

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**

UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA

**FACULTE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION
ET DE LA COMMUNICATION**

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET DE TELECOMMUNICATION



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Automatique

Spécialité : Instrumentation et système

Présenté par :

- ✓ HACINI M^{ed} SEIF EDDINE
- ✓ NAILI IYAD

Etude et commande d'un système solaire photovoltaïque

Soutneue devant le jury composé de :

- | | | | |
|-------------------------------|-----|-----------|-------------|
| ✓ Dahraoui Nadia | MCB | Président | UKM Ouargla |
| ✓ Rouabah Boubakeur | MCB | Encadreur | UKM Ouargla |
| ✓ Mahboub Mohamed Abdelbasset | MCB | Examineur | UKM ouargla |

Année Universitaire 2021/2022

Sommaire

Dédicace	I
Remerciement	II
Liste des symboles est abréviations :	III
Liste des figures:	V
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
I.1 Introduction :.....	4
I.2 Cellule photovoltaïque :.....	4
I.3 Principe de fonctionnement :	5
I.4 Types des cellules photovoltaïques :.....	6
a- Cellules mono- cristallines :.....	6
b- Cellules poly-cristallines :.....	6
c- Cellules amorphes:.....	7
I.5 Influence de l'éclairement et de la température :.....	7
a- Influence de température :.....	8
b- Influence d'éclairement :	8
I.6 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque :.....	9
I.8 Association de cellules PV :	10
a- Association série :	10
b- Association en parallèle :.....	11
c- Association en série/parallèle :.....	12
I.9 Configuration des systèmes PV:	12
a- Systèmes d'alimentation directe :	12
b- Système autonome avec stockage :.....	13
c- Système autonome hybride :	14
d- Système raccordé au réseau :	14
I.10 Les avantages d'un système pv :.....	15
Chapitre II : Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)	
II.1 Introduction :	17
II.2 Modélisation d'un panneau photovoltaïques :.....	17
II.3 Simulation des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque :.....	18
a- Caractéristiques I(V) :.....	19
b- Caractéristiques P(V) :.....	19
II.4 Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) :.....	20
a- Principe de MPPT :	20

b- Type de MPPT :	21
c- Premières commandes MPPT :	21
d- Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité :	21
II.5 MPPT avec l'algorithme perturbe et observe (PO):	21
II.6 MPPT avec l'algorithme Incrémental Conductance :.....	27
II.7 conclusion :	32
Chapitre III : Système photovoltaïque pour le pompage de l'eau	
III.1 Introduction :	34
III.2 Principe de fonctionnement du système de pompage :	34
II.2.1 Les avantages du pompage solaire PV :	35
II.2.2 Types de systèmes de pompage :	35
a-Le système solaire de pompage fonctionnant au fil du soleil :	35
b-Le système solaire de pompage avec stockage batterie :	36
II.2.3 Configurations du système de pompage photovoltaïque :	37
III.3 Le groupe électropompe :.....	37
1-Moteurs :	37
1-a- Moteurs à courant continu :	37
1-b- Moteurs à courant alternatif :.....	37
2-Les Pompes :	38
2-a- La pompe centrifuge :	38
2-b- La pompe volumétrique :	38
III.4 Modélisation et dimensionnement des panneaux photovoltaïques :	38
a-Association des modules en série :.....	39
b-Association des modules en parallèle :	39
c-Association des modules mixte :.....	39
III.5 Modélisation et dimensionnement du convertisseur DC/DC :.....	40
III.6 Modélisation et dimensionnement du moteur DC :.....	41
III.7 Commande en vitesse de la machine :.....	42
1. Système de commande :	42
2. Comment choisir le régulateur :	43
3.la régulateur PI :	43
4.Fonction de transfert de la machine :	44
5.Structure de la commande PI :	46
III.8 Dimensionnement complet de l'installation :.....	47
III.9 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise :	47
III.10 Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise :	48
III.11 Dimensionnement des stations de pompage solaire :	48
III.12 Application du système de pompage photovoltaïque :.....	49

III.13 Simulation du système de pompage	49
III.14 Conclusion :	51
Conclusion Générale	52
Résumé.....	54
Bibliography.....	55

Dédicace

Je dédie ce travail aux deux plus chères personnes au
monde qui

Sont mes parents, pour tous leurs amours,
encouragements,

Conseil, sacrifices, patiences et confiance.

À mes frères et mes sœurs. A toute ma famille
HACINI et **NAILI** sans oublier mes

Chère amis.

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur Mr ROUABAH BOUBAKEUR, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail de Master.

Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Nous remercions aussi tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Liste des symboles est abrégations :

PV	<i>Photovoltaïque</i>
GPV	<i>Générateur photovoltaïque</i>
G	<i>Générateur.</i>
Vco	<i>Tension en circuit ouvert (V)</i>
Ns	<i>Nombre de cellule en série</i>
Np	<i>Nombre de cellule en parallèle</i>
I	<i>Courant débitée par la cellule (A).</i>
Icc	<i>le Courant de court-circuit.</i>
Dc	<i>courant continu.</i>
Ac	<i>courant Alternatif.</i>
Iph	<i>Photo-courant (A).</i>
Id	<i>Courant de la diode (A).</i>
Is	<i>Courant de saturation de la diode(A).</i>
q	<i>Charge d'un électron. $q = 1.6.10^{-19}$ (C).</i>
K	<i>Constante de Boltzmann $1.38. 10^{-23}$(J/K).</i>
Ics	<i>Courant de cellules en série.</i>
V	<i>tension.</i>
Vcs	<i>tension de cellules en série.</i>
E	<i>Irradiation solaire sur un plan incliné (W/m^2).</i>
CS	<i>Convertisseur statique.</i>
Vph	<i>Photo- tension.</i>
P&O	<i>Perturbation et observation.</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking.</i>
PPM	<i>Point de puissance maximal.</i>
MCC	<i>Moteur à courant continue.</i>
IncCond	<i>Incrément des conductances.</i>
Vms	<i>Tension module en série.</i>
Ims	<i>Courant module en série .</i>
Vout	<i>Tension de sortie.</i>
Iout	<i>Courant de sortie.</i>
Pmax	<i>Puissance maximal.</i>
I_f	<i>Courant d'inducteur (A).</i>
R_F	<i>Résistance d'inducteur (Ω).</i>
L_f	<i>Inductance de l'inducteur (H).</i>
U_f	<i>Tension d'excitation (V).</i>
Ra	<i>Résistance équivalente de l'induit (Ω).</i>
Ia	<i>Courant de l'induit (A).</i>
La	<i>Inductance de l'induit (H).</i>
E	<i>Force contre électromotrice.</i>
M_{fd}	<i>Inductance mutuelle inducteur-induit (H).</i>
P	<i>Le nombre de pair de pôles.</i>
Ωr	<i>Vitesse de rotation (rad /s).</i>
Cem	<i>Couple électromagnétique (Nm).</i>
Cr	<i>Couple résistant (Nm).</i>

<i>J</i>	<i>Moment d'inertie (Kg.m²).</i>
<i>Ki</i>	<i>Gain intégral de correcteur PI.</i>
<i>Kp</i>	<i>Gain proportionnel du correcteur PI.</i>
<i>F</i>	<i>Coefficient de frottement (Nm.s/rad).</i>
<i>Km</i>	<i>Constante du moteur (^v/rad.s⁻¹).</i>
<i>PI</i>	<i>Correcteur proportionnel- intégral.</i>
<i>Id</i>	<i>le courant de la diode.</i>
<i>Irs</i>	<i>Le courant de saturation inverse.</i>
<i>T</i>	<i>température effective de la cellule en Kelvin.</i>
<i>Tr</i>	<i>Température de référence des cellules PV [°K].</i>
<i>RS</i>	<i>résistance série.</i>
<i>Gref</i>	<i>L'éclairement de référence (1000 W/m²).</i>

Liste des figures:

<i>Chapitre I :Généralité sur les systèmes photovoltaïques</i>	
<i>Figure I. 1 : schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</i>	5
<i>Figure I.2: Cellules photovoltaïque monocristallines</i>	6
<i>Figure I.3 : cellule photovoltaïque poly-cristalline</i>	7
<i>Figure I.4 : cellule photovoltaïque amorphe</i>	7
<i>Figure I. 5 : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température</i>	8
<i>Figure I. 6 : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction d'éclairement</i>	9
<i>Figure I.7 : Associations en série des cellules PV</i>	11
<i>Figure I.8 : Associations en parallèle des cellules PV</i>	11
<i>Figure I.9: Système de pompage solaire</i>	13
<i>Figure I.10 : Système d'éclairage solaire</i>	13
<i>Figure I.11: système autonome hybride</i>	14
<i>Chapitre II :Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)</i>	
<i>Figure II.1: Schémas équivalent de la cellule photovoltaïque</i>	17
<i>Figure II.2: Caractéristique I(V)</i>	19
<i>Figure II.3: Caractéristique I(V)</i>	19
<i>Figure II.4: Chaîne de conversion photovoltaïque avec une commande MPPT.</i>	20
<i>Figure II.5: Principe de l'algorithme PO.</i>	22
<i>Figure II.6 : Algorithme de la méthode P&O</i>	23
<i>Figure II.7:Algorithme P&O dans Similink</i>	24
<i>Figure II.8 : Système photovoltaïque dans Similink</i>	24
<i>Figure II.9 : Irradiation solaire</i>	25
<i>Figure II.10 :Tension du panneau</i>	25

<i>Figure II.11 :Tension du panneau,algorithme Inc-Con</i>	26
<i>Figure II.12 : Tension de charge</i>	26
<i>Figure II.13 :Puissance produite</i>	27
<i>Figure II.14 :Caractéristique P(V)</i>	27
<i>Figure II.15 : Schéma bloc sous Simulink de la commande Incrément de conductance</i>	29
<i>Figure II.16 :Tension de charge algorithme Inc-Con</i>	31
<i>Figure II.17 :Tension du panneau, algorithme Inc-Con</i>	31
<i>Figure II.18 : Puissance produit, algorithme Inc-Con</i>	32
Chapitre III :Système photovoltaïque pour le pompage de l'eau	
Figure III.1 : système de pompage solaire.	34
Figure III.2: Le système solaire de pompage fonctionnant au fil du soleil	36
Figure III.3: Le système solaire de pompage avec stockage batterie	36
Figure III.4: Groupement de module en série et en parallèle	39
Figure. III.6 : Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : S fermé, (B) : S ouvert	40
Figure. III.7 : Schéma électrique du modèle de moteur DC	40
Figure III.8 : Structure générale de la commande en boucle fermée.	41
Figure III.9 : Schéma bloc de la boucle du courant.	43
Figure III.10 : Schéma bloc de la boucle du couple.	44
Figure III.11 : Schéma bloc de la boucle de vitesse.	44
Figure III.12 : Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice.	45
Figure III.13 : Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.	45
Figure III.14 : Schéma de commande utilisant la structure PI.	45
Figure III.15 : couple électromagnétique	50
Figure III.16 :vitesse du moteur	50
Figure III.17 :courant du moteur	50

Introduction générale

L'énergie renouvelable est une énergie qui provient des ressources naturelles de l'environnement et qui ne s'épuise pas. L'énergie renouvelable est produite à partir du vent, du soleil et de l'eau, en plus de celle des marées ou de l'énergie géothermique. L'énergie renouvelable est considérée comme une énergie respectueuse de l'environnement contrairement à l'énergie traditionnelle qui dépend des combustibles fossiles et du pétrole. Ce qui nuit à l'environnement, provoque le réchauffement climatique, et provoque une pollution de l'environnement avec ses déchets, qui affecte la vie des organismes vivants à la surface de la terre, y compris l'homme, et lui fait avoir de nombreux problèmes de santé et de nombreuses maladies qui n'ont pas existé avant.

Nous avons consacré cette note à l'introduction d'une partie des énergies renouvelables, à savoir l'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV), qui est l'énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire au travers de panneaux solaires photovoltaïques ou de centrales électriques. Elle est dite renouvelable car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle des temps humains. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage.

La cellule photovoltaïque, principal composant électronique du système, utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques (rayonnement) émises par le soleil en électricité. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire PV ou un collecteur, et ces unités groupées forment ensemble une installation solaire. L'électricité est consommée ou stockée sur place, ou transportée par le réseau de distribution et de transport d'électricité.

L'énergie photovoltaïque est un enjeu mondial qui a été souligné lors de la Conférence de Paris sur le Changement Climatique (COP21) de 2015 par le lancement de l'International Solar Alliance (ISA) ou « International Solar Alliance » (ISA) en novembre 2015, alliance chargée de coordonner énergie thermique Politiques de développement solaire et photovoltaïque pour les pays riches en ressources solaires. [26].

Comme nous le verrons dans cette note du premier chapitre, la génération d'énergie photovoltaïque et sa conversion en énergie électrique.

Comme pour le deuxième chapitre, nous avons abordé le point de puissance maximale (MPPT), en tenant compte de l'évolution du niveau de rayonnement solaire et de la température ambiante.

Nous avons conclu avec le troisième chapitre, dans lequel nous avons traité de l'expérience de pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui résume la partie théorique et la partie simulation.

Chapitre I :

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) [28] ou la technologie permettant de convertir l'énergie solaire (photons) en énergie électrique par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques, disposées en modules appelés panneaux photovoltaïques.

Dans ce chapitre on va parler d'abord sur le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et leur types, avantages et caractéristiques. Puis on va faire une description des différentes configurations de ce système, après on donnera une détaille sur le convertisseur DC/DC.

I.2 Cellule photovoltaïque :

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » [1], car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plupart des applications sont en plein air. Mais certains préfèrent l'expression énergie lumière, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle (ampoules, tubes fluorescents...), peut générer de l'électricité à travers une cellule solaire [2].

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et elle dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre-indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$, ou CIS), séléniure de cuivre, d'indium et de gallium ($\text{CuInGa}(\text{Se})_2$, aussi appelé CIGS), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

I.3 Principe de fonctionnement :

Nous allons ici exposer les principes de fonctionnement principaux de cette technique. 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. 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. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.

Les électrons ne circulent que de la zone p à n et inversement pour les trous. Ceci est dû à l'utilisation de semi-conducteur. 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 : le courant électrique circule. [3]

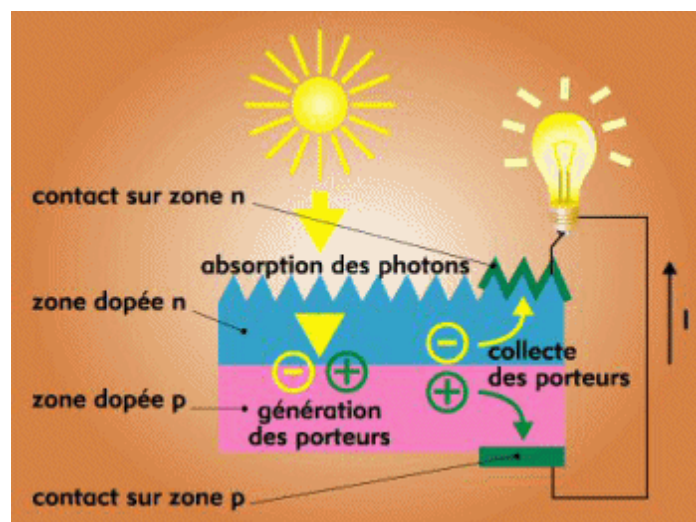


Figure I. 1 : schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.4 Types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [14].

a- Cellules mono- cristallines :

Une cellule monocristalline la plus proche du modèle théorique : cette cellule est constituée d'un monocristal divisé en deux couches. Cellules monocristallines permettent d'obtenir des rendements élevés, allant de 15 à 22 %. Cependant, ces cellules présentent les inconvénients suivants :

- Une méthode de production chronophage et difficile, et donc très coûteuse.
- Obtenir une limpidité cristalline demande beaucoup d'énergie.
- Délai de récupération élevé des investissements énergétiques (jusqu'à 7 ans). [30]



Figure I.2: Cellules photovoltaïque monocristallines

b- Cellules poly-cristallines :

Plusieurs cristaux se forment dans la lingotière lorsque le silicium est refroidi. La cellule photovoltaïque a un aspect bleuté mais pas uniforme, on distingue les motifs résultants par différents cristaux.

Les cellules poly-cristallines se caractérisent par :

- Réduction des coûts de production.
- Nécessite moins d'énergie.
- Efficacité 13% et jusqu'à 20% en laboratoire.

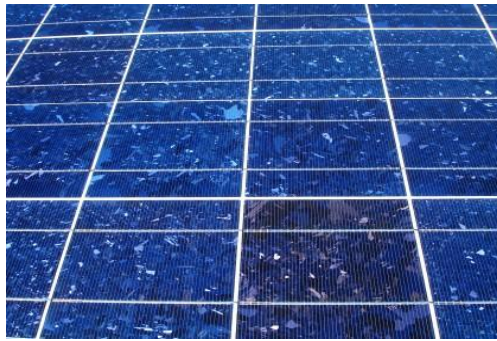


Figure I.3 : cellule photovoltaïque poly-cristalline

c- Cellules amorphes:

Ils ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire) mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un faible coût.

Ils sont couramment utilisés dans les petits produits de consommation tels que les calculatrices solaires et les montres. [29]

L'avantage de ce dernier type est qu'il fonctionne dans de mauvaises conditions d'éclairage (même par temps nuageux ou à l'intérieur)

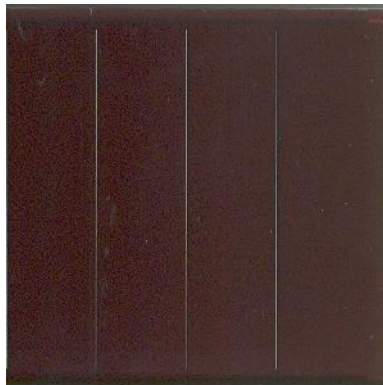


Figure I.4 : cellule photovoltaïque amorphe

I.5 Influence de l'éclairement et de la température :

Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'éclairement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes. [5].

a- Influence de température :

On peut observer l'effet de la température sur la caractéristique I(V). Comme le montre la figure (I-5), la température a un léger effet sur le courant, mais une augmentation de la température cause une diminution apparente sur la tension. [4].

Remarque :

On observe que la puissance maximale change avec le changement avec le changement de la température. La puissance diminue avec l'augmentation de la température.

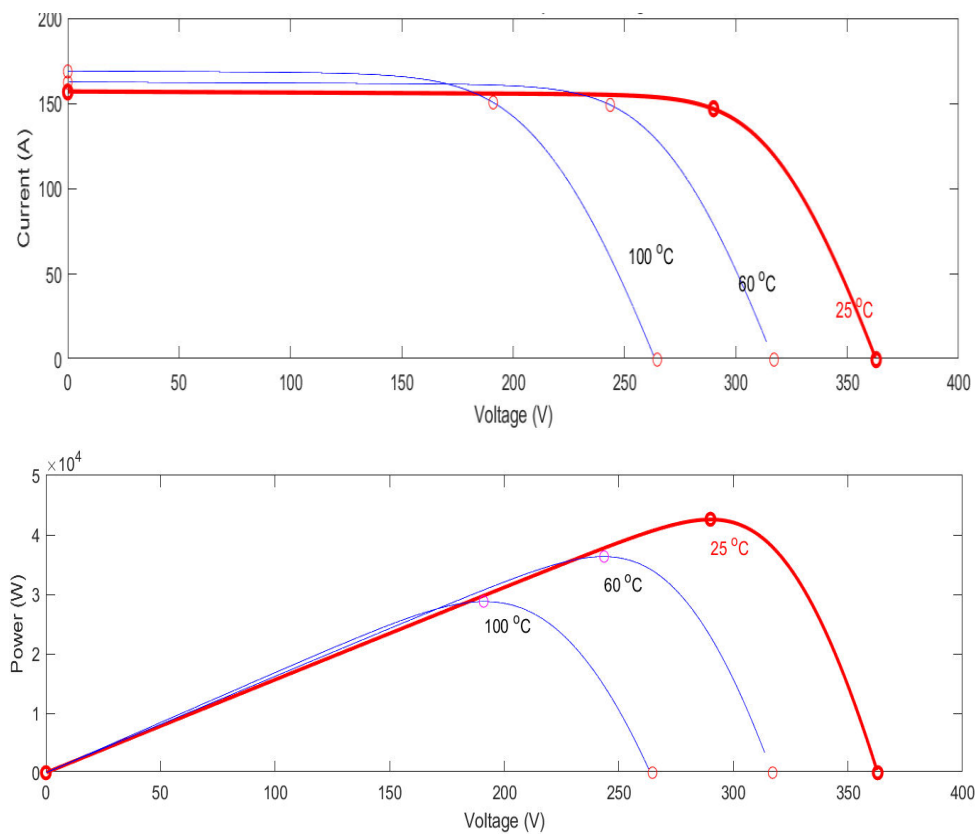


Figure I. 5 : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température[27].

b- Influence d'éclairement :

Le courant de court-circuit (I_{sc}) varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (I-6) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement. [5].

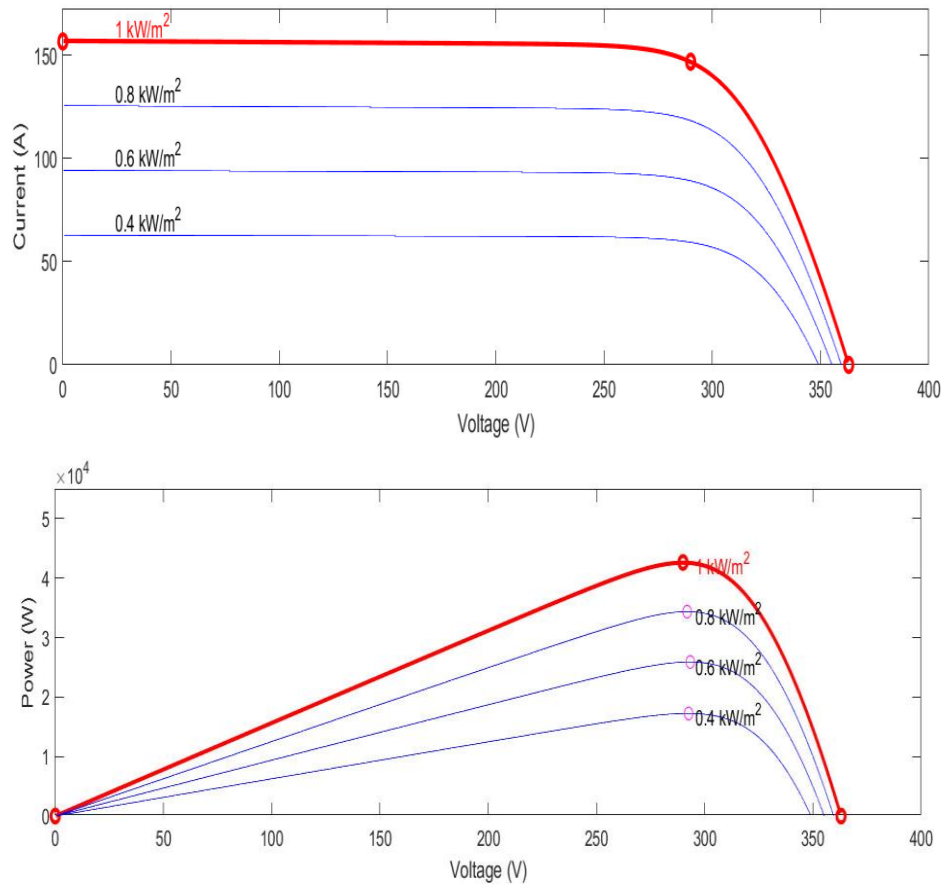


Figure I. 6 : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction d'éclairement[27].

I.6 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque :

- **Puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- **Caractéristique $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide V_{co}** : C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{oc} \cdot I_{cc}$.

I.8 Association de cellules PV :

La mise en série et/ou en parallèle des cellules PV donne un module ou un générateur photovoltaïque, pour générer la tension et le courant souhaités.

a- Association série :

L'association en série de N_s cellules permet d'augmenter la tension générée par le module photovoltaïque. La caractéristique résultante de l'association en série, les cellules sont alors traversées par le même courant et la tension est obtenue par l'addition des tensions élémentaires des cellules. L'équation résumant la caractéristique électrique de l'association en série de N_s cellules est la suivante :

$$V_{SCO} = N_s * V_{CO} \quad (I-1)$$

Avec :

V_{SCO} : Tension du circuit ouvert de N_s cellules connectées en série.

V_{CO} : Tension du circuit ouvert d'une cellule.

Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{SCO}=0.6V*36=21.6V$) an d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie de 12V. [6]

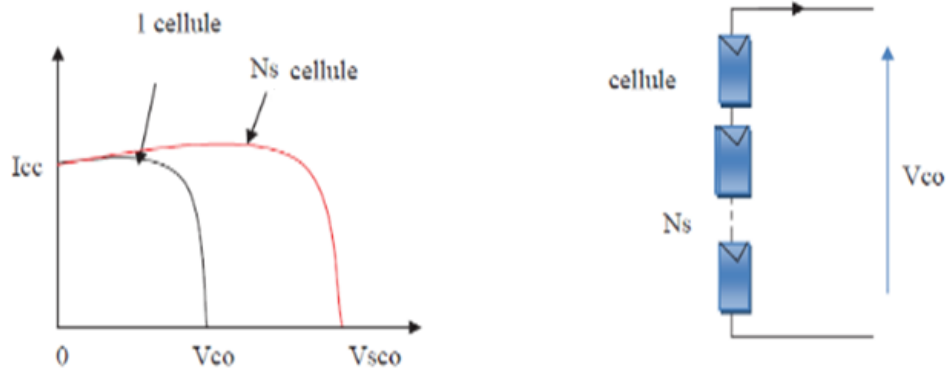


Figure I.7 : Associations en série des cellules PV

b- Association en parallèle :

Association parallèle de N_P cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants.

$$I_{PCC} = N_P * I_{CC} \tag{I-2}$$

Avec

I_{PCC} : Courant de court-circuit de N_S cellules connectées en parallèle.

I_{CC} : Courant de court-circuit d'une cellule.

La figure résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_P cellules. [6]

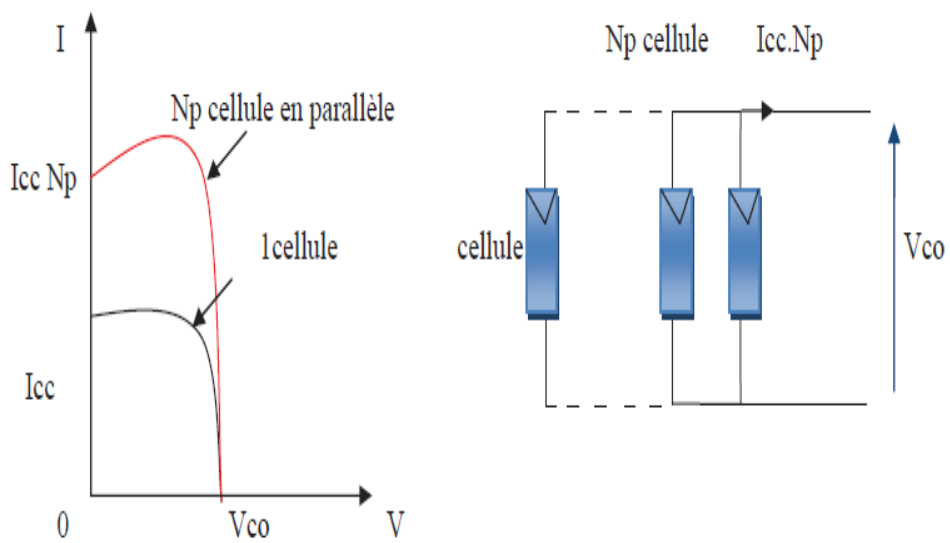


Figure I.8 : Associations en parallèle des cellules PV

c- Association en série/parallèle :

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension.

$$\begin{aligned} I_{SPCC} &= N_P * I_{CC} \\ V_{SPCO} &= N_S * V_{CO} \end{aligned} \quad (I-3)$$

I.9 Configuration des systèmes PV:

Les configurations des systèmes solaires PV sont prédéfinies pour que chaque système soit rentable et utile répondant aux besoins d'utilisations.

Il existe quatre configurations, chacune d'elles dépend du besoin exprimé :

- Système d'alimentation directe.
- Système autonome avec stockage.
- Système autonome hybride.
- Système connecté au réseau

Remarque :

Un système autonome est un système isolé du réseau électrique public.

a- Systèmes d'alimentation directe :

Dans un système solaire photovoltaïque, un ou plusieurs panneaux sont connectés en série et/ou en parallèle pour générer un champ photovoltaïque ou générateur solaire. Ce champ photovoltaïque génère du courant continu et de la tension (DC) à partir des rayons du soleil. Cette tension continue est ensuite utilisée directement ou modifiée par un convertisseur de puissance pour alimenter des charges électriques en présence du soleil (Figure I.9). Cette configuration est couramment utilisée dans les systèmes solaires d'irrigation des cultures ou d'alimentation en eau potable en milieu rural. [7]

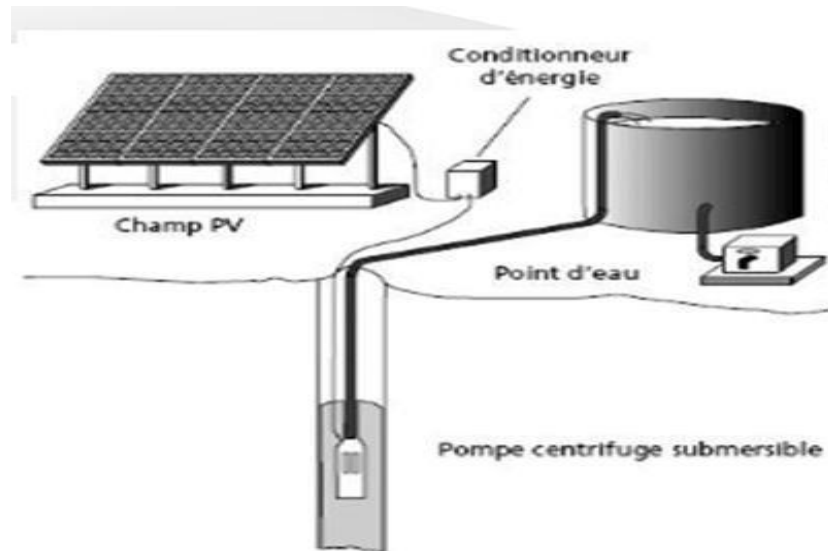


Figure I.9: Système de pompage solaire

b- Système autonome avec stockage :

Un système photovoltaïque isolé (Figure I.10) alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. C'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible, par exemple les maisons en site isolé, sur des îles en montagne, ou en désert.

Ce type de système nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries.

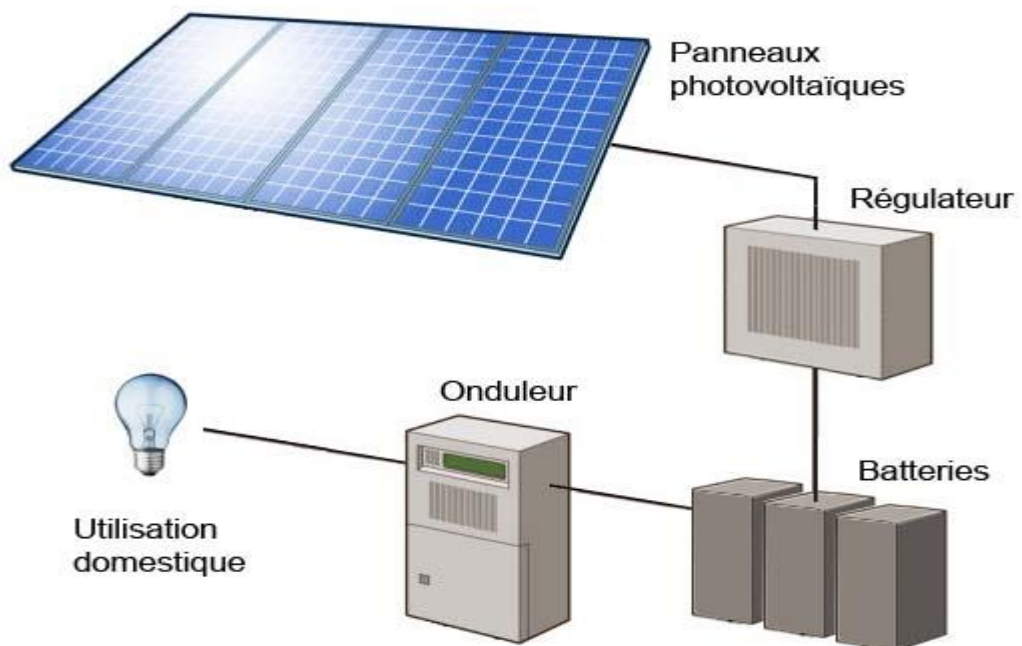


Figure I.10 : Système d'éclairage solaire

c- Système autonome hybride :

Les habitants de certaines régions reculées ont encore du mal à se déplacer en raison de la distance et du manque d'électricité pour la vie quotidienne. Dans ce cas, la solution la plus appropriée est une centrale photovoltaïque hybride, qui, en plus de la consommation d'urgence du groupe électrogène, combine également le domaine de l'énergie photovoltaïque ; ainsi, elle peut contenir une autre ressource renouvelable telle que des éoliennes et des composants hydrauliques.

Dans la (Figure I.11), deux sources d'énergies sont utilisées :

- Champs photovoltaïque.
- Groupe électrogène

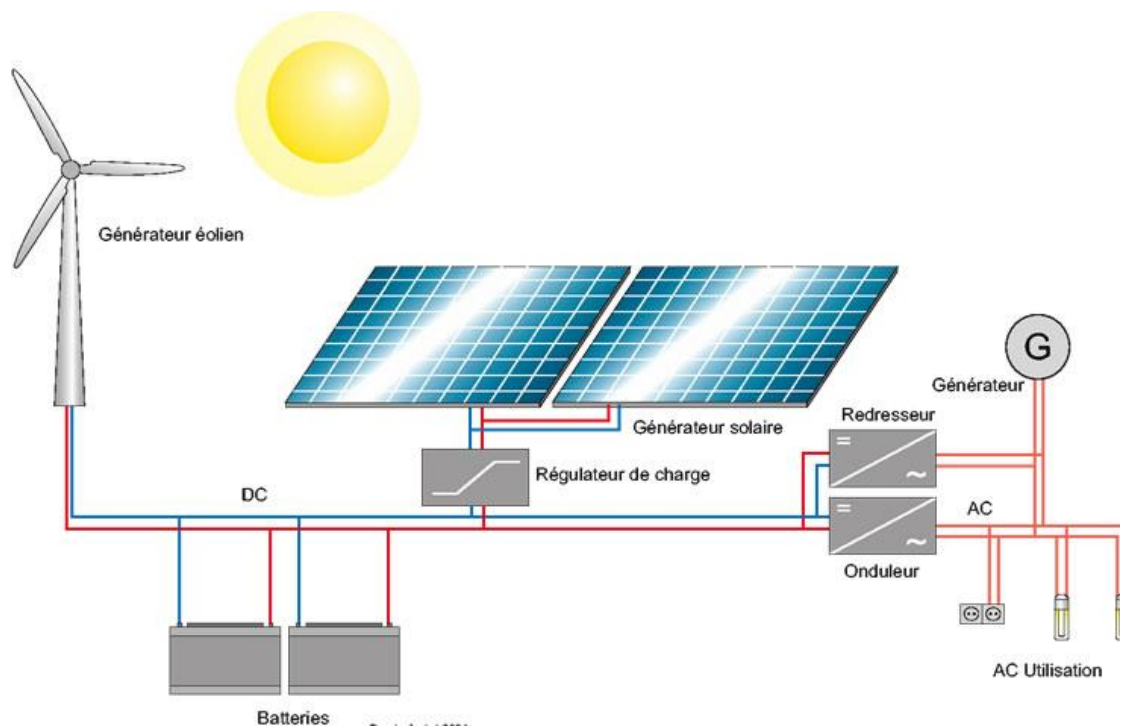


Figure I.11: système autonome hybride

d- Système raccordé au réseau :

Un système photovoltaïque connecté au réseau, on entend 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.

Dans le cas de systèmes connectés au réseau, il est impératif de convertir le courant continu produit par le système photovoltaïque en un courant alternatif synchronisé avec le réseau. Pour

effectuer cette conversion, on utilise un onduleur. Le rendement typique d'un onduleur est d'environ 95%. Il en existe de différentes puissances et les onduleurs sont conçus spécifiquement pour les applications photovoltaïques. L'onduleur possède également une fonction de découplage du réseau qui empêche d'injecter du courant sur le réseau lorsque celui-ci n'est pas en fonctionnement et une fonction de protection contre les surtensions.

I.10 Les avantages d'un système pv :

Le système photovoltaïque présente des avantages énormes tels que :

- Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre
- Propreté durant son utilisation,
- Grande fiabilité,
- Peu d'entretien,
- Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts),
- Utilisation autonome et décentralisée. [10]
- Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- L'énergie photovoltaïque est non polluant, il est écologique.

Chapitre II :
***Poursuite du point de puissance
maximale (MPPT)***

II.1 Introduction :

Les caractéristiques de sortie d'un générateur photovoltaïque sont non linéaires et directement dépendant des conditions de travail tels que : le niveau d'irradiation solaire et la température ambiante. Aussi, pour une condition de travail donnée, il existe un seul point de fonctionnement au niveau duquel la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est maximale appelé point de puissance maximale (MPP). Ce dernier se trouve à son tour fortement dépendant principalement du niveau d'irradiation solaire et de la température ambiante.

II.2 Modélisation d'un panneau photovoltaïques :

La figure II.1 établit par Shockley pour une seule cellule PV représente le modèle standard à une seule diode d'un générateur PV (le schéma équivalent) et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle. Ce schéma correspond à une source de courant I_{ph} placée en parallèle avec une diode. La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ou la résistance du semi-conducteur utilisé.

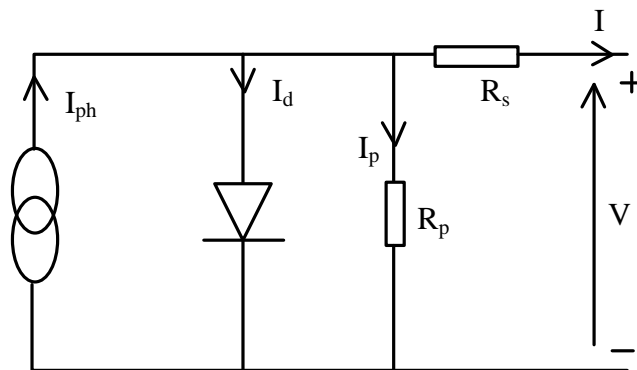


Figure II.1: Schémas équivalent de la cellule photovoltaïque

En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant en sortie de la cellule est donné par l'équation

II-1

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

La formule de Shockley donne le courant I_d de la diode équation II-2

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{q V_{oc}}{N_s K_a T_0}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-2})$$

Avec le courant de saturation de diode I_s est donné par l'équation II-3

$$I_s = I_{rs} [T_0/T_r]^3 \exp \left[\left(\frac{QEg}{AK} \right) \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (\text{II-3})$$

Le courant de saturation inverse I_{rs} est donné par l'équation II-4.

$$I_{rs} = I_{sc} / \left[\exp \left(\frac{Q V_{oc}}{N_s K_a T_0} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-4})$$

L'équation II-5 présente le courant de source I_{ph} .

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_0 - T_r)] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (\text{II-5})$$

Alors le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque est donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{Q(V + IR_s)}{N_s K_a T_0} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-6})$$

Le courant de sortie d'un panneau photovoltaïque avec N_p cellules en parallèles et N_s cellules en séries est donné par l'équation II-7

$$I = N_p * I_{ph} - N_p * I_s \left[\exp \left(\frac{Q(V + IR_s)}{N_s K_a T_0} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-7})$$

II.3 Simulation des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque :

Les paramètres du panneau photovoltaïque sont :

$N_s=72;$

$I_{sc}=9.06;$

$A=1.3;$

$K_i=0.058;$

$V_{oc}=46.22;$

$N_p=1;$

$R_s=0.5;$

$K=1.38e-23;$

$q=1.6e-19;$

$E_g=1.1;$

$R_p=100000;$

a- Caractéristiques I(V) :

La caractéristique I(V) représente les variations du courant généré par un panneau photovoltaïque en fonction de la tension à ses bornes pour une température $T=25^\circ$ et un éclairement G variable. Le courbe du courant commence par le courant de court-circuit (I_{SC}) qui correspond à une tension nulle ($V_{PV}=0$), jusqu'au circuit ouvert dont le courant est nul et la tension atteint sa valeur maximale (Figure II.2).

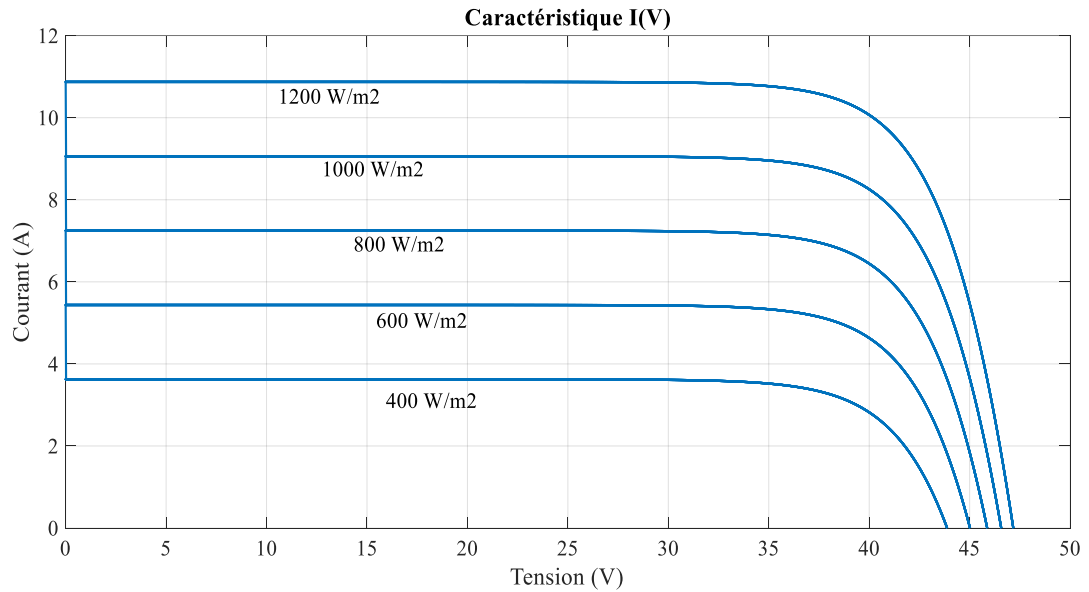


Figure II.2: Caractéristique I(V)

b- Caractéristiques P(V) :

On garde la même valeur de la température comme la caractéristique précédente, et de l'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$ et G variable). La figure qui suit montre les variations de la puissance du module photovoltaïque en fonction de la tension à ses bornes (figure II.3)

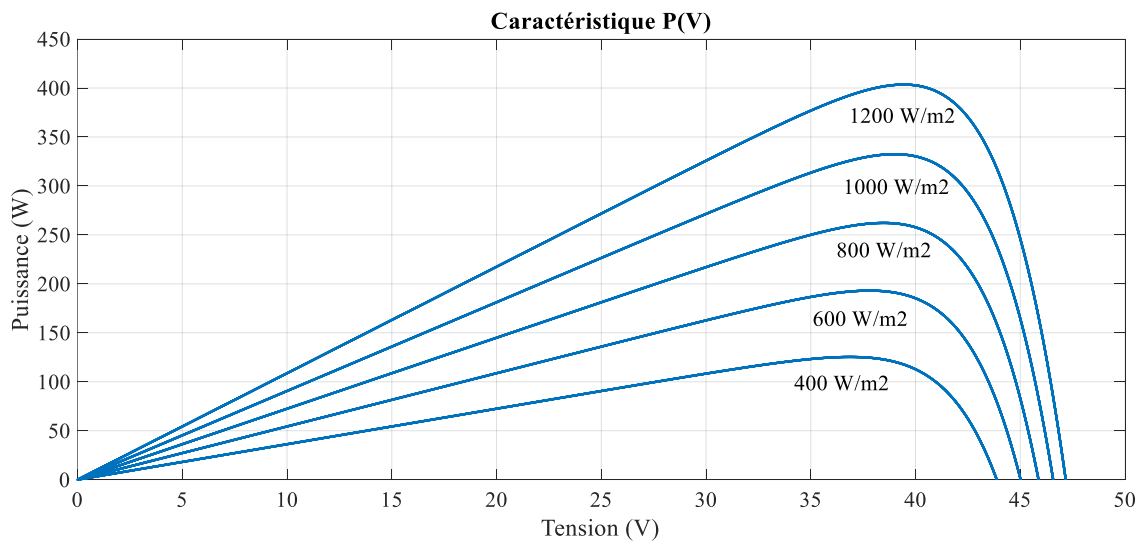


Figure II.3: Caractéristique P(V)

II.4 Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) :

Le générateur PV peut fonctionner sur une large gamme de tension et de courant de sortie, mais ne peut fournir une puissance maximale que pour certaines valeurs de courant et de tension. Alors que, la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température, ces changements climatiques entraînent des fluctuations du point de puissance maximale.

En raison de ces fluctuations, un convertisseur de puissance statique commandé est souvent utilisé entre le générateur PV et la charge électrique, ce qui permet de poursuivre le point de puissance maximale. Les techniques de commande de ce convertisseur de puissance sont appelées MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour fournir en permanence une puissance maximale par le panneau PV [11].

a- Principe de MPPT :

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

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV 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 de puissance 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. Plusieurs algorithmes sont utilisés. [13]

La Figure II.4 représente une chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT et une charge quelconque.

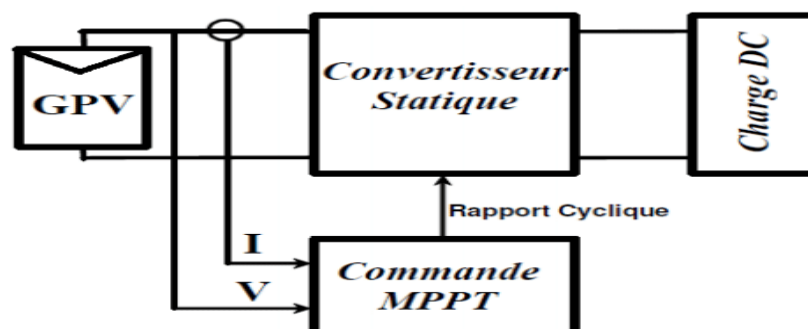


Figure II.4: Chaîne de conversion photovoltaïque avec une commande MPPT.

b- Type de MPPT :

Plusieurs publications sur les commandes de recherche du point de puissance maximale apparaissent dans la littérature, et ce depuis les années 1970. Ces commandes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur rapidité de recherche.

Dans ce qui suit, nous allons citer les principales commandes rencontrées dans la littérature.

c- Premières commandes MPPT :

La première commande MPPT est publiée par A.F. Boehring en 1968 et basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permet de maintenir le fonctionnement d'un système solaire photovoltaïque à son point de puissance maximale. A partir des mesures des I_{ph} et V_{ph} délivrés par le panneau photovoltaïque cette méthode consiste à calculer la puissance produite à l'instant T_i et la comparer à la valeur mémorisée à l'instant T_{i-1} . Par la suite, un nouveau rapport cyclique est calculé et est appliqué au convertisseur statique [14].

d- Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité :

Différents types des algorithmes MPPT ont été utilisés dans la littérature. Les trois méthodes les plus courantes sont

- Perturbation et observation (PO),
- Incrément des conductances.
- Hill Climbing.

Dans ce mémoire on utilise les deux premières

II.5 MPPT avec l'algorithme perturbe et observe (PO):

L'algorithme de commande MPPT par PO fonctionne en perturbant la tension du panneau V_{PV} avec une faible amplitude (pas de variation) autour de sa valeur initiale et en observant le comportement de la puissance produite P_{PV} comme le montre la figure II.5.

Si un changement positif (augmentation) de la tension V_{PV} entraîne une augmentation de la puissance produite P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement est à gauche du point maximum P_{PM} . A l'inverse, si la puissance produite est diminuée, cela signifie que le système étudié a dépassé le P_{PM} . Le même raisonnement peut être fait si la tension est diminuée et la puissance produite augmente cela signifie que le point de fonctionnement a approché du P_{PM} . Sur la base de diverses analyses de l'effet des changements de tension sur la caractéristique P_{PV} (V_{PV}), par rapport à P_{PM} , il est facile de localiser le point de fonctionnement et de passer les

commandes de contrôle appropriées. En conclusion, si suite à la perturbation de tension, la puissance augmente et le sens de la perturbation reste le même. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [15].

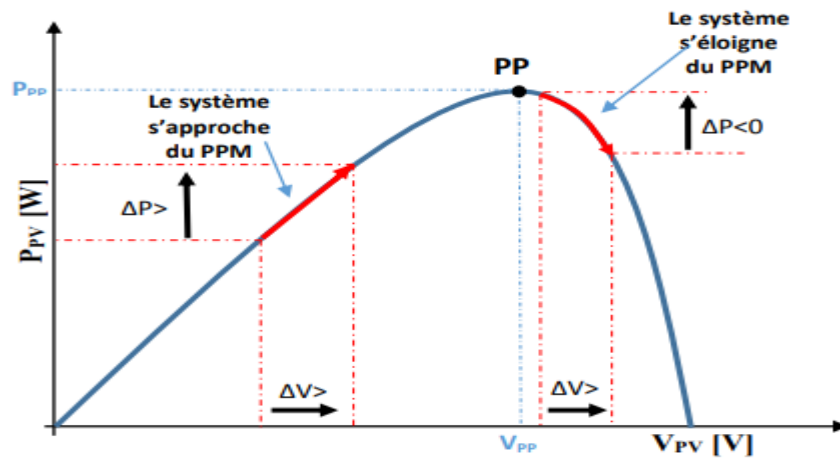


Figure II.5: Principe de l'algorithme PO.

Aujourd'hui, l'algorithme PO, est largement utilisé, à cause de sa simplicité. Cependant, Elle présente quelques problèmes liés aux fluctuations de la puissance autour du P_{PM} . Car la méthode de poursuivre le point P_{PM} doit être répétée périodiquement, cela oblige le système à osciller autour du P_{PM} en permanence lorsque ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en minimisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une valeur réduite d'incrément ralentit la recherche du PPM et augmente aussi le calcul du processeur, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. La figure II.6 représente l'organigramme de l'algorithme PO.

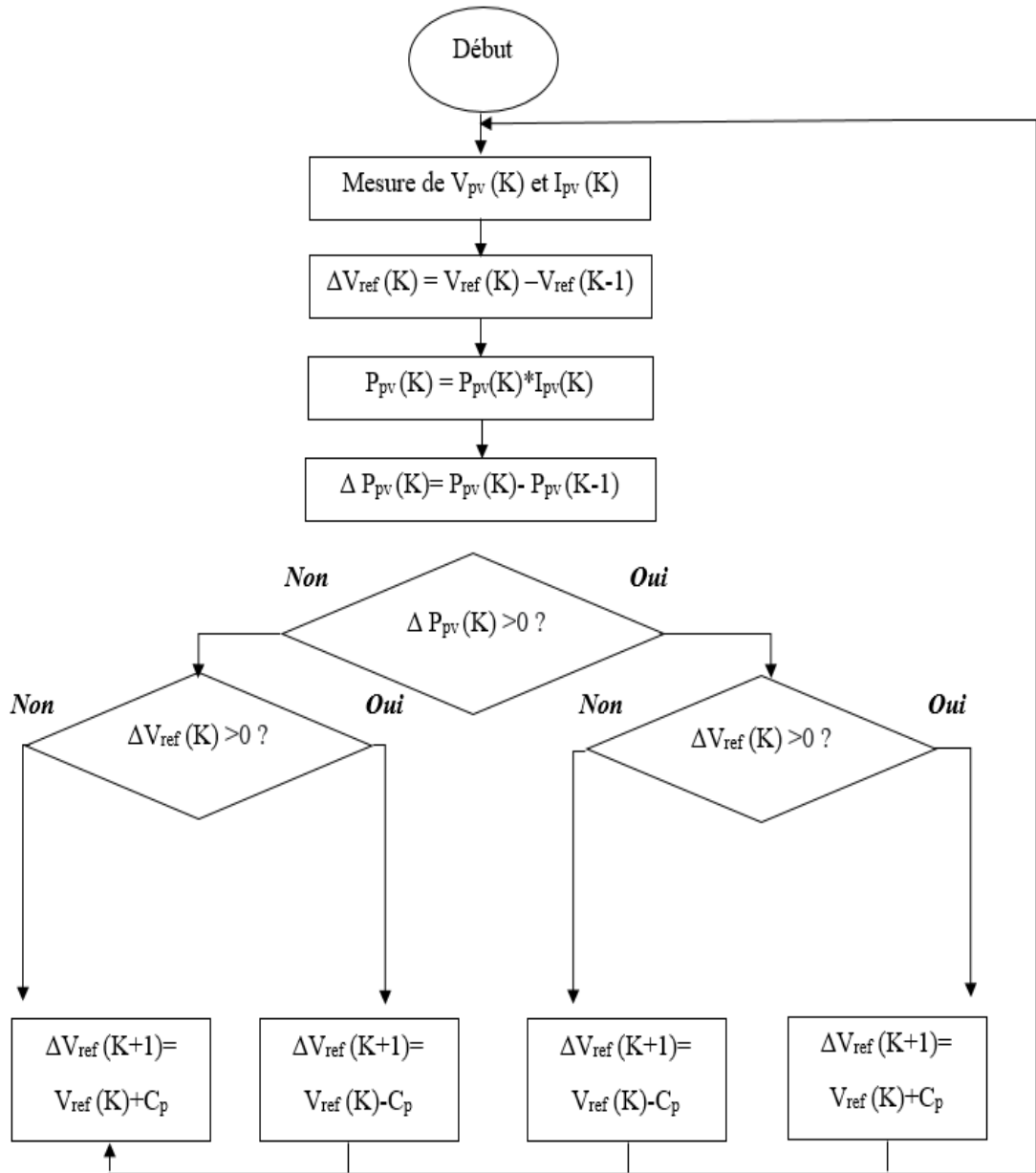


Figure II.6 : Algorithme de la méthode P&O

L'algorithme PO dans le logiciel MATLAB est représenté dans la figure II.7 avec un pas d'incrément du tension égale à 0.5V

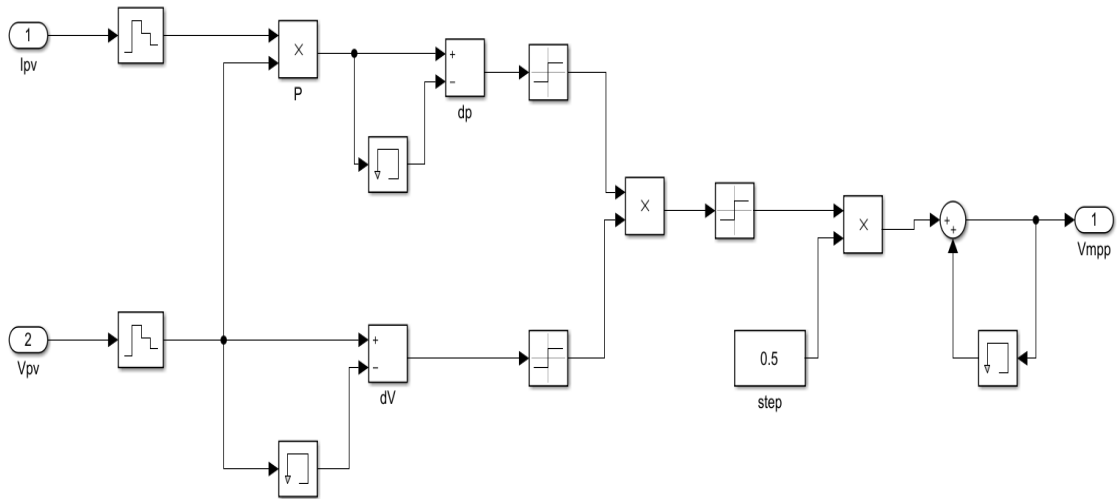


Figure II.7: Algorithme P&O dans Simulink

La simulation du système photovoltaïque (générateur photovoltaïque, hacheur booster, et la charge) avec MATLAB/Simulink est donnée par la figure II.7 avec une résistance $R_{ch}=10\text{ohm}$. On utilise 10 panneaux en série et 3 en parallèles.

Les paramètres d'un panneau sont :

$$N_s=36;$$

$$I_{sc}=3.8;$$

$$V_o=21.1;$$

$$N_p=1;$$

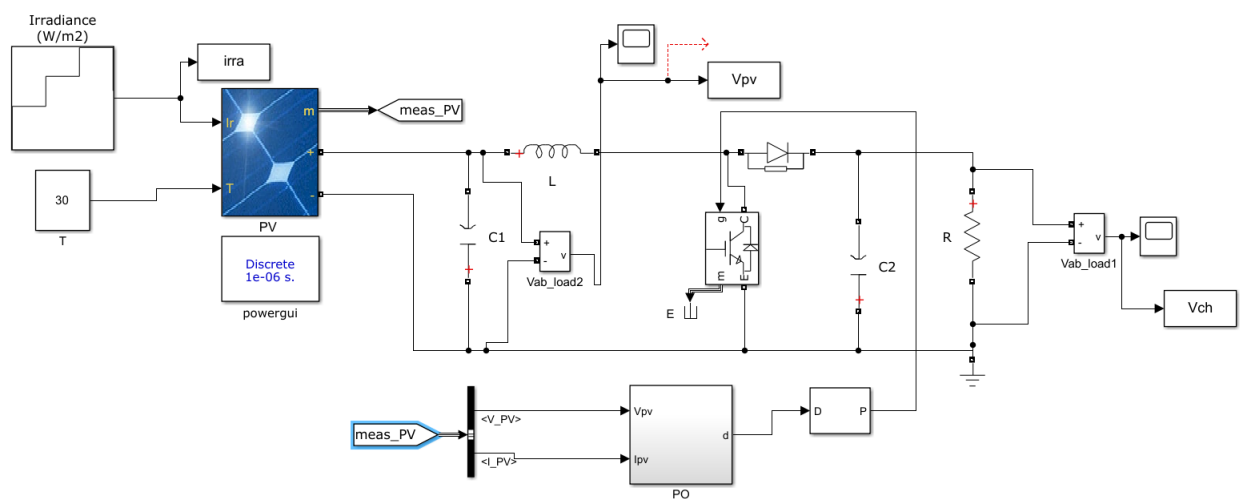


Figure II.8 : Système photovoltaïque dans Simulink

L'irradiation est variable entre 500 et 1200W/m² (Figure II.8)

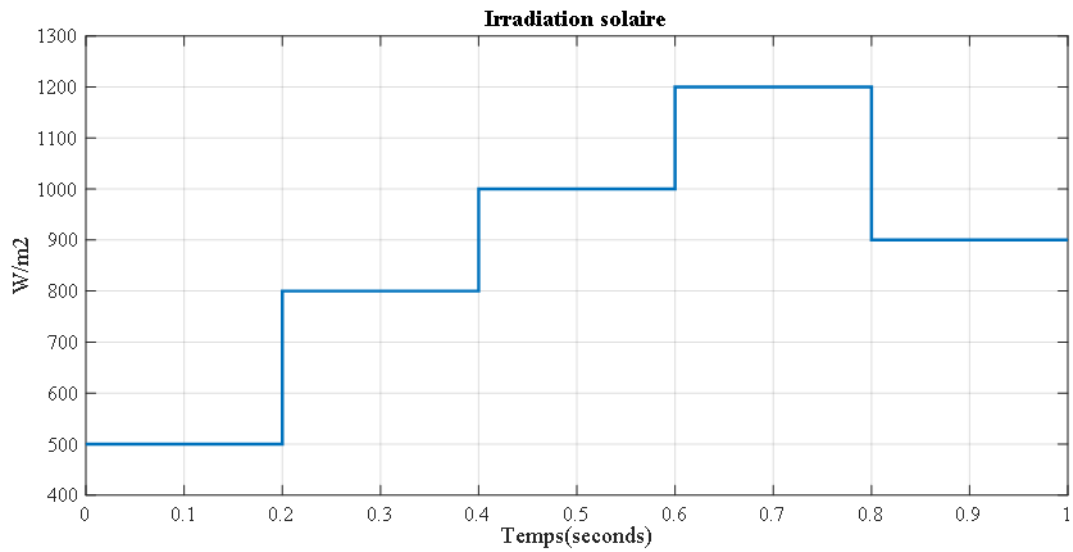


Figure II.9 : Irradiation solaire

Les figures II.10-II.11 présente la tension délivrée par le panneau solaire et la tension aux bornes de la charge.

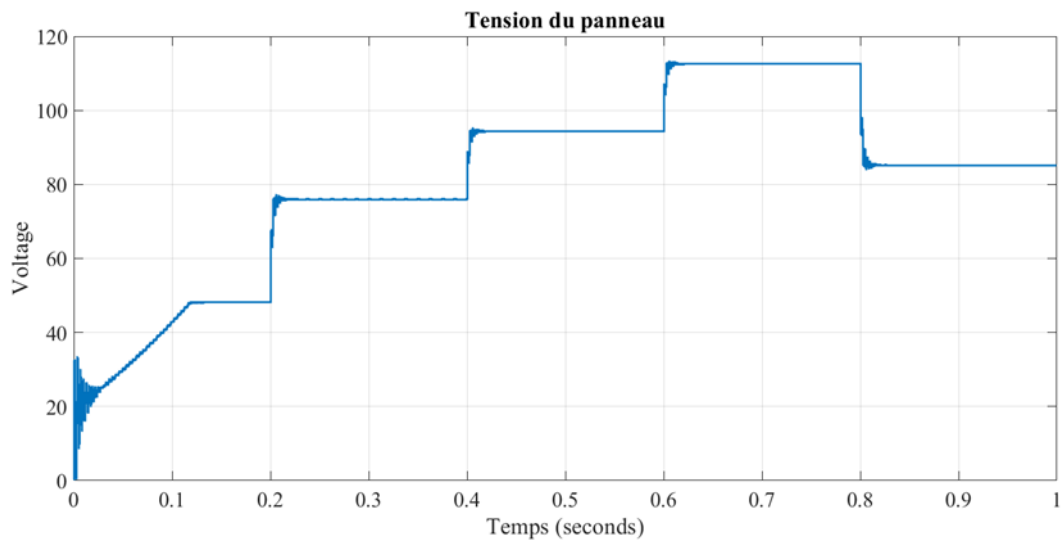


Figure II.10 : Tension du panneau

Figure II.11 : Tension du panneau, algorithme Inc-Con

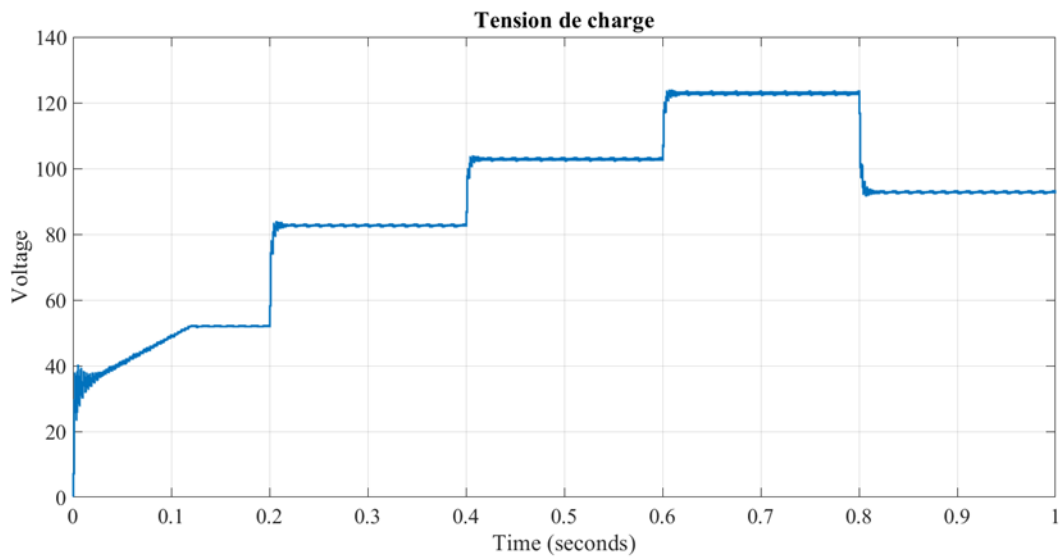


Figure II.12 : Tension de charge

La figures II.13 donne la puissance produite en utilisant l'algorithme PO, la figure II.14 donne le caractéristique P(V) du panneau solaire.

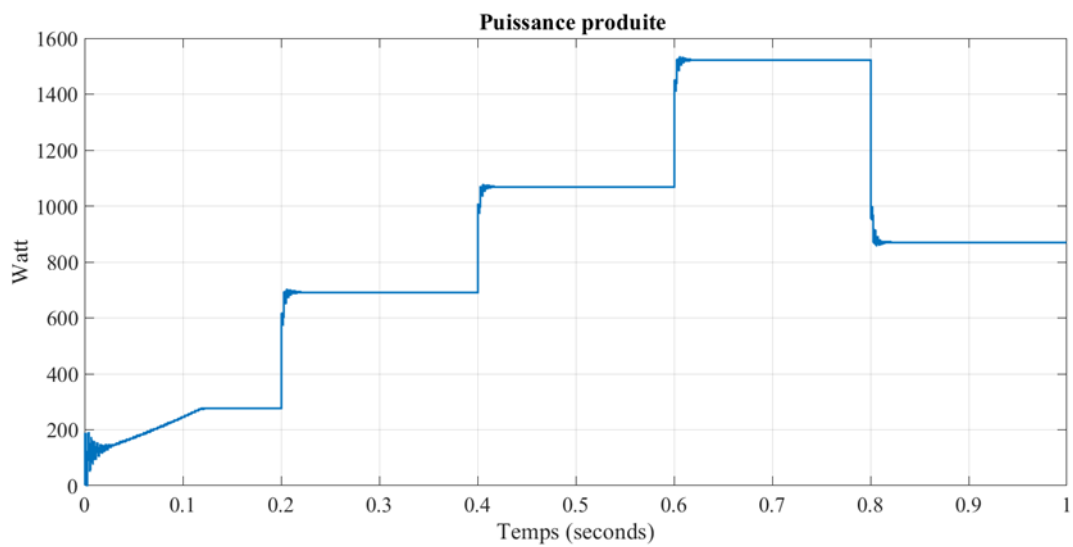


Figure II.13 : Puissance produite

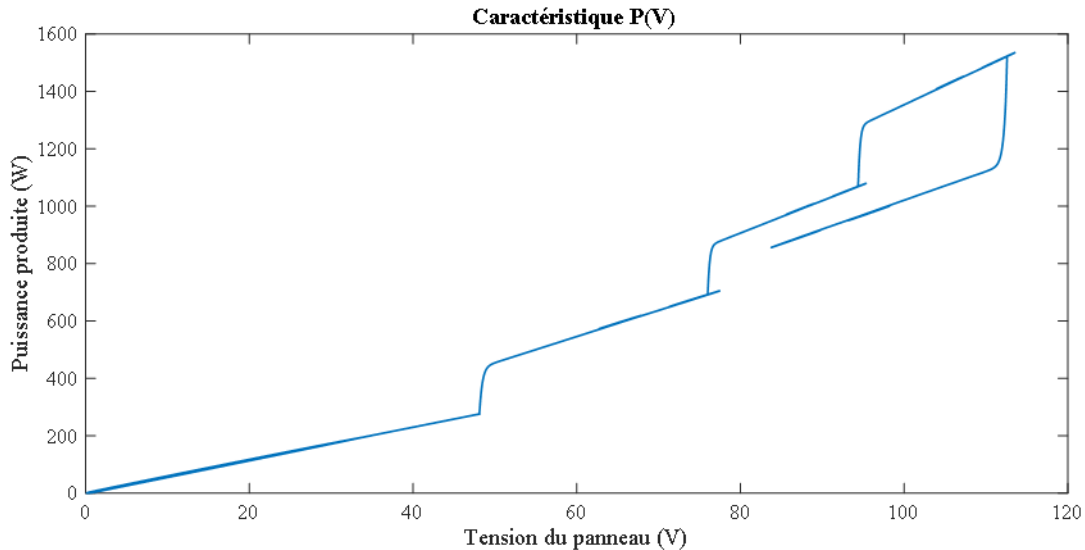


Figure II.14 : Caractéristique P(V)

Dans les figures précédentes on constate que les tensions V_{ch} et V_{pv} présentent des fluctuations autour du point de fonctionnement maximal, pour faire face à ce problème, la commande incrément des conductances est utilisée dans la section suivante.

II.6 MPPT avec l'algorithme Incrémental Conductance :

Cette technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des connaissances sur la position du point de fonctionnement par rapport à un P_{PM} [16], ainsi la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = I_{pv} / V_p \quad (II-10)$$

L'évolution de la puissance du module (P_{pv}) par rapport à la tension (V_{pv}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au ppm. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le ppm, si elle est positive le point se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite.

- Si $dP_{pv} / dV_{pv} > 0$, *pf est à gauche du PPM*
- Si $dP_{pv} / dV_{pv} = 0$, *le pf est sur le PPM*
- Si $dP_{pv} / dV_{pv} < 0$, *le pf est sur la droite du PPM*

Le lien entre la conductance et la dérivée de la puissance dP_{pv}/dV_{pv} peut-être décrit par l'équation suivante :

$$dP_{pv}/dV_{pv} = d(I_{pv} \cdot V_{pv}) / dV_{pv} = I_{pv} + V_{pv} dI_{pv}/dV_{pv} \cong I_{pv} + V_{pv} dI_{pv}/dV_{pv}$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance :

- Si $dI_{pv} / dV_{pv} > - I_{pv} / V_{pv}$ le *pf* est à gauche du PPM
- Si $dI_{pv} / dV_{pv} = - I_{pv} / V_{pv}$ le *pf* est sur le PPM
- Si $dI_{pv} / dV_{pv} < - I_{pv} / V_{pv}$ le *pf* est à droite du PPM

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance (dI_{pv} / dV_{pv}) comme illustre l'algorithme de la figure II.15, V_r Correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond à la tension optimale V_{opt} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de Δ . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM [17]

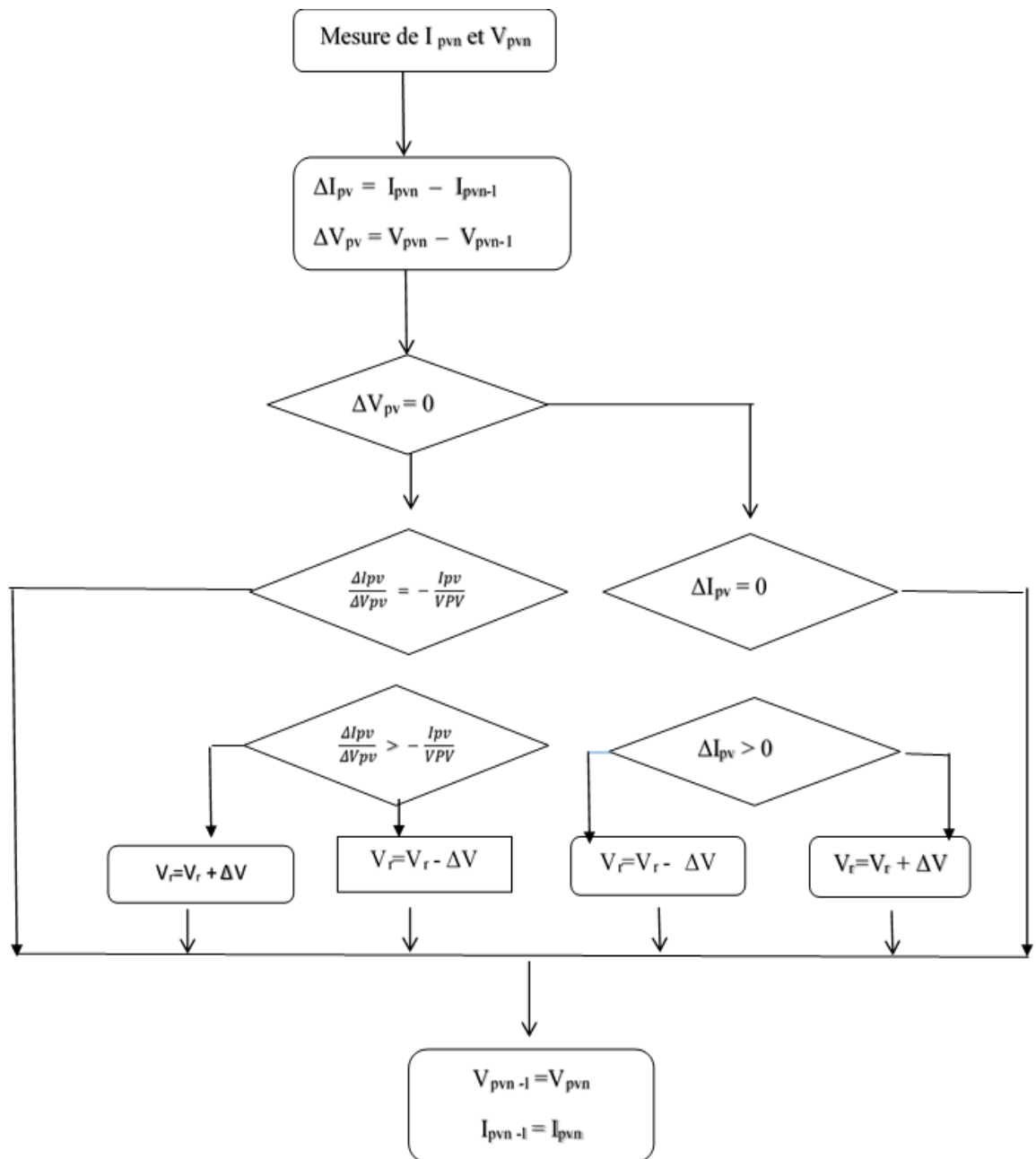


Figure II.15 : organigramme Simulink de la commande Incrément de conductance

L'algorithme incrément des conductances est utilisée dans le même schéma et les mêmes paramètres utilisées dans l'algorithme PO à l'aide du programmation MATLAB comme suit :

```
function y = MYMPP(u,i,uo,io,D)
```

```
m=0.4;
```

```
du=u-uo;
```

```
di=i-io;
```

```
d=0.5;
```

```
if du==0
```

```
    if di==0
```

```
        m=D;
```

```
    else
```

```
        if di>0
```

```
            m=D-d;
```

```
        else
```

```
            m=D+d;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
else
```

```
    if di/du== -(i/u)
```

```
        m=D;
```

```
    else
```

```
        if di/du> -(i/u)
```

```
            m=D-d;
```

```
        else
```

```
            m=D+d;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
y = m;
```

```
end
```


Les figures II.15-II.16 présente la tension délivrée par le panneau solaire et la tension aux bornes de la charge par l’algorithme incrément des conductances.

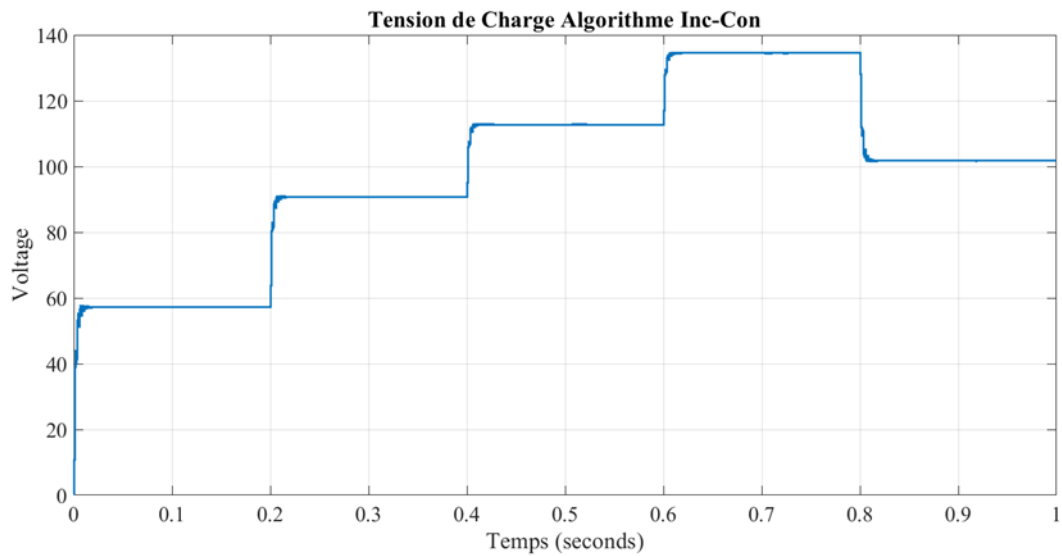


Figure II.16 :Tension de charge algorithme Inc-Con

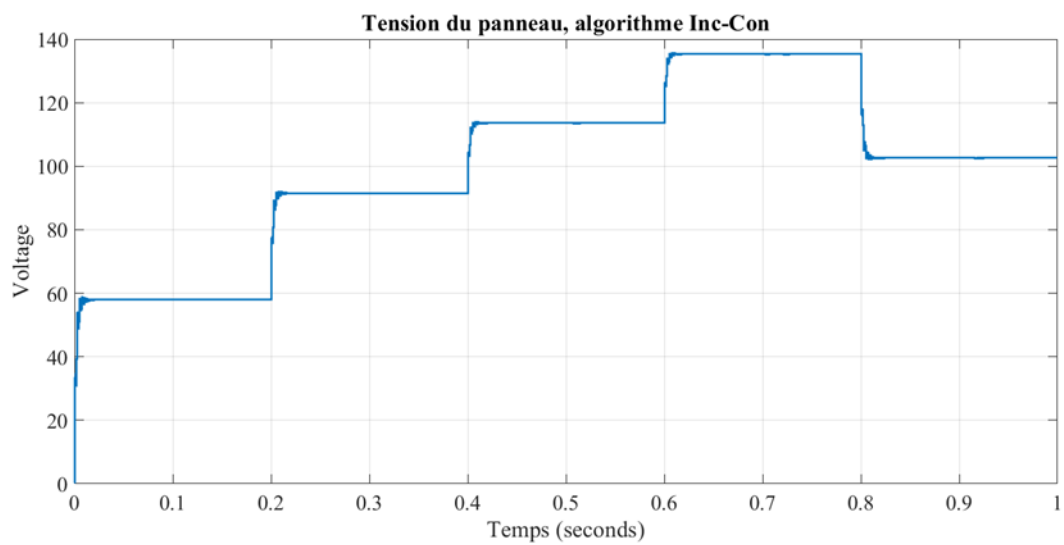


Figure II.17 :Tension du panneau, algorithme Inc-Con

La figures II.18 donne la puissance produite en utilisant l'algorithme incrément des conductances,

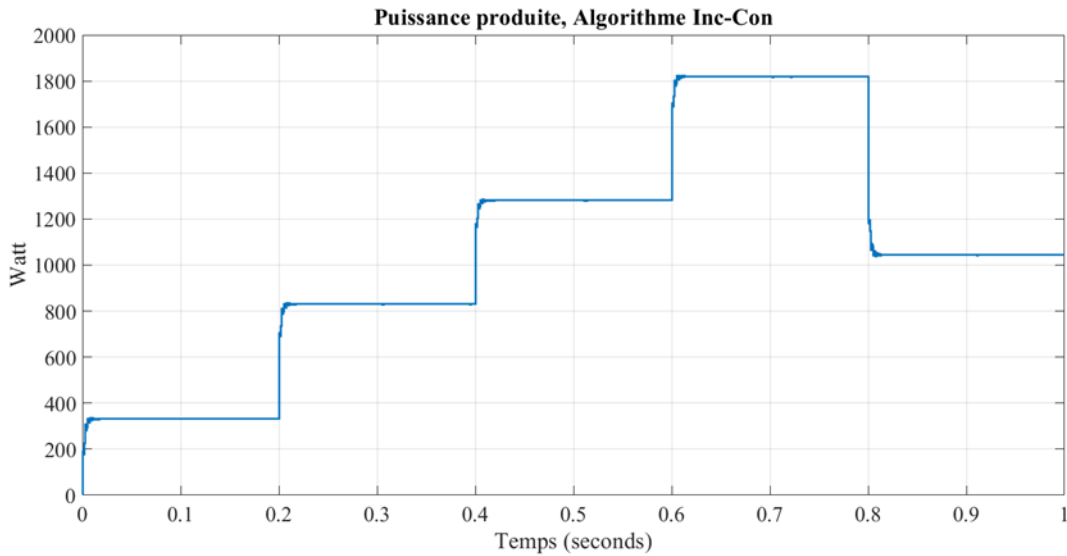


Figure II.18 : Puissance produit, algorithme Inc-Con

II.7 conclusion :

Dans ce chapitre, nous introduisons plusieurs méthodes de contrôle MPPT basées sur la rétroaction de puissance, telles que la méthode de perturbation et d'observation ((P&O)). Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour trouver la puissance maximale correspondante au point de fonctionnement.

Nous avons constaté que l'algorithme P&O est le meilleur car il permet au point de fonctionnement du générateur PV d'être aussi proche que possible du PPM et est simple à mettre en œuvre.

Nous basons notre travail sur la perturbation et l'observation (P&O) basée sur le type de commande MPPT qui sera utilisé dans notre travail.

Chapitre III :

Système photovoltaïque pour le pompage de l'eau

III.1 Introduction :

Les systèmes photovoltaïques de pompage solaires permettent de collecter de l'eau à partir d'une source (rivière, bassin, puit...) même si aucune source d'énergie n'est présente sur le site. Souvent utilisés pour se fournir en eau potable, l'irrigation ou encore remplir des réservoirs, ces systèmes permettent l'accès à l'eau dans les secteurs les plus reculés.

III.2 Principe de fonctionnement du système de pompage :

Les systèmes de pompage d'eau photovoltaïques consistent à générer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques pour alimenter une pompe électrique. L'énergie électrique produite par les modules photovoltaïques est récupérée pour alimenter un moteur à courant continu ou convertie en courant alternatif grâce à un onduleur. Selon l'installation, l'énergie peut être stockée dans des batteries. Cependant, il n'est pas toujours nécessaire de stocker l'énergie produite, car l'installation d'un réservoir à la sortie de la pompe permet de stocker l'eau, obtenant ainsi une réserve utilisable même sans soleil. Cette technologie peut être considérée comme une alternative prometteuse aux systèmes de pompage habituels au moyen de groupes électrogènes, car elle s'inscrit dans une démarche économique et environnementale. [18]

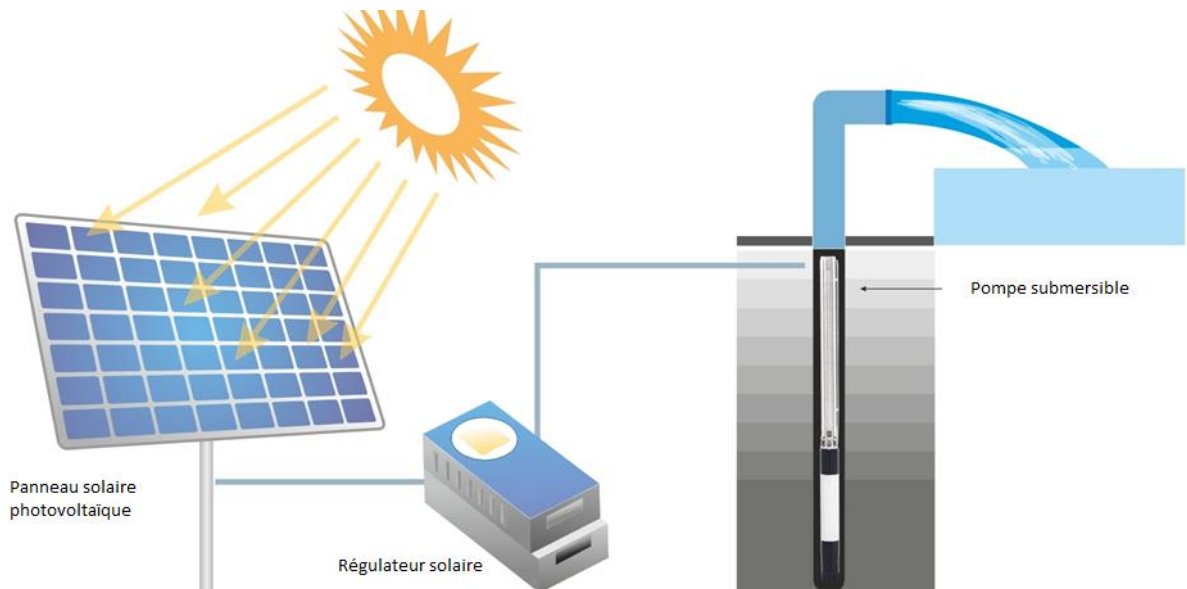


Figure III.1 : *système de pompage solaire.*

II.2.1 Les avantages du pompage solaire PV :

- Autonomie en énergie dans les zones non desservies par le réseau électrique.
- Peu de maintenance hormis un nettoyage régulier des panneaux.
- Économies par rapport à l'utilisation de carburants et à leurs acheminement jusqu'au site isolé.
- Concordance entre production et besoin en eau. Le système produit plus d'eau durant les périodes les plus ensoleillées, lorsque les besoins en eau pour l'agriculture ou pour l'élevage sont plus importants.
- Respect environnemental : pas de pollution de l'air (émission CO₂), de l'eau ou de nuisances sonores.

II.2.2 Types de systèmes de pompage :**a- Le système solaire de pompage fonctionnant au fil du soleil :**

Le système de pompage au fil du soleil ne nécessite pas de batteries; au lieu de stocker l'électricité dans un parc à batterie comme on le fait dans un système solaire autonome classique, on va préférer stocker l'eau dans un réservoir. Cela permet :

- un gain de coût au moment de l'investissement initial : il est moins coûteux d'investir dans un réservoir que dans un parc à batterie.
- un gain de coût dans l'exploitation du système : les batteries ont une durée de vie limitée et doivent régulièrement être changés; ce qui n'est pas le cas d'un réservoir. On va donc prévoir un réservoir d'un volume suffisant pour assurer quelques jours d'approvisionnement en eau.
- Les pompes solaires immergées peuvent toutes fonctionner avec un système solaire au fil du soleil.[19]

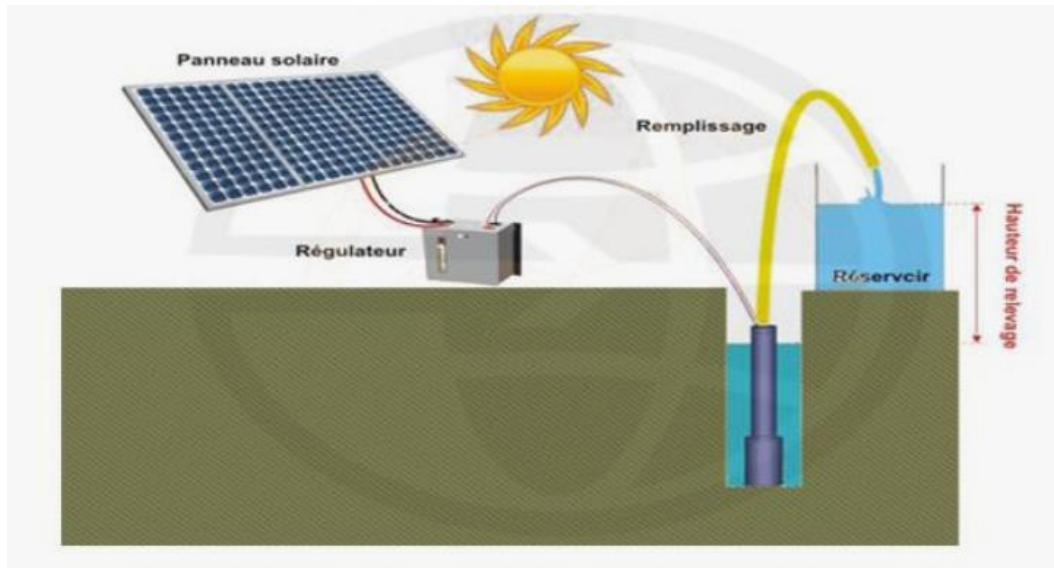


Figure III.2: Le système solaire de pompage fonctionnant au fil du soleil

b- Le système solaire de pompage avec stockage batterie :

Le système de pompage avec stockage batterie est construit comme un système solaire classique; certaines pompes, notamment les pompes de surface de mise sous pression de l'eau sanitaire doivent obligatoirement fonctionner sur batterie. Il existe plusieurs types de pompe:

- Les pompes solaires immergées.
- Les pompes de surface solaire.

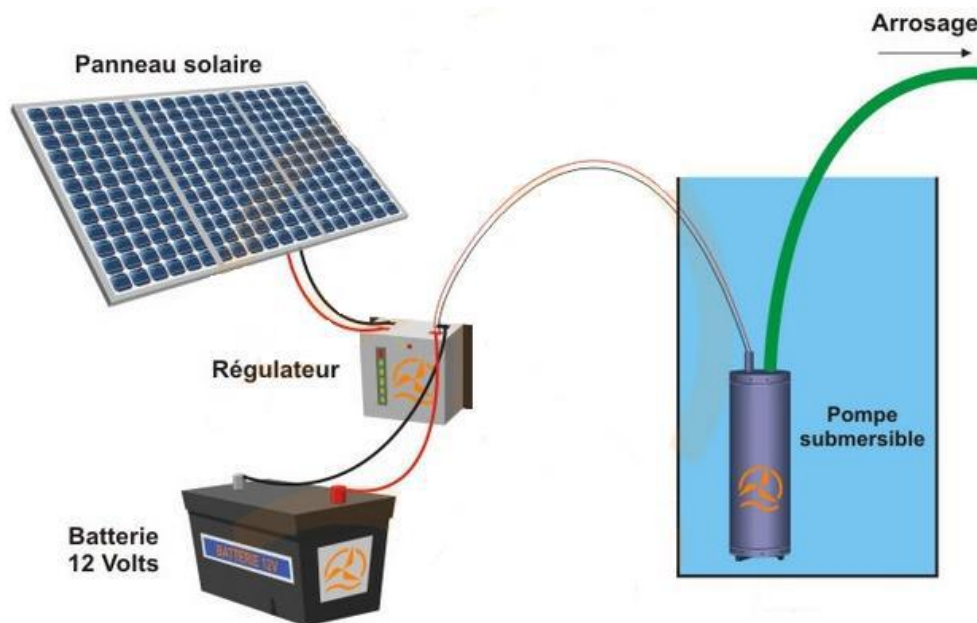


Figure III.3: Le système solaire de pompage avec stockage batterie

II.2.3 Configurations du système de pompage photovoltaïque :

Un système de pompage solaire est généralement constitué de:

- -installation photovoltaïque
- le groupe électropompe

III.3 Le groupe électropompe :

1-Moteurs :

Un moteur est une machine qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Deux types de moteurs peuvent être distingués selon leurs emplacements physiques par rapport à l'eau pompée:

- Moteur de surface qui sera associé à une pompe de surface ou à une pompe flottante.
- Moteur immergé qui sera associé uniquement à une pompe immergée.

Mais selon le principe du fonctionnement, les moteurs peuvent être à courant alternatif ou à courant continu.

1-a- Moteurs à courant continu :

Un moteur à courant continu, est une machine électrique tournante qui transforme l'énergie électrique sous forme de courant continu en énergie mécanique par le biais d'interactions électromagnétiques.

Pratiquement tous les moteurs électriques sont réversibles, c'est-à-dire qu'ils peuvent transformer l'énergie mécanique en énergie électrique en fonctionnant comme des dynamos. Les moteurs à courant continu fondent leur fonctionnement sur la loi de Lorentz, également appelée loi de Laplace lorsqu'elle est appliquée à un conducteur, comme c'est le cas pour les moteurs.[20]

1-b- Moteurs à courant alternatif :

Le moteur à courant alternatif est largement utilisé dans l'industrie, sa simplicité de construction en fait un matériel très fiable qui demande peu d'entretien. Les moteurs à courant alternatif sont classés en deux types: [20]

- Asynchrone

- Synchrones

2-Les Pompes :

Les pompes sont responsables de la transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique. Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur Principe de fonctionnement, soit de type :

2-a- La pompe centrifuge :

Les pompes centrifuges sont des appareils qui sont utilisés pour transporter des fluides par la conversion de l'énergie cinétique de rotation à l'énergie hydrodynamique de l'écoulement de fluide. L'énergie de rotation provient généralement d'un moteur électrique ou d'une turbine à vapeur (dans le cas de pompes d'alimentation en eau actionnées par une turbine). Les pompes centrifuges sont utilisées dans plus d'applications industrielles que tout autre type de pompe.[21]

2-b- La pompe volumétrique :

Les pompes volumétriques ou pompes à déplacement positif sont des pompes dans lesquelles l'écoulement du fluide résulte de la variation d'une capacité occupée par le fluide (capacité ou cylindrée variable).

Le transfert du fluide dans une pompe volumétrique se fait au moyen d'un déplacement de volume à chaque rotation.[22]

Outre ces deux classifications, nous distinguons également autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée (pompe de surface et pompe immergée)

III.4 Modélisation et dimensionnement des panneaux photovoltaïques :

Le panneau photovoltaïque est la source d'énergie électrique qui alimente un système de pompage photovoltaïque, Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Dans certaines applications, il est possible d'utiliser un ou plusieurs modules de quelques dizaines de cellules. Pour des utilisations plus importantes, les panneaux PV sont groupés dans un champ de plusieurs modules (quelques centaines).



Figure III.4: Groupement de module en série et en parallèle

a-Association des modules en série :

Les équations pour un groupement en série a donné par :

$$V_{ms} = \sum_n^1 V_n = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (\text{III-1})$$

$$I_{ms} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (\text{III-2})$$

b-Association des modules en parallèle :

Les équations pour un groupement en parallèle a donné par :

$$I_{mp} = \sum_n^1 I_n = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (\text{III-3})$$

$$V_{ms} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (\text{III-4})$$

c-Association des modules mixte :

En utilisant les équations suivent :

$N_s \longrightarrow n$ module en série

$N_p \longrightarrow m$ module en parallèle

$$V_{out} = \sum_n^1 V_n = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (\text{III-5})$$

$$I_{out} = \sum_n^1 I_m = I_1 + I_2 + \dots + I_m \quad (\text{III-6})$$

La puissance maximal des panneaux photovoltaïques a donné par :

$$P_{max} = \sum_n^1 V_n + \sum_n^1 I_m = (V_1 + V_2 + \dots + V_n)(I_1 + I_2 + \dots + I_m) \quad (\text{III-7})$$

III.5 Modélisation et dimensionnement du convertisseur DC/DC :

Pour la conversion de puissance, un rendement élevé doit être maintenu pour éviter la dissipation de puissance et éviter la surchauffe des composants électroniques. Pour cette raison, toutes les conversions de puissance à découpage doivent tourner autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et des commutateurs.

Les paragraphes suivants décriront trois topologies de circuit convertisseur de base (DC-DC) : Dans cette section, nous présenterons les principes des trois types de convertisseurs DC/DC (buck, boost et buck-boost), Ces convertisseurs sont souvent utilisés dans systèmes photovoltaïques pour générer la tension et le courant requis. Ce type de convertisseur est constitué uniquement d'éléments réactifs (self, condensateurs) qui, idéalement, ne dissipent aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils se caractérisent par des rendements élevés [23].

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (K fermé, et K ouvert), ensuite donner son modèle approximé [23].

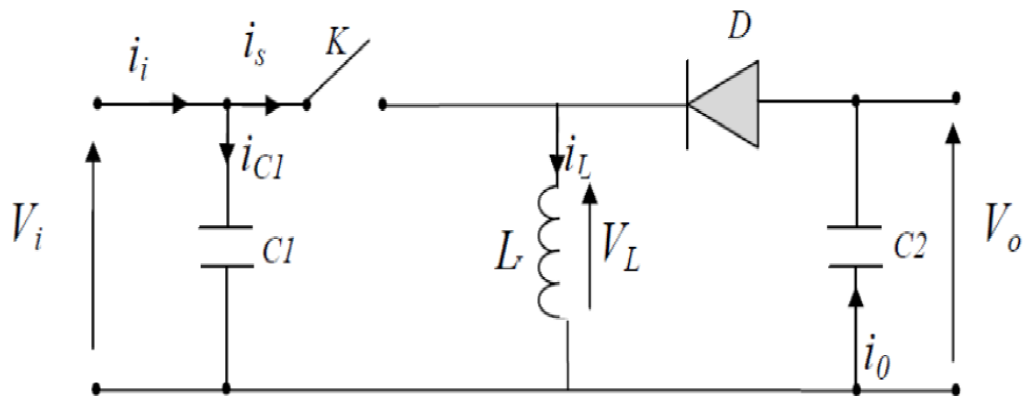


Figure. III.5 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

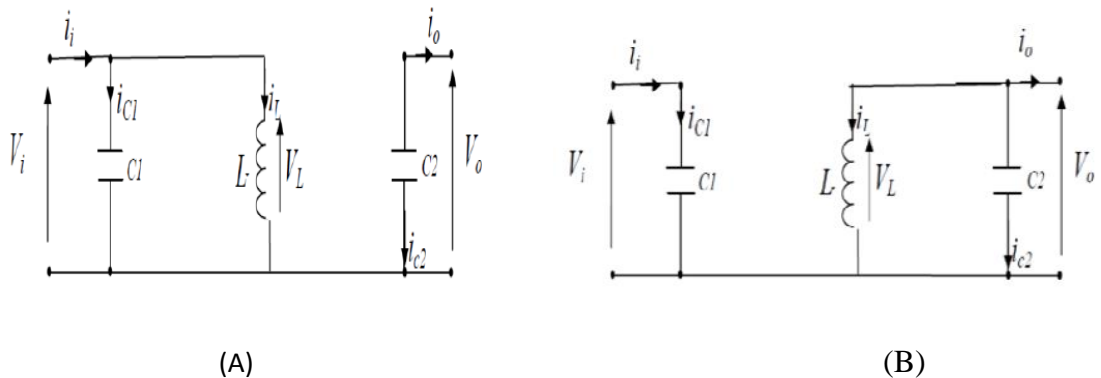


Figure. III.6 : Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : S fermé, (B) : S ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits précédents, on obtient les systèmes d'équations suivantes :

***Pour la première période dTs :**

$$ic1(t) = c1 \frac{dvi(t)}{dt} = ii(t) - il(t)$$

$$ic2(t) = c2 \frac{dv0(t)}{dt} = -i0(t)$$

$$Vl(t) = l \frac{dil}{dt} = -vi(t)$$

***Pour la deuxième période (1-d)Ts :**

$$ic1(t) = c1 \frac{dvi(t)}{dt} = ii(t) - il(t)$$

$$ic2(t) = c2 \frac{dv0(t)}{dt} = il(t) - i0(t)$$

$$Vl(t) = l \frac{dil}{dt} = vi(t) - v0(t)$$

III.6 Modélisation et dimensionnement du moteur DC :

Le modèle du moteur au quelle nous allons-nous intéresser et le moteur à excitation indépendante au quelle nous allons présenter ces expressions mathématiques, le schéma équivalent représenté dans la (figure III.7)

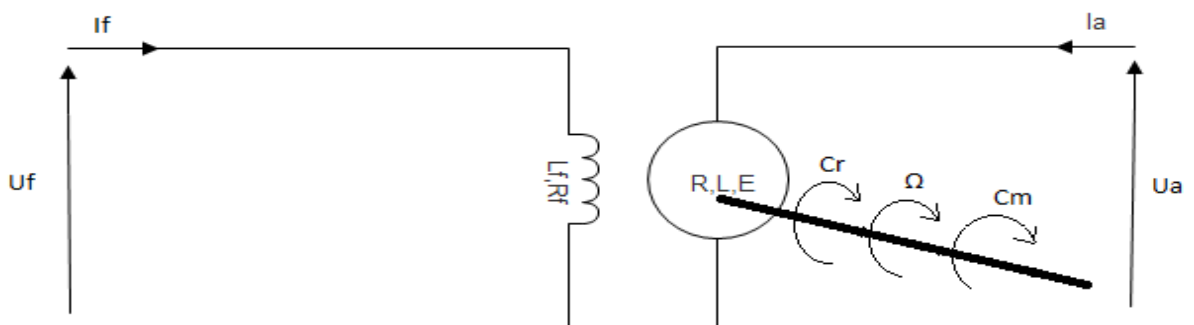


Figure. (III.7) : Schéma électrique du modèle de moteur DC

***Equations électrique de moteur DC :**

$$U_f = R_f \cdot I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \Rightarrow \frac{dI_f}{dt} = \frac{1}{L_f(U_f - R_f \cdot I_f)} \quad (\text{III-8})$$

$$U_a = R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \Rightarrow \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_a(U_a - E - R_a \cdot I_a)}$$

Remarque :

la force contre électromotrice E est :

$$E = P \cdot M \cdot f \cdot d \cdot \Omega_r \cdot I_f \quad (\text{III-9})$$

***Expression du couple électromagnétique :**

Application du théorème de Laplace, le rotor de la machine possède un couple qui en nomme couple électromagnétique.

L'expression est donnée par :

$$C_{em} = P \cdot M \cdot f \cdot d \cdot I_f I_a \quad (\text{III-10})$$

Equations mécanique :

D'après le principe fondamental de la dynamique, l'équation mécanique du moteur entraînant une charge de couple résistant est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + f\Omega_r \Rightarrow \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J(C_{em} - C_r - f\Omega_r)} \quad (\text{III-11})$$

III.7 Commande en vitesse de la machine :

I. Système de commande :

Le système de commande ou simplement la commande (contrôleur, régulateur) est un système permettant de générer l'action délibérée à appliquer à l'entrée de l'organe de commande afin de faire atteindre à la sortie du système à commander des objectifs définis en termes de durée et de la forme du régime transitoire ainsi que la valeur finale.

On peut commander le système de deux formes :

- Commande en boucle ouverte : le système ne dispose pas d'information sur la sortie du système.
- Commande en boucle fermée : lorsque le système reçoit une information sur la sortie à commander, dans ce cas il travaille en comparaison entre la sortie et la valeur de référence à lui faire attendre.

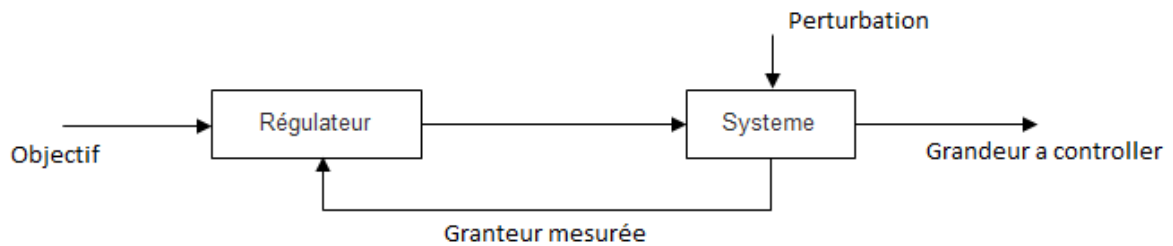


Figure III.8 : Structure générale de la commande en boucle fermée.

2. Comment choisir le régulateur :

Le régulateur représente l'élément intelligent d'un système, il est ajouté à l'extérieur du système à commander, il permet d'améliorer les performances du système qu'il commande quel que soit de régime transitoire ou permanent. Pour la régulation de notre vitesse en choisi le régulateur Pi (régulateur proportionnelle intégral) car il améliore la précision de la boucle (erreur statique nul). Modélisation et dimensionnement de la pompe centrifuge :

3. la régulateur PI :

Le régulateur PI est une combinaison de régulateur proportionnel et Intégral.

Le coté proportionnel produit une valeur de sortie qui est proportionnelle à la valeur d'erreur de courant. La contribution du coté intégral est proportionnel à la fois l'amplitude de l'erreur et la durée de l'erreur. [24]

Fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = Kp + \frac{Ki}{p} = \frac{KpP + Ki}{p} = K\left(1 + \frac{1}{\tau_i p}\right) \quad (\text{III-12})$$

Avec $\tau_i = \frac{Kp}{Ki}$

4. Fonction de transfert de la machine :

En écrivant les équations du moteur dans le domaine de fonctionnement, et en supposant La condition initiale est nulle.

$$U_a(p) = Ra \cdot I_a + p \cdot La(p) + E(p) \tag{III-13}$$

$$C_{em}(p) - Cr(p) = J \cdot p\Omega_r(p) + f\Omega_r(p) \tag{III-14}$$

$$E(p) = Km \cdot \Omega_r(p) \tag{III-15}$$

$$C_{em}(p) = Km \cdot I_a(p) \tag{III-16}$$

De l'équation (III.13) nous pouvons déduire la tension d'alimentation "Ua(p)" et

La force contre-électromotrice "E(p)" est donnée par :

$$U_a(p) - E(p) = (Ra + La \cdot Pa)I_a(p) \tag{III-17}$$

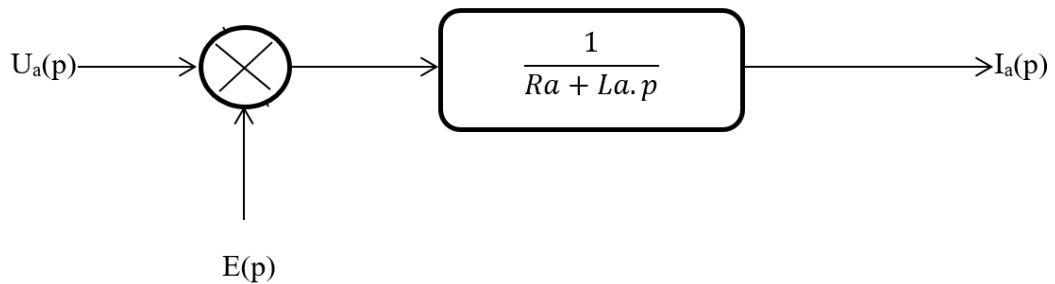


Figure III.9 : Schéma bloc de la boucle du courant.

À partir de l'équation (III.16), nous dérivons la relation entre le courant d'induit "Ia(p)" et le couple électromagnétique "Cem" (Figure III.16) :

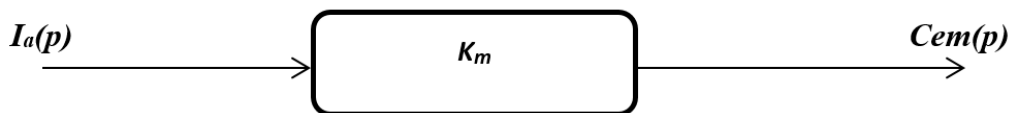


Figure III.10 : Schéma bloc de la boucle du couple.

A partir de l'équation (III.9), nous dérivons la relation entre la vitesse de rotation "Ω(p)" et le couple utile "Cem - Cr" comme suit :

$$C_{em}(P) - Cr(p) = (J \cdot P + f) \cdot \Omega_r(p) \tag{III-18}$$

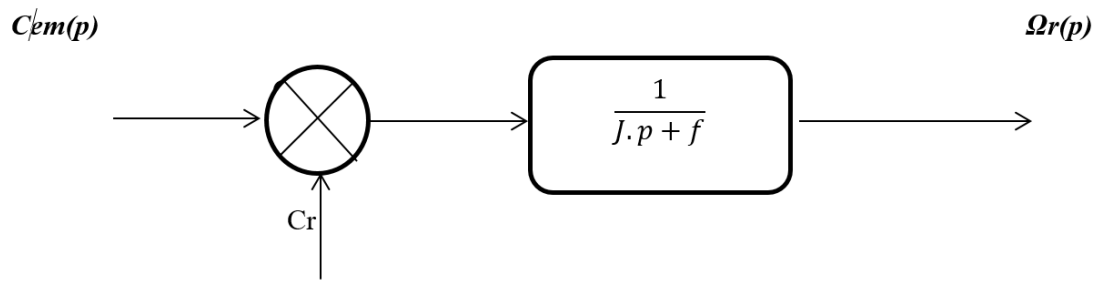


Figure III.11 : Schéma bloc de la boucle de vitesse.

De l'équation (III.15) nous dérivons la relation entre la vitesse de rotation et la force de réaction Électrique (Figure III.13)



Figure III.12 : Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice.

A partir des relations (III.13), (III.14), (III.15), (III.16) on obtient la fonction de transfert globale du moteur qui est comme suit :

$$T(p) = \frac{\Omega_r}{U_a} = \frac{K_m}{(L_a \cdot J)p^2 + \left(\frac{L_a \cdot f + R_a \cdot J}{R_a \cdot f + K_m^2}\right)p + 1} \tag{III-19}$$

,En reliant les différents blocs (Figure III.10), (Figure III.11), (Figure III.12)

(Figure III.13) on obtient le schéma bloc global du moteur (Figure III.14

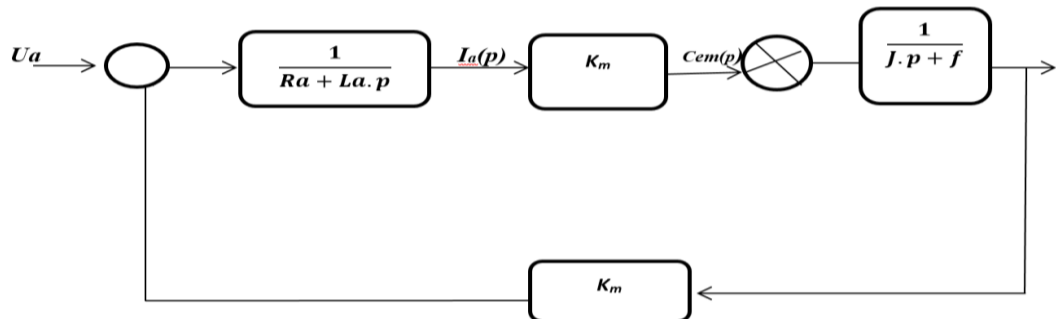


Figure III.13 : Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.

5. Structure de la commande PI :

Chaque boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique présenté sur la (figure III.15). Il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur réglée et sa propre consigne [25].

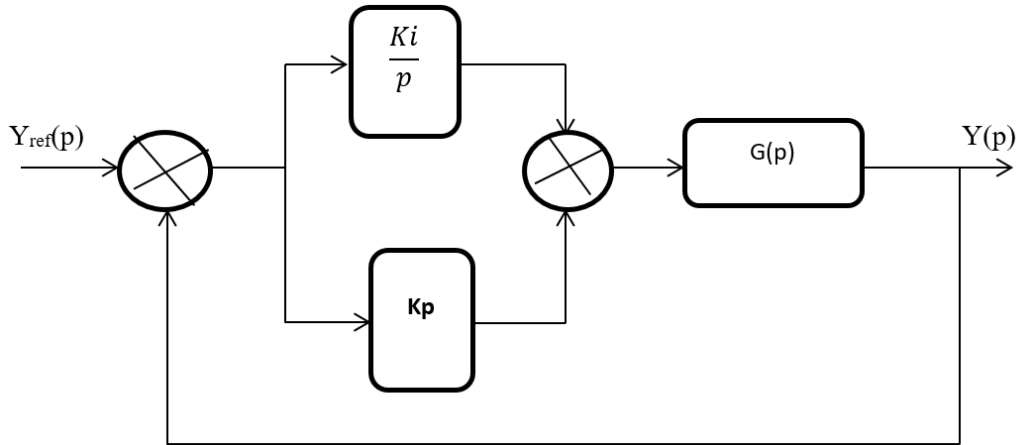


Figure III.14 : Schéma de commande utilisant la structure PI.

Soit $G(p)$ la fonction de transfert d'un système de premier ordre donnée par :

$$G(p) = \frac{G0}{(1 + \tau.p)} \quad (\text{III-20})$$

La fonction de transfert en BF est :

$$FTbf(p) = \frac{G0.Ki(\frac{Kp}{Ki}p + 1)}{(\tau p + 1)(p + (KpP + Ki)\frac{G0}{\tau P + 1})} \quad (\text{III-21})$$

L'apport d'un zéro par le régulateur PI dans la fonction de transfert en boucle fermée peut modifier le régime transitoire du système. Pour remédier à ce problème, la méthode de compensation des pôles est plus adaptée pour le calcul des paramètres Kp et Ki . Elle consiste à imposer le zéro du régulateur égal à un pôle de la fonction de transfert du système à commander et une constante du temps FT boucle fermée répondant aux objectifs fixés.

Le principe de cette méthode est illustré par les relations de l'équation suivante :

$$\frac{K_p}{K_i} p + 1 \quad (III-22)$$

$$= (\tau p + 1) \quad \gg \tau$$

$$= \frac{K_p}{K_i}$$

$$FT_{bf} = \frac{G_0 K_i}{p + G_0 K_i} \gg \tau_{bf} = \frac{1}{G_0 K_i} \quad (III-22)$$

Les paramètres du régulateur a donnés par :

$$K_i = \frac{1}{G_0 \tau_{bf}} \quad (III-23)$$

$$K_p = \frac{\tau}{G_0 \tau_{bf}} \quad (III-23)$$

III.8 Dimensionnement complet de l'installation :

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

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

III.9 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise :

Une fois que nous avons déterminé le volume d'eau nécessaire pour chaque mois de l'année et les caractéristiques des conduites, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique nécessaire sur une base quotidienne et mensuelle à l'aide de la relation :

$$E_h = C_h * Q * H_{MT} \quad (III-24)$$

Avec :

$$Q = \text{Volume d'eau [m}^3\text{/jour]}$$

$$C_h = \text{Constante hydraulique [kg.s.h / m}^2\text{]}$$

$$H_{MT} = \text{Hauteur manométrique total [m]}$$

Où :

$$C_h = g \cdot \frac{\rho}{3600} \quad (III-25)$$

ρ : Densité de l'eau [1000kg/m³]

g : La gravité terrestre [9.81m/s²]

III.10 Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise :

L'énergie nécessaire pour transporter une quantité d'eau donnée à une hauteur donnée au cours d'une journée est calculée à l'aide de l'équation suivante :

(III-26)

E_e : Energie électrique exprimé en [kwh / j]

η_{MP} : Le rendement du groupe motopompe, en général entre 30% et 60%.

η_{Conv} : Le rendement du convertisseur.

III.11 Dimensionnement des stations de pompage solaire :

Voici les données minimales requises pour déterminer la puissance requise pour faire fonctionner la pompe solaire :

-La situation géographique est utilisée pour calculer l'irradiation solaire globale.

-La dette est utilisée pour calculer les besoins de journalisation de l'eau pour la période de temps maximale.

-La hauteur manométrique totale est utilisée pour déterminer le niveau statique, la remise maximale, la hauteur du réservoir et les pertes de charge dues à la tuyauterie.

On procédera comme suit :

1-Définir l'irradiation globale journalière mensuelle en [wh/m²/j] par rapport à la latitude de la zone de travail.

2- Choisir une pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale, (utiliser les abaques de rendement des pompes fournis par le constructeur).

3- Choisir l'onduleur adapté à la pompe (tension et puissance).

4- Déterminer la puissance crête P_c nécessaire au fonctionnement de la pompe par des moyens analytiques ou graphiques.

- 5- Sélectionner le type de panneau solaire (définir sa puissance nominale Pn)
- 6-Déterminer le nombre de panneaux par la relation Pc/Pn
- 7- Vérifiez la tension nominale à laquelle l'onduleur fonctionne (selon le modèle).
- 8- Déterminer le nombre de modules série/parallèle (formulaire de connexion).

III.12 Application du système de pompage photovoltaïque :

Les paramètres du système de pompage sont donnés dans le tableau suivant :

Q (volume d'eau)	10 m ³
H _{MT}	43 m
η_{conv}	100%
η_{MP}	44%
Heures d'ensoleillement par jour	5 h
Ensoleillement moyen (G)	1 KW/m ²
Rendement des panneaux photovoltaïque	80%
Tension nominale du moteur	100V

La puissance hydraulique donnée par l'équation III.24 peut exprimer par :

$$E_h = 2.725 * 10 * 43 = 1171.75 \text{ KWh}$$

Alors l'énergie électrique nécessaire pour alimenter le moteur à courant continu est :

$$E_e = \frac{1171.75}{0.44} = 2663 \text{ KWh}$$

Et la puissance que doit être générée par les panneaux photovoltaïque est

$$P_{PV} = \frac{E_e}{G * 5 * 0.8} = \frac{2663}{4} = 665 \text{ W}$$

Alors la puissance que doit être produite par les panneaux photovoltaïque est P_{PV}=700W

Et le courant du moteur I=7A. Le champ photovoltaïque sera composé de 14 modules de 50Watt et tension V_{mp}=14.3V. 7 panneaux en série et 2 en parallèle

III.13 Simulation du système de pompage

Le moteur à courant continu est considéré à vide entre 0 et 0.2s , après 0.2s le moteur a un couple résistant de 2.9N/m (figure III.16). La figure III.17 représente la vitesse de rotation en rad/s qui est régulée à 220 rad/s par un régulateur de vitesse. La figure III.18 donne le courant consommé par le moteur à courant continu.

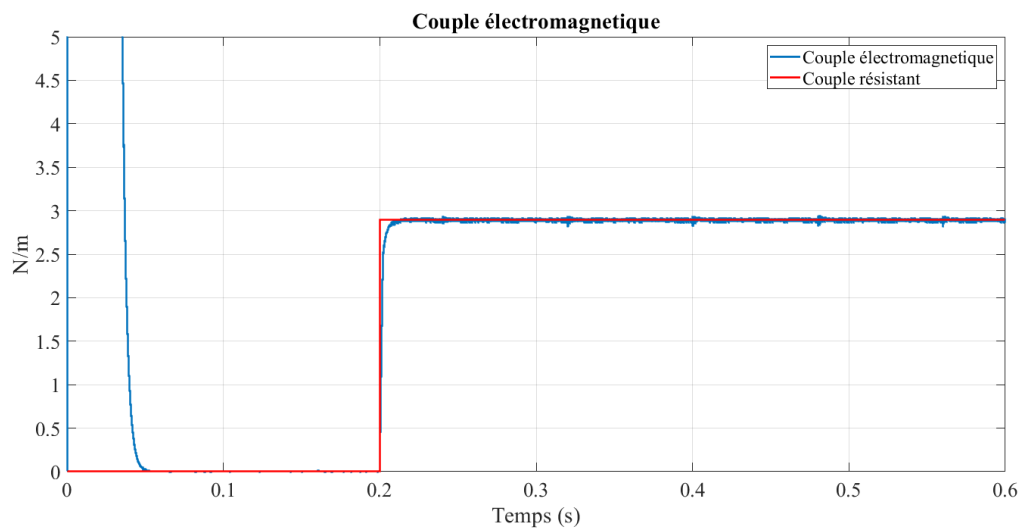


Figure III.15 : couple électromagnétique

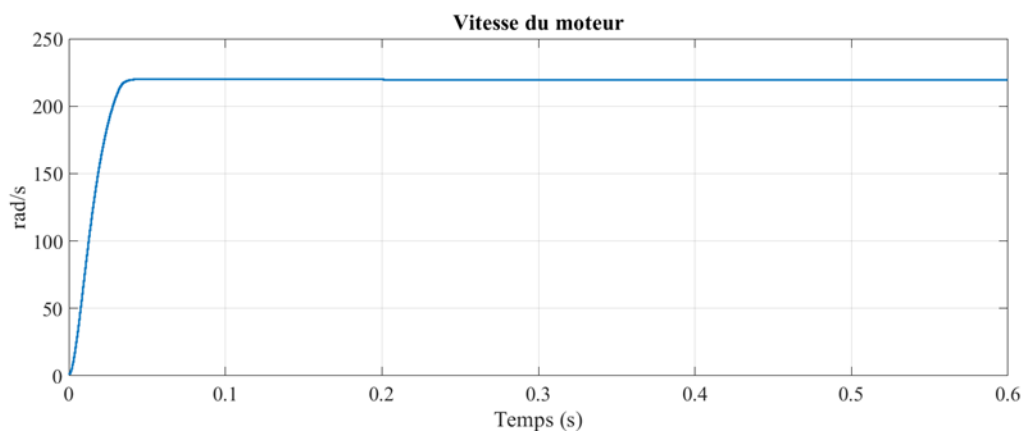


Figure III.16 : vitesse du moteur

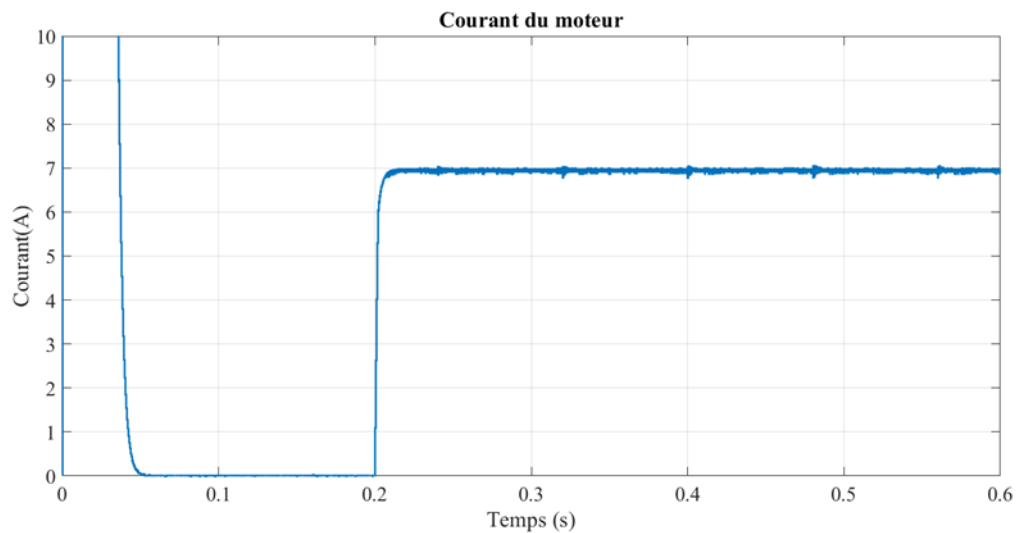


Figure III.17 :courant du moteur

III.14 Conclusion :

Dans ce chapitre, deux technologies de pompage photovoltaïque sont présentées : le pompage solaire et le pompage par batterie. Nous avons déjà manifesté notre intérêt pour le pompage de l'eau dite « au-dessus du soleil ». Nous avons également pu conclure que, selon l'état actuel de la technique, les systèmes de pompage photovoltaïques les plus courants sont constitués de petites pompes centrifuges avec des moteurs à courant continu. Le moteur est alimenté par un générateur photovoltaïque sans batteries via un convertisseur DC/DC.

Conclusion Générale

La consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Les énergies traditionnelles vont Les énergies non conventionnelles en constante diminution comportent de nombreux risques. Malgré leurs propriétés polluantes et épuisantes, les énergies fossiles sont surexploitées. Parce que l'énergie est l'un des moteurs du développement des pays verts et des partis politiques et les scientifiques, ayant pris de l'ampleur dans les sociétés développées, tentent de promouvoir énergies propres et renouvelables. En conséquence, la recherche d'énergies s'intensifie la substitution dite renouvelable.

Les énergies renouvelables en général et l'énergie photovoltaïque en particulier apparaissent dans ce contexte comme une alternative intéressante pour maintenir le confort humain et la qualité de l'environnement. Ainsi, nous aborderons dans un premier temps quelques notions sur la source d'énergie représentée par le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs principales caractéristiques, et pertes physiques et technologiques qui limitent l'efficacité des cellules photovoltaïques. Le but de notre travail est de mener une étude sur l'énergie solaire photovoltaïque et d'étudier certaines de ses caractéristiques et de la convertir en énergie électrique et certains de ses avantages.

Dans le premier chapitre, nous avons traité d'un aperçu de l'énergie solaire photovoltaïque, puis des cellules olfactives, de leurs avantages, de leur fonctionnement, de la conversion de la lumière en électricité, de l'effet de la température et de l'éclairage sur la production de panneaux, et de la meilleure façon de connecter des panneaux à obtenir la production d'électricité maximale possible (EN SÉRIE ,EN PARALLÈLE , EN SÉRIE/PARALLÈLE) et nous avons parlé de divers systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé du point de puissance maximale pouvant être généré (MPP). Nous avons simulé le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque à l'aide du programme MATLAB. Nous avons enregistré les résultats sous forme de courbes (Figure II.2) et (Figure II.3) Nous avons tracé le point de puissance maximale. Nous avons parlé de leurs types et nous nous sommes concentrés sur l'algorithme perturbe et observe (PO) et l'algorithme Incrémental Conductance .Nous les avons simulés dans MATALB comme indiqué dans (Figure II.6) et (Figure II.7) et avons enregistré les résultats comme montré.

Dans le dernier chapitre, nous avons intégré le travail dans une forme appliquée, qui est le pompage de l'eau grâce à l'énergie solaire, et nous avons parlé des types de pompage, et nous

nous sommes concentrés dans notre travail sur le pompage sans batterie (Le système solaire de pompage au fil du soleil) et nous avons parlé des composants du système que nous avons expliqués (La pompe, Les Moteurs).

Résumé

L'utilisation de l'énergie solaire dans les zones reculées pour différentes applications, telles que le pompage de l'eau, est d'un intérêt majeur pour les habitants des pays en développement qui n'ont pas un accès sûr à l'eau. Le travail présenté dans ce mémoire implique la modélisation, la simulation, le contrôle et l'optimisation des systèmes de pompage d'eau à énergie solaire.

Le système se compose d'un ensemble d'éléments en interaction, à savoir des panneaux photovoltaïques, des convertisseurs de tension, moteur à courant continu, des pompes centrifuges et des circuits hydrauliques.

Mots clés : pompage de l'eau , l'énergie solaire , panneaux photovoltaïques , convertisseurs de tension , moteur à courant continu.

ملخص:

يعد استخدام الطاقة الشمسية في المناطق النائية لتطبيقات مختلفة ، مثل ضخ المياه ، ذا أهمية كبيرة للناس في البلدان النامية الذين ليس لديهم وصول آمن إلى المياه. يتضمن العمل المقدم في هذه الأطروحة النمذجة والمحاكاة والتحكم وتحسين أنظمة ضخ المياه التي تعمل بالطاقة الشمسية. يتكون النظام من مجموعة من العناصر المتفاعلة ، وهي الألواح الكهروضوئية ، ومحولات الجهد ، ومحرك التيار المستمر ، ومضخات الطرد المركزي ، والدوائر الهيدروليكية

الطاقة الشمسية، ضخ المياه، الألواح الكهروضوئية، محولات الجهد، محرك التيار المستمر

كلمات مفتاحية : مضخات الطرد المركزي

Abstract :

The use of solar energy in remote areas for different applications, such as water pumping, is of major interest to people in developing countries who do not have secure access to water. The work presented in this thesis involves modeling, simulation, control and optimization of solar-powered water pumping systems.

The system consists of a set of interacting elements, namely photovoltaic panels, voltage converters, DC motor, centrifugal pumps and hydraulic circuits.

Keywords: pumping , solar-powered , photovoltaic , converters, DC

Bibliographie

[1] : Article in I-manager s Journal on Circuits and Systems · January 2017.

[2] : <http://www.bsi-economics.org/>

[3] : Fabien CASSORE et Guillaume ORLANDI et Maxime RAU «CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COLORANT» Encadrant : Jacques PERSELLO

[4] : Narimen Debili, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », mémoire de magister, université Constantine 1, 2015

[5] : (modélisation et simulation d'un générateur PV) mémoire master Université hamma Lakhdar el oued.

[6] : (étude du fonctionnement et commande d'UN système PV raccordé au réseaux) mémoire master académique Université Tlemcen 2018/2019

[7] : N.OULAMI, configuration des installations solaires photovoltaïque, N.OULAMI, école technique de Blida –laboratoire e-learning, 2017 :p.3.

[8] : <http://www.aquaa.fr/portfolio/article-portfolio/>

[9] : https://www.transtech-africa.de/bilder/photovoltaik/Grafik_PV_TH13.jpg

[10] : Abdelkader Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n, Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.

[11] : C. CABAL, « Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédie à la Conversion Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2008

[12] : M.S.Fateh. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.

[13] : J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.

- [14] : M. Lakhdar Louazen. Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla. Mémoire de Magister, Université EL HADJ LAKHDAR – BATNA, 2008
- [15] : Dione MBAYE et Merahi SAWSENE, Etude du fonctionnement et commande d'un système photovoltaïque raccordé au réseau, mémoire de master, Université télémcen, Algérie, 2018/2019
- [16] : C. Cabal, 'Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédié à la Conversion Photovoltaïque', Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 3, Décembre 2008
- [17] : J.L. Santos, F. Antunes, A. Chehab and C. Cruz, 'A Maximum Power Point Tracker for PV Systems Using a High Performance Boost Converter', Solar Energy, Vol. 80, N°7, pp. 772 – 778, 2006
- [18] : <https://www.trace-software.com/fr/les-systemes-photovoltaiques-pour-le-pompage-de-l-eau/>
- [19] : <https://www.ecosolaire.com/2017/10/10/pompage-solaire/>
- [20] : <https://fr.demotor.net/moteurs-electriques/moteur-courrant-continu>
- [21] : <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-quune-pompe-centrifuge-definition/>
- [22] : <https://www.techniquesfluides.fr/pompes-volumetriques-t-2-fr>
- [23] : MelleDEBILI Narimene, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque » Mémoire de Magister, UNIVERSITE CONSTANTINE I. 2014/2015.
- [24] : <https://www.loxone.com/frfr/kb/regulateur-pi/>
- [25] : D, Benderradji, «Contribution à la Commande Robuste de la Machine à Induction » Thèse de doctorat, université de Batna 2010.
- [26] : Dirk Jordan et Teresa Barnes, « Build solar-energy systems to last — save billions », Nature, décembre 2021, p. 215–217.
- [27] : D Abdelfattah « Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque » Thèse de MASTER université d'El-Oued.

[28] : BOUZID Kheir eddine « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino uno » , Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.

[29] : HANANOU FATIHA et ROUABAH AICHA«Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque». Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.

[30] : BERREGUI ABDELFETTAH et ABSA AMJED«Etude technicoéconomique d'une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla» ». Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.

