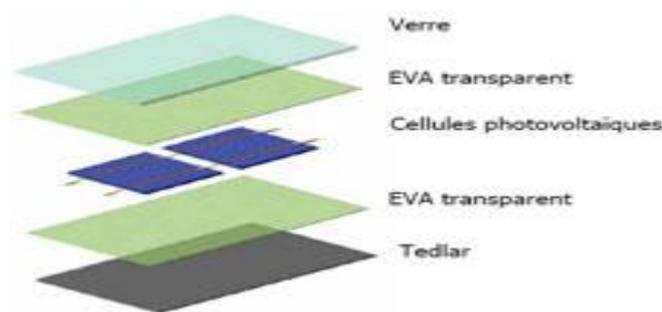


Fig.(I.6) : Constitution d'un module photovoltaïque.

Le module lui même doit être protégé 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 . Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque.

- **La protection par diodes parallèles (ou by-pass) :** a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défektivité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules.
- **La diode série:** placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée encore diode anti-retour.

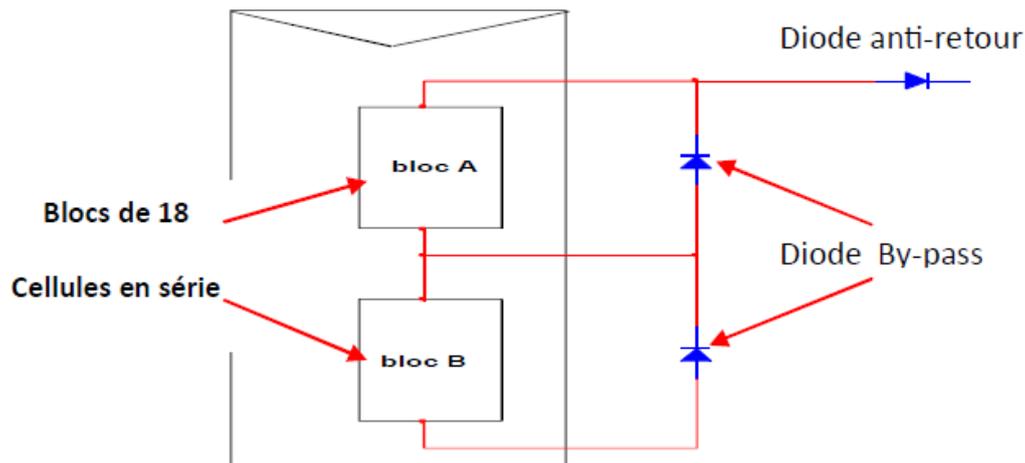


Fig.(I.7) : protection des modules par les diodes anti retour et by-pass

I-5 Classification des systèmes photovoltaïques :

Le système solaire photovoltaïque peut être classifié selon l'autonomie en deux classes :

I-5-1 Système isolé ou autonome :

Ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide de plusieurs composants mais le plus importants ce sont les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique. Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont : Accumulateurs au plomb-acide et accumulateurs au nickel-cadmium [8] .

I-5-2 Système raccordé au réseau :

Un système photovoltaïque connecté au réseau ,c'est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur . Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

I-6 Utilisation des systèmes solaires:

- L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus,...) .
- Les communications (Stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes, téléphones mobiles,...) .
- La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal (Forêts, montagnes, ..) .
- Capteurs isolés (Infos météorologique, enregistrements sismiques, recherche scientifique,...) .
- Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation .
- Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques..) .

I-7 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque :

En tant que source d'énergie électrique , un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

Avantages du photovoltaïque :

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité , peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

Inconvénients du PV :

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 23.4 %
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

I-8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présentés des généralités sur l'énergie solaire et ses caractéristiques , ainsi que les deux types de systèmes photovoltaïques existants ; ensuite on a terminé par les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire .

II-1 Introduction:

La partie production d'énergie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules , qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité.

Un panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins de 1 V. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou un panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque.

Dans notre étude on se base sur l'élément de base du système photovoltaïque qui est la cellule solaire.

II-2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.1) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

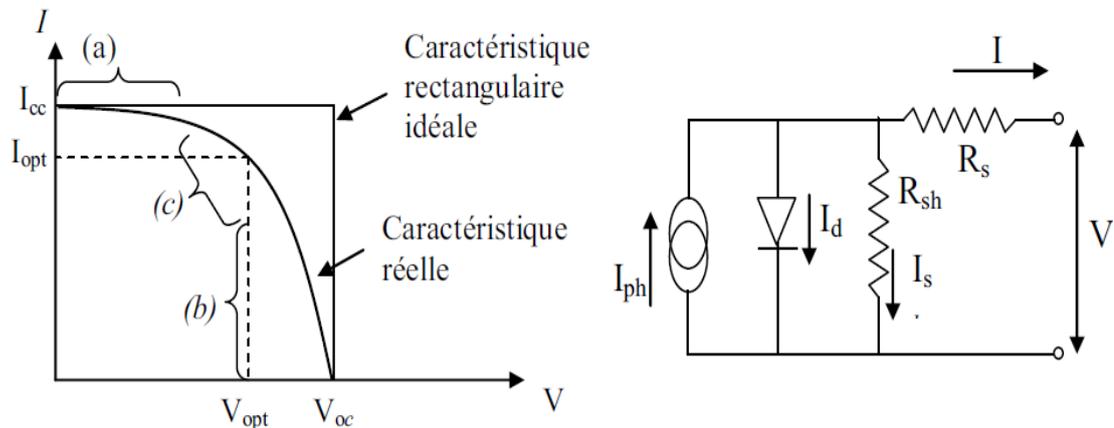


Fig. (II.1) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Pour la cellule idéale,

$$I = I_{ph} - I_d \quad (V) \quad (II.1)$$

où

I_d : Courant de la diode .

I_{ph} : Le photo courant.

$$I_d = I \left(e^{\frac{qv}{Akt}} - 1 \right) \quad (II.2)$$

$kT/q = 26 \text{ mV}$ à 300 °K (27°C) pour le silicium.

A : Coefficient d'idéalité de la diode .

La relation entre les trois grandeurs, I , I_{ph} et $I_d(V)$ représente la caractéristique courant tension idéale permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires :

- Le courant de court-circuit I_{cc} .
- La tension en circuit ouvert V_{oc} .
- Le facteur de qualité A .
- Le facteur de forme ff .

La caractéristique $I(V)$ se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement .
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} .
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

II-3 Les paramètres d'une cellule solaire :

II-3-1 La tension à circuit ouvert V_{oc} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt . Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse

$$V_{co}(I = 0) = V_t \log \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_o} \right) \quad (\text{II.3})$$

II-3-2 Le courant de court-circuit I_{sc} :

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

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (\text{II.4})$$

II-3-3 La Puissance maximale P_{max} :

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

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (\text{II.5})$$

Le produit ($V_{max} * I_{max}$) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ($V_{co} I_{sc}$).

II-3-4 Le facteur de qualité :

A est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace (compris entre 1 et 2).

II-3-5 Le facteur de forme ff :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$ff = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} I_{sc}} \quad (II.6)$$

II-3-6 Rendement énergétique maximum η :

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente :

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{P_{incidente}} = \frac{P_{max}}{E.S} \quad (II.7)$$

Où

S : Surface de cellule solaire.

E : Flux incident.

La droite passant par l'origine et le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile comme le montre la figure (II.2).

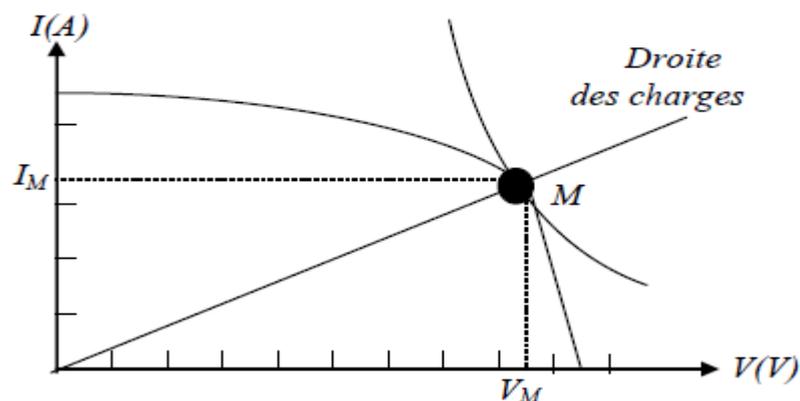


Fig. (II.2) : Caractéristiques électrique d'une cellule élémentaire .

II-4 Les paramètres qui influent sur la caractéristique I(V) :

Quatre paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule solaire ou un générateur photovoltaïque :

- La résistance série R_s .

- La résistance shunt p .
- L'éclairement E .
- La température T .

II-4-1 L'influence de la résistance série :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible [13]. La figure (II.3.a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de la résistance série. Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite du point M de la figure (II.2)). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant. La figure (II.3.b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche du point M de la figure (II.2)). Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée [15].

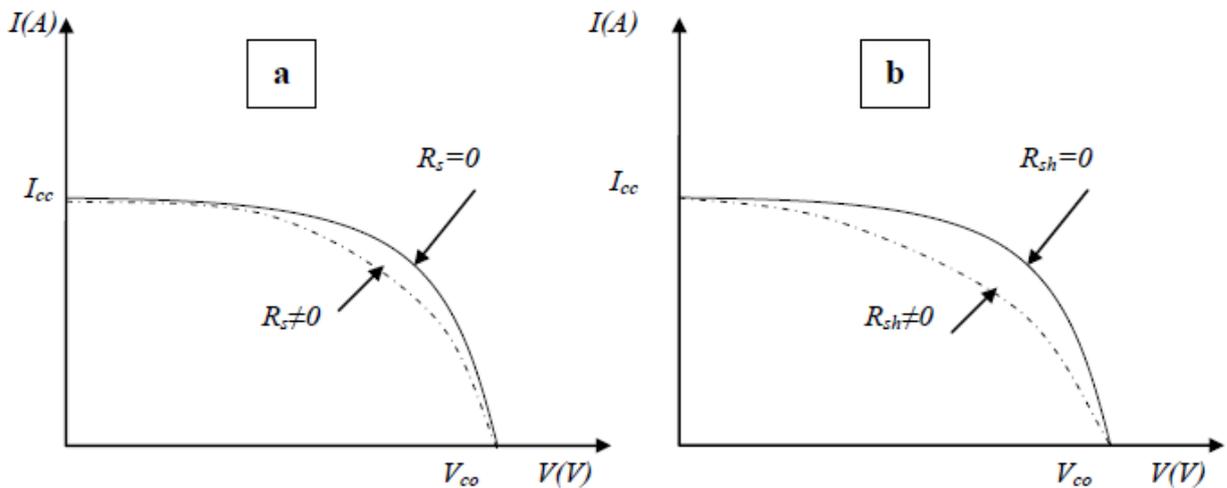


Fig. (II.3) :L'influence de la résistance R_s (a) et R_p (b) sur $I(V)$.

II-4-2 Influence de l'éclairement :

La figure (II.4) présente la caractéristique $I(V)$ d'un module photovoltaïque pour différents ensoleillements à la température fixe. Comme on peut voir sur la figure, le courant du module est

proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement .

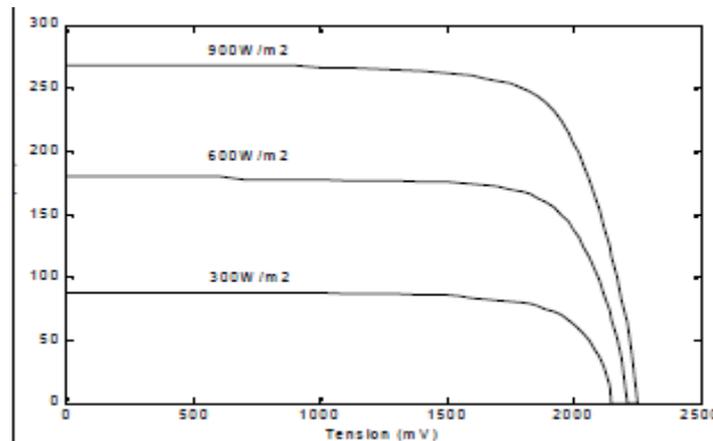


Fig.(II.4) : Influence de l'éclairement sur I(V).

II-4-3 Influence de la température :

On peut observer l'effet de la température sur la caractéristique I(V) .Comme le montre la figure (II.5), la température a un léger effet sur le courant, mais une augmentation de la température cause une diminution apparente sur la tension de circuit ouvert.

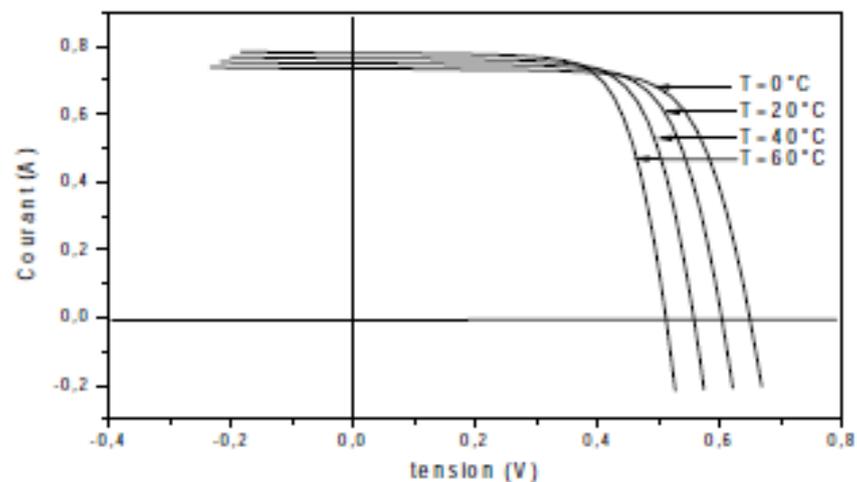


Fig. (II.5) : Influence de la température sur I(V).

II-5 Les panneaux photovoltaïques:

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules connectés en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaires.

La tension de sortie du générateur photovoltaïque dépend du nombre de modules en série alors que le courant de sortie dépend du nombre de modules en parallèle.

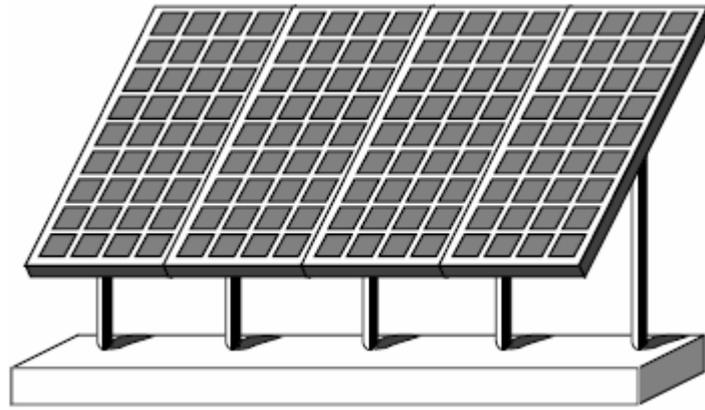


Fig.(II.6) : Champ photovoltaïque.

II-5-1 Le module photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque produit une tension d'environ 0.6V, pour augmenter cette tension on connecte un certain nombre des cellules (36 ou 72 cellules) en série pour aboutir à une tension désirée de l'ordre de 21V. Quand les cellules connectées en série sont placées dans une armature, l'ensemble constitue un module photovoltaïque.

Un module de 36 cellules fournit une tension appropriée pour charger une batterie de 12V, et pareillement un module de 72 cellules est approprié pour une batterie de 24V.

II-5-1-1 Association des Modules :

Il existe trois types de l'association :

II-5-1-1-1 Association en série :

L'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

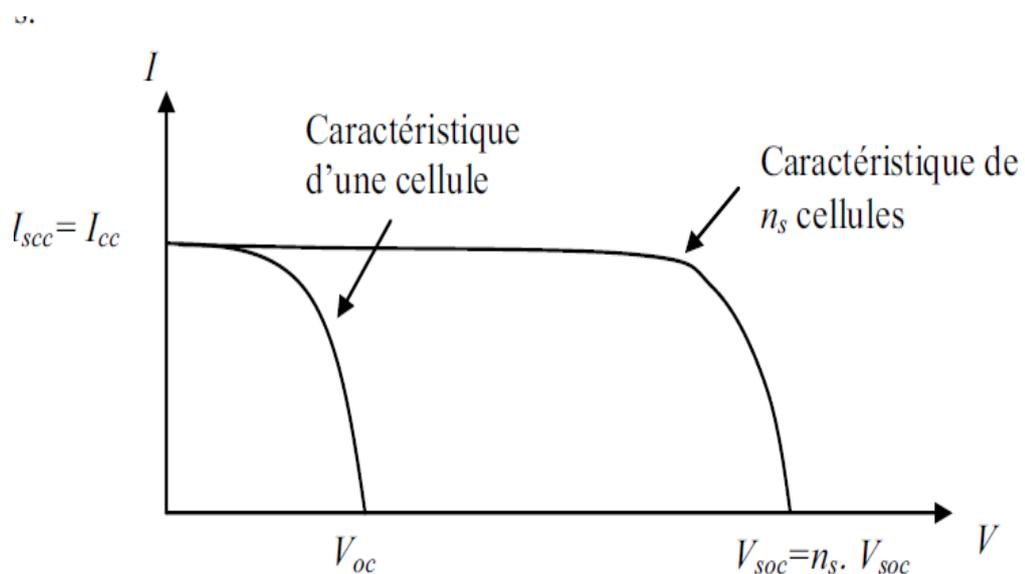


Fig.(II.7) : Caractéristique résultante d'un groupement série de n_s cellules identiques

II-5-1-1-2 Association en parallèle:

L'association en parallèle des photopiles délivre une courant égale à la somme des courants individuelles et une tension égale à celui d'une seule cellule [16].

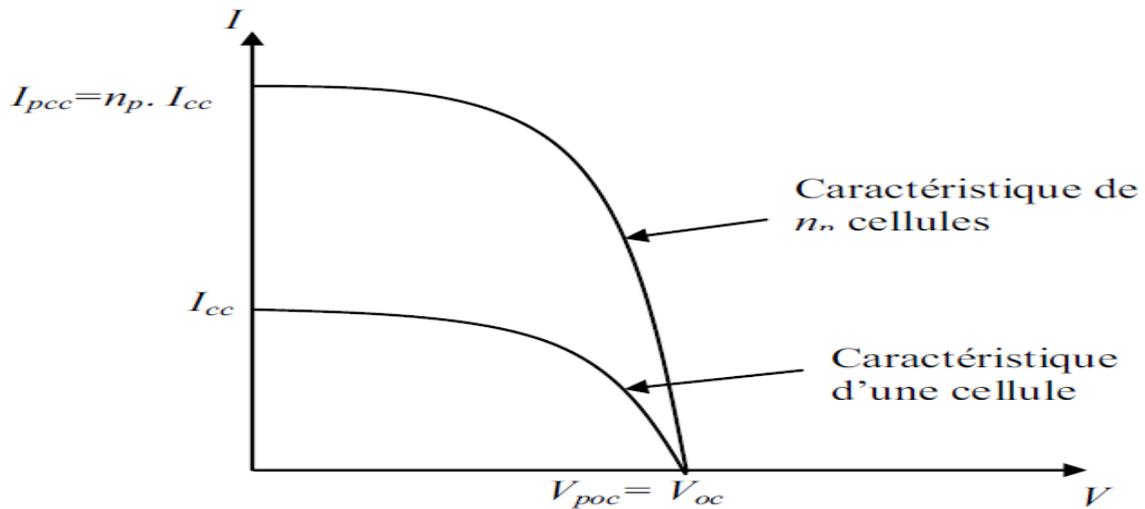


Fig.(II. 8) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques

II-5-1-1-3 Association mixte des générateurs photovoltaïques :

Pour atteindre une puissance importante , il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle ;car une cellule ne suffit par pour alimenter une charge DC de la taille d'une station de pompage . Cette interconnexion de modules entre eux définit la notion du générateur photovoltaïque (GPV).

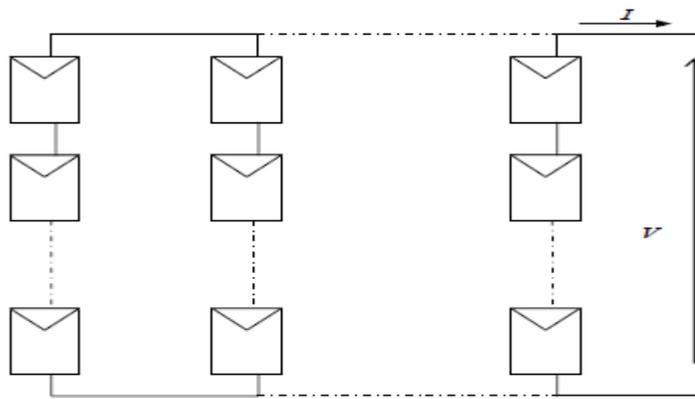


Fig. (II.9) : Association de mixte des cellules solaires photovoltaïques .

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série N_s cellules et N_p parallèle est la suivante :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(e^{\frac{1}{V_t A} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{R_p} \right)} - 1 \right) - \frac{N_p}{R_s} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{R_p} \right) \quad (\text{II.8})$$

La figure (II.10) montre l'influence de groupement mixte sur la puissance et le courant d'un générateur Photovoltaïque.

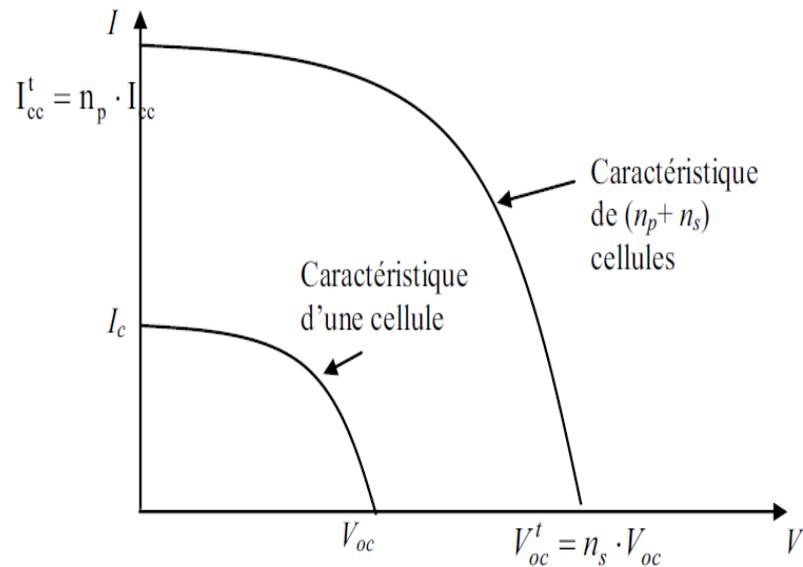


Fig. (II.10) : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques

II-6 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présentés la production de l'énergie électrique à partir d'un générateur photovoltaïque. Nous nous sommes intéressés à l'étude d'un modèle d'une cellule photovoltaïque, avec son schéma équivalent. Ensuite nous avons considérés les différents paramètres du circuit équivalent qui permet de tracer la caractéristique $I(V)$. Nous avons remarqués que les performances d'un GPV sont fortement influencées par des conditions météorologiques tel que l'éclairement et la température ainsi par les paramètres internes résistance série et parallèle.

Dans le chapitre suivant nous passerons à la modélisation sous Matlab d'un système de pompage photovoltaïque afin de tester les paramètres intensifs influents.

III-1 Introduction

Généralement , un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque , un hacheur , et un groupe motopompe . Les système de pompage photovoltaïque étudié fonctionne au fil du soleil . Dans ce chapitre la modélisation de chaque composant de ce système sera présentée .

III-2 Modélisation du générateur photovoltaïque :

III-2-1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

a Cas idéal :

Le modèle d'une cellule à une diode dans le cas idéal est caractérisé par son schéma électrique équivalent (Figure III.1).

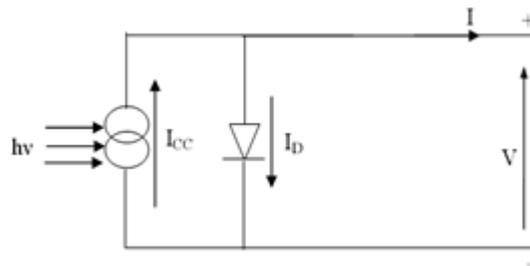


Fig. (III.1) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéal

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est donnée par :

$$I = I_{cc} - I_d = I_{cc} - I_0 \left(e^{\frac{qv}{kt}} - 1 \right) \quad (\text{III.1})$$

I, V : Le courant et la tension fournis par la cellule.

I_D : Le courant de diode donnée par:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qv}{Akt}} - 1 \right) \quad (\text{III.2})$$

I_0 : Courant inverse de saturation ou le courant de fuite de la diode (A) .

q : La charge de l'électron qui est égale à $1,60217646 \cdot 10^{-19}$ C .

k : La constante de Boltzmann qui est égale à $1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J. K⁻¹.

T : La température de la jonction PN (K) .

A : La constante d'idéalité de la diode. Plus elle est proche de 1 et plus la diode est idéale.

La figure (II.2), représente les différentes courbes de courants [6].

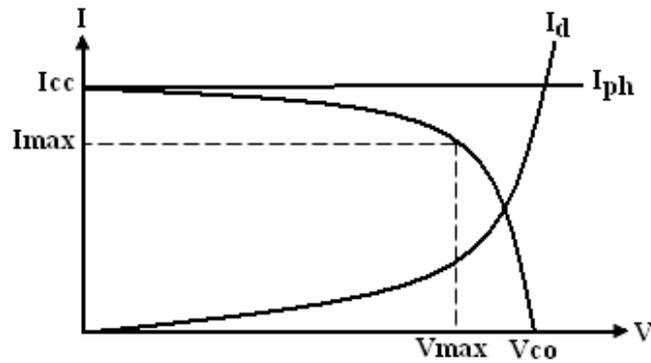


Fig. (III.2) : La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque

b- Cas réel :

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances (R_s ; et R_p) [14] :

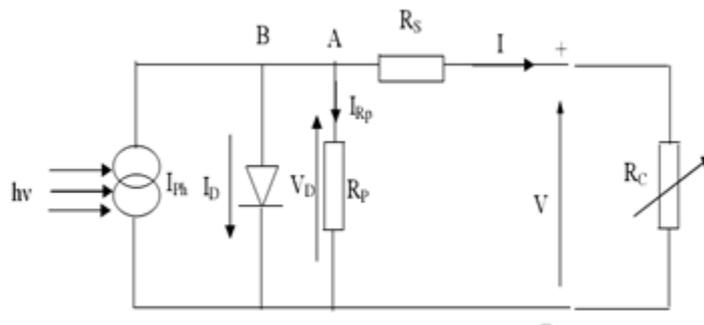


Fig. (III.3) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réel .

- **R_s** : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semi-conducteur, électrodes). Elle s'exprime par :

$$\rho = \frac{l}{s_g} + R_m \quad (III.3)$$

Avec

ρ : La résistivité de la grille.

l : La longueur de la grille.

s_g : Section des grilles collectrices.

R_m : Résistance propre du matériau, sa valeur est faible ($< 2\Omega$ pour les cellules au silicium).

- **R_p** : Résistance parallèle, dite « Shunt », provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction .

Le comportement de cette cellule est décrit par l'équation électrique suivante:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$I_{Rp} = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (\text{III.6})$$

Et :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V+R_s I}{V_t A}} - 1 \right) \quad (\text{III.7})$$

Il en résulte que :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+R_s I}{V_t A}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (\text{III.8})$$

Il reste donc à exprimer I_0 .

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_{rk}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{III.9})$$

Où

$I_{0,ref}$: Le courant de saturation nominal (A).

T_{ref} : La température de référence 298c°.

$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp \left(\frac{v_{co,ref}}{A v_{t,ref}} \right) - 1} \quad (\text{III.10})$$

Où : $v_{co,ref}$ et $I_{sc,ref}$ sont respectivement les tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit du panneau à la température nominale.

Pour I_{ph} et D'après les documents [21] et [22], en considérant les dépendances entre les différents facteurs, on a :

$$I_{0,ref} = \frac{(I_{sc,ref} + K_i \cdot \Delta T) G}{G_{ref}} \quad (\text{III.11})$$

Où

G_{ref} : Est l'irradiation dans les conditions nominales.

K_i : Coefficient de température est fréquemment donné par le fabricant en général positif.

Maintenant et pour le calcul de la résistance série R_s on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'équation (III.8) se simplifie à :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+R_s I}{V_t A}} - 1 \right) \quad (\text{III.12})$$

Où

I : le courant fourni par la cellule.

V : la tension aux bornes de la cellule.

La différentiation de l'équation (III.12), donne :

$$dI = 0 - I_0 \left(\frac{dV + R_s dI}{V_t A} \right) \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_t A}} - 1 \right) \quad (\text{III.13})$$

Ce qui en résulte :

$$R_s = - \frac{dV}{dI} - \frac{n V_t}{I_0 e^{\left(\frac{V + R_s I}{n V_t} \right)}} \quad (\text{III.14})$$

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

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{co}} - \frac{n V_t}{I_0 e^{\left(\frac{V_{co}}{n V_t} \right)}} \quad (\text{III.15})$$

où

$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{co}}$: Est la pente de la courbe I(V) dans le point $V = V_{co}$ (calculée à partir de la courbe

I(V) Dans la fiche technique du module puis divisée par le nombre de cellules en série) [24].

La réécriture de l'équation (III.8) donne la fonction suivante :

$$f(I) = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_t A}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} = 0 \quad (\text{III.16})$$

Pour résoudre cette équation on utilise des méthodes d'itération simple généralement la méthode de Newton Raphson qui est choisie pour la convergence rapide de la réponse. La méthode de newton est décrite comme suit [9] :

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

Où $f'(x_n)$ représente la dérivé de la fonction $f(x_n)$

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

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_t A}} - 1 \right)}{-1 - \left(\frac{q}{akT} \right) R_s I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_t A}} - 1 \right)} \quad (\text{III.18})$$

III-3 Modélisation d'un module BP MSX60 de BP Solaire :

Dans la paragraphe suivante on va modéliser le module BP MSX60 de BP Solaire sous Matlab/Simulink version 7.7.0 .

III-3-1 Caractéristique courant- tension, puissance– tension:

Les figures (III.4) (III.5) représentent respectivement les courbe $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

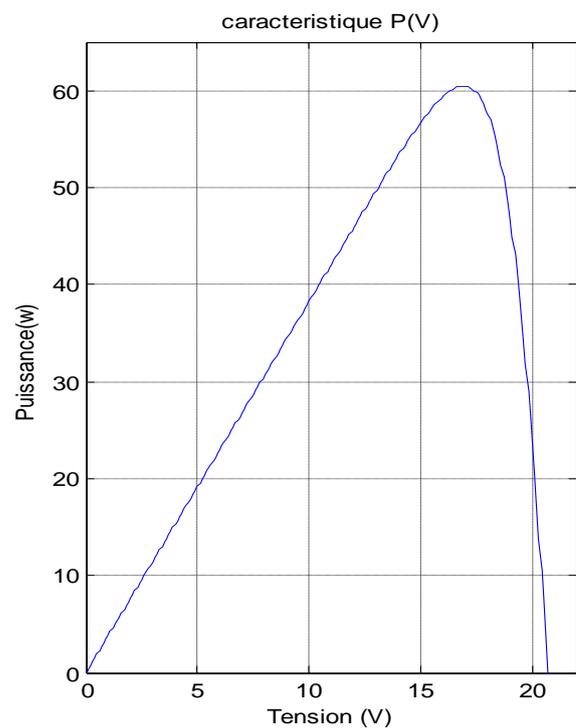
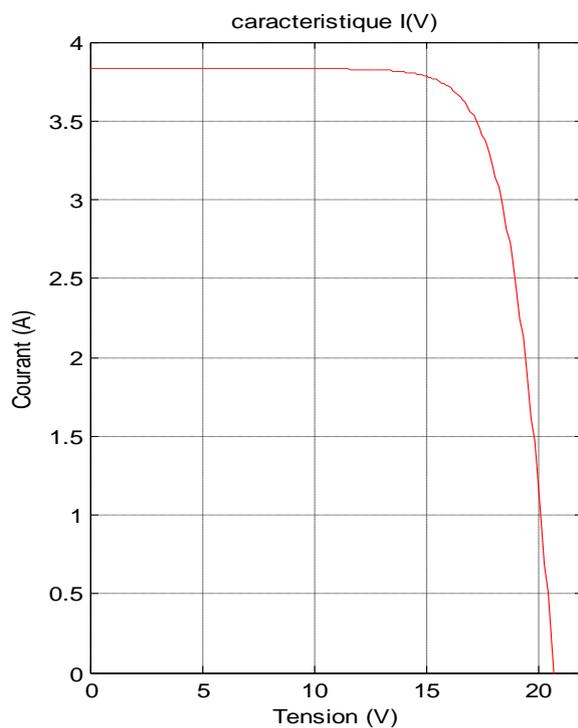


Fig. (III.4) : Caractéristique courant-tension

Fig. (III.5) : Caractéristique puissance-tension

Afin de voir le bon fonctionnement du modèle étudié, nous avons effectué des simulations suivant les effets des différents paramètres (la température et l'éclairement) sur les caractéristiques courant-tension.

III-3-2 Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi conducteur sont très sensibles à la température [6] .

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant ($G=1000\text{W/m}^2$) pour différentes température (25°C , 50°C , 75°C , 100°C). La courbe des caractéristiques va présenter des différentes allures selon la température. On remarque que

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale figure (III.6) et (III.7).

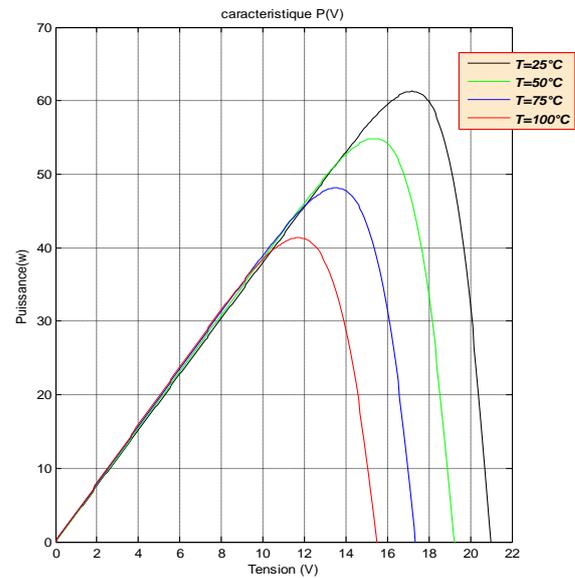
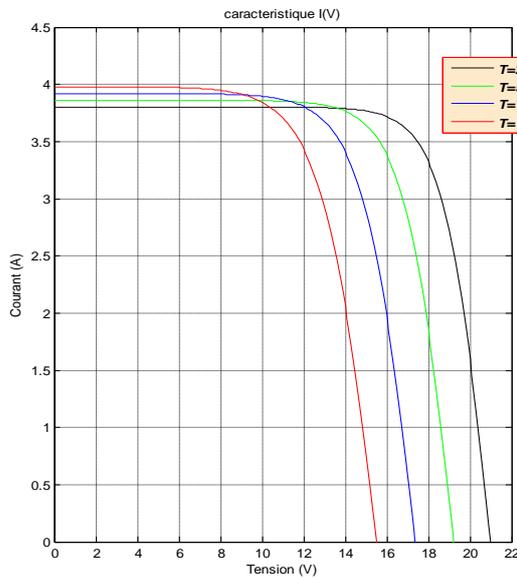


Fig.(III.6) : Influence de la température sur I(V) **Fig.(III.7) :** Influence de la température sur P(V)

III-3-3 Influence de l'éclairement :

Par contre du cas précédent, lorsque nous avons maintenu une température constante (25°C) à différents éclairagements .On remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (I_{cc}) est une fonction linéaire de l'éclairement .m

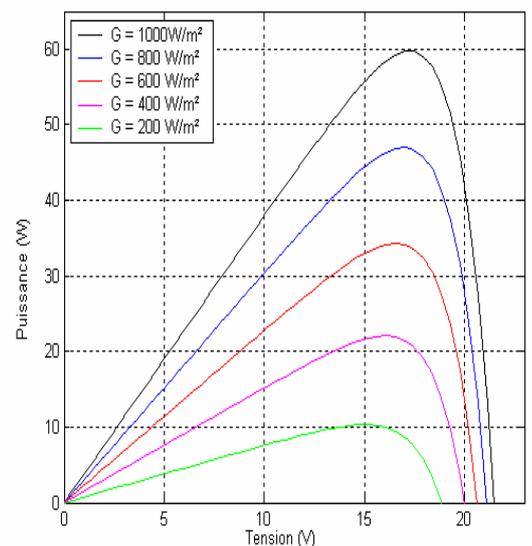
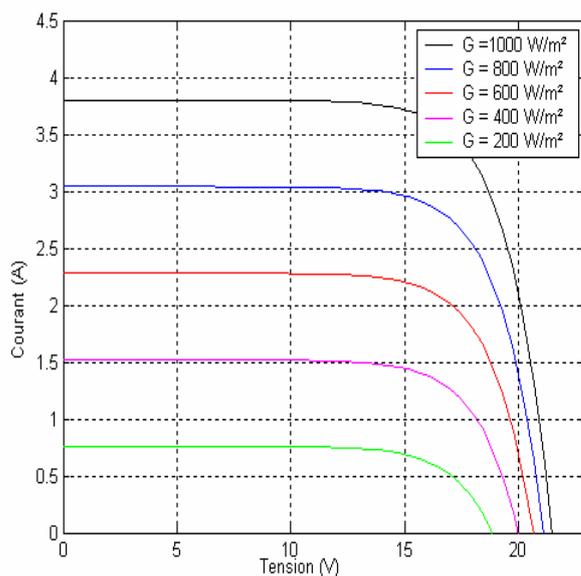


Fig. (III.8) : Influence de l'éclairement sur I(V)

Fig.(III.9) : Influence de l'éclairement sur P(V)

II-3-4 Influence de l'éclairement et la température :

La variation de la température et de l'éclairement en même temps, nous a permis de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert (V_{oc}), par contre il y a une grande variation du courant (I_{cc}), voir figure (III.10) et figure (III.11).

On remarque aussi que la puissance délivrée par un générateur photovoltaïque dépend beaucoup plus de la variation de l'éclairement que la variation de la température.

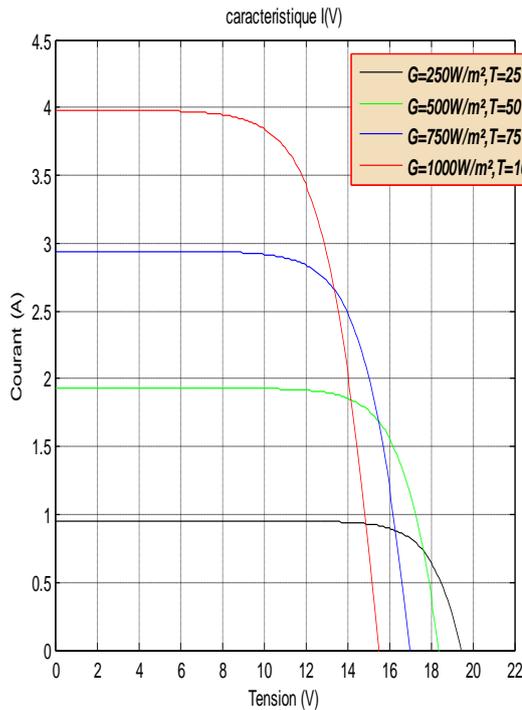


Fig.(III.10) : Influence de l'éclairement et de la température sur I(V)

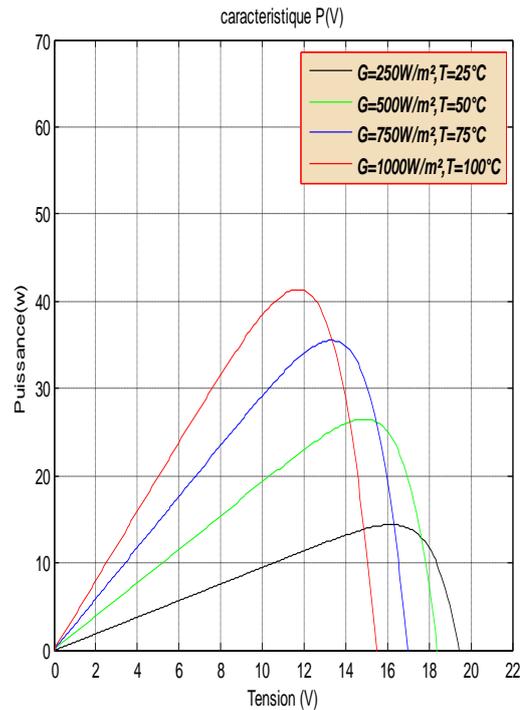


Fig.(III.11) : Influence de l'éclairement et de la température sur P(V)

II-3-5 Influence de la résistance série:

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode qui se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée elle diminue la valeur du courant de court-circuit (I_{cc}) voir figure (III-12) et figure (III-13).

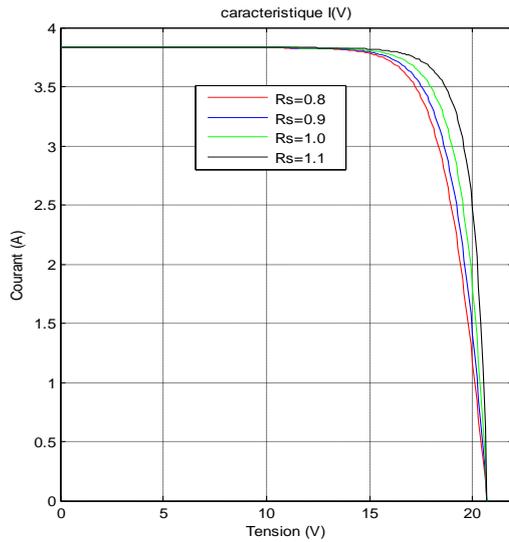


Fig. (III.12) : Influence de la résistance série sur I(V)

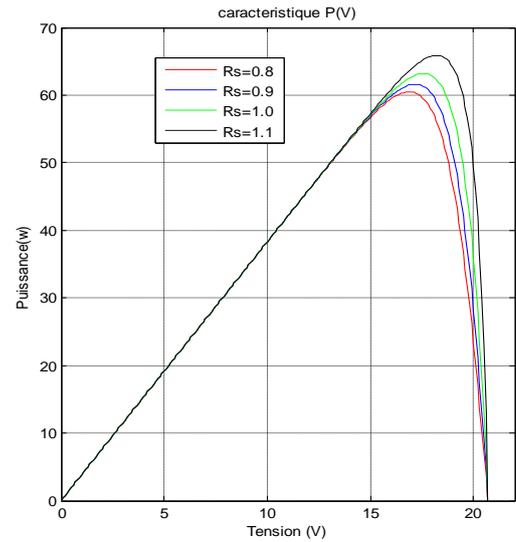


Fig. (III.13) : Influence de la résistance série sur P(V)

II-3-6 Influence du facteur de qualité :

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement voir figure (III.14) et figure (III.15).

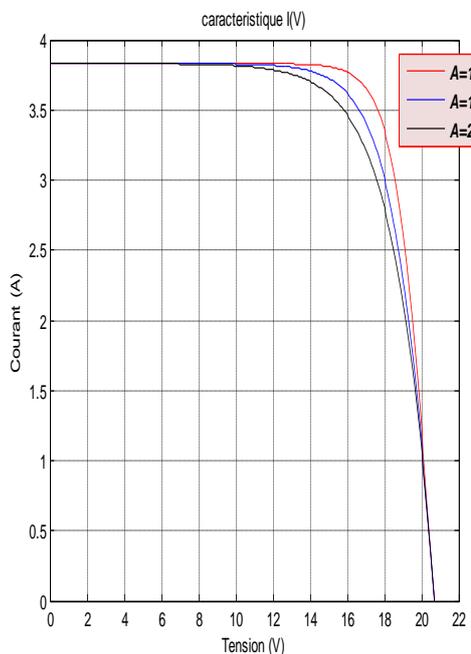


Fig. (III.14) : Influence du facteur de qualité sur I(V)

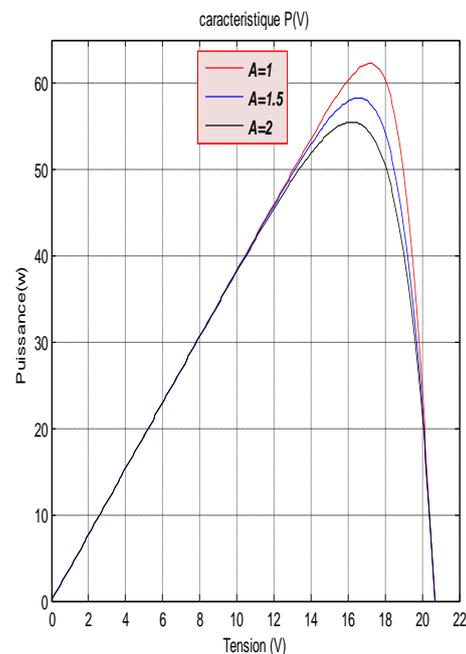


Fig.(III.15) : Influence du facteur de qualité sur P(V)

III-3-7 L'influence de l'association en parallèle ,série ,mixte des modules :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule . La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous (figure III.16) , ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série . Comme il est montré par la figure , ce genre de groupement augmente le courant ; la caractéristique équivalente sera alors celle d'une cellule.

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW, sous une tension convenable , il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque .

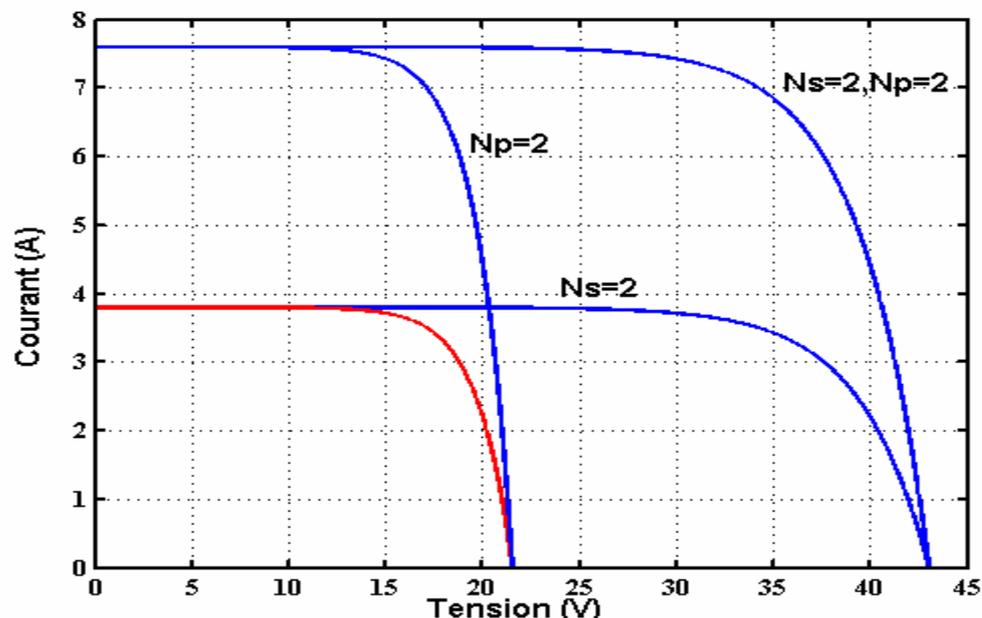


Fig.(III.16) : L'influence de l'association des modules .

III-3-8 Zone de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (III.17) représente trois zones essentielles :

- La zone (I) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (II) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

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

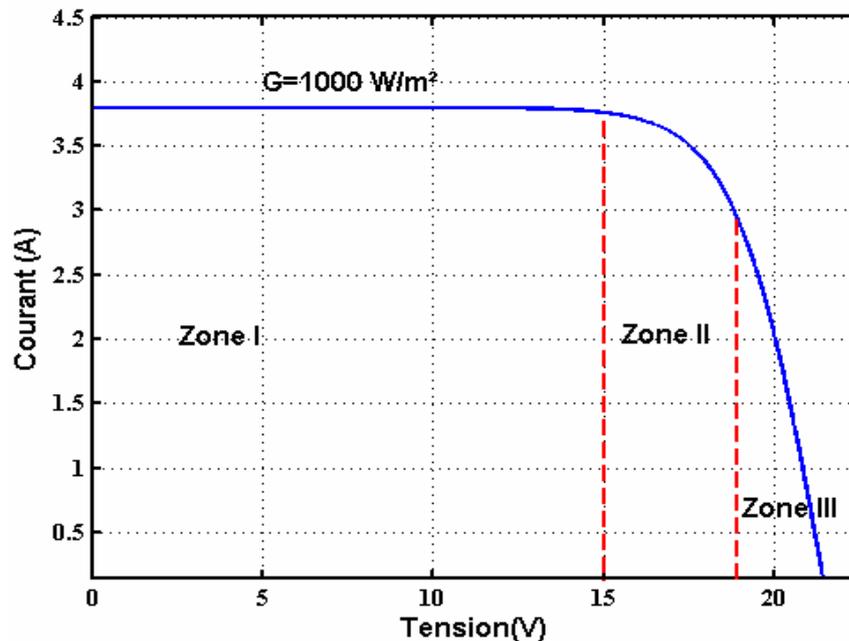


Fig. (III.17) : Différentes zones de la caractéristique I (V), $T = 25^\circ\text{C}$.

III-4 Adaptation du générateur photovoltaïque à la charge :

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC) [18].

III-4-1 Connexion directe source-charge :

L'installation la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque, formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, et une charge (charge résistive ou batterie) qui utilise directement l'énergie produite. Cette installation ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées et pour des températures bien définies. Le courant fourni à la charge dépend fortement de l'intensité de l'éclairement pour une température donnée et de la nature de la charge [7], figure (III.18). L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de réglage de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti [26].

Il faut s'assurer, auparavant, que la charge accepte bien la connexion directe au générateur photovoltaïque : c'est le problème de dimensionnement.

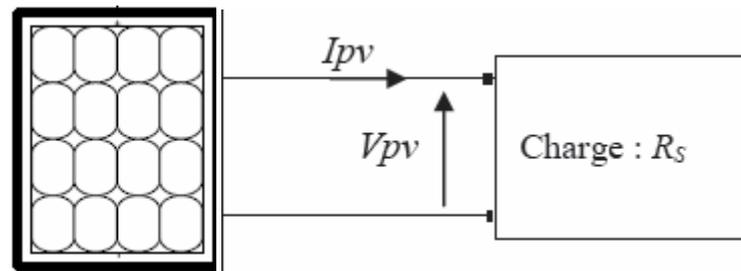


Fig.(III.18) : Connexion directe source-charge (résistive).

III-4-2 Étage d'adaptation entre un GPV et une charge :

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur.

L'adaptateur communément utilisé en photovoltaïque est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survoltrice ou dévoltrice. Si par exemple la charge est une batterie au plomb, ce sont ses plages de tension de charge et de décharge qui vont permettre d'établir la structure la plus adéquate [7].

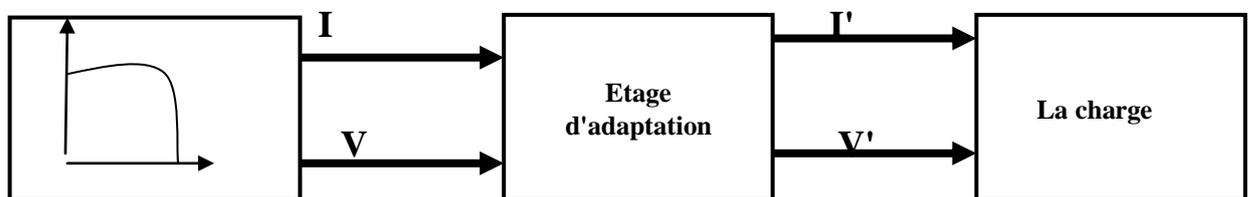


Fig.(III.19) : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

III-4-3 Les convertisseurs DC-DC :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs.

Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [25].

Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les paragraphes suivants (DC-DC) : Dans cette partie nous présentons le principe des trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [30].

III-4-3-1 Convertisseur dévolteur (Buck - converter) :

Un convertisseur Buck , ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP.

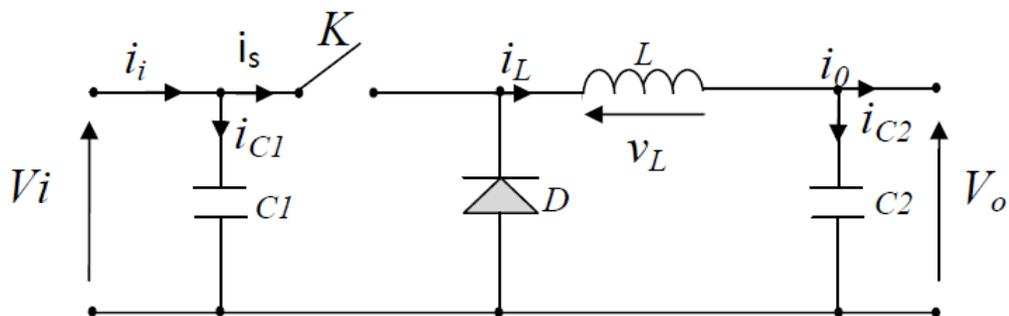


Fig. (III.20) : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (III.20) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur K fermé pendant dTs et ouvert pendant $(1-d)TS$ [32,35].

Où:

- TS est la période de commutation .
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

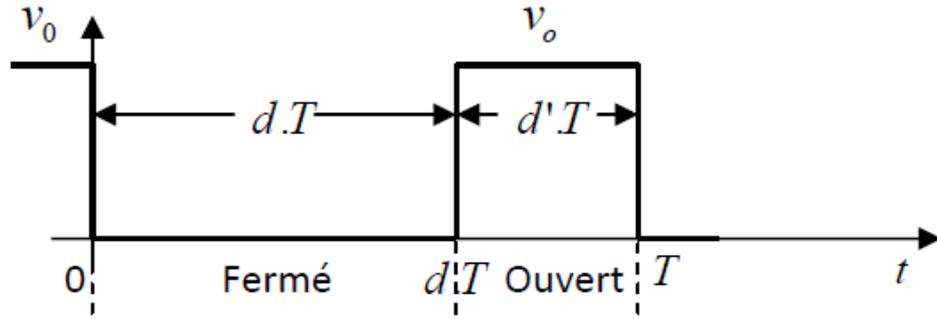


Fig. (III.21) : Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur.

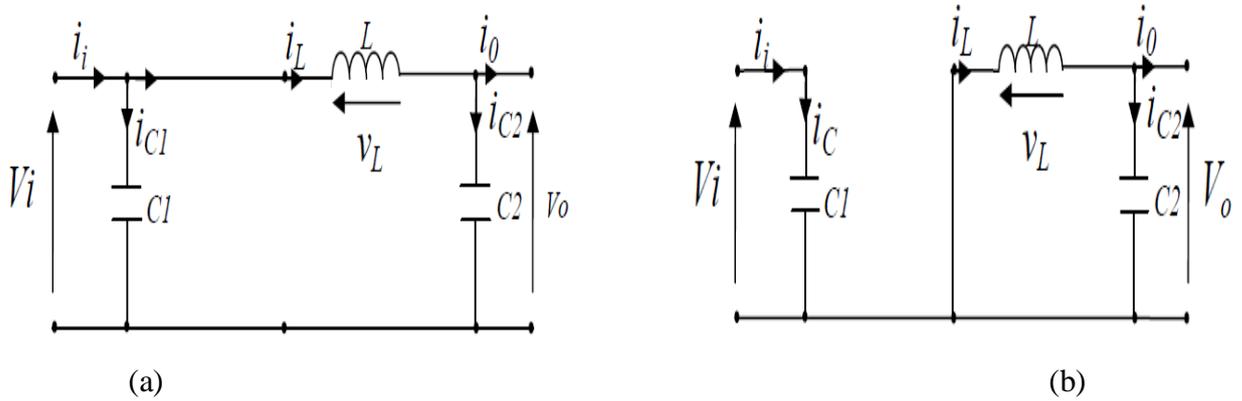


Fig.(III.22) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

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

Pour la première période dT_s

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad (\text{III. 19})$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = -v_0(t) \end{cases} \quad (\text{III. 20})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante [27]:

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt_{DT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1 - D)T_s \quad (\text{III. 21})$$

En appliquant la relation (III.21) sur les systèmes d'équations (III.19) et (III.20), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_l) + (1 - d)T_s i_i \\ c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} T_s = dT_s(i_l - i_0) + (1 - d)T_s(i_l - i_0) \\ L \frac{di_l}{dt} = dT_s(v_i - v_0) + (1 - d)T_s(-v_0) \end{cases} \quad (\text{III. 22})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_0(t) = i_l(t) - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_l(t) = \frac{1}{d} \left(i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\ v_i(t) = \frac{1}{d} \left(L \frac{di_l}{dt} + v_0(t) \right) \end{cases} \quad (\text{III. 23})$$

III-4-3-2 Convertisseur survolteur (Boost - converter) :

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (III.23) , représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (K) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (K) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (i_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).[19,35]

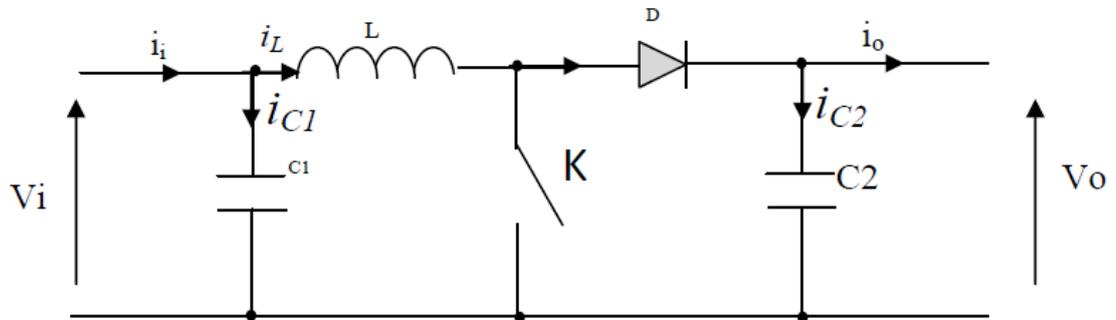


Fig. (III.23) : Schéma de principe d'un convertisseur Boost .

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne [27]:

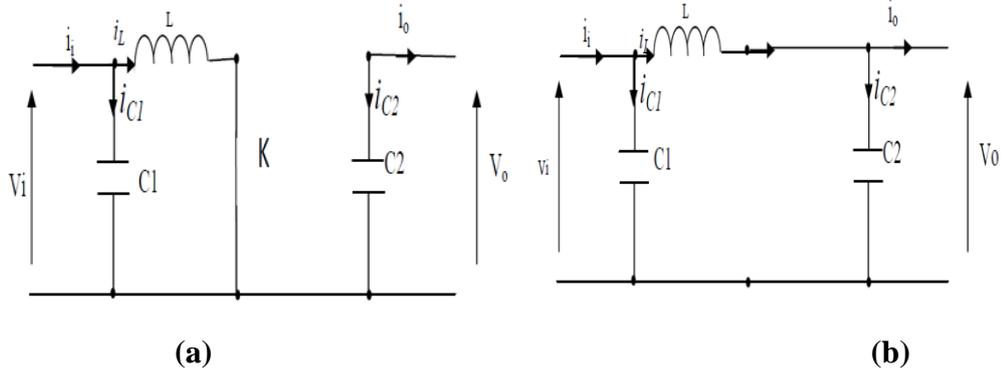


Fig.(III.24) : Schémas équivalents du hacheur survolteur

(a) : K fermé ;(b) : ouvert

Pour la première période dTs :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{array} \right. \quad (III. 24)$$

Pour la deuxième période (1-d)T_s :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{array} \right. \quad (III. 25)$$

En appliquant la relation (III.21) sur les systèmes d'équations (III.24) et (III.25) . Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [27]

$$\left\{ \begin{array}{l} i_l(t) = i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0(t) = (1 - d)i_l - c_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = L \frac{di_l}{dt} + (1 - d)v_0 \end{array} \right. \quad (III. 26)$$

III-4-3 Le convertisseur Buck-Boost :

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (III.25) . Dans ce dispositif , la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation Cependant , La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off) . La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

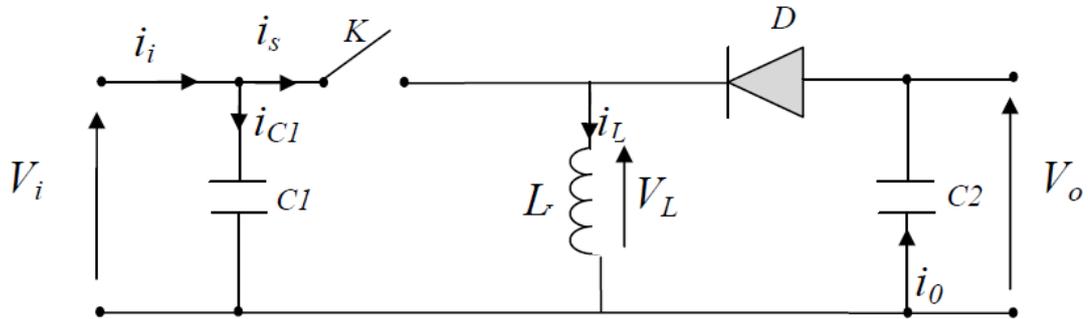


Fig.(III.25) : Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure (III.26) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles de fonctionnement [27]:

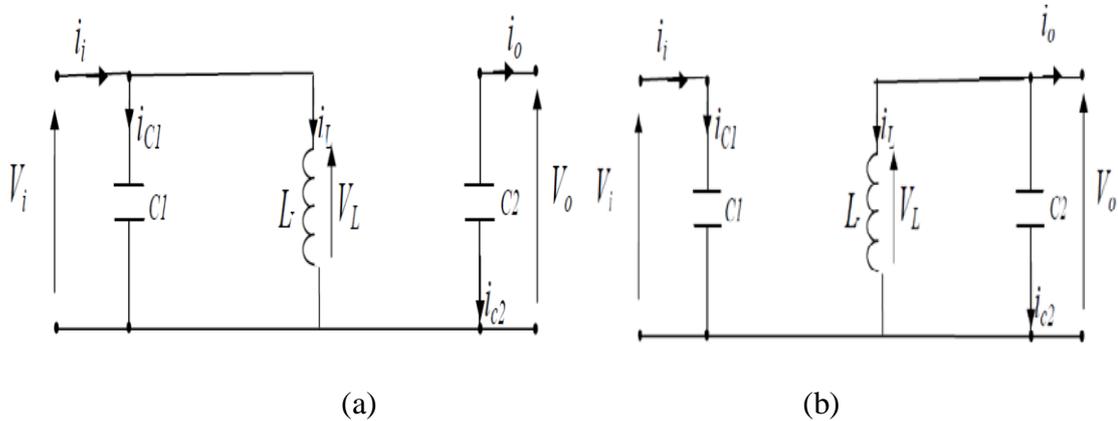


Fig.(III.26) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur

(a):K ouvert ; (b):K fermé

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

Pour la première période dTs :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (III. 27)$$

Pour la deuxième période (1-d)Ts:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

En appliquant la relation (III.21) sur les systèmes d'équations (III.27) et (III.28), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur [27] :

$$\begin{cases} i_l(t) = \frac{1}{d} \left(i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\ i_0(t) = -(1-d)i_l - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ v_i(t) = v_i(t) = \frac{1}{d} \left(-(1-d)v_0 + L \frac{di_l}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

III-5 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.27) 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 .

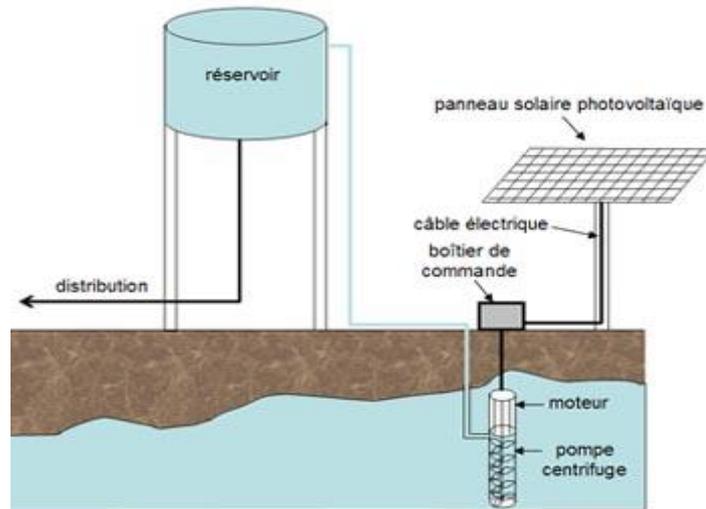


Fig. (III.27) : Structure d'une station de pompage photovoltaïque .

III-5-1 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) [11]

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants [27] :

- 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.

La construction et les types d'un moteur à courant continu sont cités dans l'annexe (3).

III-5-1-2. 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 [1] .

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 [37].

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 :

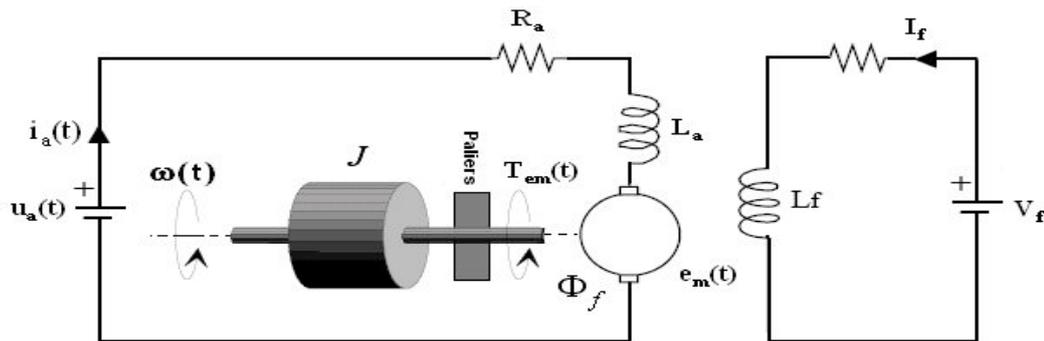


Fig. (III.28) : Machine à courant continu a aimant permanent

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 φ_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 :

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_m(t) \quad (\text{III.30})$$

b) Equations électromagnétiques :

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

$$e_m(t) = k_e \cdot \omega(t) \quad (\text{III.31})$$

k_e : Constantes de tension

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

$$T_{em}(t) = k_t \cdot I_a \quad (\text{III.32})$$

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 :

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - B_m \cdot \omega(t) - T_r - T_f \quad (\text{III.33})$$

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 :

$$[X] = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \quad (\text{III.34})$$

III-5-1-4 Résultats de simulation de moteur à aimant permanent :

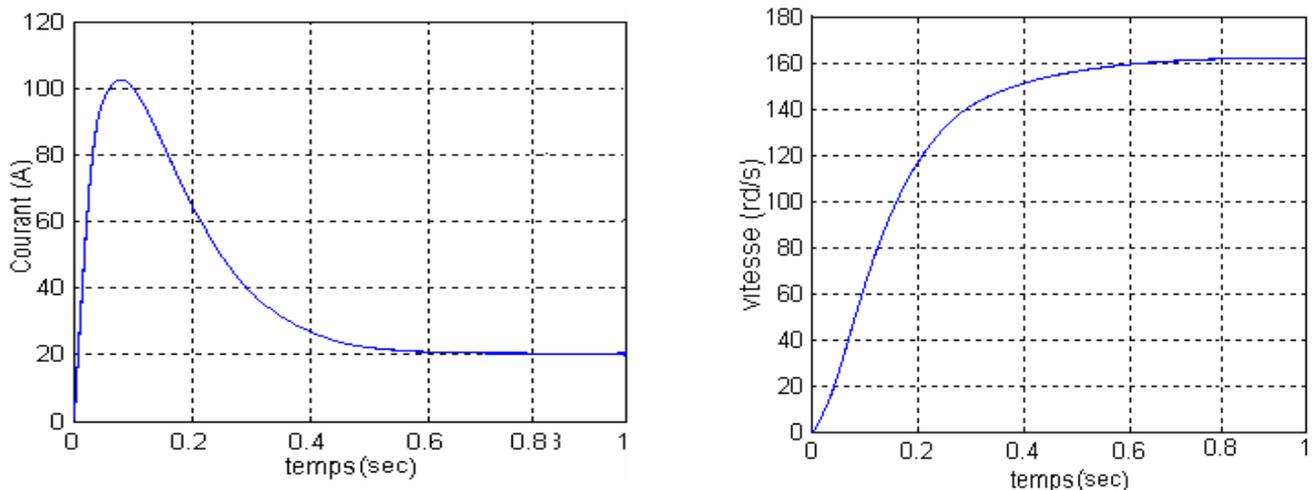


Fig. (III.29) Variation de courant et de la vitesse du moteur en fonction de temps .

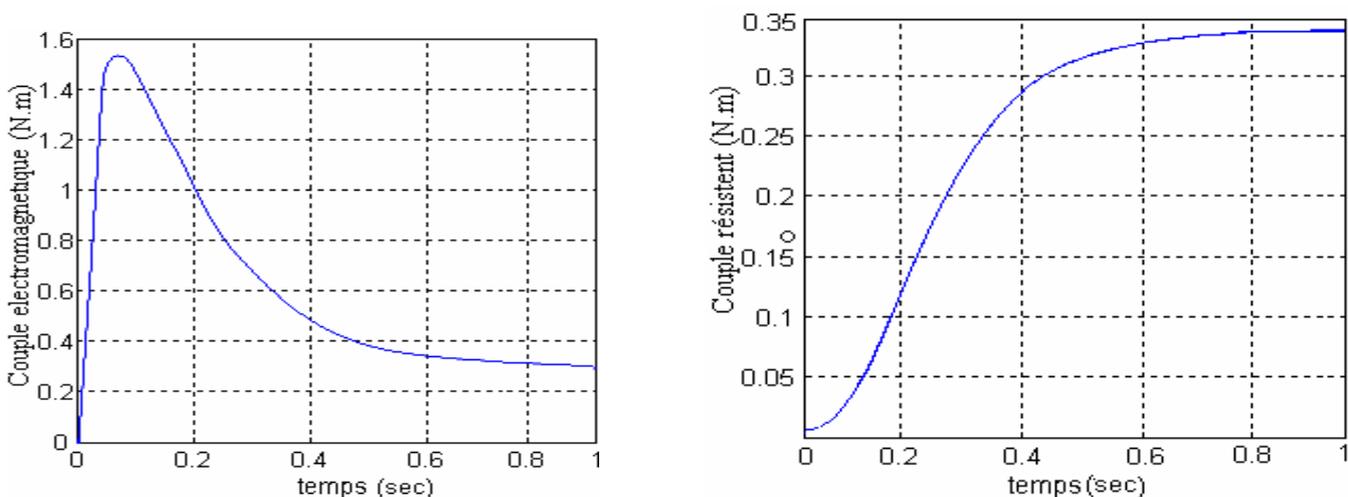


Fig. (III.30) : Variation de couple électromagnétique et le couple résistant du moteur en fonction de temps.

III-5-2 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.

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée "pompe au fil du soleil", utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [41] .

Les critères qui guident le choix d'une pompe sont les suivants: [30]

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

III-5-2-1 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 [41] .

III-5-2-2 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-5-2-2-1 Caractéristiques d'une pompe volumétrique :

III-5-2-2-1-1 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 [30].

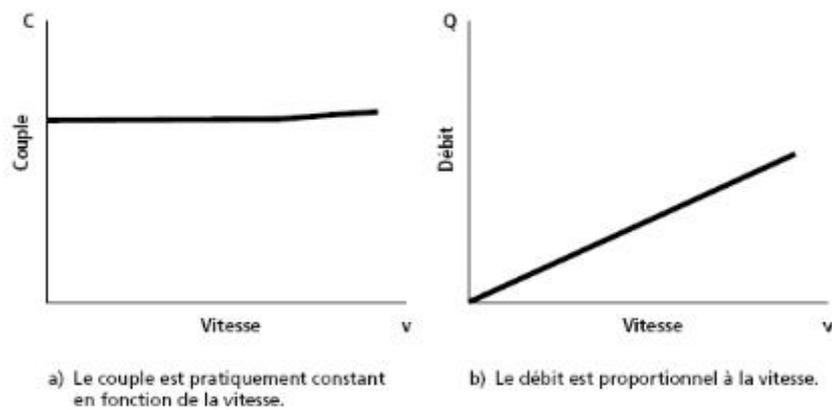


Fig. (III.31) : Caractéristiques débit- vitesse ; couple -vitesse d'une pompe volumétrique.

III-5-2-2-1-2 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. [29]

III-5-2-2-1-3 Caractéristiques débit- hauteur :

Le débit Q de la pompe volumétrique est donné par : [7]

$$Q = k_q \omega - k_h H_m \quad (\text{III. 35})$$

Où :

ω : la vitesse de la pompe.

k_q, k_h : constantes données de la pompe.

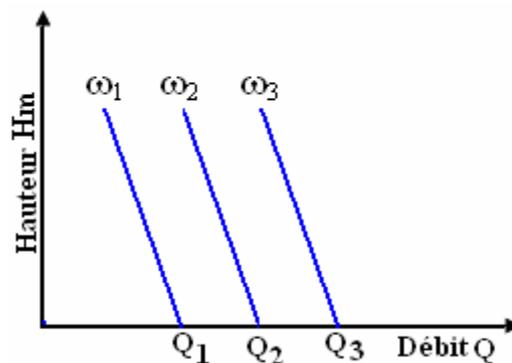


Fig. (III.32) : Caractéristiques débit-hauteur d'une pompe volumétrique

III-5-2-3 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 [42]. 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.

III-5-2-3-1 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.

III-5-2-3-1 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

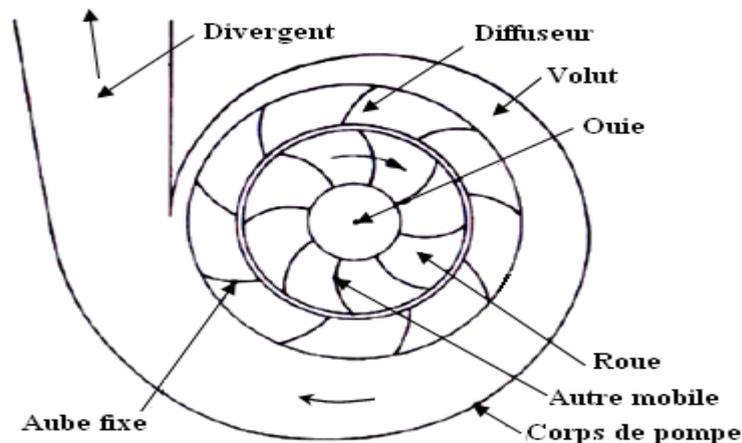


Fig. (III.33) : Schéma de principe d'une pompe centrifuge.

III-6 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] :

$$f(H, Q, W) = 0 \quad (\text{III.36})$$

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.

$$H = H_s + H_d \quad (\text{III.37})$$

H : Hauteur totale du pompage.

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

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

III-6-1 Les pertes de charge :

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

III-6-1-1 Les pertes de charge linéaires :

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

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2.g} \quad (\text{III. 38})$$

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/s²).

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

$$v = \frac{4.Q}{\pi D^2} \quad (\text{III.39})$$

Q : débit (m³/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8.Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{III.40})$$

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-6-1-2 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 :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \cdot \frac{v^2}{2.g} = \varepsilon \cdot \frac{8.Q^2}{\pi^2 D^4 g} \quad (\text{III.41})$$

ε : Coefficient de pertes de charges locales .

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes :

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (\text{III.42})$$

$$H_d = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \cdot \frac{8.Q^2}{\pi^2 D^4 g} = K_{fr} \cdot Q^2 \quad (\text{III.43})$$

K_{fr} : Constante de la canalisation .

La hauteur totale de pompage est :

$$H_d = H_s + K_{fr} \cdot Q^2 \quad (\text{III.44})$$

III-6-2 Caractéristiques d'une pompe centrifuge :

III-6-2-1 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).[38]

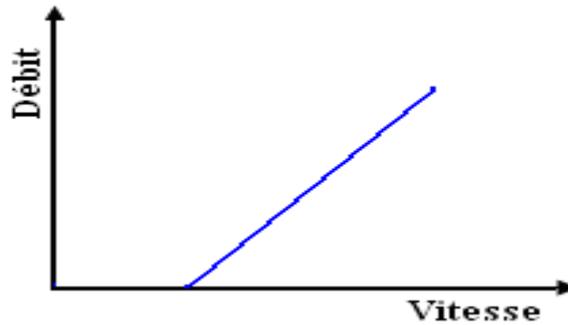


Fig. (III.34) : Caractéristiques d'une pompe centrifuge

III-6-2-2 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. [29]

Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r :

$$C_r = K_r \omega^2 + C_s \quad (\text{III. 45})$$

Avec

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

C_s : Le couple statique, très petite.

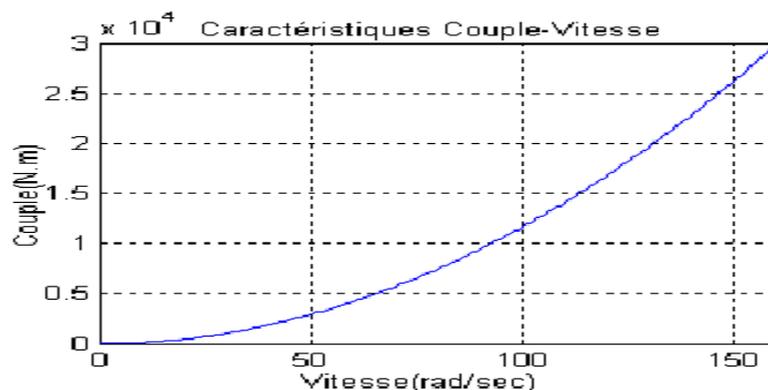


Fig.(III.35) : Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge

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

$$P_{méc} = kr \cdot \omega \quad (\text{III. 46})$$

III-6-2-3 Caractéristiques Débit - hauteur :

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction de débit [34,30] .

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".[30]

$$HMT = K_0. \omega^2 - K_1. \omega. Q - K_2. Q^2 \quad (III. 47)$$

Avec :

k_0, k_1, k_2 : Des constantes 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. [31]. Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes :

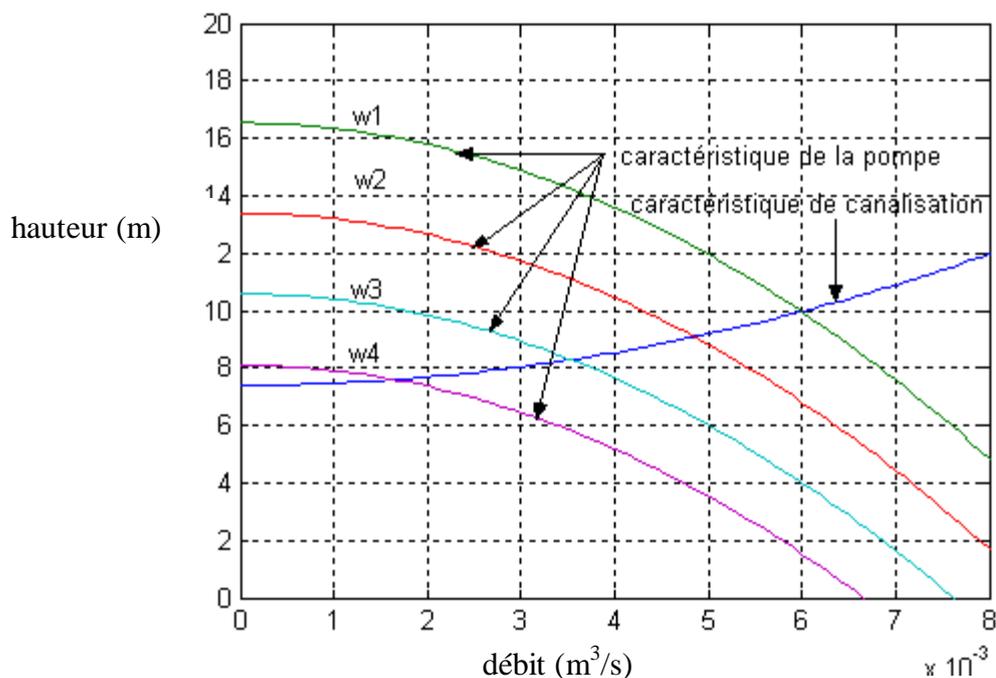


Fig.(III.36) : Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.

III-6-2-4 Caractéristique de la puissance :

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

$$P_h = \rho. g. Q. Hm \quad (III. 48)$$

Où :

ρ : La masse volumique de l'eau étant de 1000kg/m^3 .

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

La courbe de la figure (III.37), des puissances absorbées pour les différents débits est une branche de parabole qui peut présenter un maximum dans la plage utilisable.

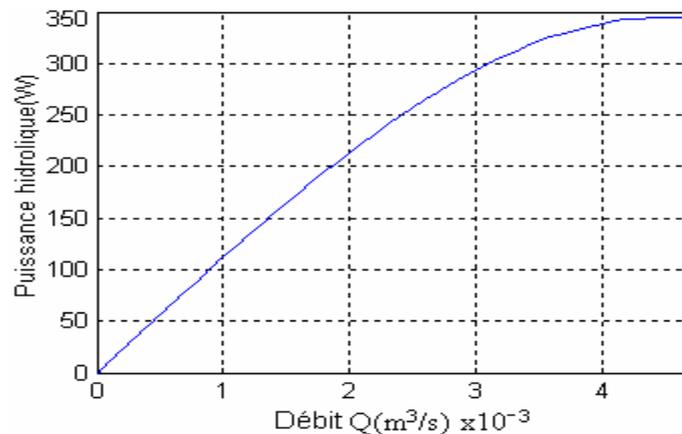


Fig.(III.37) : Caractéristique de la puissance hydraulique de la pompe centrifuge

III-6-2-5 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 : [30]

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{ab}} \quad (\text{III. 49})$$

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 72% . Le schéma de la figure (III.41) présente les valeurs de rendement d'une pompe [30] .

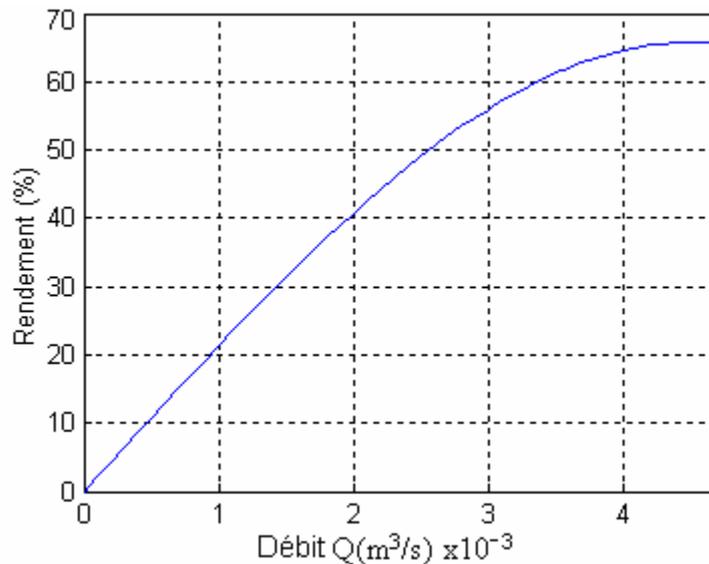


Fig. (III.38) : Caractéristique de rendement de la pompe centrifuge

III-7 Les différents types d'installation du groupe motopompes :

La figure (III.39) représente différents types d'installations courantes de systèmes photovoltaïques de pompage .

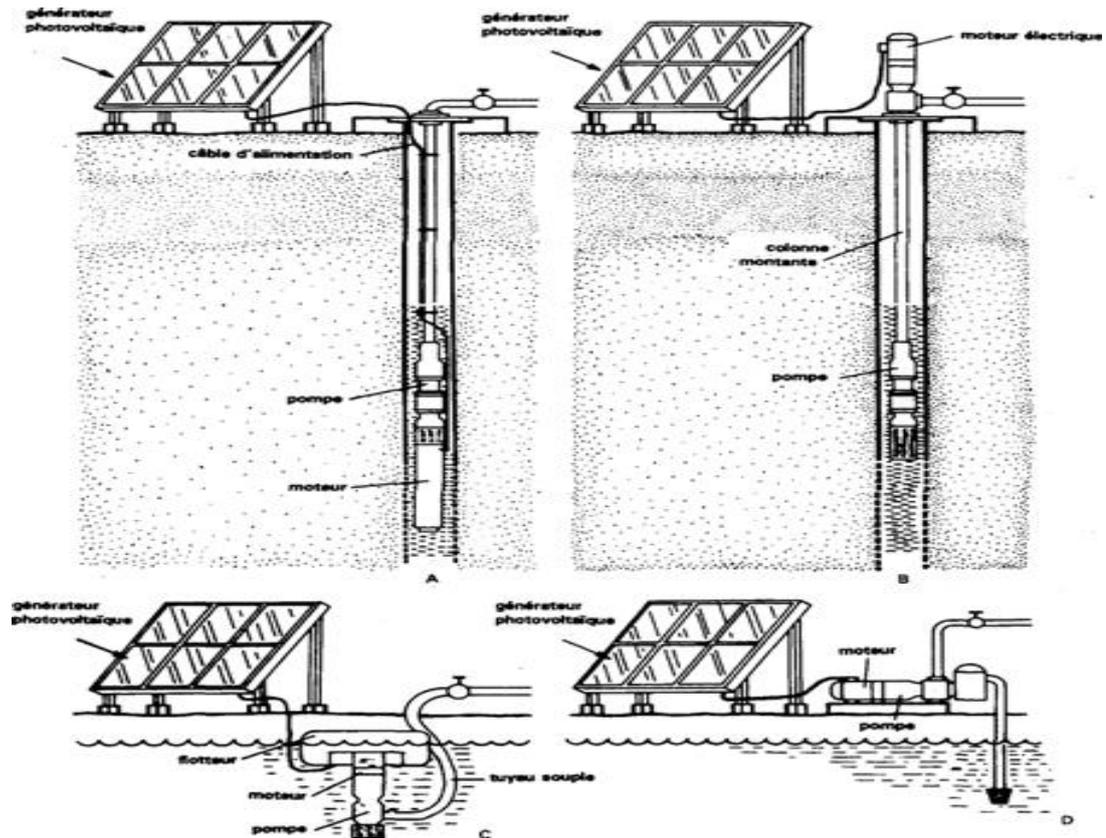


Fig. (III.39) : Exemples d'installations de pompes solaires

- 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 immergé . 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-8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque, afin de faciliter l'accès à la simulation du système.

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 éclaircissements 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 photovoltaïque 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 MSAP 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 7.7.0.

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 :

IV-2-1 Modèle d'un module PV :

Si on basant sur le modèle mathématique de la cellule solaire développé dans le sous paragraphe (III.2) du chapitre III, on obtient le bloc schématique de SIMULINK montré par la Figure (IV.1) ci dessous :

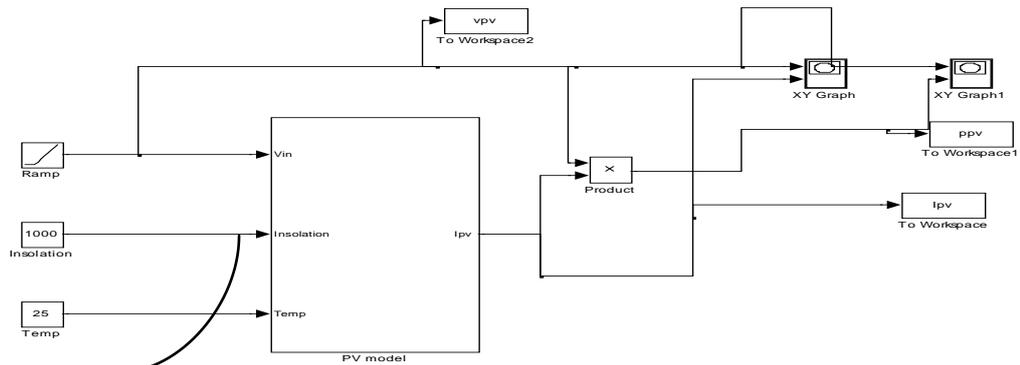


Fig. (IV.1): Schéma bloc du module BP MSX60 de BP Solaire sous Matlab/Simulink

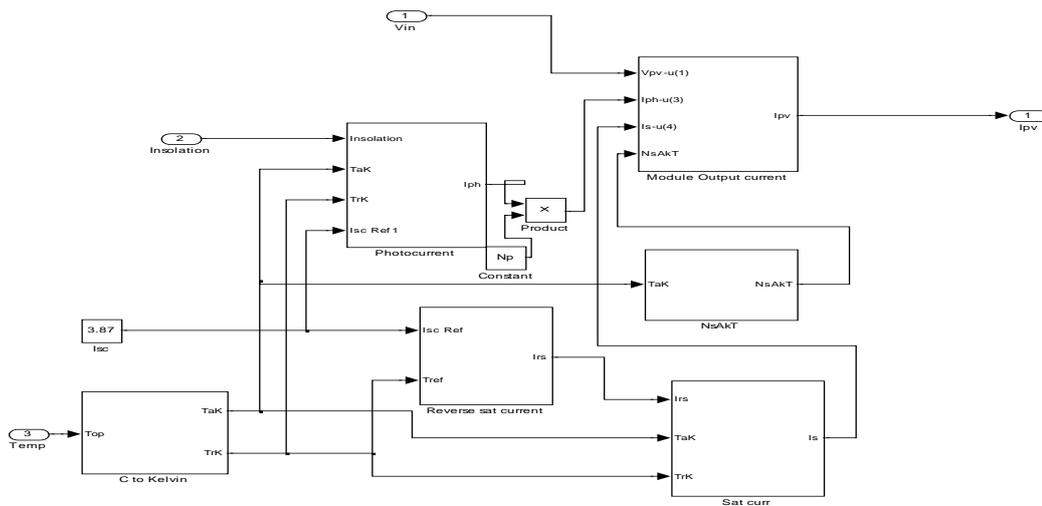


Fig.(IV.2): Schéma bloc du Sous-système du module photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

Le subsysteme a été modélisé étape par étape à l'aide de ces équations, sous Matlab/Simulink. Pour qu'on puisse calculer tous les sous blocs il faut d'abord calculer la température donc la première étape sera le calcul de la température :

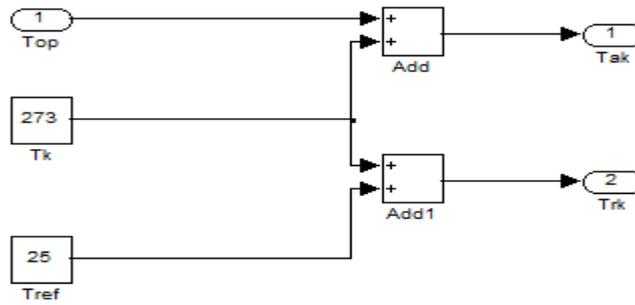


Fig.(IV.3) : Calcul de la température.

La deuxième étape est de calculer le courant de saturation I_{rs} :

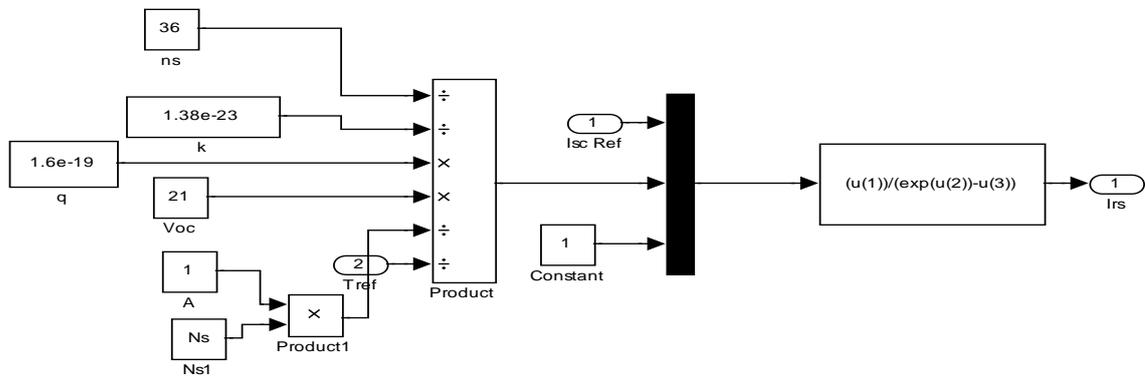
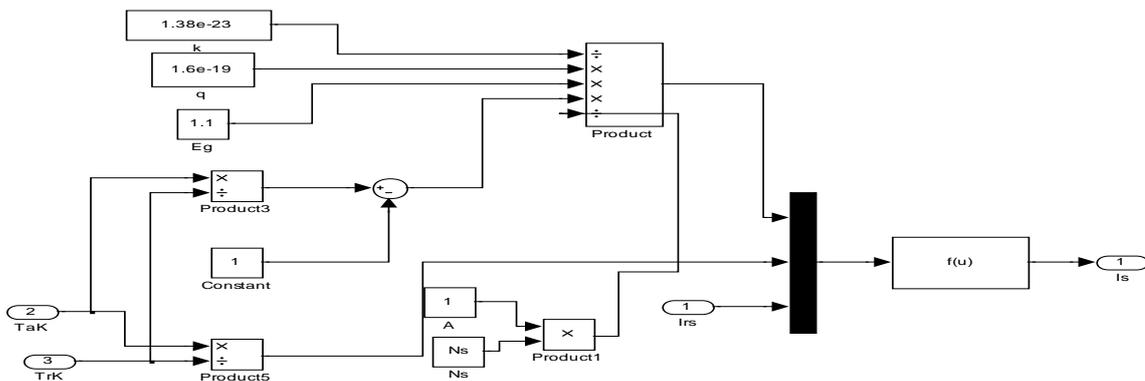


Fig.(IV.4) : Modélisation du courant inverse de saturation I_{rs}

Le calcul du courant de saturation qui est en fonction de I_{rs} ; sera dans la troisième étape :



La quatrième étape est le calcul du courant photonique :

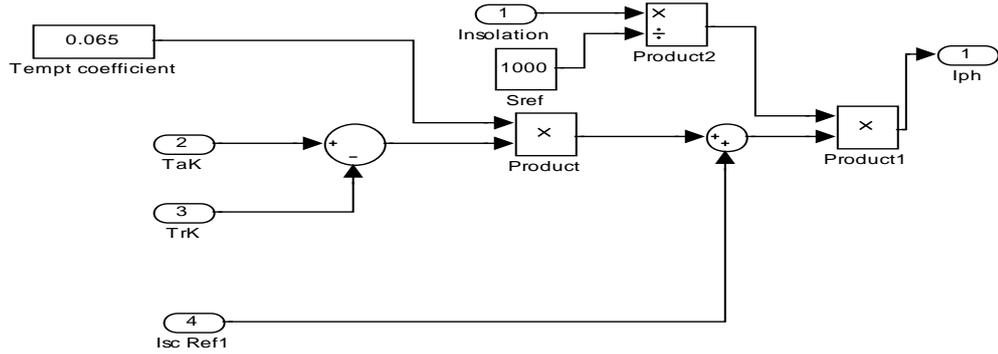


Fig. (IV.6) : Modélisation du courant photonique I_{ph} .

L'étape six est le calcul du produit $nsAkT$:

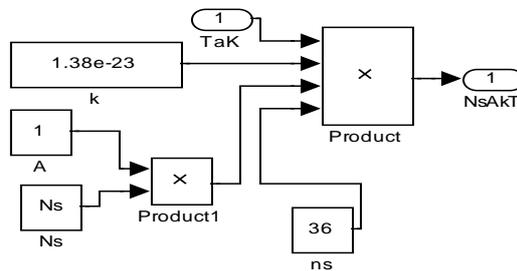


Fig.(IV.7) : Modélisation $nsAkT$.

Finalement on terminera par le calcul du courant global I_{pv}

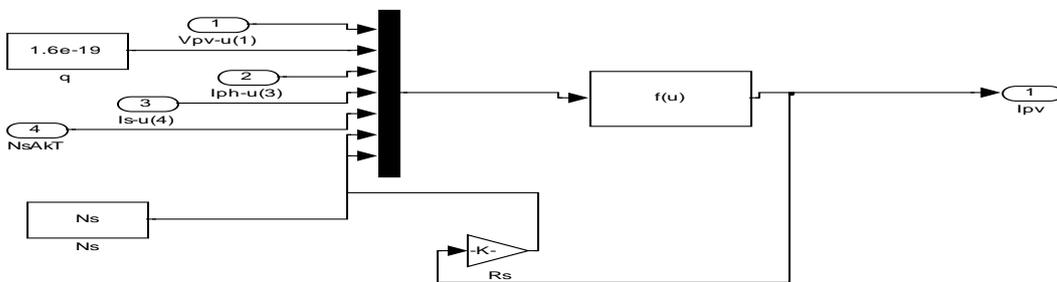


Fig.(IV.8) : Modélisation du courant photovoltaïque I_{pv}

IV-3 Simulation du moteur à courant continu :

Les caractéristiques du moteur à courant continu sont données dans l'Annexe 3 . Les figures (IV.10),(IV.11) 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 $I=5.5$ A. Ainsi que la vitesse $\omega \cong 183,5$ (m²/s).

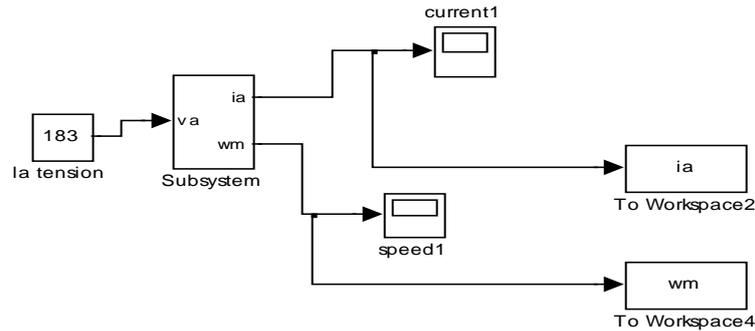


Fig.(IV.9) : Model du moteur à courant continu sous Matlab/Simulink.

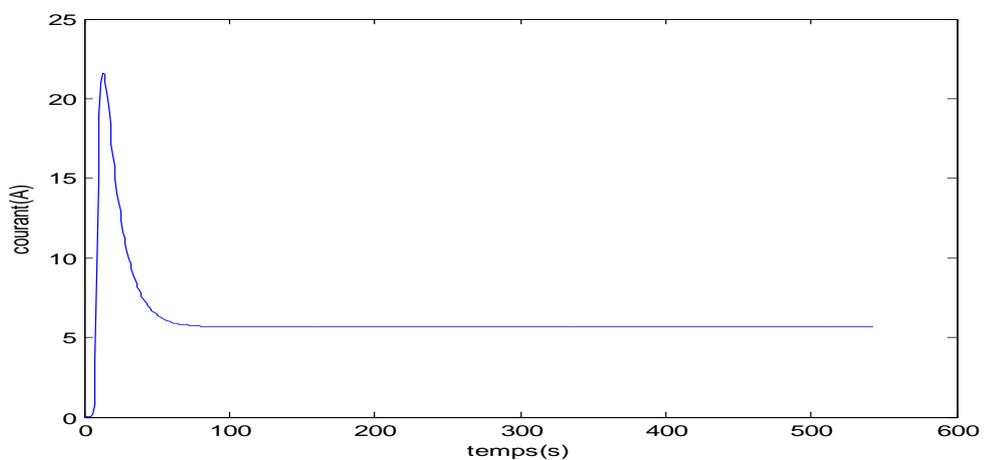


Fig. (IV.10) : La variation du courant délivré par le moteur à courant continu en fonction de temps.

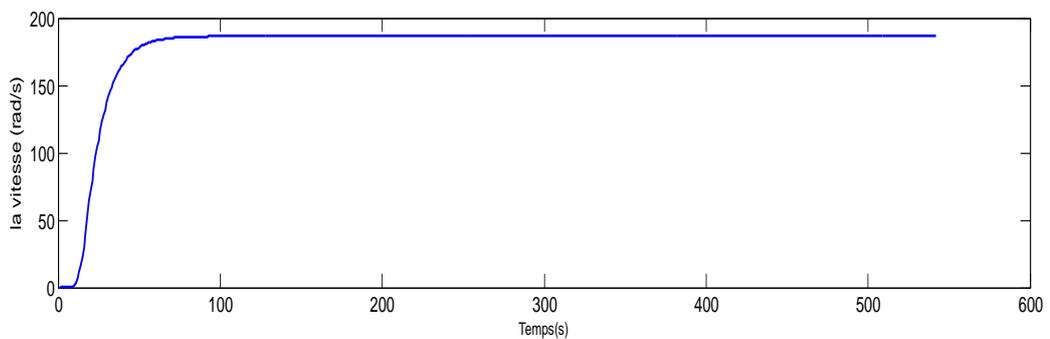


Fig. (IV.11) : La variation du courant délivré par le moteur à courant continu en fonction de temps.

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 :

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

Où

ρ : La masse volumique de l'eau étant de 1000 kg/m³ .

g : Accélération de la pesanteur (9,81m²/s) .

H_m : Hauteur manométrique totale.

n_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 :

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

P_a : Puissance électrique absorbée par la pompe .

P_u : Puissance électrique utile délivrée par le moteur .

η_m : Rendement du moteur .

Pour prévoir certains imprévus d'exploitation, il serait prudent de majorer la puissance absorbée par la pompe des quantités suivantes [41] :

- 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 559.5 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 728 W . Dans notre cas on a choisie un moteur synchrone à aimant permanent dont la puissance mécanique est 746 W.

Le rendement du moteur est estimé à 0.94 .

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} = \frac{746}{0.94} = 793,61 \text{ w} \quad (\text{IV.3})$$

Le rendement du convertisseur est de l'ordre de 0.95 [40] :

$$P_a = \frac{P_a}{\eta_c} = \frac{793,61}{0.95} = 835,38 \text{ w} \quad (\text{IV.4})$$

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 835.38W On doit dimensionner le générateur PV, c'est-à-dire déterminer le nombre de modules qui le constituent pour alimenter le moteur.

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

$$P_{GPV} = 60 \cdot 14 = 840 \text{ w} \quad (\text{IV.6})$$

Donc le nombre de module en série est $N_s=7$ et le nombre de modules en parallèle est $N_p=2$.

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. [40].

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

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

$$C_r = K_p \cdot \omega^2 \quad (\text{IV.8})$$

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.12) ci dessous :

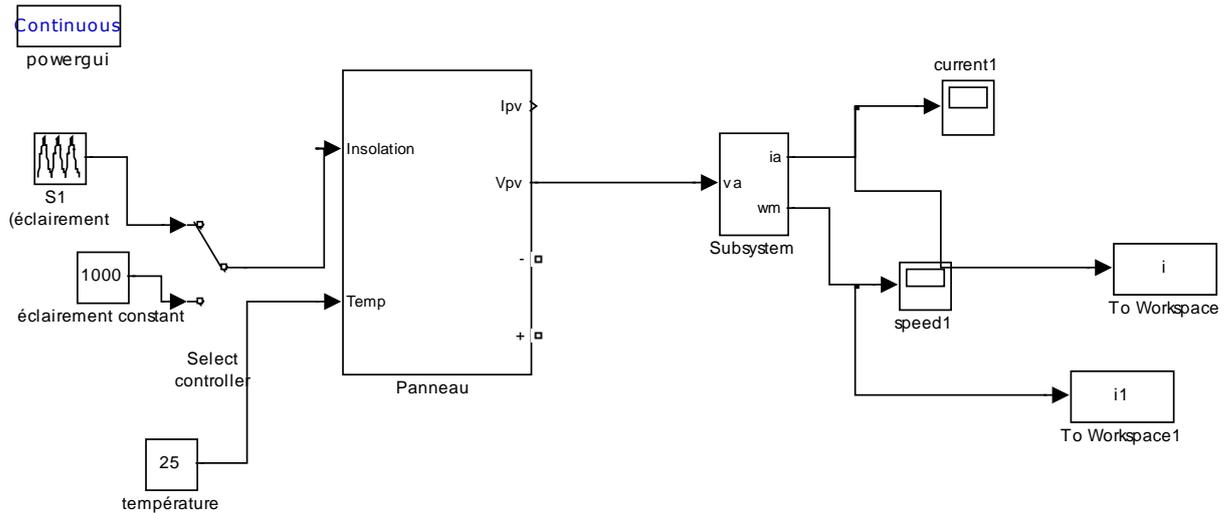


Fig. (IV.12) : Schéma bloc d'un couplage directe GPV- MSAP

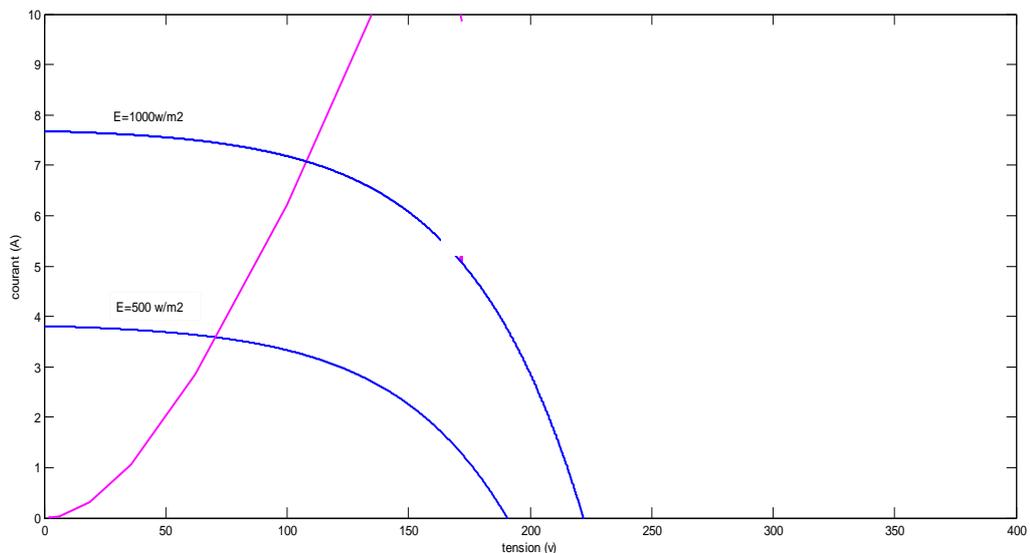


Fig. (IV.13) : Caractéristique I(V), Im(V) d'un couplage directe pour différents éclairagements et une température constante T=25°C

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**) [17].

IV-6-1 Principe de la Recherche du MPPT :

La figure (IV.14) représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT classique. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (DC), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le générateur photovoltaïque peut fournir.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du Convertisseur en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [28].

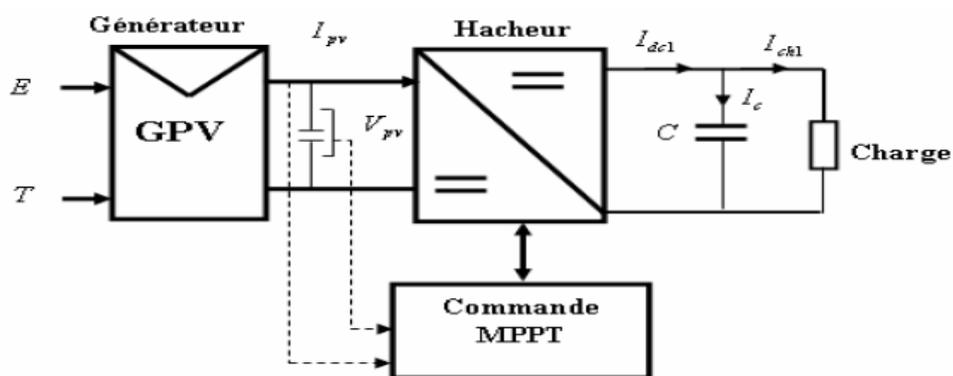


Fig. (IV.14) : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT .

IV-6-2 Les algorithmes du point de puissance maximale :

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées :

- Perturb & Observ (P&O).
- l'incrément de Conductance (IncCond)
- Algorithme capacité- parasite (PC) [20.22].

IV-6-2-1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Cette méthode, est largement utilisée par sa facilité d'implémentation, en plus parce qu'elle est une méthode itérative simple et exige seulement des mesures de V_{pv} et I_{pv} [30]. Présentent cependant quelques problèmes liés aux oscillations autour du MPP qu'elles engendrent en régime établi car la procédure de recherche du MPP doit être répétée périodiquement [23].

L'algorithme de la méthode P&O est représenté par la figure (a) de l'Annexe 2 [11]. Au début on fait définir les valeurs initiales : $I_{réf}$, $\Delta I_{réf}$, P_{old} , à chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés afin de calculer P_{pv} .

Cette valeur de P_{pv} est comparée à la valeur P_{old} calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté, $I_{réf}$ est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent et $I_{réf} = I_{réf} + \Delta I_{réf}$, $P_{old} = P_{pv}$.

Si la puissance de sortie a diminué, $I_{réf}$ est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent $I_{réf}$ est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT quand le point de puissance maximale est atteint, $I_{réf}$ oscille autour de la valeur optimale $I_{réf} - \Delta I_{réf}$ Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrément de la perturbation.

Si l'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. Le rendement de cette technique est d'environ 85% [11].

L'inconvénient de la technique de P&O est celui en cas de changement rapide des conditions atmosphériques, telles qu'un nuage mobile, cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans la direction fautive.

Sur la figure(IV.15).on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe $P(V)$ du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B1 ce si nous emmène à $\Delta P > 0$ avec $[\Delta P = P(K) - P(K - 1)]$ et le MPPT continue à perturber les tensions dans la même direction c à d vers le point B2.

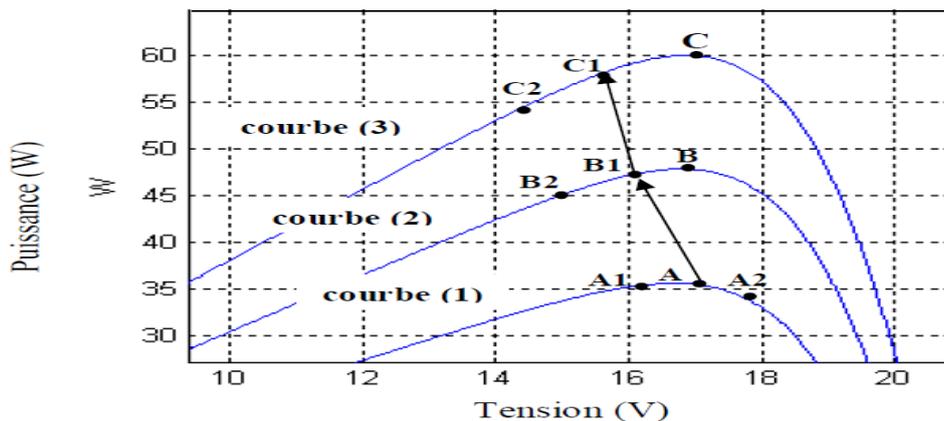


Fig. (IV.15) : Divergence de la méthode P&O.

IV-6-2-2 Méthode de l'incrément de Conductance :

Cette méthode utilise la conductance incrémentale de la source comme MPPT. Cette méthode est plus efficace que la méthode de perturbation, et indépendante des caractéristiques des différents composants utilisés. [36]

Elle est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du figure (IV.16) panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite [17].

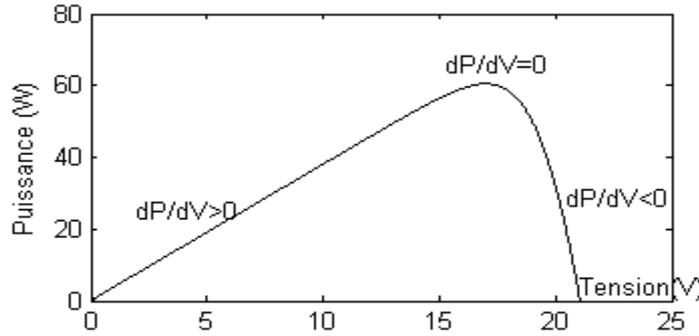


Fig.: (IV.16) : Caractéristique de la puissance tension d'un générateur photovoltaïque, Variation de $\frac{dP}{dV}$

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 \text{ au MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0 \text{ à gauche du MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \text{ à droite du MPP} \end{cases} \quad (IV.9)$$

Puisque :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{d(I)}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (IV.10)$$

Alors, l'équation (IV.17) peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ au MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ gauche du MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ à droite du MPP} \end{cases} \quad (IV.11)$$

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ($G_{ci} = \frac{I}{V}$) à l'incrémentation de la conductance ($\Delta G_{ci} = \frac{\Delta I}{\Delta V}$), comme le montre l'organigramme (Annexe 2). v_{ref} est la tension de référence pour laquelle le panneau est forcé à fonctionner. Au MPP, $v_{ref} = V_{MPP}$. Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans ΔI est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue v_{ref} pour suivre le nouveau MPP. [32].

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape.[32.33]

IV-6-2-3 Algorithme capacité- parasite (PC) :

L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance MPPT) est semblable à celui de l'incrément de la conductance sauf que l'effet de la capacité parasite (C_p) qui modélise le stockage des charges dans les jonctions P-N des cellules photovoltaïques soit inclus.

En ajoutant cette capacité à notre modèle, en la représentant sous la forme [33] :

$$I(t) = C_p \frac{dv}{dt} \quad (IV.11)$$

Le nouveau modèle est exprimé selon :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{v+R_s I}{V_r}\right) - 1 \right] - \frac{v+R_s I}{R_p} + C_p \frac{dv}{dt} \quad (IV.12)$$

$$I = F(v) + C_p \frac{dv}{dt} \quad (IV.13)$$

L'équation (IV.13) montre les deux composantes de (I) :

- Une est fonction de la tension, F(V)
- La seconde est relative au courant dans la capacité parasite.

En utilisant cette notation, l'incrément de la conductibilité du panneau photovoltaïque peut être définie comme étant le rapport $\frac{dF(v)}{dv}$ et la conductibilité instantanée peut être définie

comme le rapport $F(V)/V$. Le MPP est obtenu quand $\frac{dp}{dv}=0$.

En multipliant l'équation (IV.12) par la tension (V) du panneau pour obtenir la puissance électrique, puis en différenciant le résultat, l'équation de la puissance électrique au MPP sera obtenue et peut être exprimé selon :

$$\frac{dF(v)}{dv} = c_p \left(\frac{\dot{V}}{V} + \frac{\ddot{V}}{\dot{v}} \right) + \frac{F(v)}{v} \quad (IV.14)$$

Les trois termes de l'équation (III.18) représentent l'accroissement de la conductibilité, l'ondulation induite par la capacité parasite et la conductibilité instantanée. Les dérivées première et seconde de la tension du panneau tiennent en compte de l'effet d'ondulation alternative produite par le convertisseur. On notera que si (C_p) est égale à zéro, l'équation (IV.14) se simplifie et devient celle utilisée pour l'algorithme d'accroissement de la conductibilité.

Puisque la capacité parasite est modélisée comme un condensateur connecté parallèlement aux bornes de chaque cellule photovoltaïque, la connexion des panneaux en parallèle augmentera la capacité globale vue par le MPPT. À partir de là, la différence entre l'efficacité de CP-MPPT et celle de INCMPTT devrait être au maximum dans un générateur solaire de haute puissance avec plusieurs panneaux en parallèle [34].

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 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) donne le ratio de la tension du panneau à la tension aux bornes de la charge [17].

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 :

$$V_m = R_a I_m + L_a \cdot \frac{dI_m}{dt} + k_e \omega \quad (\text{IV.15})$$

Et le couple du moteur :

$$C_m = k_m I_m \quad (\text{IV.16})$$

La pompe centrifuge oppose un couple résistant:

$$C_r = k_r \omega^2 + C_s \quad (\text{IV.17})$$

k_e [V/rad.s - 1], k_m [Nm/Ampère] et k_r [(Nm/rad.s⁻¹)²] sont des coefficients de proportionnalité .

D'autre part nous avons l'équation mécanique :

$$J_m \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r \quad (\text{IV.18})$$

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 :

$$P_{op} = V_{op} I_{op} = V_m I_m \quad (\text{IV.19})$$

Le rendement générateur photovoltaïque - machine synchrone 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 [40]:

$$\eta_{gm} = \frac{P_m}{N.E.S_g} \quad (IV.20)$$

η_{gm} : le rendement GPV-MSAP .

P_m : la puissance mécanique (w).

N : $N_s \cdot N_p$

E : la radiation captée par le PV.

S_g : surface du générateur (m^2) .

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

$$c_r = K_p \cdot \omega^2 \quad (IV.21)$$

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

La puissance mécanique de la MSAP est définie par :

$$P_m = K_p \cdot \omega^2 \quad (IV.21)$$

$$\eta_{gm} = \frac{K_p \cdot \omega^2}{N.E.S_g} \quad (IV.22)$$

K : Coefficient de la pompe centrifuge.

IV-8 Simulation du système globale :

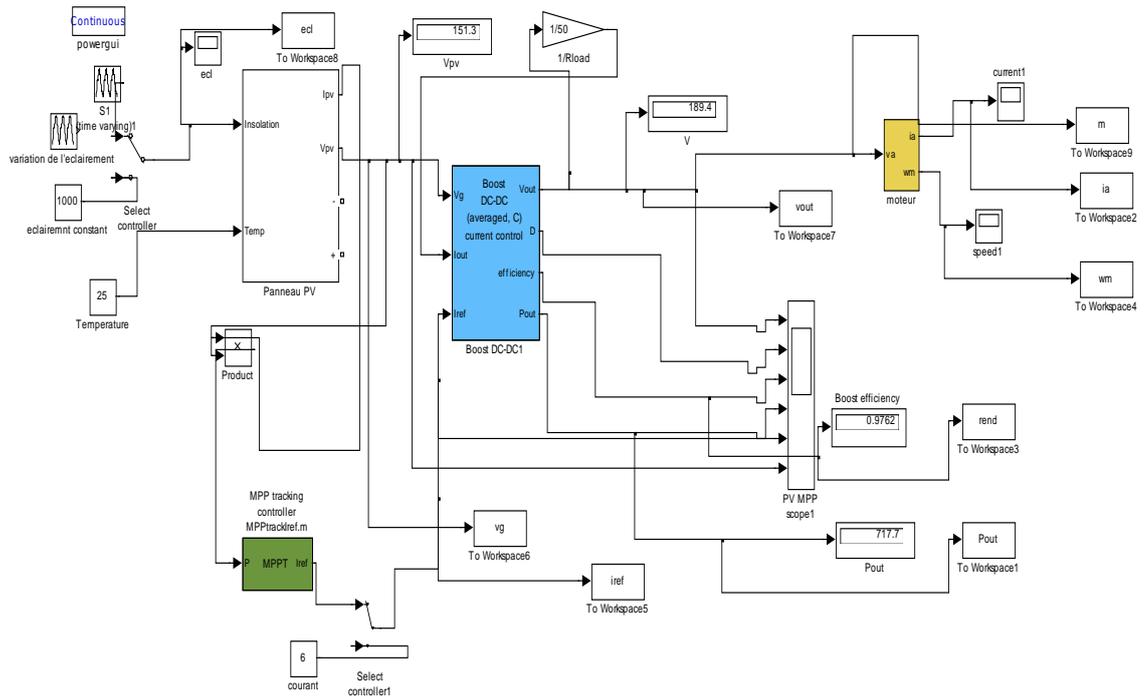


Fig. (IV.17) : schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous Matlab/Simulink .

IV-9 Résultats de simulation :

La figure suivante (IV.18) montre la variation de l'éclairement en fonction de temps.

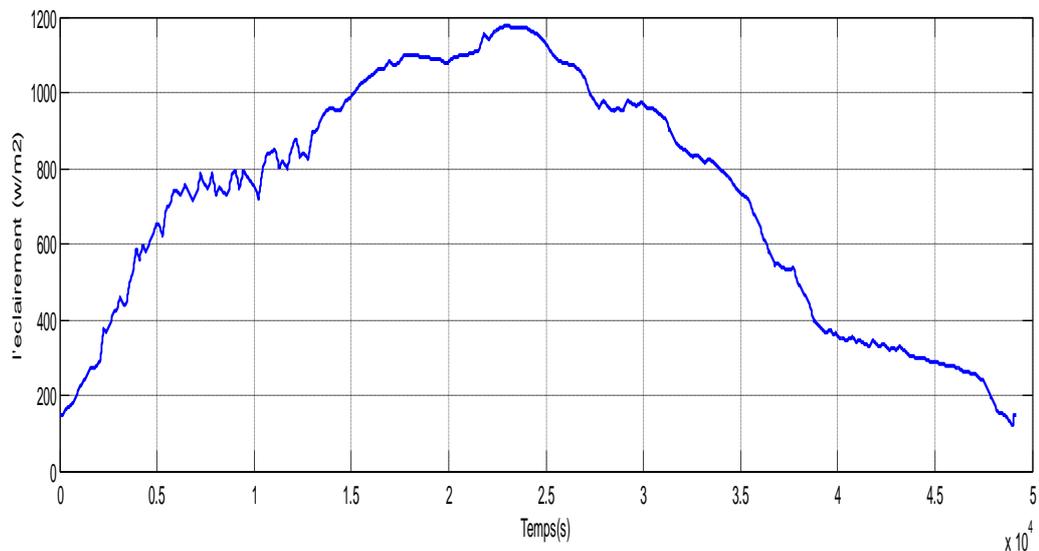


Fig. (IV.18) : La variation de L'éclairement en fonction de temps .

La figure (IV.19) montre l'allure des caractéristiques de charge des deux mode de couplage directe et indirecte .Pour le couplage directe du moteur au générateur photovoltaïque, le point de fonctionnement du groupe motopompe est loin de la bande de puissance optimale .En intercalant entre le générateur et la charge, un convertisseur DC-DC qui consiste en un traqueur de puissance maximale (MPPT) .On optimisera le fonctionnement de notre générateur et le couple moteur commence à augmenter de manière significative même à des niveaux bas de rayonnements. Cela se traduit par un glissement du point de fonctionnement du couplage directe vers la zone de fonctionnement optimale où la tension et le courant sont plus grands.

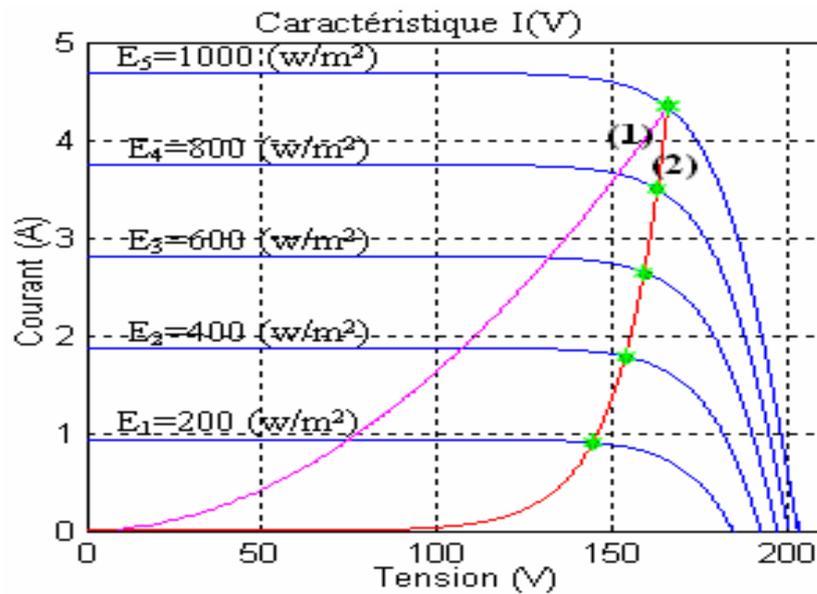


Fig. (IV.19) Caractéristiques de charge de système de PPV, T=25°C
(1) Couplage direct, (2) Couplage avec MPPT .

La tension du générateur Vg (V) à T=25°C pour Ns=7, Np=2

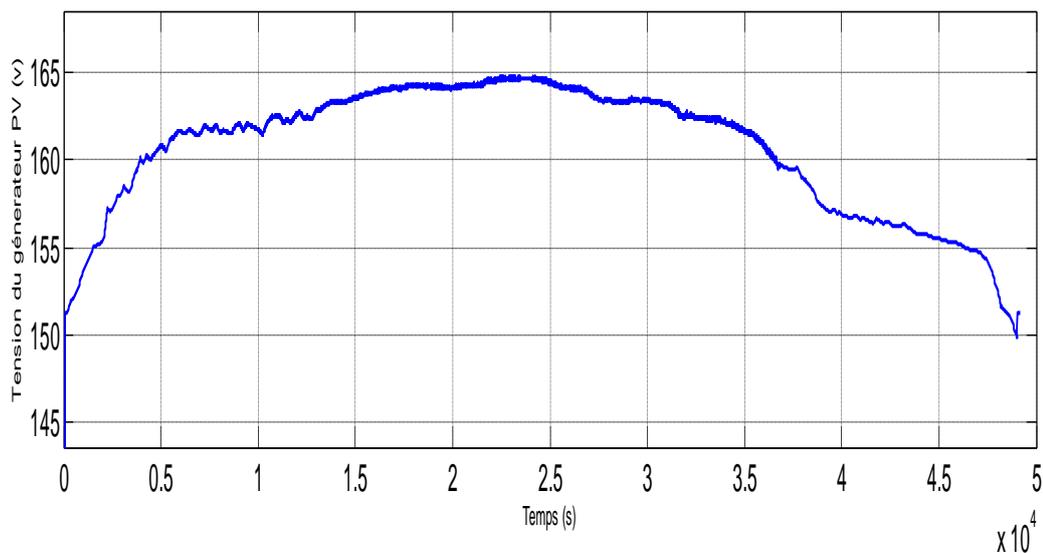


Fig. (IV.20) :La tension du générateur en fonction de temps

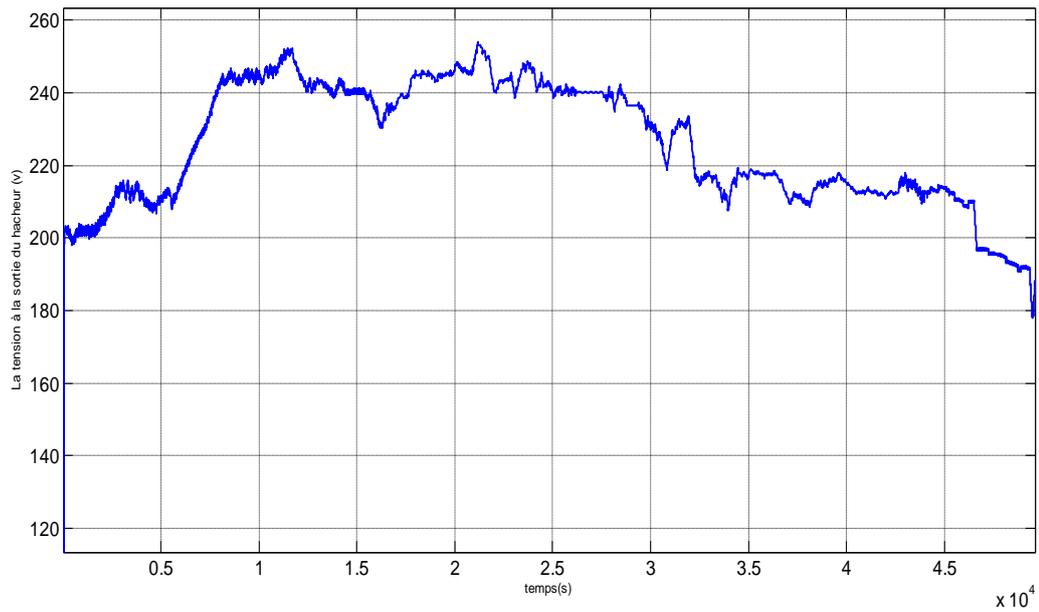


Fig. (IV.21) : Variation de la tension de sortie du hacheur Boost en fonction de temps.

Les figures (IV.20) , (IV.21) présentent la tension du générateur et la tension à la sortie du hacheur Boost en fonction de temps , on remarque clairement l'effet du convertisseur élévateur et de l'optimisation du système .

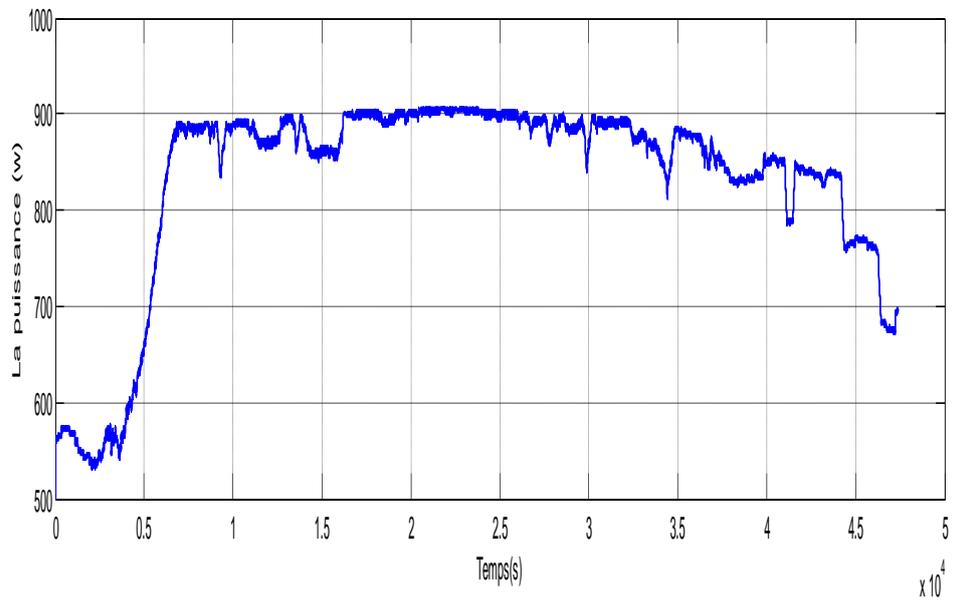


Fig. (IV.22) : Variation de la puissance de sortie en fonction de temps .

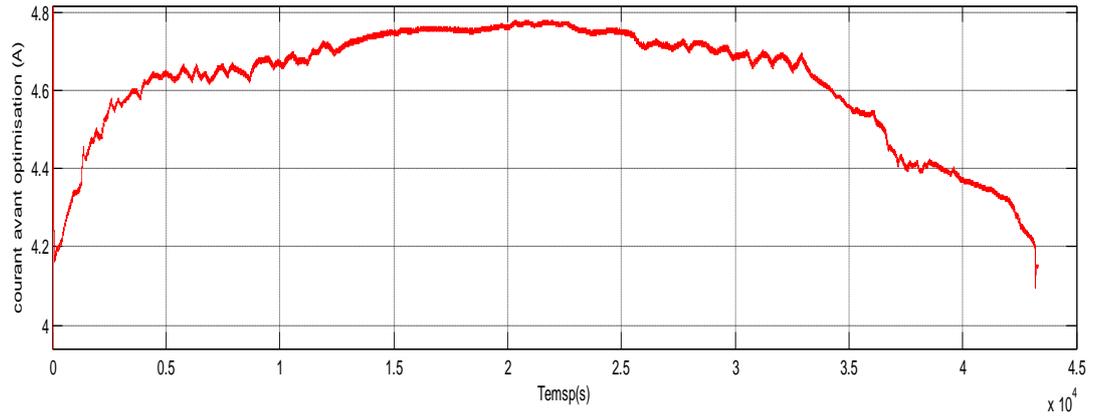


Fig. (IV.23) : Variation du courant du moteur en fonction de temps avant optimisation

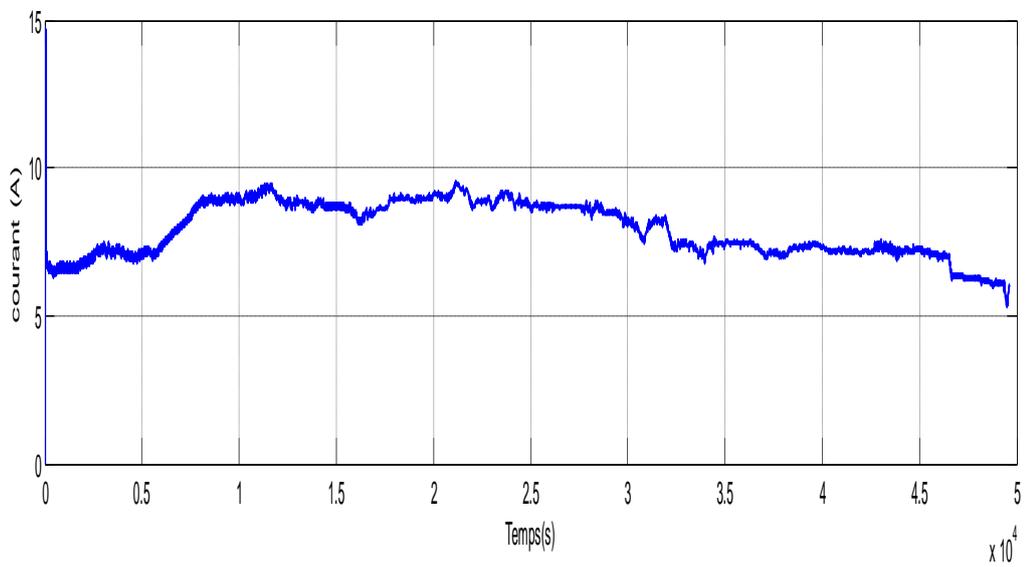


Fig. (IV.24) : Variation du courant du moteur en fonction de temps après optimisation

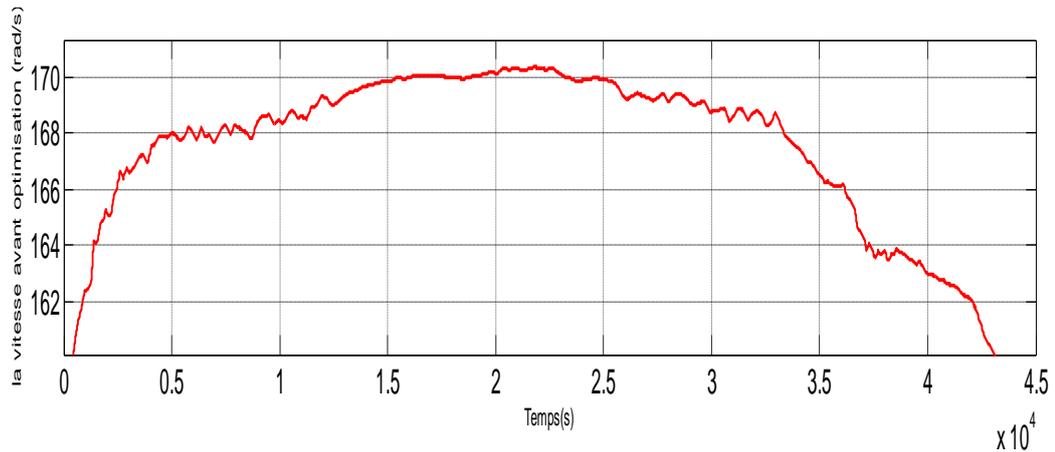


Fig. (IV.25) Variation de la vitesse du moteur en fonction de temps avant optimisation

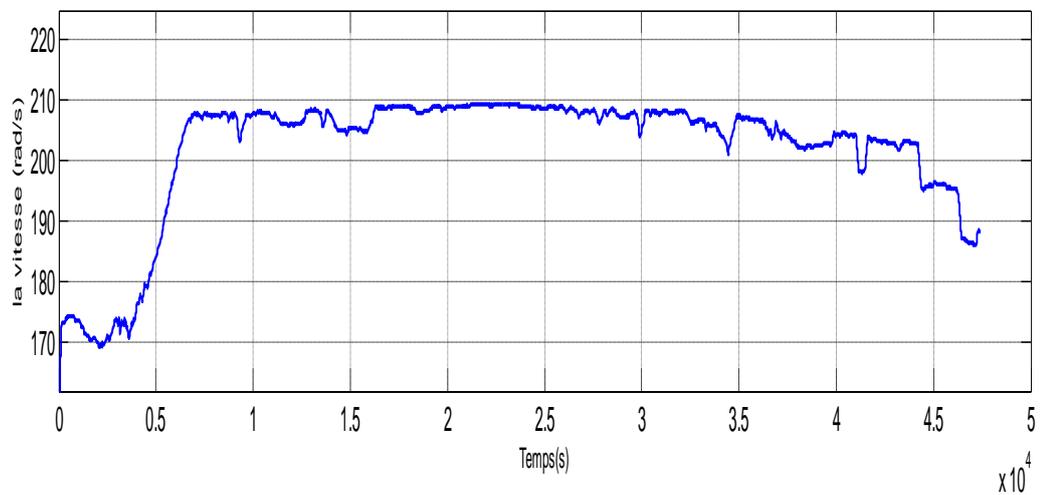


Fig. (IV.26) : Variation de la vitesse du moteur en fonction de temps après optimisation

La figure (IV.23,24) , (IV.25,24) montrent une augmentation intéressante de la vitesse et le courant du moteur d'un couplage indirecte par rapport à un couplage directe du système de pompage solaire ce qui explique le rôle de l'optimisation du système photovoltaïque .

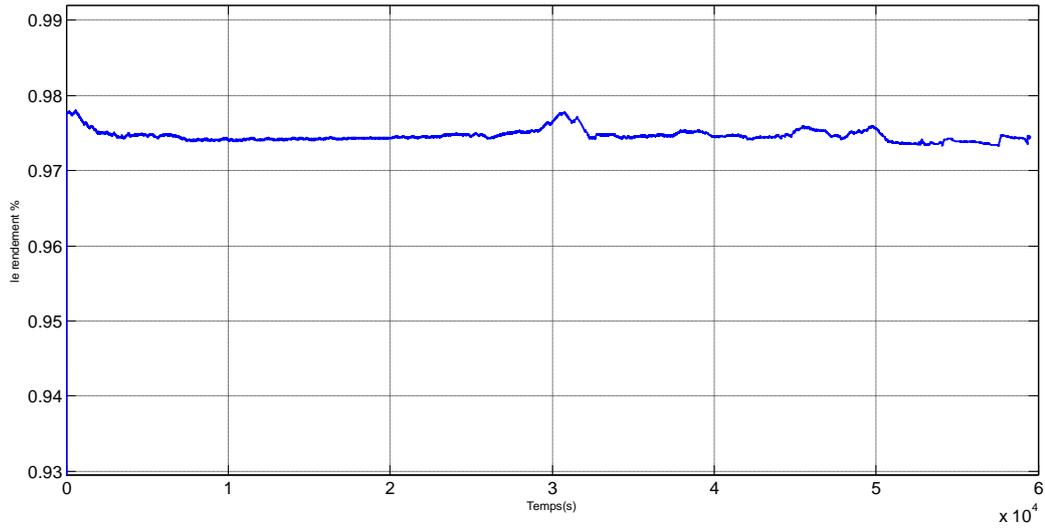


Fig. (IV.27) : Le rendement en fonction de temps

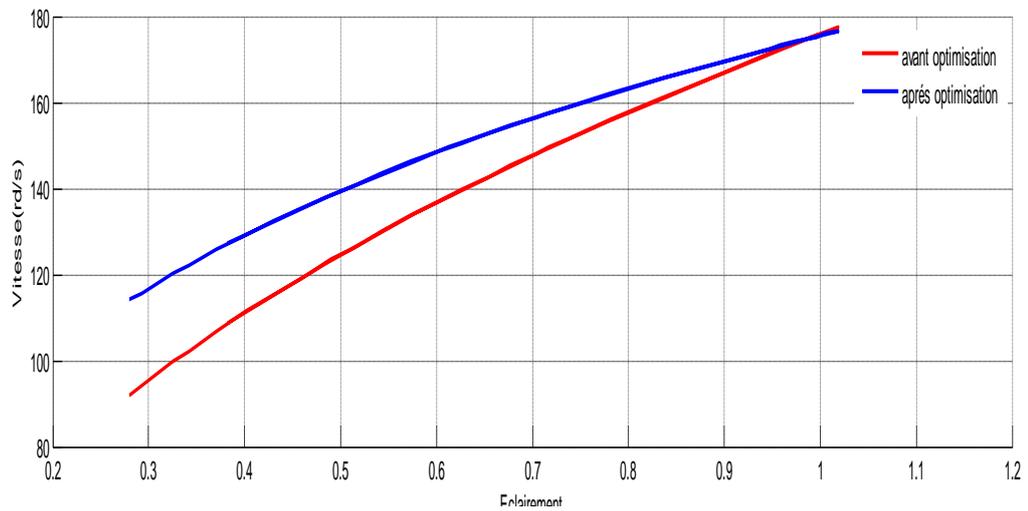


Fig. (IV.28) : variation de la vitesse en fonction de l'éclairment

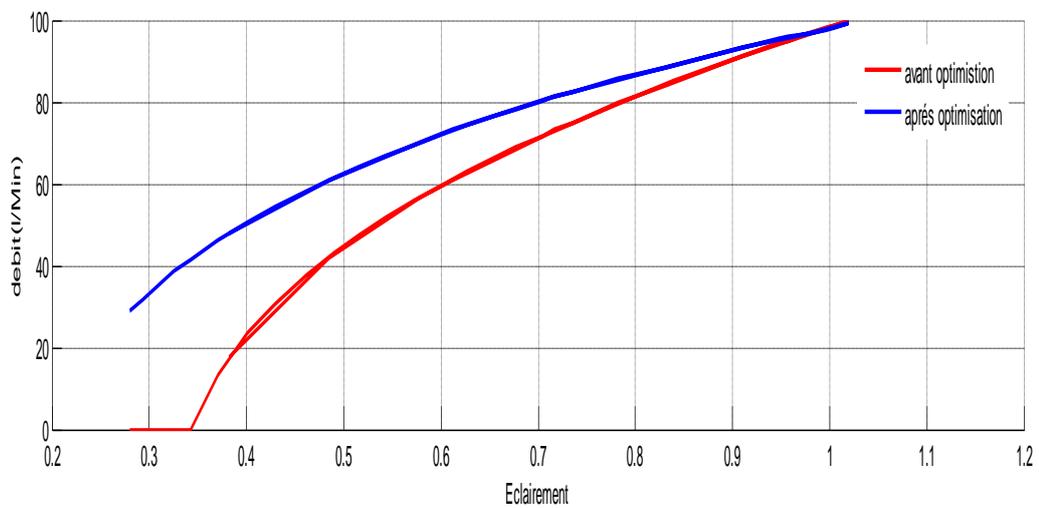


Fig. (IV.29) :Caractéristique du débit en fonction de l'éclairment

Les caractéristiques (IV.28) et (IV.29) représentent les allures des courbes des débits en fonction de l'éclairement .Dans le cas du couplage direct le système ne commence à délivrer de l'eau qu'à partir d'un éclairement de 350W/m^2 , par conséquent la maximisation de puissance force la pompe a fournir de l'eau à partir de 280W/m^2 .

On remarque une augmentation intéressante de la vitesse et du débit pour les faibles éclairements comparativement aux éclairements élevés.

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 .

Conclusion générale

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications tel que le pompage d'eau présente un intérêt très important ; cependant les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coup élevé, cela se vérifie sur la caractéristique $I-V$ sous l'influence de différentes températures.

L'étude des générateurs photovoltaïques a permis la connaissance du comportement de ces derniers en fonction de l'éclairement et de la température et leurs effets sur les caractéristiques électriques, et par conséquent sur leur rendement.

Pour palier à ces contraintes on a abordé la problématique d'optimisation par la présentation de la modélisation de chaque élément constituant la chaîne photovoltaïque, ainsi qu'un dimensionnement du générateur. Ceci nous a conduits à mettre en place les différents étages d'adaptations et par la suite nous a permis de comparer les résultats par rapport avec un système en couplage direct du générateur photovoltaïque avec le groupe motopompe.

L'étude des différents moteurs électriques du point de vue excitation et leurs caractéristiques électriques : couple - vitesses a montré que le moteur synchrone 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.

Liste des figures

Fig.(I.1) : Types de rayonnement solaire reçus au sol.....	4
Fig.(I.2) : Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.....	4
Fig.(I.3) : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné	4
Fig.(I.4) : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	5
Fig.(I.5) : Présentation schématique d'une cellule solaire.....	7
Fig.(I.7) : Constitution d'un module photovoltaïque.....	8
Fig.(I.8) : Protection des modules par les diodes anti retour et by-pass.....	9
Fig.(II.1) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	12
Fig.(II.2) : Caractéristiques électrique d'une cellule élémentaire	13
Fig.(II.3) : L'impact de la résistance R_s (a) et R_p (b) sur I(V).....	14
Fig.(II.4) : Influence de l'éclairement sur I(V).....	16
Fig.(II.5) : Influence de la température sur I(V).....	16
Fig.(II.6) : Champ photovoltaïque.....	17
Fig.(II.7) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.....	18
Fig.(II.8) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques...	18
Fig.(II.9) : Association de mixte des cellules solaires photovoltaïques	19
Fig.(II.10) : Caractéristique résultante d'un groupement hybride des cellules identiques.....	19
Fig.(III.1) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéal.....	22
Fig.(III.2) : La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque.....	22
Fig.(III.3) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réel.....	22
Fig.(III.4) : Caractéristique courant-tension.....	25
Fig.(III.5) : Caractéristique puissance-tension.....	25
Fig.(III.6) : Influence de la température sur I(V).....	26
Fig.(III.7) : Influence de la température sur P(V).....	26
Fig.(III.8) : Influence de l'éclairement sur I(V)	26
Fig.(III.9) :Influence de l'éclairement sur P(V)	27
Fig.(III.10) : Influence de l'éclairement et de la température sur I(V).....	27
Fig.(III.11) : Influence de l'éclairement et de la température sur P(V)	27
Fig.(III.12) : Influence de la résistance série sur I(V).....	28
Fig.(III.13) : Influence de la résistance série sur P(V)	28
Fig.(III.14) : Influence du facteur de qualité sur I(V)	28

Fig.(III.15) : Influence du facteur de qualité sur P(V).....	28
Fig.(III.16) : l'influence de l'association des modules	28
Fig.(III.17) : Différentes zones de la caractéristique I (V), T = 25 °C.....	30
Fig.(III.18) : Connexion directe source-charge.....	31
Fig.(III.19) : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.	31
Fig.(III.20) : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.....	31
Fig.(III.21) : Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur.....	32
Fig.(III.22) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur.....	33
Fig.(III.23) : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	33
Fig.(III.24) : Schémas équivalents du hacheur survolteur.....	34
Fig.(III.25) : Convertisseur dévolteur-survolteur.....	35
Fig.(III.26) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur.....	36
Fig.(III.27) : Structure d'une station de pompage photovoltaïque	37
Fig.(III.28) : Machine à courant continu a aimant permanent.....	38
Fig.(III.29) Variation de courant et de la vitesse du moteur.....	40
Fig.(III.30) : Variation de couple électromagnétique et le couple résistant du moteur	41
Fig.(III.31) : Caractéristiques débit- vitesse ; couple -vitesse d'une pompe volumétrique.....	42
Fig.(III.32) : Caractéristiques débit-hauteur d'une pompe volumétrique.....	43
Fig.(III.33) : Schéma de principe d'une pompe centrifuge.....	43
Fig.(III.34) : Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	46
Fig.(III.35) : Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.....	46
Fig.(III.36) : Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.....	47
Fig.(III.37) : Caractéristique de la puissance hydraulique de la pompe centrifuge.....	48
Fig.(III.38) : Caractéristique de rendement de la pompe centrifuge.....	49
Fig.(III.39) : Exemples d'installations de pompes solaires.....	49
Fig.(IV.1) : Schéma bloc du module BP MSX60 de BP Solaire sous Matlab/Simulink.....	52
Fig.(IV.2) : Schéma bloc du Sous-système du module photovoltaïque sous Matlab/Simulink.....	52
Fig.(IV.3) : Calcul de la température.....	53
Fig.(IV.4) : Modélisation du courant inverse de saturation I_{rs}	53
Fig.(IV.5) : Modélisation du courant de saturation I_s	53
Fig.(IV.6) : Modélisation du courant photonique I_{ph}	54
Fig.(IV.7) : Modélisation $nsAkT$	54

Fig.(IV.8) : Modélisation du courant photovoltaïque I_{pv}	54
Fig.(IV.9) : Model du moteur à courant continu courant sous Matlab/Simulink.....	55
Fig.(IV.10) : La variation du courant délivré par le moteur à courant continu en fonction de temps.....	55
Fig.(IV.11) : La variation du courant délivré par le moteur à courant continu en fonction de temps.....	55
Fig.(IV.12) : Schéma bloc d'un couplage directe GPV- MSAP.....	54
Fig.(IV.13) : Caractéristique I(V), $I_m(V)$ d'un couplage directe pour différents éclairements et une température constante $T=25^\circ C$	58
Fig.(IV.14) : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT	59
Fig.(IV.15) : Divergence de la méthode P&O.....	60
Fig.(IV.16) : Caractéristique de la puissance tension d'un générateur photovoltaïque, Variation de $\frac{dP}{dV}$	61
Fig.(IV.17) : Schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous Matlab/Simlulink	63
Fig.(IV.18) : La variation de L'éclairement en fonction de temps	63
Fig.(IV.19) : Caractéristiques de charge de système de PPV, $T=25^\circ C$ (1) Couplage direct, (2) Couplage avec MPPT	64
Fig.(IV.20) :La tension du générateur en fonction de temps.....	65
Fig.(IV.21) : Variation de la tension de sortie du hacheur Boost en fonction de temps.....	65
Fig.(IV.22) : Variation de la puissance de sortie en fonction de temps	65
Fig.(IV.23) : Variation du courant du moteur cc en fonction de temps avant optimisation.....	66
Fig.(IV.24) : Variation du courant du moteur cc en fonction de temps après optimisation.....	66
Fig. (IV.25) : Variation de la vitesse du moteur en fonction de temps avant optimisation.....	67
Fig.(IV.26) : Variation du courant du moteur en fonction de temps avant et après optimisation.	67
Fig.(IV.27) : Variation de la vitesse du moteur en fonction de temps avant et après optimisation.....	68
Fig. (IV.28) : variation de la vitesse en fonction de l'éclairement	68
Fig. (IV.29) :Caractéristique du débit en fonction de l'éclairement	68

Annexe1

Tableau 1: Caractéristiques électriques du module BP MSX60 de BP Solaire

Température	T°	25	$^{\circ}\text{C}$
Tension de circuit ouvert	V_{co}	21.0	V
Courant de court circuit	I_{cc}	3.87	A
Tension de puissance maximale	V_{max}	16.8	V
Courant de puissance maximale	I_{max}	3.5	A
Puissance maximale	P_{max}	58	W

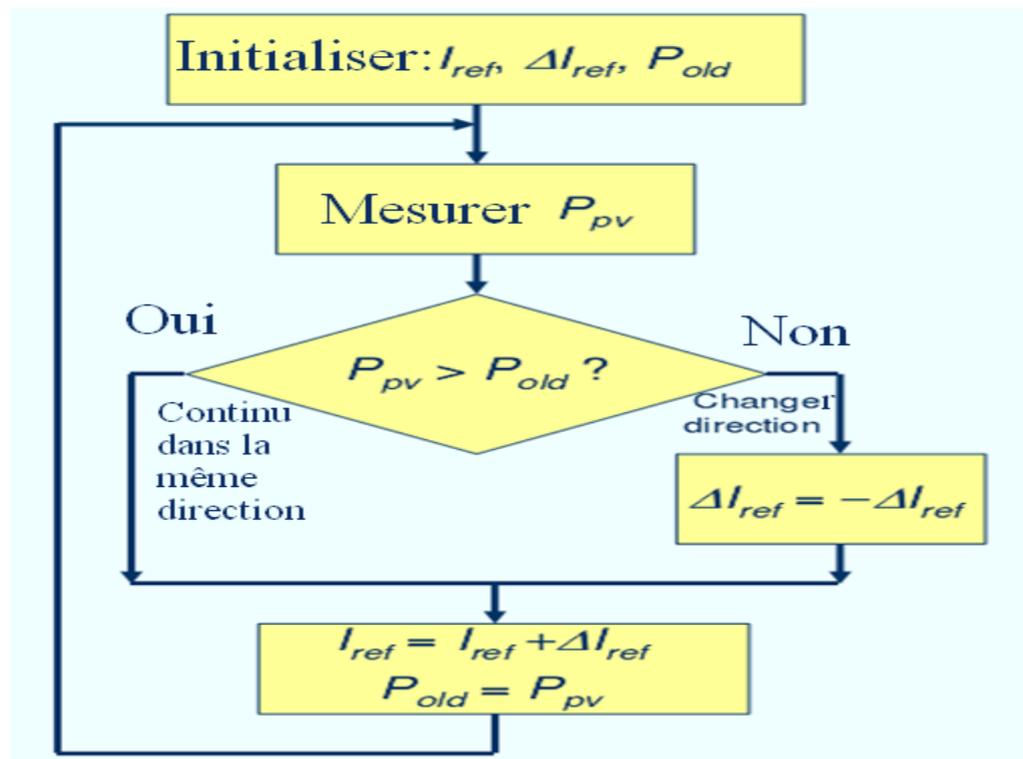
Tableau 2 : Caractéristique de la machine synchrone à aimant permanent [40]:

fréquence	F	60	HZ
Puissance nominale	P	746	W
Vitesse nominale	n	1800	tr /mn
Tension nominale	U_{sn}	208	V
Courant nominale	I_{sn}	5	A
Résistance d'une phase statorique	R_s	1.93	Ω
le moment d'inertie	J	0.003	Kg/m^2
flux des aimants	φ_e	0.314	Wb
Coefficient de frottement visqueux	f_v	0.0008	$\text{Nm} / (\text{rad} / \text{s})$
Nombre de pôles .	p	4
Inductance directe	L_d	0.0424	H
Inductances en quadrature	L_q	0.0795	H

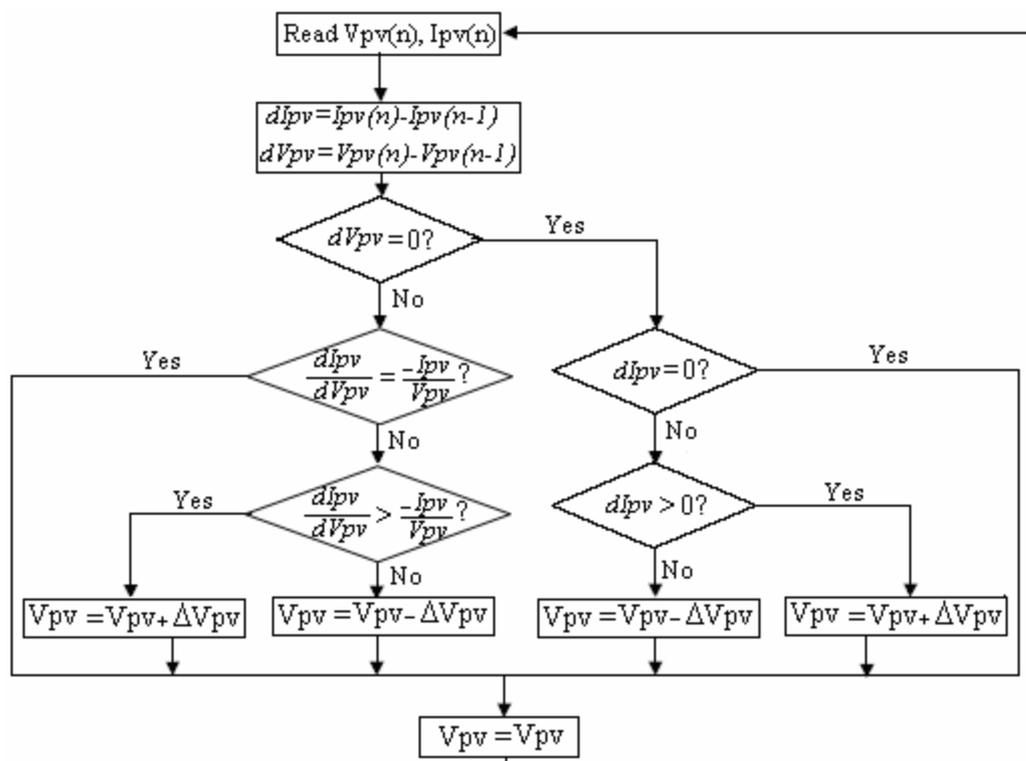
Tableau 3 : Caractéristique de la pompe centrifuge [40]

Puissance nominale	P_n	559.5 w
Vitesse nominale	n	1830 tr/mn
Hauteur totale du pompage	H	10 m
Hauteur statique	H_s	7.4 m
Longueur de la tuyauterie	L	7.4 m
Accélération de la pesanteur	g	9.81 m /s ²
La masse volumique de l' eau	ρ	1000 Kg/m ³

Annexe 2



1. Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation



2. Algorithme de l'incrément de Conductance

Annexe3

Moteur à courant continu

1- Structure d'un moteur à courant continu :

Le moteur synchrone comprend :

- Un **circuit magnétique** comportant une partie fixe, le stator, une partie tournant, le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties.
- Une source de champ magnétique nommée **l'inducteur** (le stator) créée par un bobinage ou des aimants permanents.
- Un circuit électrique **induit** (le rotor) subit les effets de ce champ magnétiques.
- Le **collecteur** et les **balais** permettent d'accéder au circuit électrique rotorique.

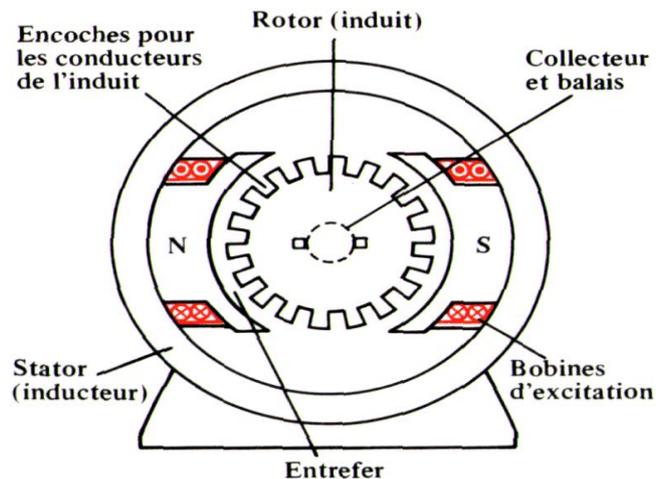


Fig. (1) : Moteur à courant continu

2- Types des Moteurs à courant continu :

Le moteur à courant continu excité par des aimants permanents n'est pas le seul type possible. Souvent on remplace les aimants par des électroaimants fixes (bobines convenablement alimentées en courant continu). Les bobines sont appelées "bobines d'excitation" ou "bobines inductrices". On distingue généralement quatre types de moteurs selon le branchement envisagé:

1-Moteur à excitation indépendante: L'inducteur peut être, soit un aimant permanent, soit un électroaimant fixe.

2-Moteur à excitation série : L'inducteur et l'induit sont reliés en série.

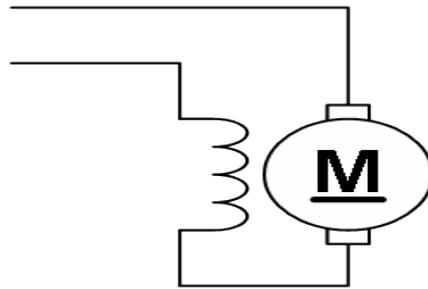


Fig. (2) : Moteur à excitation série

3-Moteur à excitation shunt : L'inducteur de ce moteur est en parallèle avec l'induit, La tension d'induit est également La tension d'excitation.

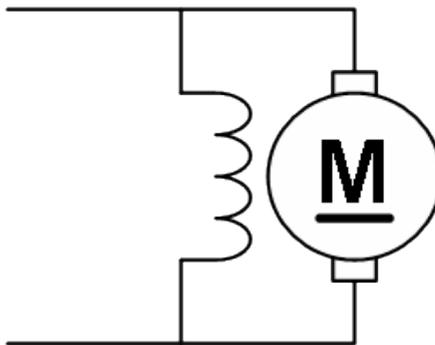


Fig (3) : Moteur à excitation parallèle.

4-Moteur compound : Une bobine inductrice est raccordée directement à la source de courant, tandis que la seconde bobine inductrice est raccordée en série au rotor.

G : L'intensité du rayonnement solaire (W/m^2).

λ : Longueur d'onde m

E : L'énergie de chaque photon.

h : La constante de Planck. $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$

C : La vitesse de propagation. $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

η_{STC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque ;

P_m : La puissance produite par le générateur PV ;

E_{STC} : L'éclairement absorbé par la cellule ;

Scellule : La surface de la cellule [m^2].

A : Facteur de qualité

I_{ph} : Photo- courant (A)

I_d : Courant traversant la diode.

q: Charge de l'électron. $1,60217646 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

k: La constante de Boltzmann. $1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J. K}^{-1}$

U_T : tension thermique (v).

I_s : courant de saturation (A)

V : tension à la borne de la diode (v).

T : température absolue (en kelvin).

R_s : résistance série (Ω)

R_{sh} : résistance shunt (Ω)

A : Facteur de qualité

I_{CC} : courant de court-circuit (A).

V_{CO} : Tension à circuit ouvert (v)

P_{max} : Puissance maximale (w) .

ff : Facteur de forme.

η_c . Rendement d'une cellule solaire.

$P_{solaire}$: Puissance du rayonnement solaire incident.

η_g : Rendement de générateur photovoltaïque

S : Surface du module photovoltaïque (m^2).

N_s : Nombre de module en série.

T : la période de commutation

α : rapport cyclique du commutateur

I_{op} : le courant optimal.

V_{op} : la tension optimale.

J_m : courant d'excitation

B_m : un champ magnétique d'induction

FEM :force

MCC : moteur a courant continu

k_e, k_t : constantes de tension et de couple de moteur.

I_a : le courant d'armature de moteur.

R_a : la résistance de circuit d'armature de moteur.

C_e : le couple électromagnétique de moteur.

C_r : le couple résistant de moteur.

Q : débit (m^3/h)

HMT : Hauteur manométrique totale

H_g : hauteur géométrique

ρ : Masse volumique de l'eau (Kg/m^3).

g : accélération de la pesanteur (m/s^2).

ΔH : Sommes de toutes les pertes de charges dans les tuyauteries d'aspiration et de refoulement (tuyauteries, vannes, accessoires).

P_m : puissance fournie par le moteur

K_{fr} : Coefficient de perte de charge relatif à la pompe.

K_c : Coefficient de pertes de charge relatif à la pompe.

K_1 : Coefficient correcteur dépendant des dimensions de la pompe.

H_p : Hauteur réelle.

H_t : Hauteur théorique

ΔH : Les pertes de charges dans les tuyauteries d'aspiration et de refoulement.

K_f : Coefficient de débit

P_{ah} : Puissance hydraulique absorbée (ou puissance utile à la conversion)

T : couple de torsion sur l'arbre de la pompe

ω : vitesse angulaire de la pompe

H_s : Hauteur statique

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires

L : La longueur d'un tronçon de conduite (m).

D : Le diamètre d'un tronçon de conduite (m).

V : La vitesse d'écoulement dans la conduite.

g : L'accélération de la pesanteur (m/s).

K_p : *Constante de la canalisation*

K_1, K_2, K_3 : des constantes propre de la pompe donnée par le constructeur

K_r : Coefficient de proportionnalité [(Nm/rad.s⁻¹)].

C_s : Couple statique

η_g : rendement du générateur à la température de référence(25C°)

A : surface active du généraveur(m²)

- [1] Abada, Sofiane. « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur Sepic ». université LAVAL QUEBEC.2011
- [2] : Z.Benjellouli « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de magistère université de Bechar .Algérie 2009.
- [3] : M. Belhadj Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome» Mémoire de Magister , Centre Universitaire De Bechar ,2008.
- [4] : Edition Masson « Les piles solaires, le composant et ces applications ».1985
- [5] : A Borni « modélisation et commande des machines électrique » thèse de magister université de Constantine 2009.
- [6] : A. Boden . « Analyse optimisée du système de pompage photovoltaïque » .mémoire de magistère, université de Constantine, année 2008
- [7] : M.Boukli -Hacene. « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique » .mémoire de magister , université Aboubaker belkaid ,Tlemcen.2011
- [8] : J. Royer T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy « Le Pompage Photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [9] : Céline BERNARD, Carolina SEBRAO – OLIVEIRA, Bernard LAVAL, Clément VAUDOUEUR. « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de la logique flou ». Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 énergie renouvelables. 2009
- [10] : B.Chaouki , B.Tarek « Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au réseau», Mémoire ingénieurs. Biskra, 2007.
- [11] : Mr. MEFLAH AISSA. « Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque». Mémoire de Magister. université ABOU BEKR BELKAID - Tlemcen. 2011
- [12] : B.Omar , C.Idris, « L'intégration du photovoltaïque Au Réseau électrique Problèmes et perspectives », Mémoire ingénieurs. Biskra, 2006.
- [13] : Yann Pankow, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de doctorat . Ecole doctorale de L'ENSAM ED 432,Lille,2004.
- [14] : Nafa, « Estimation des énergies incidentes et fournies par module photovoltaïque », Mémoire de DES, Université de Tlemcen, Juin 2001.

- [15] : S.Ameziane « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien » thèse de Magistère en Electrotechnique l'Université de Batna .2009
- [16] : M. Boudjemâa. « Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque».mémoire de magister ,université de Constantine.2007.
- [17] : R.chenni , «Etude techno-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire » thèse de doctorat université de Constantine .2007 .
- [18] : F.Slama ; « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Mémoire de magister ; université Ferhat Abbas , Sétif. 2011 .
- [19] : Mme. OBEIDI, « Commande des hacheurs MPPT par logique floue", Ecole Nationale Polytechnique » Mémoire de Magister, 2006.
- [20] : M. Rachid, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzareah », Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2005.
- [21] : Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG, « Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK » Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA.
- [22] : Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho, « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays », IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009 .
- [23] : L.Kemmouche, « Modèle de fonctionnement d'une station solaire photovoltaïque, en prévision de panne », mémoire de magistère, université de Constantine, année 2002.
- [24] : S.djeriou .«Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone»;mémoire de magister , université Ferhat Abbas Sétif.2011
- [25] : A. Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque» Mémoire de Magister , université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou . 2011
- [26] : A. C. Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques » Thèse de doctorat ;Institut National de Science Appliquée de Toulouse
- [27] : 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'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [28] : M.Angel ,Cid Pastor, « Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques»,Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006

- [29] : Sy M. Mansour Niang & Souleymane Diop Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT Electrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation .2008
- [30] : A. Saadi, «Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque» Mémoire de Magister ,Université de Biskra, 2000.
- [31] : 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
- [32] : S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [33] : Yun Tiam Tan. « Impact on the power system with a large penetration of photovoltaic generation », PHD Thesis submitted to The University of Manchester Institute of Science and Technology, 2004
- [34] : S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [35] : N. Abouchabana, «Etude d'une nouvelle topologie buck-Boost appliquée à un MPPT »; Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009
- [36] : Cours "PIPVoitureSolaire.pdf", <http://das.ensica.fr> .
- [37] : S. BELAKEHAL. « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » 2010.
- [38] : 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.
- [39] : N.AOun , « étude et modélisation des différents modèles de cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales » thèse de magister ; université de Constantine .2010
- [40] : R. Chenni , L. Zarour , A. Bouzid and T. Kerbache « Comparative study of photovoltaic pumping systems using a permanent magnet synchronous motor and an asynchronous motor », Rev. Energ. Ren. Vol. 9 (2006) 17 – 28
- [41] : D.BOUKHERS « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage »,Mémoire de magister université de Constantine 2007
- [42] : Hindmarsch J. Electrical machine and their applications, 4th ed. New York: Pergamon press; 1984

Résumé

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coût élevé .

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation, la commande et l'optimisation d'un système de pompage solaire.

Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, le convertisseur de tension, le moteur synchrone à aimant permanent, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique.

Mots-clés :

Energie solaire, Photovoltaïque, Modélisation et Simulation, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Optimisation, Pompe centrifuge.

ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم الطاقات المتجددة التي تستعمل في المناطق النائية، المعزولة أو البعيدة عن شبكة توزيع الطاقة الكهربائية لما لها من فوائد كثيرة. من بين المجالات التي تستعمل فيها نجد مجال ضخ المياه، لكن هناك عدة مشاكل تعرقل استعمالها نذكر من بينها غلاء تكلفتها ومردود ضعيف. في هذا المنوال تم إنجاز هذه المذكرة التي من خلالها قمنا بنمذجة، محاكاة، و تحكم في نظام ضخ المياه، هذا النظام يتكون من عدة أجزاء تشارك فيما بينها، و هي مولد الطاقة الشمسية، محول التوتر، المحرك التزامني بمغناطيس دائم و المضخة. الدراسة تتضمن أيضا تقنية متابعة نقاط الاستطاعات الأعظمية الذي يضمن رفع مردود المحرك- المضخة، هذه التقنية تضمن أيضا التكيف بين المولد الشمسي و الحمولة لتخفيض ثمن تحويل الطاقة و هم عدة تقنيات و خوارزميات لفعل هذا العمل .

كلمات مفتاحية: خلية شمسية, نموذج, لوح, نقطة الأستطاعات الاعظمية .

Abstract

The use of solar in isolated sites for different applications, such as water pumping presents many interests for third world countries which are in real need for drinking water. However photovoltaic generators do have two main disadvantages namely: High cost, bad efficiency.

The work presented in this memory is related to modelisation, simulation, control and optimisation of pumping solar systems.

The chain of this system is composed of photovoltaic panels, voltage converter, permanent magnet synchronous motor, centrifugal pump and a hydraulic circuit.

Keywords: photovoltaic ,converter, modeling, pumping, Dimensioning and simulation.