



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : Electronique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Rahmani Bachir

Bendjara mekki

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Électronique

OPTION : Électronique des systèmes embarqués

Thème

**Conception de contrôleur PSO-FOPID pour un suivi maximal
du point de puissance (MPPT) du système PV**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Bachir Bendjedia	MCA	Président
Abdellah Rahmani	MCB	Examineur
Mohammed Yousri Silaa	MCB	Encadrant

Promotion : 2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



جامعة عمار ثليجي - الأغواط

كلية/معهد:التكنولوجيا
قسم:الالكترونيك

مذكرة ماستر

تقديم الطالب (ة): رحمانى بشير و بن جارة مكي

ميدان:التكنولوجيا
شعبة:الالكترونيك
تخصص:الالكترونيك الانظمة المضمنة

موضوع البحث

تصميم وحدة تحكم PSO-FOPID لتتبع نقطة الطاقة القصوى
PV للنظام (MPPT)

أعضاء لجنة المناقشة:

الاسم و اللقب	الدرجة العلمية	الصفة
بشير بن جديعة		رئيسا
عبد الله رحمانى		ممتحن أول
محمد يوسري صيلع		مشرفا

الدفعة: 2023

Remerciements

Nous remercions Allah de nous avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à notre promoteur, le « Dr. Mohamed Yosri Silaa », qui nous a fait l'honneur de diriger ce travail. Nous tenons à le remercier chaleureusement pour sa présence et ses conseils avisés.

Nous remercions nos familles pour leur soutien moral durant notre projet de fin d'étude.

Nous remercions également le président de jury et les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail. Nous exprimons notre profonde gratitude au chef de département ainsi à tous les enseignants du département d'électronique.

الملخص:

في هذه الدراسة، يتم استخدام وحدة تحكم (FOPID) PID في النظام الكهروضوئي. بدأنا بدراسة عامة عن الخلايا الكهروضوئية. لقد قمنا بتفصيل المعلومات الأساسية التي ساعدتنا في تقدم العمل، وكذلك كل شيء يتعلق بمحولات DC/DC لاستغلال طاقة الألواح الشمسية. تعتبر المحولات (Buck) و (Boost) و (Buck-Boost) ضرورية جداً في موضوعنا، وكذلك أوامر PID و FOPID. تم تطوير مبدأ تشغيلها من أجل الحصول على أفضل أداء للنظام. يتم تعيين إعدادات وحدة التحكم باستخدام خوارزمية تحسين سرب الجسيمات (PSO). ثم قمنا بتحليل تشغيل محولات التعزيز والباك والأداء الأمثل لنظام PV في جهاز محاكاة Matlab

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة الكهروضوئية، محول مستمر/مستمر، جسيم خوارزمية تحسين السرب (PSO)، مصححات الترتيب الكسري

Résumé :

Dans cette étude, un contrôleur PID d'ordre fractionnaire (FOPID) est utilisé dans un système photovoltaïque. Nous avons commencé par une étude générale sur le photovoltaïque. Nous avons détaillé les informations de base qui nous ont aidés dans la progression du travail, ainsi que tout ce qui concerne les convertisseurs DC/DC pour l'exploitation de l'énergie des panneaux solaires. Les convertisseurs (Buck), (Boost) et (Buck-Boost) sont très essentiels dans notre sujet, tout comme les commandes PID et FOPID. Leur principe de fonctionnement a été développé afin d'obtenir la meilleure performance du système. Les paramètres du contrôleur sont réglés à l'aide de l'algorithme PSO (Particle Swarn Optimisation). Ensuite, nous avons analysé le fonctionnement des convertisseurs boost et buck ainsi que le fonctionnement optimal d'un système PV dans le simulateur Matlab.

Mot clefs : Système Photovoltaïque, convertisseur DC/DC, PSO, FOPID

Abstract :

In this study, a fractional order PID controller (FOPID) is used in a photovoltaic system. We started with a general study on photovoltaic. We have detailed the basic information that helped us in the progress of the work, as well as everything concerning DC/DC converters for the exploitation of the energy of solar panels. Converters (Buck), (Boost) and (Buck-Boost) are very essential in our subject, as are PID and FOPID commands. Their operating principle has been developed in order to obtain the best system performance. The controller settings are set using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. We then analysed the operation of the boost and buck converters and the optimal functioning of a PV system in the Matlab simulator.

Key words: system photovoltaic, DC/DC converters, switch-mode (MOSFET), FOPID, PSO

Table de Matières

Table de Matières

Remerciements

Résumé

Table de Matières

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iii
Listes des Symboles et Abréviations.....	iv
Introduction Générale	1
Chapitre I : Modélisation du panneau solaire.....	4
Introduction.....	4
I.1. Cellule photovoltaïque.....	5
I.1.2. Structure physique	5
I.1.3. Différents types des cellules solaires.....	5
I.1.3.1. Les cellules monocristallines.....	5
I.1.3.2. Les cellules amorphes	6
I.1.3.3. Silicium poly cristallin	7
I.4 Principe de fonctionnement photovoltaïque :	7
I.5 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :.....	8
I.5.1 Facteur de forme FF :.....	8
I.5.2 Rendement de conversion η :	8
I.5.3 Tension en circuit ouvert V_{co} :.....	9
I.5.4 Courant de court-circuit.....	9
I.5.5 Puissance maximale	9
I.6 La modélisation.....	10
I.6.1 Circuit électrique équivalent	10
I.6.2 Le photon courant I_{ph}	11
I.6.3 Courant de saturation inverse du module.....	12
I.6.4 le courant de saturation du module I_{sat}	12
I.6.5 Le courant de shunt I_{sh}	13
I.7 Module photovoltaïque.....	14
I.8 Association des modules photovoltaïques :.....	15

Table de Matières

I.8.1 - Association série :	15
I.8.2 Association en parallèle	16
I.9 La Protection.....	16
I.10 Le panneau solaire.....	18
I.11 système photovoltaïque:	18
I.11.1 Le système de régulation de charge :	18
I.11.2 Les batteries.....	19
I.11.3 Systèmes photovoltaïques indépendants :	19
I.11.4 Système connecté à un réseau local	20
I.12 Systèmes photovoltaïques directement relié au réseau	20
I.14.Influence de l'Éclairement et de la température :	21
I.14.1 Influence de l'Éclairement:	21
I.14.2.Influence de la température :	23
I.15 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :	24
I.15.1 Avantages:	24
I.15.2.Inconvénients :	24
Conclusion	25
Chapitre II : Convertisseurs DC-DC	26
Introduction.....	26
II.1. Convertisseurs DC-DC.....	26
II.1.1 Principe de fonctionnement	27
II .2 Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire	27
II.3 Types de Convertisseurs.....	28
II.3.1. Convertisseur Boost.....	28
II.3.1.1. Principe de fonctionnement	28
II.3.1.2. Applications	30
II.3.2. Convertisseur Buck.....	31
II.3.2.1. Principe de fonctionnement	31
II.3.2.2. Applications	32
II.3.3. Convertisseur Buck-Boost	32
II.3.3.1. Principe de fonctionnement	33
II.3.3.2. Applications	34
II.4. Résultat de la simulation du convertisseur DC-DC	34

Table de Matières

II.4.1. Convertisseur Boost.....	34
II.4.2. Convertisseur back	36
Conclusion	38
Chapitre III :Commande MPPT basée sur FOPID-PSO et Résultats de simulation	37
Introduction.....	37
II.1. Conception d'un système de commande	38
III.1.1. Asservissement.....	39
III.1.2. Régulation.....	39
III.2. Principe général de la régulation	39
III.3. Qualité d'un asservissement et performances d'un système	39
III.4. Types de système de commande	39
III.4.1. système de commande en boucle ouverte	39
III.4.2. Système de Commande en Boucle Fermée	40
III.5. Différents types de correcteurs.....	41
III.5.1. Correcteur proportionnel (P) :	41
III.5.2. Correcteur PI.....	42
III.5.3. Correcteur PID	43
III.5.3. Les différentes structures du PID.....	44
III.5.3.1. La structure parallèle.....	44
III.5.3.2. La structure mixte	45
III.5.3.3. La structure série.....	45
III.5.4. Contrôleur $PI\lambda D\mu$ d'ordre fractionnaire	45
III.6. Réglage d'un Régulateur FOPID par PSO	47
III.6.1. Processus de réglage.....	47
III.6.2. Problème d'optimisation	47
III.6.3. Optimisation du régulateur PID et FOPID	48
III.6.4. Optimisation par essaims de particules (PSO).....	48
III.7. Discussion de simulation et résultats	50
Conclusion	57
Conclusion générale	52
Références	53

Liste des Figures

Liste des figures

Titre	page
Figure I.1: Système Photovoltaïque	04
Figure I.2 : photo d'une cellule monocristalline	05
Figure I.3: photo d'une cellule amorphe	06
Figure I.4 : photo d'une cellule poly-cristallin	07
Figure I.5 : Le principe de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque	08
Figure I.6: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire	10
Figure I.7: Circuit modélisé de l'équation photo courant PV.	12
Figure I.8: Circuit modélisé pour l'équation 2 courant de	13
Figure II.9: Circuit modélisé pour l'équation I_{sat}	13
Figure I.10: Circuit modélisé pour le courant de shunt	14
Figure I.11 : Interconnexion de tous les sous systèmes du module PV.	14
Figure I.12 : Module photovoltaïque.	15
Figure I.13 : la caractéristique résultante obtenue en association en série	16
Figure I.14: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle	16
Figure I.15: Schéma d'un module photovoltaïque	17
Figure I.16: Effet de la diode by pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.	18
Figure I.17: Les composantes d'un champ photovoltaïques [7]	18
Figure I.18 : Système photovoltaïque directement relié au réseau	20
Figure I.19: Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie	21
Figure I.20: Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C)	22
Figure I.21: Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C)	22
Figure I.22: Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m ²)	23
Figure I.23: Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m ²)	23
Figure II.1: Principe de base d'un hacheur [21].	23
Figure II.2 : Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture / fermeture sur une période T_s .	27
Figure. II.3: schéma de base d'un convertisseur Boost	28
Figure.II.4: Convertisseur boost interrupteur fermé	29
Figure. II.5: Convertisseur boost interrupteur ouvert	29

Liste des Figures

Figure. II.6 : schéma de base d'un convertisseur Back	31
Figure. II.7 : Convertisseur back interrupteur fermé	31
Figure. II.8 : Convertisseur back interrupteur ouvert.	32
Figure. II.9 : schéma de base d'un convertisseur Back-boost	33
Figure. II.10 : Convertisseur back- boost interrupteur fermé	33
Figure. II.11 : Convertisseur back- boost interrupteur ouvert	33
Figure. II.12 : Résultat de la simulation boost	35
Figure. II.13 : Résultat de la simulation back	36
Figure. III.1 : Système de commande	38
Figure. III.2 : Schéma bloc d'un système en boucle ouverte	40
Figure. III.3 : Schéma d'un système en boucle fermée	40
Figure. III.4 : Commande proportionnelle P.	42
Figure. III.5 : Commande PI.	43
Figure III.6 : Commande PID.	44
Figure. III.7 : La structure parallèle	45
Figure. III.8 : La structure mixte	45
Figure. III.9 : La structure série.	46
Figure. III.10 : Le contrôleur FOPID	47
Figure III.10 : Illustration géométrique du mouvement des particules dans le processus PSO Les particules sont mises à jour selon les équations suivantes.	49
Figure. III.11 : Données d'irradiation solaire.	51
Figure. III.12 : Données température	52
Figure. III.13 : Réponse de power PV de sortie avec FOPID	52
Figure. III.14 : Réponse de courant de sortie avec FOPID	53
Figure. III.15 : Réponse de tension de sortie avec FOPID	53
Figure. III.16 : Réponse de tension BOOST	54
Figure. III.17 : Réponse de courant BOOST	54
Figure. III.18 : Réponse de courant BOOST	55

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Titre	page
Tab II.1 : Tableau de données Convertisseur Boost	34
Tab II.2 : Tableau de données Convertisseur Buck	35
Tab III.1 : Paramètres de PID et FOPID synthèses par PSO	50

Listes des Symboles et Abréviations

Listes des Symboles et Abréviations

❖ Symboles

<i>symbole</i>	<i>Signification</i>
P_V	Photovoltaïque.
V_{PV}	la tension du panneau photovoltaïque.
I_{PV}	le courant du panneau photovoltaïque.
$P\&O$	Perturbe & Observe
P_{max}	La puissance maximale produite par le générateur PV
V_m	la tension maximale.
I_m	le courant maximal
F_F	facteur de forme
I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{CO}	Tension en circuit ouvert
η	Le rendement de la cellule photovoltaïque
P_{inc}	Puissance incident.
S	Surface de la cellule photovoltaïque.
E	L'éclairement absorbé par la cellule en W/m ² .
V_{s1}	la tension de seuil.
I_d	Courant traversant la diode
V_d	Tension aux bornes de la diode.
I_s	Le courant de saturation en Ampère (A).
V_{th}	Le potentiel thermique en Volt (V)
N	Le facteur de qualité de la diode.
Q	La charge absolue d'un electron en coulomb (1.60281×10^{-19} C).
K	la constant de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K= 8.61400×10^{-5} eV/K)
T	la température absoute en Kelvin (K).
I_{Ph}	un générateur de courant
R_s	Résistance série de la cellule PV.
$R_{sh}R_p$	La résistance parallèle (Résistance shunt) de la cellule PV

Listes des Symboles et Abréviations

N_S	nombre des modules en séries
N_P	nombre des modules en parallèles
V_i	La tension d'une seule cellule.
DC-DC	Convertisseur continu/continu
$U (V)$	Tension.
I	Courant
P	Puissance
R	Résistance de charge.
L	Inductance.
C	Capacité
D	Diode
α	Rapport cyclique.
T	période de la tension source.
T_{ON}	Temps de fermeture de Q
T_{OFF}	Temps d'ouverture de Q
T	La période
PI	Régulateur proportionnel intégrateur
$S(p)$	grandeur de (sortie)
$E(p)$	grandeur de (sortie)
$G(p)$	grandeur d'entrée.
$\varepsilon(p)$	fonction de transfert.
$C(p)$	erreur
$u(t)$	fonction de transfert du régulateur.
$r(t)$	le signal de commande
$x(t)$	la consigne
$y(t)$	le signal de retour
$C(s)$	la grandeur à commander
$G(s)$	la fonction de Transfer du correcteur
K_P	la fonction de transfert de système
K_I	le gain intégral
K_d	le gain dérivé

Listes des Symboles et Abréviations

T_i	la constante d'intégration
T_d	la constante de dérivation
T	constante de temps
$PI^\lambda D^\mu$	correcteurs d'ordre fractionnaire
λ	Ordre d'intégration
μ	Ordre de dérivation

❖ *Abréviations*

<i>Acronyme</i>	<i>Signification</i>
PI	Proportionnel Intégral
PI	Proportionnel Intégral Dérivé
FOPID	Fractional Order PID
<i>IAE</i>	Intégrale Absolute Error
<i>ITAE</i>	Integral Time Absolute Error

Introduction Générale

Introduction Générale

Le besoin du monde entier en énergie oblige les chercheurs à se joindre au consensus de la transformation énergétique. L'énergie renouvelable est considérée plus que jamais comme leur meilleur choix vers l'exploitation de nouvelles sources modernes, fiables et plus propres. Cette tendance est une cause de l'épuisement continu des produits énergétiques fossiles et des nouvelles réglementations climatiques mondiales visant l'atténuation de la pollution et du réchauffement climatique terrestre. D'autre part, elle est due à la maturité croissante du marché de l'énergie renouvelable et des progrès technologiques et techniques. Parmi les solutions les plus envisagées, il y a l'énergie d'origine solaire et l'énergie éolienne. La particularité de l'énergie solaire est caractérisée par sa disponibilité abondante dans tous les coins du monde. L'intérêt pour cette énergie a connu une croissance exponentielle ces dernières années, en suivant deux axes : le solaire photovoltaïque et le solaire thermique. Par ailleurs, l'énergie éolienne, largement connue sous le nom d'"énergie éolienne", se distingue par sa fiabilité et sa durabilité, et est souvent exploitée en tant que source centrale de production. Les investissements dans l'énergie éolienne sont principalement réalisés par les États, les grandes entreprises et les groupes formant les grandes entreprises [1].

Par conséquent, des méthodes et des outils de production efficaces deviennent essentiels pour mettre en œuvre ces vues. Les recherches en cours s'inscrivent dans le cadre de l'amélioration des performances et de l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques. Elles contribuent également au développement de lois de commande visant à améliorer la conversion de l'énergie photovoltaïque sous forme rayonnante en énergie électrique pour divers équipements électriques. Ces contrôles doivent faire face aux différents systèmes de production perturbateurs du changement climatique et doivent également maintenir la stabilité requise. Nous tenons à souligner la stabilité de ce mot, car nous avons affaire à un flux soumis à toutes les variations naturelles, le flux dit libre. Prenons un petit exemple : dans le cas d'une chaudière à combustible classique (fioul, charbon, etc.), nous pouvons contrôler et ajuster toutes les grandeurs physiques en amont (pression, combustible, air) pour obtenir un flux laminaire de vapeur attaquant un turbo-alternateur qui produit de l'énergie électrique. On constate que dans une telle énergie conventionnelle, toutes les grandeurs évoquées peuvent être maîtrisées. En revanche, dans un système où l'on ignore toutes les valeurs d'entrée du processus amont (la vitesse de l'air

attaquant l'éolienne, le courant de l'eau attaquant l'hydrolienne, l'intensité du rayonnement solaire projeté sur les panneaux solaires, etc.) et que nous ne pouvons pas contrôler, nous devons dépendre des systèmes de stabilisation pour une puissance régulée et stable. Sinon, un manque de stabilité, pour quelque raison que ce soit, peut entraîner de graves dommages et conséquences [1].

La qualité de la puissance produite est un critère essentiel dans la conception des contrôleurs. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes de contrôle proposées dans la littérature scientifique, chacune doit répondre à des exigences spécifiques telles que la flexibilité vis-à-vis des changements climatiques, le niveau de vibration lors de l'application et le niveau d'accessibilité pour la maintenance. La nature des systèmes de conversion de l'énergie renouvelable est souvent non linéaire, alors que les commandes classiques destinées aux systèmes linéaires ne sont plus adaptées.

Chaque source d'énergie renouvelable a ses propres caractéristiques, et pour cela, nous constatons que chaque type d'énergie a ses propres méthodes de contrôle qui partagent le même objectif, mais avec des outils et des stratégies différents. Cette note couvrira l'étude des ordres d'énergie provenant de la source naturelle du soleil.

Ce travail concerne le contrôle du système photovoltaïque à l'aide du contrôleur FOPID (Fractional Order PID). L'optimisation par essaim de particules (PSO) est utilisée pour déterminer les paramètres optimaux du contrôleur FOPID. Dans le premier chapitre, nous présenterons une généralité sur les systèmes photovoltaïques en abordant le générateur photovoltaïque et le principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les convertisseurs (DC/DC) parmi lesquels il existe trois types de convertisseurs DC-DC les plus couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Nous expliquerons le principe de fonctionnement, les applications et les résultats de simulation du convertisseur boost et du convertisseur buck. Dans le troisième chapitre, nous présenterons les concepts de base des systèmes de contrôle, le principe de contrôle conventionnel, les différents types de régulateurs ainsi que le principe de fonctionnement du PI, du PID et du FOPID attaquant l'éolienne, la courant de l'eau attaquant l'hydrolienne, l'intensité du rayonnement solaire projeté sur les panneaux solaires, etc.)

Introduction Générale

Pouvons pas contrôler, nous devons dépendre des systèmes de stabilisation pour une puissance régulée et stable.

Sinon, un manque de stabilité pour quelque raison que ce soit peut entraîner de graves dommages et conséquences.

La qualité de la puissance produite est un critère essentiel dans la conception des contrôleurs. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes de contrôle proposées dans la littérature scientifique, chacune soumettre les exigences de candidature ; Flexibilité vis-à-vis des changements climatiques, du niveau de vibration lors de l'application et du niveau d'accessibilité pour la maintenance.

La nature des systèmes de conversion de l'énergie renouvelable est souvent non linéaire alors que les commandes classiques destinée aux systèmes linéaires ne sont plus convenables.

Chaque source d'énergie renouvelable a ses propres caractéristiques, et pour cela nous constatons que chaque type d'énergie a ses propres méthodes de contrôle qui partagent le même objectif, mais avec des outils et des stratégies différents. Cette note couvrira l'étude des ordres d'énergie provenant de la source naturelle du soleil.

Ce travail est pour le contrôle du système photovoltaïque à base FOPID Controller, Particule Swarm Optimisation (PSO) est utilisé pour déterminer les paramètres optimaux du contrôleur FOPID.

Dans le premier chapitre nous présenterons une généralité sur les systèmes photovoltaïques. En présentant le générateur photovoltaïque et le principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les convertisseurs (DC/DC) parmi lesquels il existe trois types de convertisseurs DC-DC Le plus couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques et pour déterminer le principe de fonctionnement et les applications et résultats de simulation du convertisseur boost et back.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les concepts de base des systèmes de contrôle,

Introduction Générale

Principe de contrôle conventionnel, différents types de régulateurs, principe de fonctionnement PI, PID, FOPID.

Chapitre I :
Modélisation du
panneau solaire

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

Introduction

Si la consommation d'une source d'énergie ne limite pas son utilisation future, elle est renouvelable. Les humains ont compris comment utiliser au mieux les différentes sources d'énergie. Ces sources d'énergie sont de deux types : les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables. Les énergies renouvelables se sont révélées être un atout incontournable pour résoudre une partie des problèmes par rapport aux énergies fossiles, telles que le pétrole et le gaz. Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu général sur les énergies photovoltaïques et les systèmes solaires photovoltaïques qui représentent l'actualité des énergies renouvelables. Dans notre travail, nous nous intéresserons à l'énergie solaire (photovoltaïque).

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur Terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux, en énergie électrique. Pour ce faire, elle utilise des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible, qui réalisent cette transformation d'énergie.

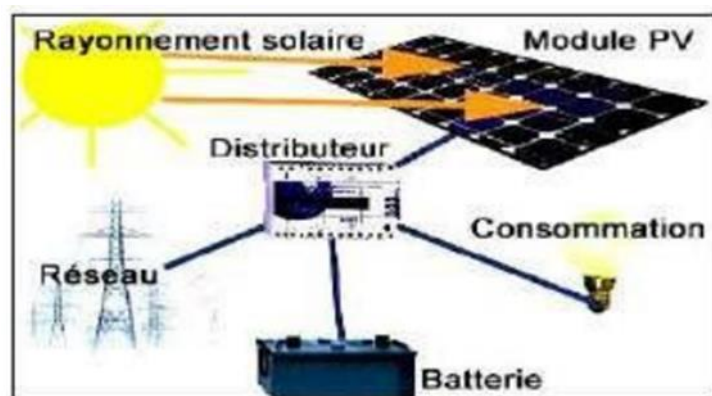


Figure I-1: Système Photovoltaïque

I.1. Cellule photovoltaïque

I.1.1. Historique

Le physicien français Edmond Becquerel décrivit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre. De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell Laboratoires qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires.

I.1.2. Structure physique

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs généralement à base de silicium (Si), qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Les cellules sont raccordées entre-elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15% de l'énergie solaire recue

I.1.3. Différents types des cellules solaires

I.1.3.1. Les cellules monocristallines

Ce genre de cellules est caractérisé par un rendement élevé, mais leur principal défaut est leur coût élevé en raison de leur fabrication complexe. Leur part de marché est de 43%.



Figure I-2 : photo d'une cellule monocristalline

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

- Très bon rendement : 14 à 20 %.
- Durée de vie : importante (30 ans)
- Coût de fabrication : élevé.
- Puissance : 100 à 150 Wc/m². 7 m²/kWc.
- Rendement faible sous un faible éclairement.
- Perte de rendement avec l'élévation de la température.
- Fabrication : est très compliquées.

I.1.3.2. Les cellules amorphes

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction.

Les cellules amorphes sont utilisées dans de petits produits tels que des calculatrices ou des montres, car leur rendement est assez faible et leur coût élevé. Leur part de marché est de 10%.

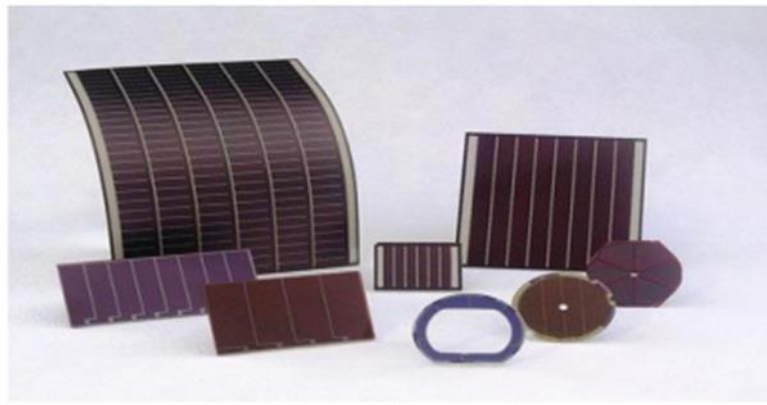


Figure I-3: photo d'une cellule amorphe

- Rendement faible : 5 à 9 %.
- Durée de vie : assez importante (20 ans) .
- Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies.

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

- Puissance : 50 WC/m². 16 m²/kWc.

-Fonctionnement correct avec un éclairage faible.

-Peu sensible aux températures élevées.

-Utilisables en panneaux souples.

-Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium

I.3.3 Silicium poly cristallin

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et hétérogènes.

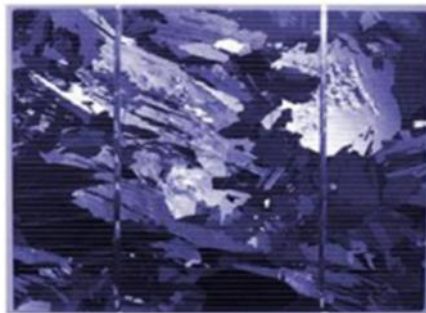


Figure I-4 : photo d'une cellule poly-cristalline

Sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé

- Procédé moins gourmand en énergie.

-Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.

I.4 Principe de fonctionnement photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives dans la cellule.

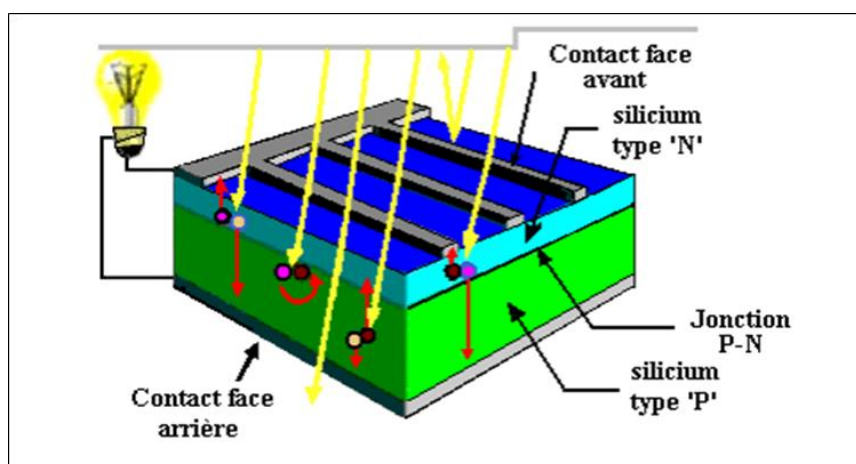


Figure I-5 : Le principe de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque

I.5 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :

I.5.1 Facteur de forme FF :

Le point de fonctionnement usuel d'une cellule solaire est un point de la courbe I(V) qui correspond à une puissance maximale dissipée par la charge.

$$F = \frac{P_m}{I_{cc} V_{oc}} = \frac{I_m V_n}{I_{cc} V_{oc}} \quad (I.1)$$

Cette valeur décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse

I.5.2 Rendement de conversion :

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Si S est la surface de la cellule (en m²) et E est l'éclairement-irradiante (en W/m²).

$$= \frac{P_m}{P_{incS}} \quad (I.2)$$

- Pinc: Puissance incident
- S : surface de la cellule photovoltaïque.
- Pm : La puissance maximale produite par le générateur PV.
- E : L'éclairement absorbé par la cellule en W/m².
- η : Le rendement de la cellule photovoltaïque

$$F_F * I_{CC} * V_{C0} \quad (I.3)$$

I.5.3 Tension en circuit ouvert :

C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo courant. Elle est obtenue en plaçant ($t=0$) dans l'expression du courant, elle est donnée par la relation :

$$f(x) = nV_{th} \log\left(1 + \frac{i_{ph}}{i_s}\right) \quad (I.4)$$

V_{th} : Le potentiel thermique en Volt (V).

i_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur de qualité de la diode.

I.5.4 Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est le courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire, augmente généralement avec l'intensité d'illumination. I_{cc} est la valeur courant lorsque la tension $V=0$.

On peut déduire :

$$I_{cc}(V = 0) = I_{ph} \quad (I.5)$$

I.5.5 Puissance maximale

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit $V.I$ est

Maximum, elle est donnée par l'équation :

$$P_m = I_m V_m \quad (I.6)$$

V_m : Tension correspondant à la puissance maximale.

I_m : Courant correspondant à la puissance maximale.

I.6 La modélisation

I.6.1 Circuit électrique équivalent

Une cellule PV peut être modélisée par un schéma électrique équivalent qui reproduit son comportement quand elle est éclairée par un faisceau lumineux.

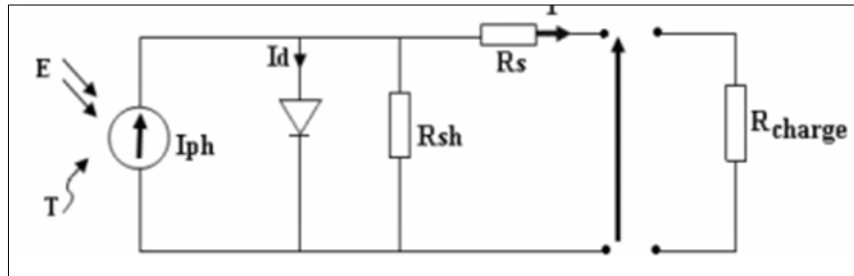


Figure I-6: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire

En appliquons la loi de Kirchoff aux nœuds :

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.7)$$

- Le générateur du courant (I_{ph}): il délivre le courant (I_{ph}) correspondant au courant photo-généré.
- La diode: modélise la jonction P-N, avec I_d : courant électrique à travers la diode.
- La résistance série R_s : modélise les pertes résistives au sein de la photopile. Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension V_i aux bornes de la jonction pn. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}): correspond à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction; il en résulte qu'une partie du courant (I_{ph}) sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible [1].

L'expérience montre qu'avec l'obscurité ; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s .

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

$$V_{th} = \frac{K_t}{q} \quad (I.8)$$

T : la température absolue en Kelvin (K)

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C)

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V)

K : la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K = 8.61400×10^{-5} eV/K).

Sous éclairage, un terme I_{ph}, tenant compte du photo-courant généré est rajouté. Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, les effets résistifs et les fuites vers les bords d'autres sont tenus en compte. L'équation de la caractéristique I-V devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V+I_{rs}}{nV_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{V+I_{rs}}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

Avec :

$$G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}} \quad (I.10)$$

Alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V+I_{rs}}{nV_{th}} \right) - 1 \right) - G(V + I_{rs}) \quad (I.11)$$

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V)

I_{ph} : photo-courant généré (proportionnel au rayonnement incident)

I_s : le courant de saturation en Ampère (A)

n : le facteur de qualité de la diode

I.6.2 Le photon courant I_{ph}

Le module photon-courant est donné dans l'équation :

$$I_{ph} = [I_{cc} + k_i(T - 298)] \times I_r / 1000 \quad (I.12)$$

Modélisé comme dans la figure (I_{r0} = 1000 W/m²) :

-Le bloc sur Simulink de I_{ph} :

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

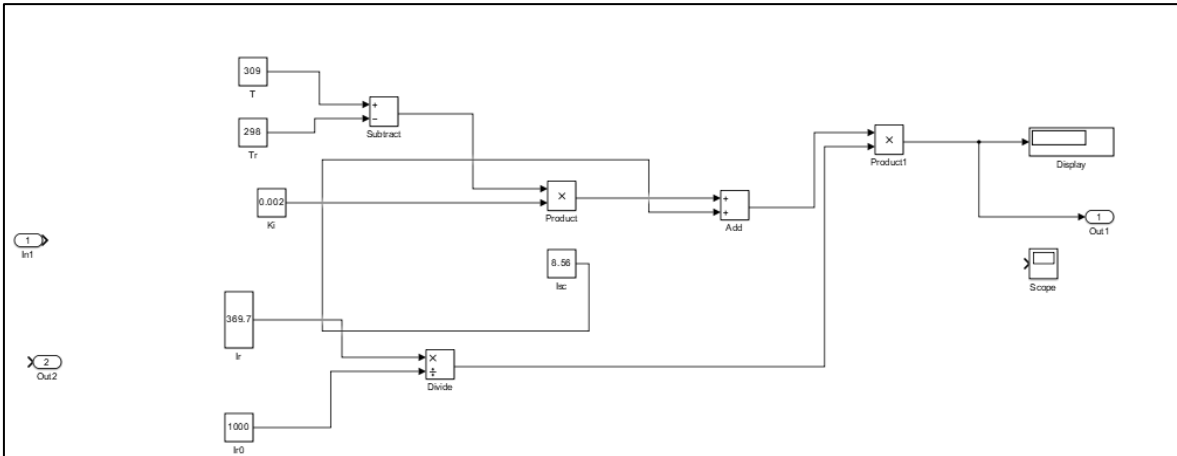


Figure I-7: Circuit modélisé de l'équation photo courant PV.

I.6.3 Courant de saturation inverse du module

De l'équation :

$$2I_{rs} = I_{sc} \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{NskT}\right) \right] \quad (I.13)$$

Le courant de saturation inverse du module donné dans l'équation et modélisé dans ce bloc

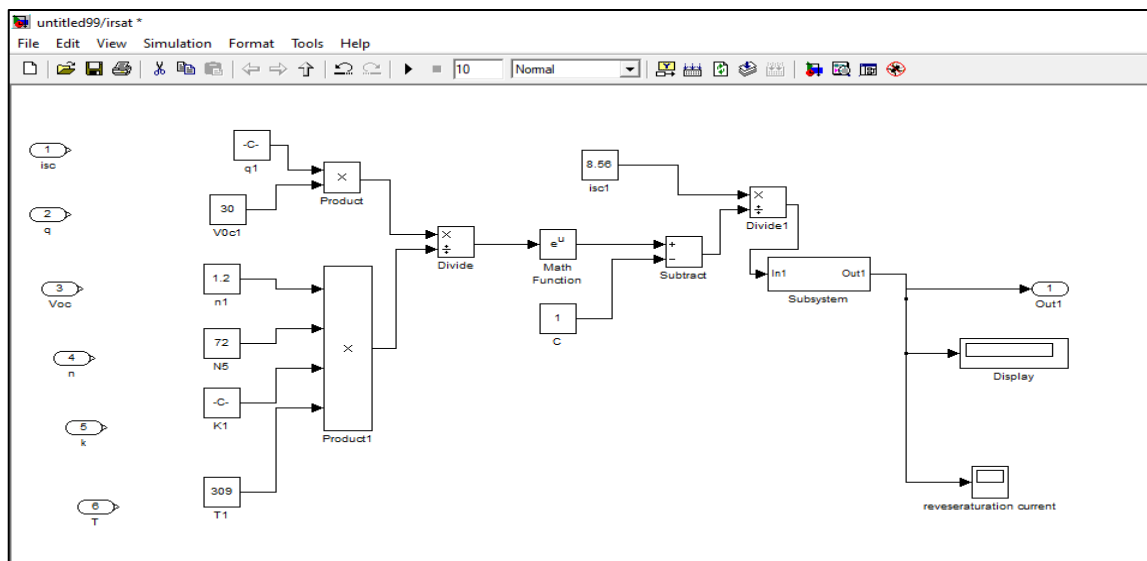


Figure I-8: Circuit modélisé pour l'équation 2 courant de

Saturation inverse $I_{rsat} = I_{sc} / [\exp\left(q \frac{V_{oc}}{NsknT}\right) - 1]$

I.6.4 le courant de saturation du module Isat

Pour calculer le courant de saturation du module Isat :

$$I_{sat} = I_{rs} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_{g0}}{nK} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (I.14)$$

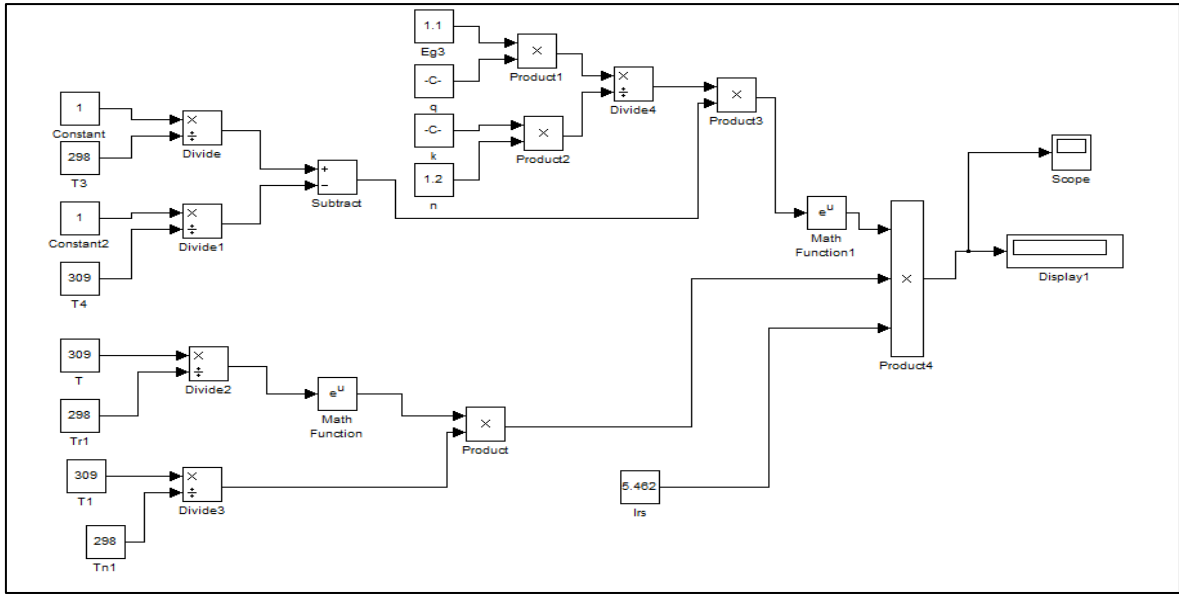


Figure II-9: Circuit modélisé pour l'équation I_{sat}

I.6.5 Le courant de shunt I_{sh}

Le courant de shunt donné par

$$I_{sh} = \frac{V \times N_p / N_s + 1 \times R_s}{R_{sh}} \quad (I.15)$$

Dans cette équation :

N_p est le nombre de modules PV connectés en parallèle

R : résistance série en ohms

R_{sh} : est la résistance shunt tandis que V_t est la tension thermique de la diode (vt).

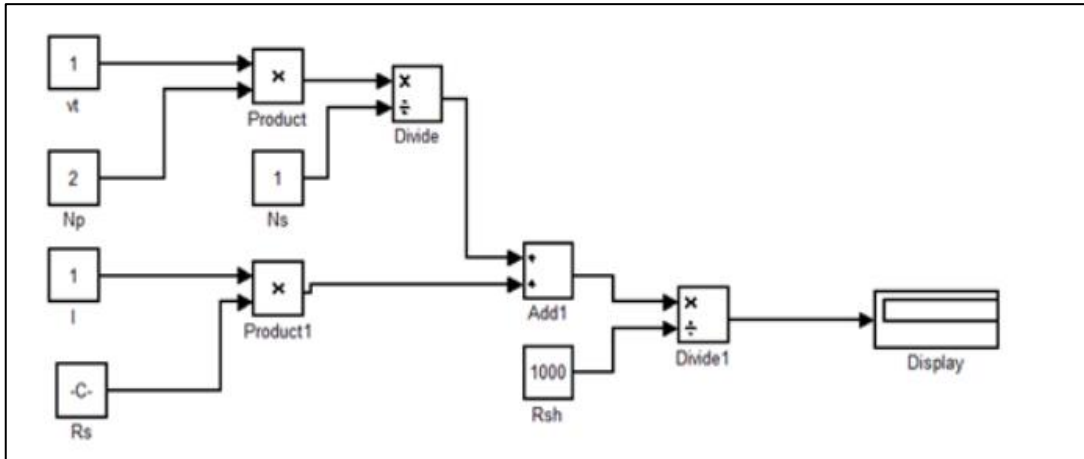


Figure I-10: Circuit modélisé pour le courant de shunt

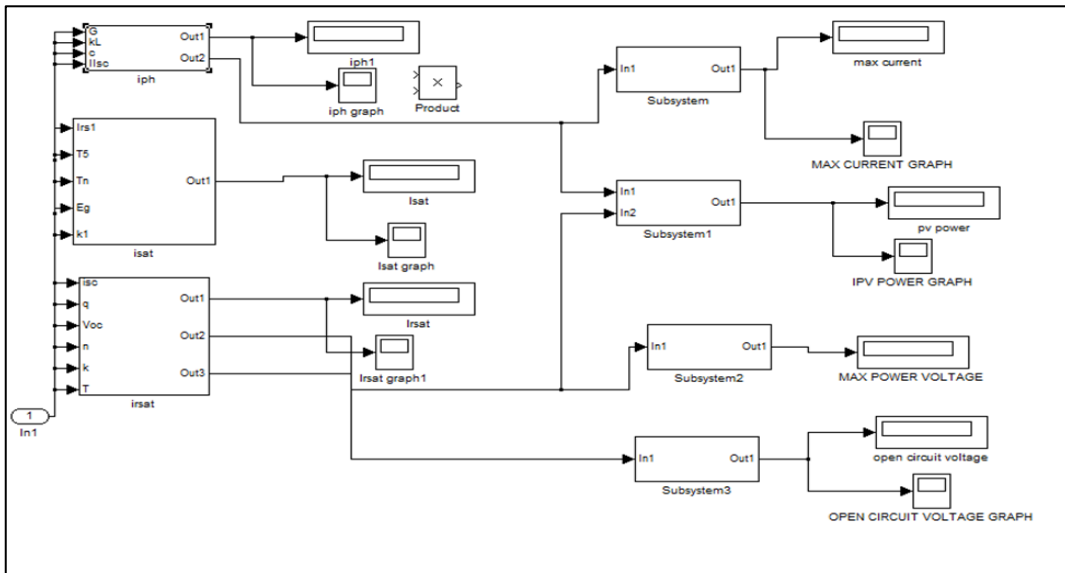


Figure I-11 : Interconnexion de tous les sous-systèmes du module PV.

I.7 Module photovoltaïque

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I-10). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène-Acétate de Vinyle, de l'anglais Ethylene-Vinyl Acetate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. Les

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation [2].

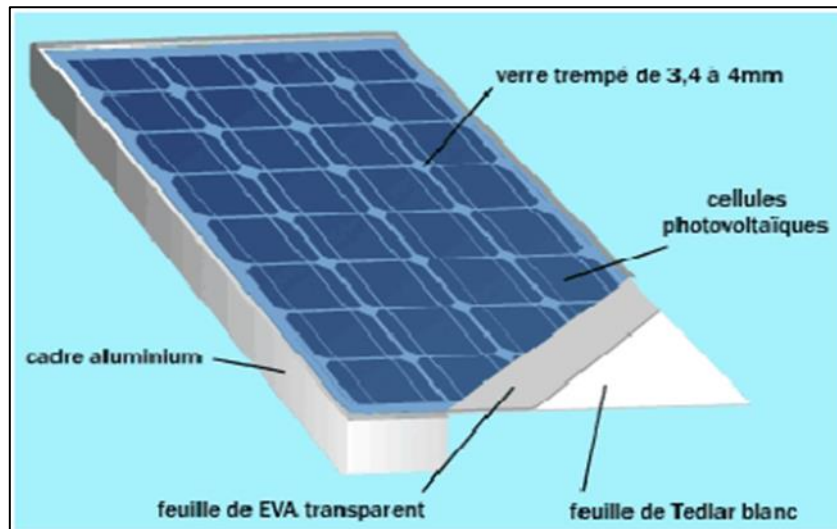


Figure I-12 : Module photovoltaïque.

Les modules en silicium mono cristallin (43% du marché avec une efficacité de Conversion (énergie électrique produite / énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%), poly cristallin (47% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15 %) ou silicium amorphe (10% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %) délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100 Wc (Watt- crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [3]

I.8 Association des modules photovoltaïques :

I.8.1 - Association série :

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même. La (figure1.5) montre la caractéristique résultante (I_{SCC}, V_{sc0}) avec :

$$I_{SCC} = I_{CC} \text{ et } V_{sc0} = n_s * V_{C0} \quad [4] \quad (I.15)$$

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

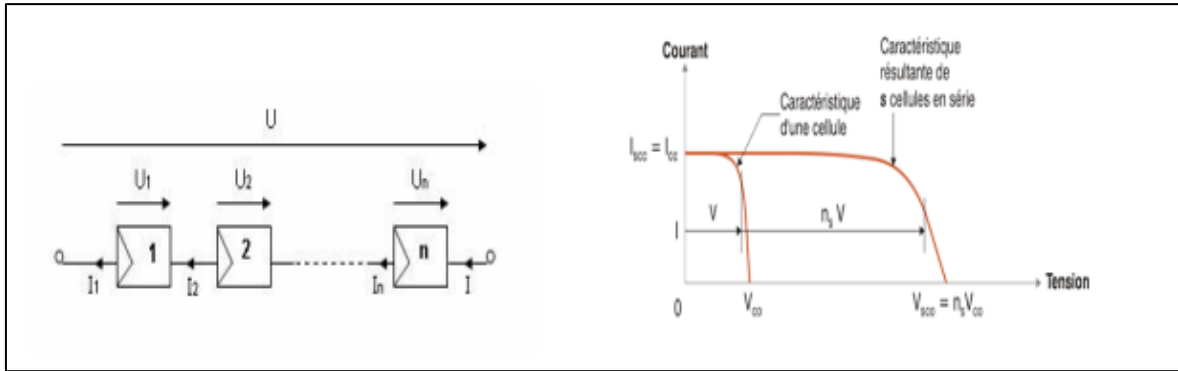


Figure I-13 : la caractéristique résultante obtenue en association en série

I.8.2 Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [7].

$$i_{cc_{np}} = N_p \cdot I_{CC} \tag{I.16}$$

$$V_{CO_{np}} = V_{CO} \tag{I.17}$$

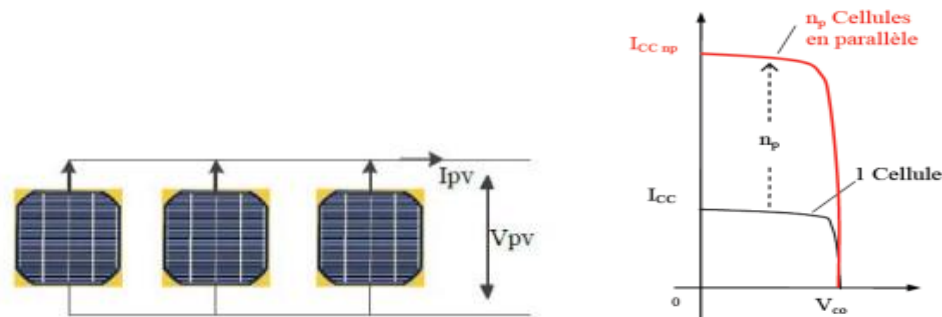


Figure I-14: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

I.9 La Protection

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et en panneaux en parallèles, Pour cela y'a deux modelés de protections :

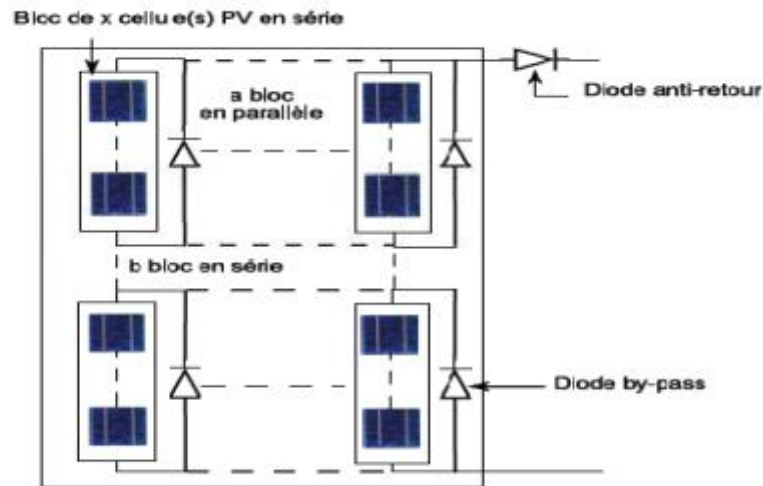


Figure I-15: Schéma d'un module photovoltaïque

La diode anti-retour empêchant un courant négatif, Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit. Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure I-11, par la perte d'une partie de la protection d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [5].

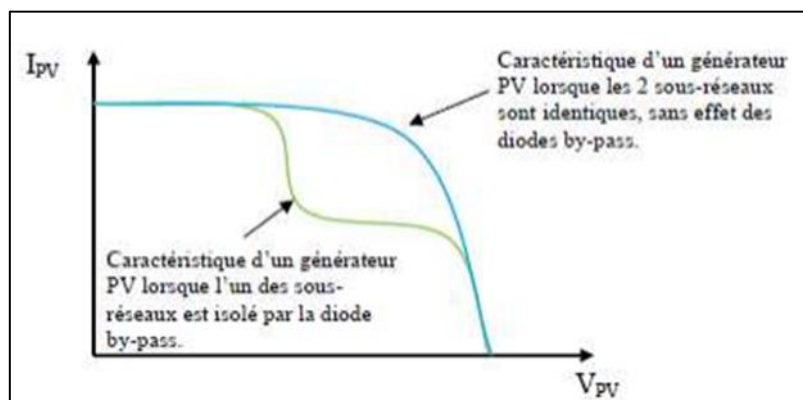


Figure I-16: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

I.10 Le panneau solaire

Le panneau photovoltaïque constitué de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance, Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire [6]

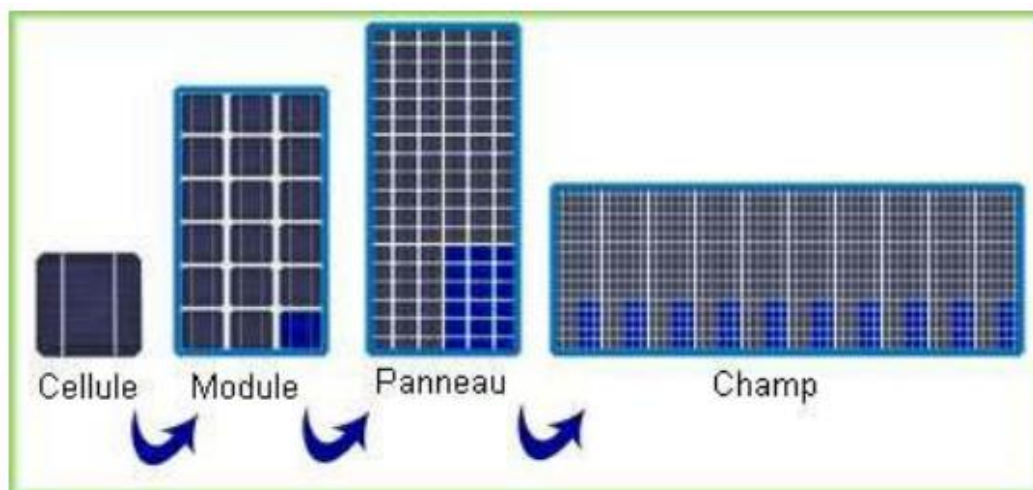


Figure I-17: Les composantes d'un champ photovoltaïques [7]

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend de [8]:

- les besoins en électricité
- la taille du panneau
- l'ensoleillement du lieu d'utilisation
- la saison d'utilisation.

I.11 système photovoltaïque :

Un système PV est un ensemble complet d'équipements PV pour transformer la lumière du soleil en électricité, généralement il se compose de cinq éléments principaux : un panneau PV qui produit une faible puissance entre 1 et 3 W, la batterie, le régulateur, le convertisseur et la charge. Et il existe 3 types de systèmes :

I.11.1 Le système de régulation de charge :

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Presque toutes les installations autonomes sont

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

équipées d'un régulateur qui contrôle le flux d'énergie allant des cellules solaires vers la batterie et les utilisateurs [9].

I.11.2 Les batteries

Elle est chargée de stocker le courant produit par le panneau pour assurer l'autonomie du système, sa durée de vie est définie par nombre de cycle (charge-décharge), elle se caractérise par :

-Ampérage en Ampère heure (Ah)

-Voltage en Volt.

On peut trouver les types des batteries solaires suivants :

➤ Batterie étanche: c'est une batterie fermée, étanche, sèche, sans maintenance ni entretien, à installer à l'abri de la chaleur et l'humidité, à ne pas stocker plus de 4 à 5 mois, très chère, durée de vie de 17 à 10 ans.

➤ Batterie stationnaire solaire: c'est une batterie ouverte (humide), avec entretien (l'ajout de l'acide chlorhydrique ou l'eau distillée chaque 6 mois), prix moins chère, durée de vie 10 à 15 ans.

➤ Batterie à gel: c'est une batterie ouverte destiné à zones froides (neige, verglas ...), avec entretien (l'ajout de l'antigel mono-propylène glycol chaque 6 mois), prix moyen, durée de vie 15 ans.

I.11.3 Systèmes photovoltaïques indépendants :

C'est un système qui alimente l'utilisateur en électricité (sans être connecté au réseau électrique). En effet, il s'appelle aussi " un système autonomes " sont des systèmes qui ne dépendent pas de l'existence d'un réseau d'électricité. C'est bien souvent la meilleure moyenne de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible : dans les sites isolés ("les îles, les montagnes, désert)

On peut classer ces systèmes en deux catégories :

- Systèmes avec accumulateurs
- Système sans accumulateurs

I.11.4 Système connecté à un réseau local

Ces systèmes photovoltaïques convertissent l'électricité en courant alternatif (CA) et transfèrent leur surplus d'électricité au réseau auprès duquel ils s'approvisionnent pendant la nuit ou lorsque le rayonnement solaire est insuffisant. Dans ces systèmes on compte :

I.12 Systèmes photovoltaïques directement relié au réseau

Le système ne peut fournir ou prélever de l'énergie qu'au réseau. La batterie n'est plus présente. Le schéma du système PV directement relié au réseau est donné par la figure suivante

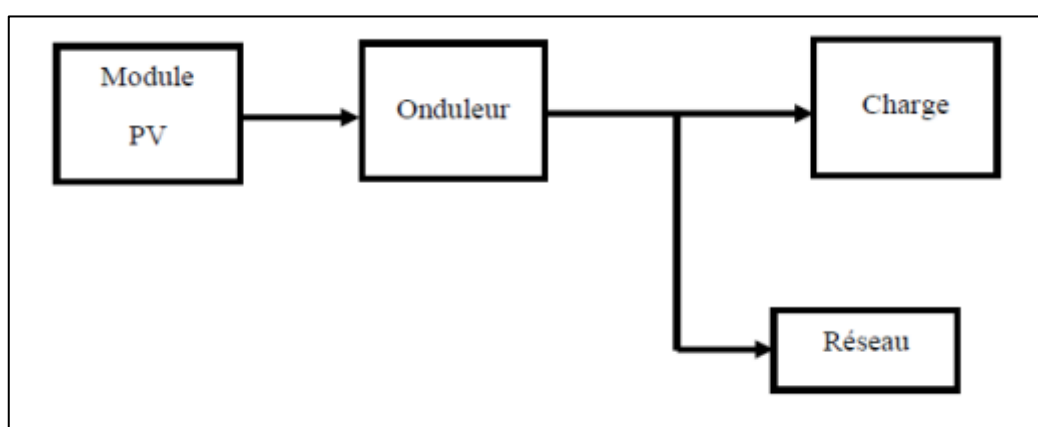


Figure I-18 : Système photovoltaïque directement relié au réseau

L'absence des batteries est un point positif, car celle-ci augmente le coût de système photovoltaïque. En plus elle doit être entretenue et changée après quelques années.

I.13 Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie

Système peut fournir de l'énergie au réseau et prélever l'énergie d'appoint nécessaire au réseau. Le schéma d'un système PV relié au réseau avec batterie est le suivant.

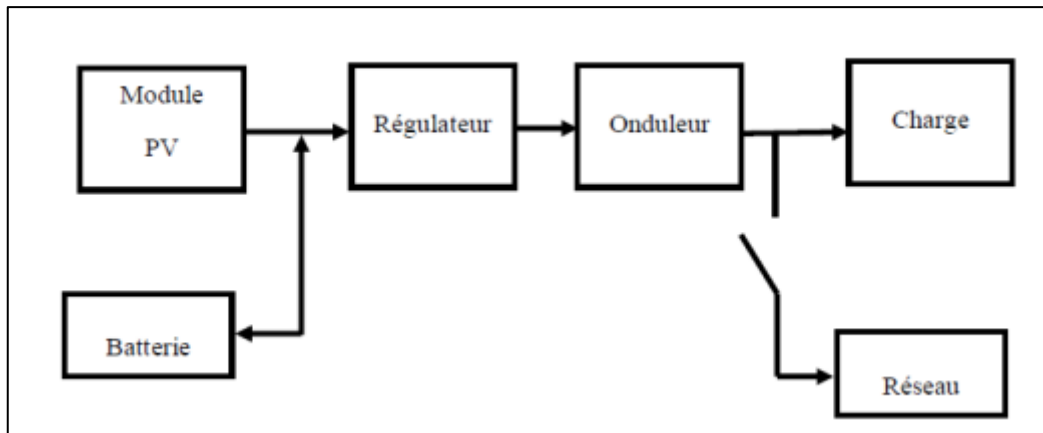


Figure I-19 : Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie

L'énergie est fournie par le module PV à la charge, l'excédent est stocké dans les batteries, dans le cas de décharge ou de surcharge de la batterie, on utilisera le réseau pour prélever ou délivrer l'énergie [10].

Modélisation de générateur photovoltaïque :

Propriétés électrique des cellules photovoltaïques :

En vue de tenir compte des phénomènes physiques parvenus au niveau de la cellule .la cellule photovoltaïque est équivalente a une source de courant pour la modélisation de flux linéaux incident shunté par une diode représentant le phénomène de polarisation de la cellule , une résistance R ,modélise les pertes ohmique de matériau qui doit être le plus faible possible et une résistance shunt R_{sh} modélise de fuite comme l'illustre la figure

I.14.Influence de l'Éclairement et de la température :

I.14.1 Influence de l'Éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 600 w/m^2 et 1200 w/m^2 avec un pas de 200, la caractéristique ($I=f(V)$) est donnée par la figures (I-15) on remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement [11].

Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement comme l'illustre la figure (I.16)

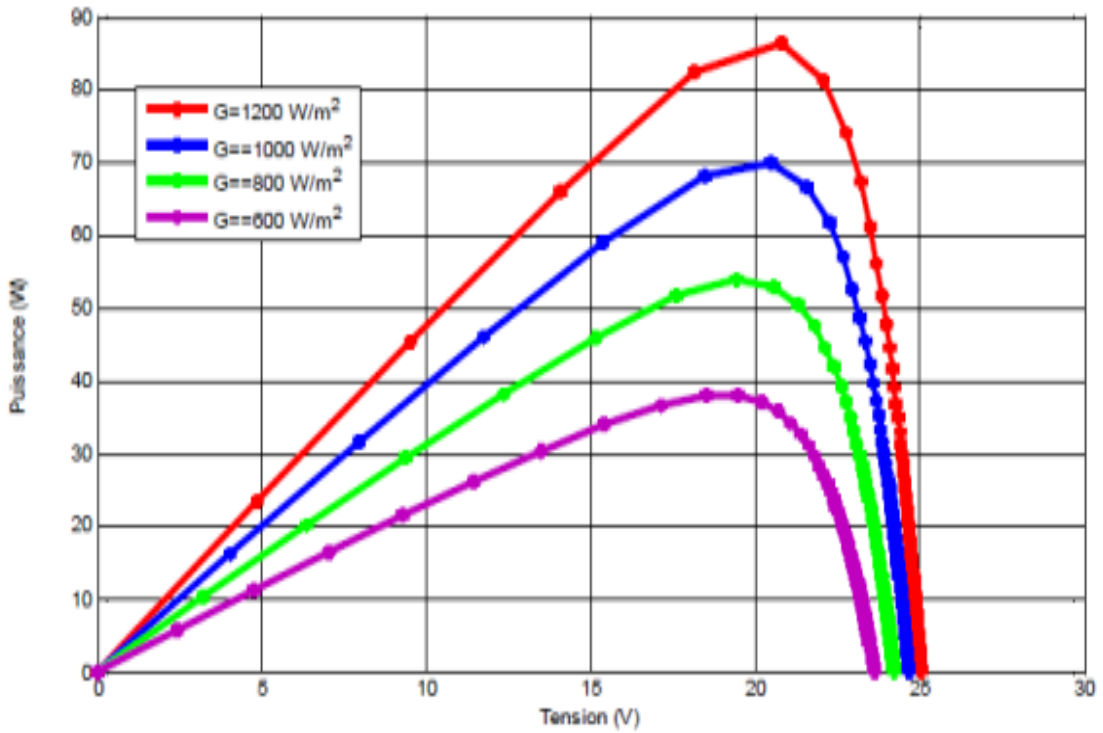


Figure I-20: Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C) [6].

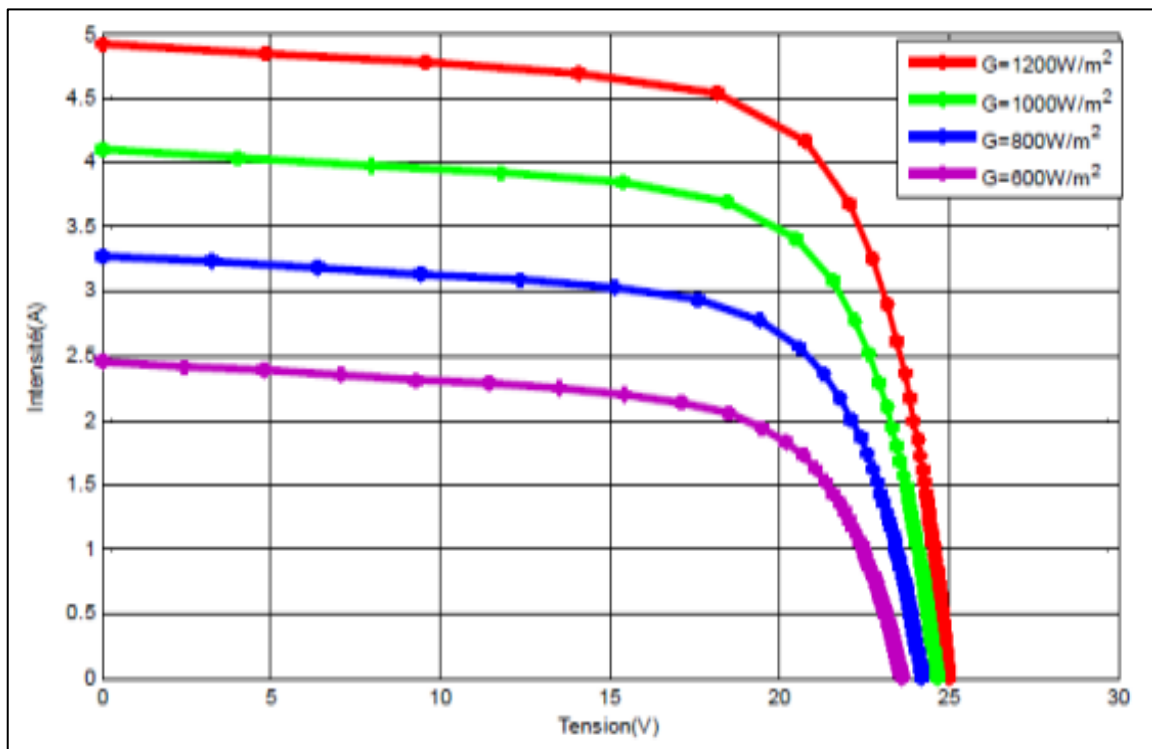


Figure I-21: Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C) [6].

I.14.2. Influence de la température :

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 55°C dans la même condition de, l'éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par la figure (II.17) on remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue figure (II.21) [11].

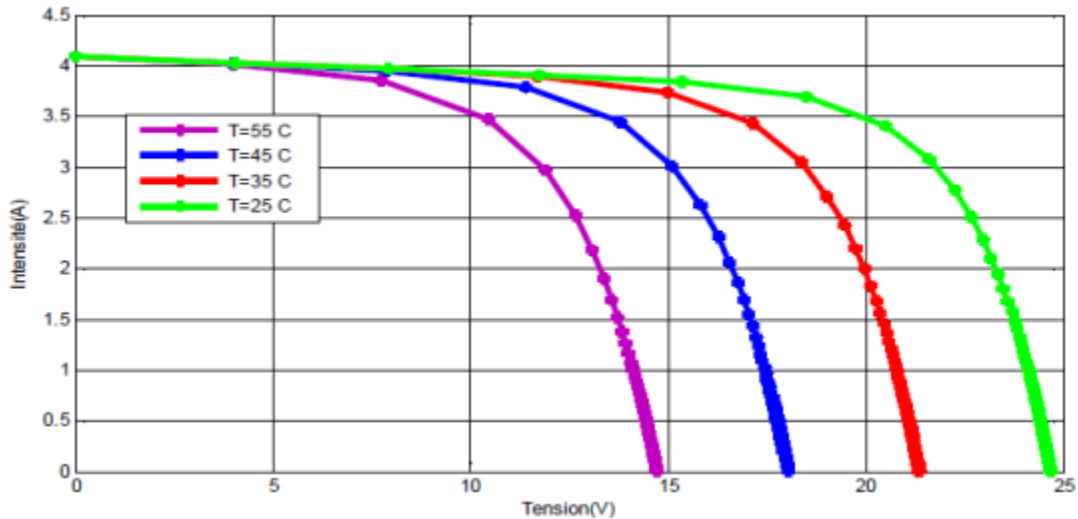


Figure I-22: Caractéristique $I(V)$ d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$) [6].

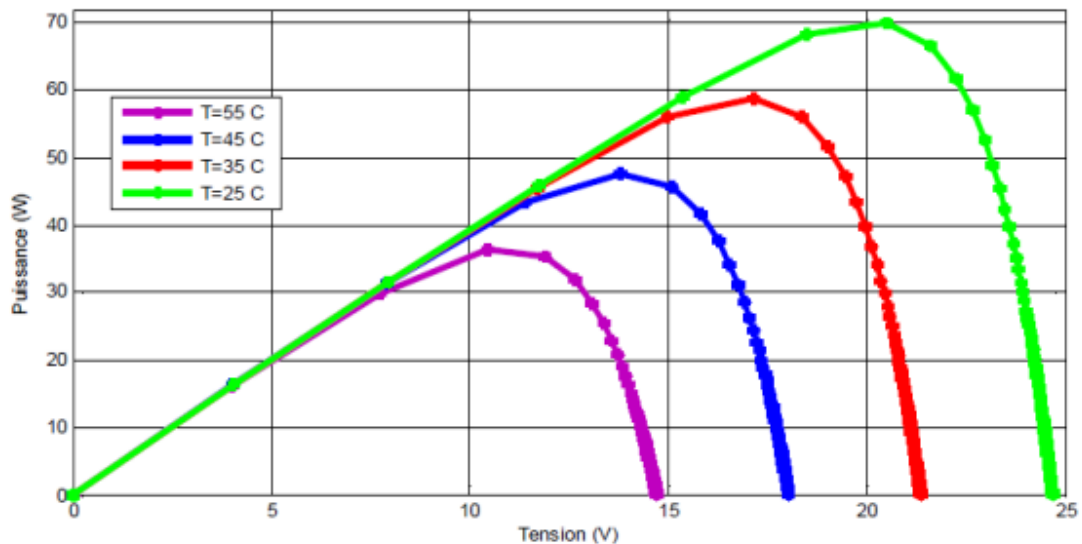


Figure I-23: Caractéristique $P(V)$ d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$) [6].

I.15 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :

I.15.1 Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages [12] :

- Haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel
- 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.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.15.2. Inconvénients :

Les inconvénients sont:

- Le cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le faible rendement de conversion de module.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le cout du système photovoltaïque augmente.
- Pollution à la fabrication [13].

Chapitre I : Modélisation du panneau solaire

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par présenter le principe de l'effet photovoltaïque et la cellule PV, ainsi que ses paramètres. Ensuite, nous avons abordé la notion de conversion photovoltaïque via des dispositifs à semi-conducteurs, en mettant l'accent sur la jonction PN. De plus, nous avons présenté une étude sur les schémas équivalents de la cellule PV, ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques et les technologies utilisées, en détaillant leurs avantages et inconvénients.

CHAPITRE II:
Convertisseurs DC-DC

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC

Introduction

Développements récents dans les systèmes de puissance basés sur les énergies renouvelables, les véhicules hybrides, les systèmes aérospatiaux, les réseaux intelligents basés sur l'énergie renouvelable et les appareils portables ont posé le défi de l'amélioration de l'efficacité énergétique. La conception de nouveaux systèmes de conversion d'énergie DC-DC est nécessaire [14].

Ces nouveaux systèmes seront composés de plusieurs sources d'énergie d'entrée, intégrées par le biais d'un système électronique de puissance à entrées multiples. Ils utiliseront un convertisseur électronique de puissance à entrées multiples capable d'accueillir différentes sources d'entrée et de combiner leurs avantages pour fournir une sortie contrôlée pour diverses applications [14]. Les convertisseurs DC-DC utilisent des opérations de commutation pour convertir une tension électrique en une autre. Ils sont populaires en raison de leur petite taille et de leur efficacité par rapport aux régulateurs linéaires (diviseurs de tension). Les convertisseurs DC-DC ont une large gamme d'applications [15].

Dans ce chapitre, nous présentons trois types de convertisseurs DC-DC (continue-continue), parmi les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour l'adaptation de la source à la charge [16].

II.1. Convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC jouent un rôle très important dans le domaine des énergies renouvelables [17].

Le hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés qui permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable, à partir d'une source de tension continue constante avec un rendement élevé, présentant la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque [18].

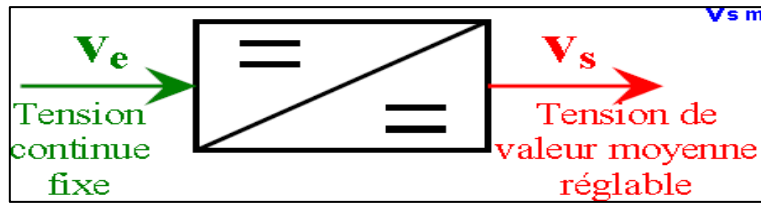


Figure II.1 : Principe de base d'un hacheur [21].

II.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source –charge à l'aide d'un interrupteur électronique.

L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout ou rien (bloqué-saturé) [19]. Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s .

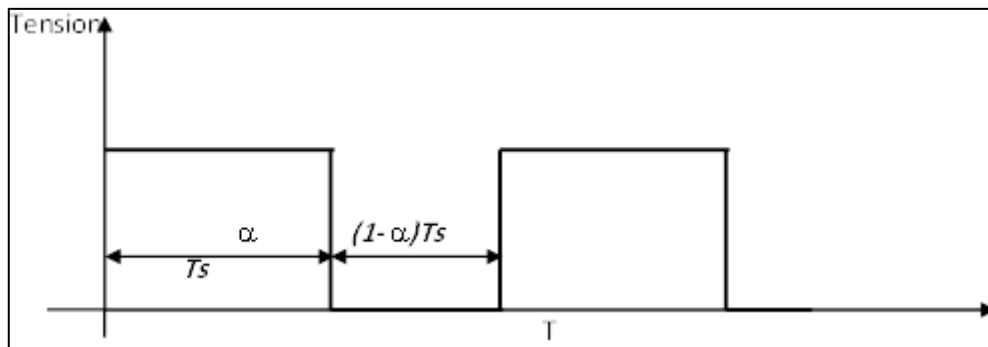


Figure II.2 : Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture / fermeture sur une période T_s .

Avec un temps de fermeture égale à $\alpha.T_s$ et un temps d'ouverture de $(1-\alpha)T_s$, où:

- T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$
- α représente le rapport cyclique du commutateur $0 < \alpha < 1$

II .2 Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire

Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteur électronique commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaire ou IGBT ou les thyristors GTO. Le principe du Hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de L'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une Tension de sortie continue réglable [16].

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les convertisseurs DC-DC sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source [16].

II.3 Types de Convertisseurs

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

- Elévateur de tension « Boost »
- Abaisseur de tension « Buck »
- Abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost »

II.3.1. Convertisseur Boost

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [15]. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive) [15].

II.3.1.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur Q (voir Figure 3) :

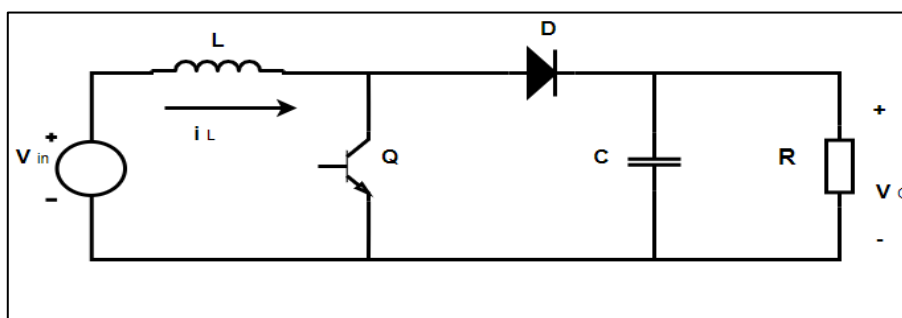


Figure. II.3 : schéma de base d'un convertisseur Boost

Lorsque l'interrupteur principal est sur ON :

C'est la phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur Q (Figur 4) est fermé (état passant), il provoque une augmentation du courant dans le flux inductance L et stocke

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC

l'énergie électrique. Ainsi une certaine quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation [17].

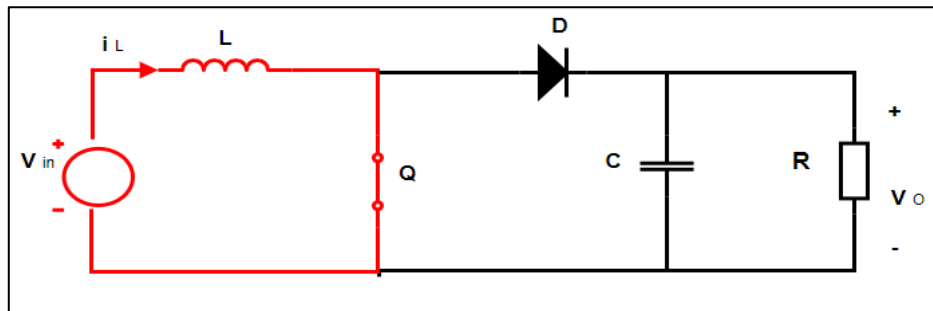


Figure.II.4 : Convertisseur boost interrupteur fermé

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit équivalent, on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(v_{in}) \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{RC}(-v_o) \end{array} \right. \quad 0 < t < dt \quad (\text{II.1})$$

Lorsque l'interrupteur principal est sur OFF

L'interrupteur est ouvert, l'inductance est en série avec le générateur et ses f.é.m. Ajouté du générateur (effet amélioré). Le courant à travers l'inductance circule ensuite à travers les diodes D, le condensateur C et la charge R. Cela conduit au transfert d'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

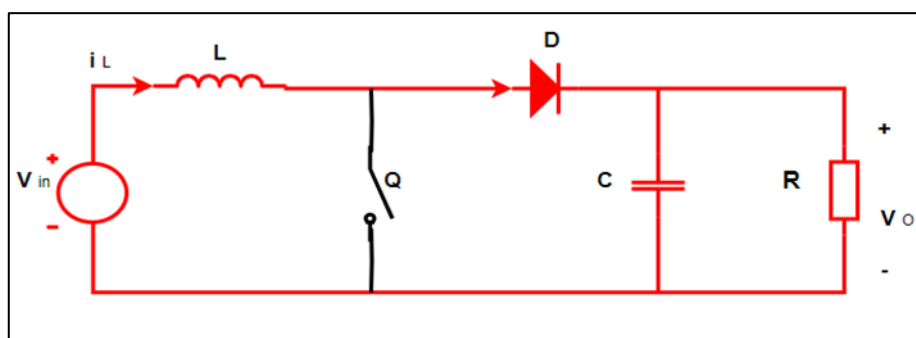


Figure. II.5 : Convertisseur boost interrupteur ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit équivalent, on trouve :

$$\begin{cases} \frac{di_l}{dt} = \frac{1}{l}(v_{in} - v_o) \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{c}\left(i_l - \frac{v_o}{R}\right) \end{cases} \quad 0 < t < dt \quad (\text{II.2})$$

II.3.1.2. Applications

On utilise un convertisseur boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les dispositifs alimentés par des batteries d'accumulateurs nécessitent fréquemment plusieurs batteries en série pour obtenir un niveau de tension suffisamment élevé. Toutefois, l'espace disponible est souvent limité, ce qui rend difficile l'utilisation d'un nombre suffisant d'éléments. Le convertisseur boost permet d'augmenter la tension fournie par les batteries et de réduire le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension souhaité. Les véhicules hybrides et les systèmes d'éclairage représentent deux exemples courants de l'utilisation des convertisseurs boost [16].

Les convertisseurs boost sont utilisés dans des applications de faible puissance comme les Systèmes d'éclairage portatifs. Une diode électroluminescente blanche nécessite une tension de 2,7 à 3,6 V environ pour fonctionner, un convertisseur boost permet d'augmenter la Tension fournie par une pile de 1,5 V afin de réaliser une lampe torche faible consommation [15].

Équipements médicaux portables : les convertisseurs DC/DC boost peuvent être utilisés dans les équipements médicaux portables tels que les pompes à insuline, les moniteurs de glucose et les respirateurs portables pour augmenter la tension de la batterie à une tension suffisante pour alimenter ces dispositifs.

Applications automobiles : Les convertisseurs DC/DC boost sont utilisés dans les véhicules pour fournir une alimentation électrique fiable et efficace aux composants électroniques tels que le système audio, les systèmes de navigation et les systèmes d'assistance à la conduite.

Énergie solaire : les panneaux solaires produisent une tension de sortie très faible, souvent inférieure à la tension requise pour alimenter les appareils électriques. Les convertisseurs DC/DC boost peuvent être utilisés pour augmenter la tension de sortie du panneau solaire à une tension suffisante pour alimenter les charges

II.3.2. Convertisseur Buck

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.

II.3.2.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur Q (voir figure) :

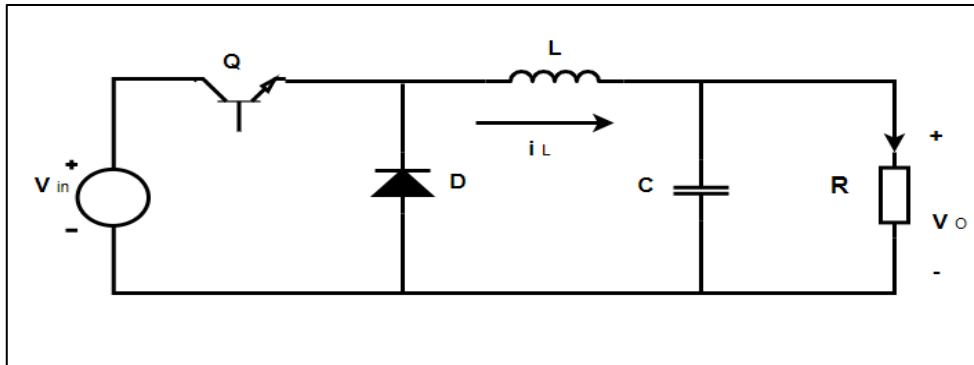


Figure. II.6 : schéma de base d'un convertisseur Buck

Dans l'état passant, l'interrupteur Q (Figure.7) est fermé, la tension V_L aux bornes de l'inductance égale $V_L = V_{in} - V_{out}$. Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.

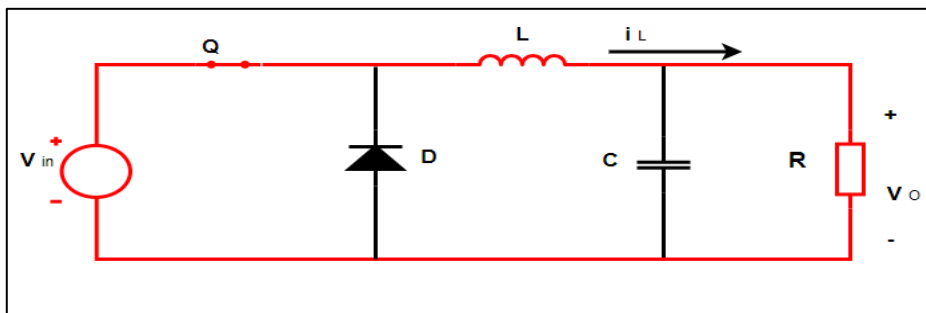


Figure. II.7 : Convertisseur buck interrupteur fermé

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit équivalent, on trouve :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}((v_{in} - v_o)) \\ \frac{dv_s}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_L - \frac{v_s}{R}\right) \end{cases} \quad 0 < t < dt \quad (\text{II.3})$$

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC

Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux borne de l'inductance vaut $V_L = -V_{out}$. Le courant traversant l'inductance décroît.

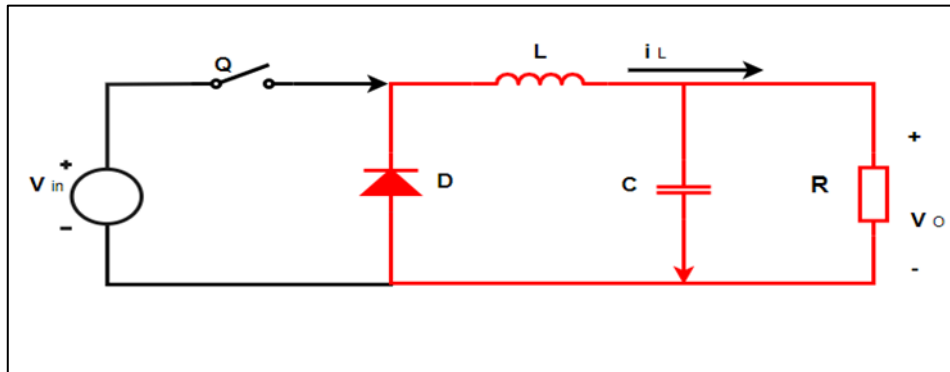


Figure. II.8 : Convertisseur buck interrupteur ouvert.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit équivalent, on trouve :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (v_e) \\ \frac{dv_s}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{v_s}{R} \right) \end{cases} \quad 0 < t < dt \quad (\text{II.4})$$

II.3.2.2. Applications

Systèmes solaires : les convertisseurs DC/DC buck sont utilisés dans les systèmes solaires pour convertir la tension continue produite par les panneaux solaires en une tension continue stable pour l'alimentation des appareils électriques.

Conversion des 12-24V fournis par une batterie d'ordinateur portable vers les quelques Volts nécessaires au processeur.

Automobile : les convertisseurs DC/DC buck sont utilisés dans les voitures pour convertir la tension continue de la batterie en une tension continue plus faible pour l'alimentation des équipements électroniques.

II.3.3. Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est un convertisseur d'alimentation qui convertit une tension DC en une autre tension DC de valeur inférieure ou supérieure mais avec une polarité inversée, il combine donc les propriétés des deux convertisseurs.

II.3.3.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur Q (voir figure 9)

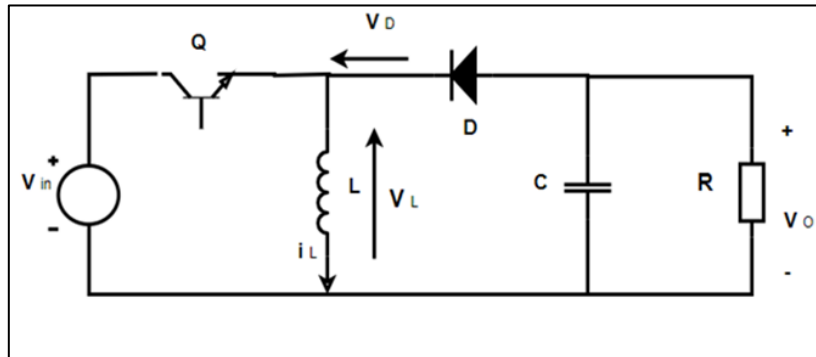


Figure. II.9 : schéma de base d'un convertisseur Back-boost

Dans l'état passant, l'interrupteur Q (voir figure) est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.

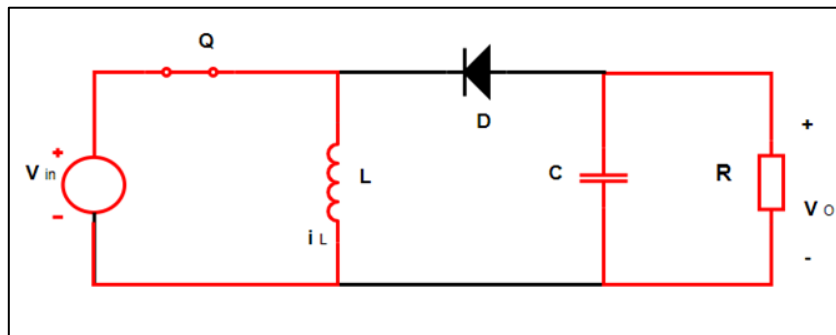


Figure. II.10: Convertisseur back- boost interrupteur fermé

Dans l'état bloqué, l'interrupteur Q est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge [20].

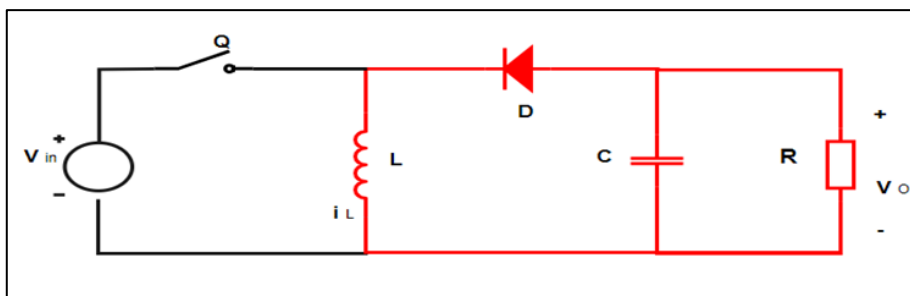


Figure. II.11 : Convertisseur back- boost interrupteur ouvert

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC

II.3.3.2. Applications

Un convertisseur DC/DC back-boost est un type de convertisseur de tension qui permet de convertir une tension continue (DC) à une autre tension continue.

Contrairement aux convertisseurs classiques qui peuvent seulement augmenter ou diminuer la tension d'entrée, le convertisseur back-boost permet de réaliser ces deux opérations avec une seule topologie.

Convertisseur d'énergie solaire : Les panneaux solaires fournissent une tension variable en fonction de la quantité de lumière solaire disponible. Les convertisseurs back-boost peuvent être utilisés pour réguler la tension de sortie des panneaux solaires afin de la rendre utilisable par d'autres appareils électroniques.

Chargeur de batterie : Les convertisseurs back-boost peuvent également être utilisés pour charger des batteries à partir de sources de tension plus faibles que la tension de la batterie. Cela est particulièrement utile dans les applications où l'espace est limité et où il n'y a pas assez de place pour une source d'alimentation plus grande.

En somme, le convertisseur DC/DC back-boost est un outil très polyvalent qui peut être utilisé dans de nombreuses applications électroniques. Sa capacité à fournir une tension plus élevée ou plus faible que la tension d'entrée le rend très pratique pour les applications qui nécessitent une régulation de la tension.

II.4. Résultat de la simulation du convertisseur DC-DC

II.4.1. Convertisseur Boost

Nous voulons concevoir un convertisseur élévateur qui produira une sortie automatique de 240 V à partir d'une source de 89 V. Conception pour une inductance DC et une ondulation de tension automatique inférieure à 5 %. La charge est une Résistance de 10 Ω qui suppose les composants idéaux de la conception.

$$V_s = 89 \text{ v} , V_{\text{out}} = 240 \text{ v} , R = 10 \Omega , r = 0.5 \% , f = 40000 \text{ HZ}$$

Calculer le rapport cyclique :

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_{\text{out}}} = 1 - \frac{89}{240} = 0.63$$

Calculer l'inductance minimale :

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2(R)}{2f} = \frac{0.63(1-0.63)^2(10)}{2(40000)} = 10.7808 \mu\text{H}$$

Calculer 25% plus grand que l'inductance minimale :

$$L = 1.25L_{\min} = 1.25(10.7808) = 13.476 \mu\text{H}$$

Calculer la capacité minimale :

$$C = \frac{D}{Rr_f} = \frac{0.63}{10(0.05)(40000)} = 31.5 \mu\text{F}$$

Résultat de la simulation

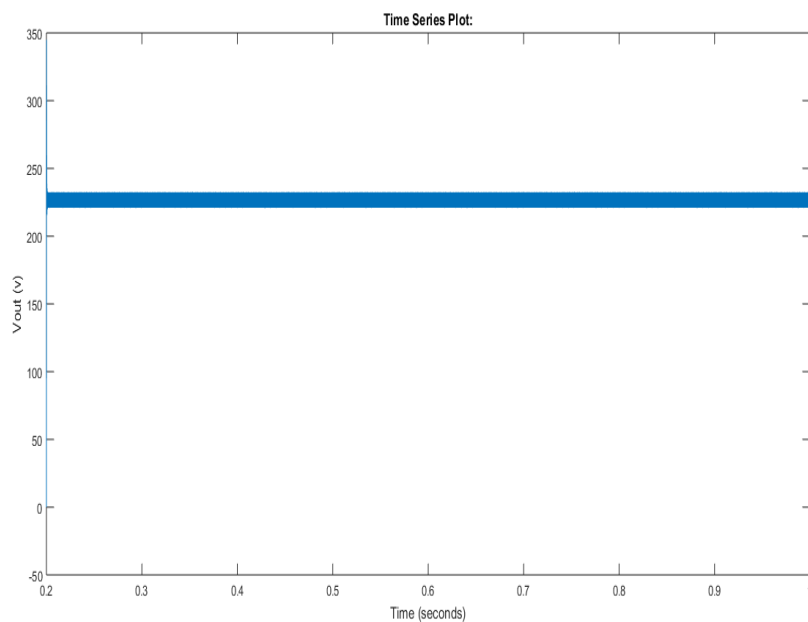


Figure. II.12 : Résultat de la simulation boost

La figure (13) montre les résultats de la simulation du Convertisseur Boost par le programme Matlab (Simulink), où nous simulons 2 cas, la tension d'entrée est réglée sur 89 v, mais le rapport cyclique est modifié 2 fois pour afficher le résultat de la tension de sortie.

Tab II.1 : Tableau de données Convertisseur Boost

Paramètres	Valeurs
Vs	89 v
L	13.476 μH
C	31.5 μF
R	10 Ω

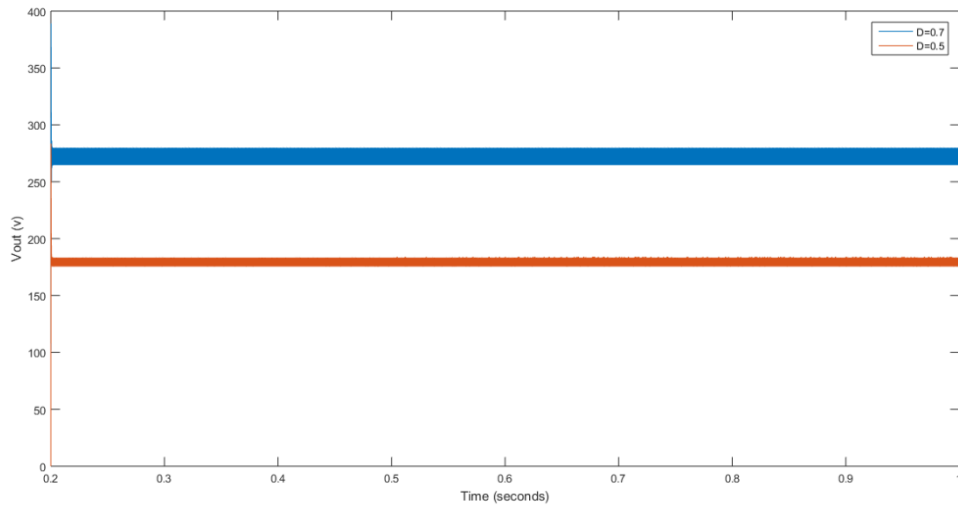


Figure. II.13 : Résultat de la simulation boost

II.4.2. Convertisseur buck

La figure (14) montre les résultats de la simulation du Convertisseur Buck par le programme Matlab (Simulink), où nous simulons 3 cas, la tension d'entrée est réglée sur 24 v, mais le rapport cyclique est modifié 3 fois pour afficher le résultat de la tension de sortie.

Tab II.2 : Tableau de données Convertisseur Buck

Paramètres	Valeurs
Vs	24 v
L	$15.53 \cdot 10^{-6}$ H
C	$25 \cdot 10^{-6}$ F
R	10 Ω

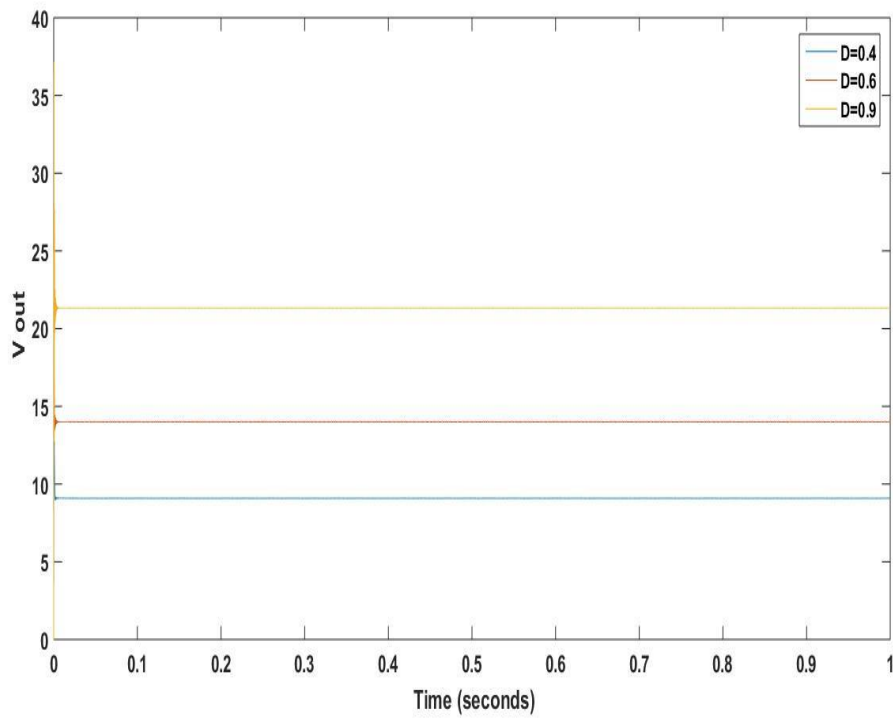


Figure. II.14 : Résultat de la simulation Back

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur les différents convertisseurs DC-DC, Il décrit les principes de fonctionnement des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost, ainsi que leurs applications dans différents domaines.

Par la suite, on a entamé la simulation de ces convertisseurs sous l'environnement Matlab/Simscape. Les résultats obtenus, ont validé nos connaissances théoriques.

CHAPITRE III :
Commande MPPT basée
sur FOPID-PSO et
Résultats de simulation

Chapitre III : Commande MPPT basée sur FOPID-PSO et Résultats de simulation

Introduction

Le contrôle des processus industriels a connu l'utilisation généralisée du correcteur proportionnelle intégrateur dérivateur (PID) pendant plusieurs décennies. Cette technique a été largement acceptée dans l'industrie en raison de sa capacité à contrôler la majorité des processus, de ses actions bien définies et de sa mise en œuvre relativement simple. Bien que plusieurs techniques existent pour régler les paramètres du PID, il convient de noter que cette méthode est moins efficace pour les systèmes complexes et non linéaires.

L'apparition du calcul fractionnaire était depuis 300 ans mais son application en automatique a été en 1990 par Alain Ousaloup [22].

En 1999, Podlubny a proposé une généralisation du correcteur PID classique appelé régulateur PID avec intégration et dérivation fractionnaires d'ordres λ et μ . Cependant, le choix des paramètres (K_p , K_i , K_d , λ , μ) pour ce régulateur reste un grand défi pour de nombreux chercheurs depuis son application dans le domaine industriel [23].

Ce chapitre se concentre les règles d'ajustement des paramètres de contrôleur PID classique et fractionnaire qui sont utilisés dans la commande des systèmes stables et instables.

II.1. Conception d'un système de commande

Le contrôle-commande d'un processus industriel est un système qui permet de surveiller et de réguler les opérations d'une usine ou d'une installation industrielle. Il est composé de capteurs qui mesurent les grandeurs physiques telles que la température, la pression, le débit, etc., ainsi que d'actionneurs qui permettent de commander les différentes parties du processus. L'ensemble est géré par une unité de calcul qui traite les données fournies par les capteurs et qui envoie des commandes aux actionneurs pour ajuster le fonctionnement du processus [24].

L'objectif du contrôle-commande est d'optimiser le fonctionnement du processus en ajustant les paramètres de façon à atteindre les objectifs de production tout en minimisant les coûts et en garantissant la sécurité des personnes et des équipements. Les commandes peuvent être effectuées de manière automatique ou semi-automatique en fonction des paramètres et des scénarios de fonctionnement préétablis.

Le contrôle-commande est un élément clé de l'automatisation des processus industriels. Il permet de garantir une qualité de production constante, de réduire les erreurs et les pertes, d'optimiser les temps de production et de réduire les coûts.

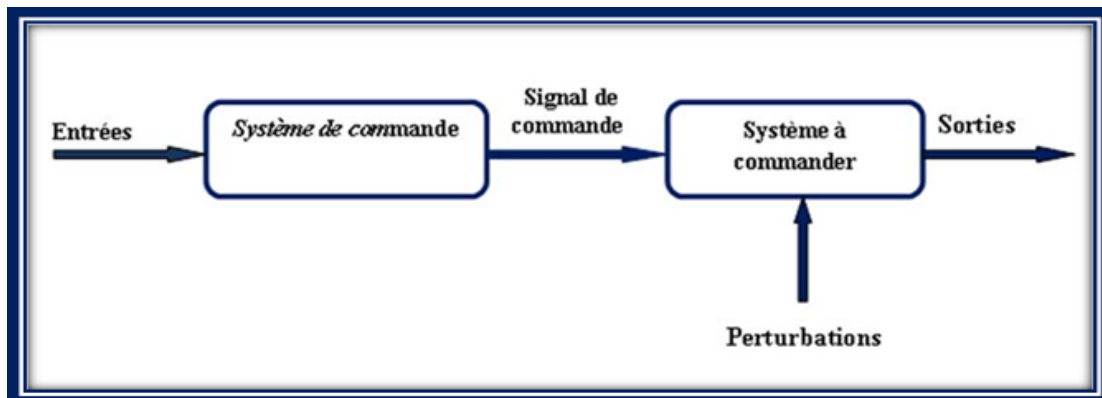


Figure. III.1 : Système de commande

Le système de commande comprend un élément nécessaire qui est le régulateur qui effectue le calcul de la commande à appliquer au processus à partir de la consigne et de l'état du processus. Lorsqu'il y a un retour d'information de la grandeur observée sur le régulateur, on parle d'un asservissement du système ou d'une régulation du système [25].

III.1.1. Asservissement

La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, n'est pas constantes et les grandeurs perturbatrices n'existent pas ou sont très peu influentes sur la grandeur à régler [26].

III.1.2. Régulation

La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, est constante et les grandeurs perturbatrices influencent fortement sur la grandeur à régler [26].

III.2. Principe général de la régulation

Dans les installations industrielles et domestiques, il est souvent nécessaire de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs déterminées malgré les variations extrêmes ou internes qui peuvent influencer ces grandeurs. Par exemple, pour régler la vitesse et la position des moteurs, il est nécessaire d'effectuer des actions appropriées sur le processus considéré. Si les perturbations sont lentes ou négligeables, un simple réglage en boucle ouverte peut suffire, mais dans la plupart des cas, ce type de réglage n'est pas suffisant et il est nécessaire de comparer en permanence la valeur mesurée de la grandeur réglée à celle que l'on souhaite obtenir et d'agir en conséquence sur la grandeur d'action.

Cela nécessite la mise en place d'une boucle de régulation ou d'asservissement, qui comprend une chaîne de moyens de mesure, de traitement de signal, d'amplification et de commande d'actionneur. Bien que la régulation soit considérée comme l'aspect le plus important dans le milieu industriel, il est également important de tester les performances et la qualité de la boucle d'asservissement. Ainsi, lorsque des modifications des entrées perturbatrices se produisent sur le procédé, la consigne est maintenue constante [25].

III.3. Qualité d'un asservissement et performances d'un système

Les principales qualités d'un asservissement sont au nombre de trois : stabilité, précision, et rapidité.

III.4. Types de système de commande

Il existe différents types de systèmes de commande, notamment

III.4.1. système de commande en boucle ouverte

Cette structure de commande est simple et peu coûteuse, mais malheureusement dans certaines applications où la précision est d'une grande importance et/ou les

paramètres du système à commander sont variantes, elle n'est pas utilisée à cause de leur imprécision [29].

On peut définir la commande en boucle ouverte comme un système où le signal de commande « d'entrée » est indépendant du signal réglé « sortie » [8].

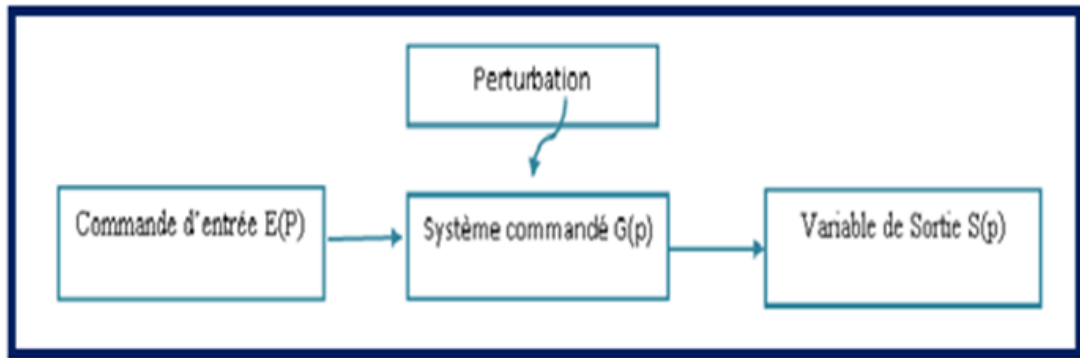


Figure. III.2 : Schéma bloc d'un système en boucle ouverte

III.4.2. Système de Commande en Boucle Fermée

Une structure de commande en boucle fermée présentée par la Figure 3 est définie comme un système où le signal de commande (d'entrée) dépend d'une façon ou d'une autre du signal de sortie. Les systèmes en boucle fermée sont couramment appelés des systèmes asservis. La structure de commande en boucle fermée (contre réaction) est capable de :

Stabiliser un système instable en boucle ouverte.

Compenser les perturbations externes

Compenser les incertitudes internes au processus lui-même.

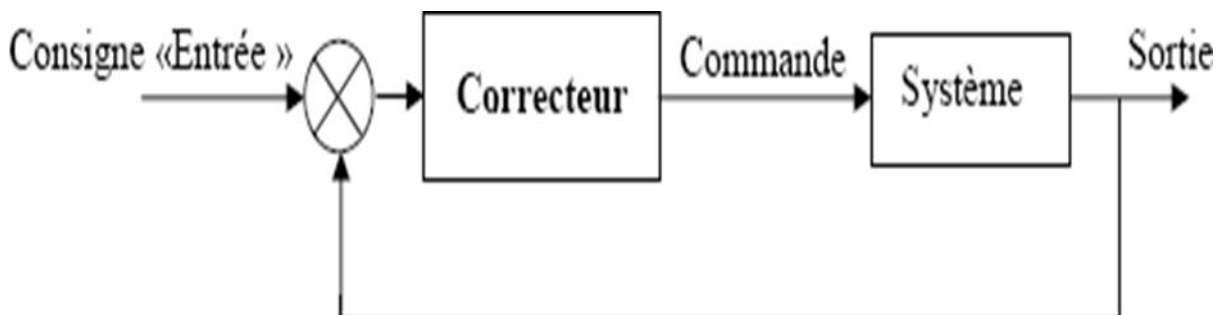


Figure. III.3: Schéma d'un système en boucle fermée

La fonction des correcteurs consiste à minimiser les écarts et à obtenir une réponse rapide du système, malgré les variations de l'entrée de référence et des perturbations. Différents types de correcteurs peuvent être utilisés, tels que ceux basés sur les actions proportionnelle, intégrale et différentielle.

III.5. Différents types de correcteurs

De nombreux régulateurs sont utilisés dans l'industrie, mais parmi les plus couramment utilisés se trouvent les régulateurs de la famille PID. Ces régulateurs sont appréciés pour leur capacité à régler les performances d'un processus modélisé du premier ordre ou du deuxième ordre en utilisant ces trois paramètres (amortissement, temps de réponse, dépassement, etc.) [29].

Il convient de noter que la plupart des régulateurs utilisent un algorithme similaire à celui du régulateur PID, même s'ils ne sont pas explicitement désignés comme tels. Cet algorithme est capable de prendre en compte les variations de l'entrée et de la sortie du système régulé, et d'ajuster la commande en conséquence pour maintenir les performances du système à un niveau optimal. En outre, l'utilisation de régulateurs PID est largement répandue en raison de leur fiabilité et de leur facilité de mise en œuvre [29].

La plupart des régulateurs comportent un algorithme identique à celui désigné par un "PID".

- P : Action proportionnelle.
- I : Action intégral
- D : Action dérivée

L'adaptation d' n régulateur aux différents systèmes s'effectue par le réglage des coefficients (paramètres) de l'algorithme.

- Paramètre k_p pour le réglage de l'action proportionnelle.
- Paramètre k_i pour le réglage de l'action intégrale.
- Paramètre k_d pour le réglage de l'action dérivée

III.5.1. Correcteur proportionnel (P) :

Ce correcteur de base est souvent utilisé pour ajuster le gain d'un système asservi, ce qui a un impact significatif sur sa précision. En optant pour un correcteur proportionnel,

la loi de commande corrigée $u(t)$ sera directement proportionnelle à l'écart $e(t)$. Cela peut permettre d'obtenir une réponse plus rapide et plus précise du système [28].

$$u(t) = k \cdot e(t) \quad (\text{III } 1)$$

La fonction de transfert du correcteur est donc :

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = k(p) \quad (\text{III.2})$$

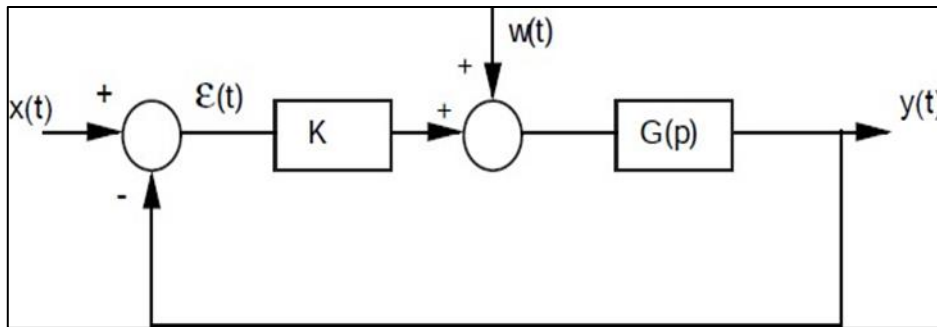


Figure. III.4 : Commande proportionnelle P.

III.5.2. Correcteur PI

Le contrôle de processus est une méthode pour ajuster les paramètres d'un système en temps réel, afin de maintenir une performance optimale. L'action proportionnelle est l'une des fonctions qui peut être utilisée pour ajuster la sortie du régulateur, en fonction de la différence entre la mesure et la consigne. Dans de nombreux cas, le correcteur intégral est également utilisé en combinaison avec le correcteur proportionnel, afin d'améliorer le régime permanent et transitoire du système. Cette technique est appelée correcteur proportionnel-intégral. Le gain du régulateur peut être ajusté en réglant les paramètres du régulateur, tels que le coefficient de proportionnalité [28].

L'équation dans le domaine temporel de ce correcteur est écrite par l'expression :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) dt \quad (\text{III.3})$$

Où $e(t)$, $x(t)$, k_p et k_i désignent respectivement l'erreur à l'instant t , la commande générée et les gains du correcteur.

La fonction de transfert du contrôleur correspondante est donnée par :

$$C(p) = k_p + \frac{k_i}{p} = k_p \left(I + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (\text{III.4})$$

Avec :
$$T_i = \frac{k_p}{k_i} \quad (\text{III.5})$$

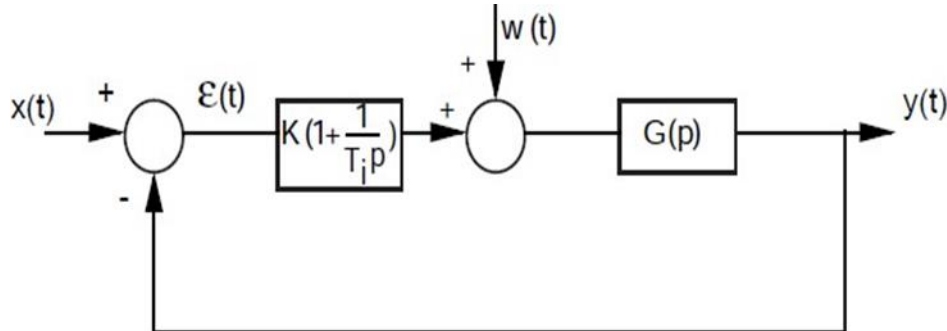


Figure. III.5: Commande PI.

L'introduction d'un correcteur PI permet d'améliorer la précision et de rejeter les perturbations de type échelon. Par contre, ce type de correcteur possède certaines limitations sur l'amélioration de la rapidité et peut même introduire une instabilité du système en boucle fermée [30].

III.5.3. Correcteur PID

Le correcteur PID est un algorithme de contrôle utilisé dans de nombreux systèmes d'automatisation industrielle pour réguler la sortie en fonction d'une entrée de référence et d'une boucle de rétroaction.

Le correcteur P agit en proportion de l'écart entre la valeur de référence et la valeur réelle. Plus l'écart est grand, plus l'effet de correction est important.

Le correcteur I agit en proportion de l'intégrale de l'écart entre la valeur de référence et la valeur réelle. Cela signifie que le correcteur I peut corriger les erreurs qui persistent même après que le correcteur P a agi.

Le correcteur D agit en proportion de la dérivée de l'écart entre la valeur de référence et la valeur réelle. Cela signifie que le correcteur D peut aider à prévoir les changements futurs et à ajuster la correction en conséquence.

En combinant ces trois types de correction, le correcteur PID peut fournir un contrôle précis et stable dans une grande variété de systèmes d'automatisation.

Le schéma général de la boucle fermée est donné par :

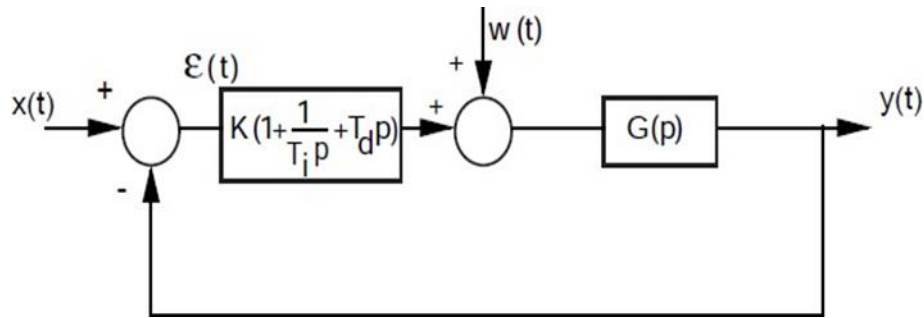


Figure III.6: Commande PID.

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. La détermination des coefficients k_p , k_i , k_d du correcteur PID permet d'améliorer à la fois la précision (k_p et k_d), la stabilité (k_d) et la rapidité (k_p , k_d).

Le réglage d'un PID est en général assez complexe, des méthodes pratiques de réglages permettent d'obtenir des bons résultats. Il est régi par la relation Suivante :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{III.6})$$

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = k_p + \frac{k_i}{p} + k_d p = k_p \left(I + T_d p + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (\text{III.7})$$

III.5.3. Les différentes structures du PID

III.5.3.1. La structure parallèle

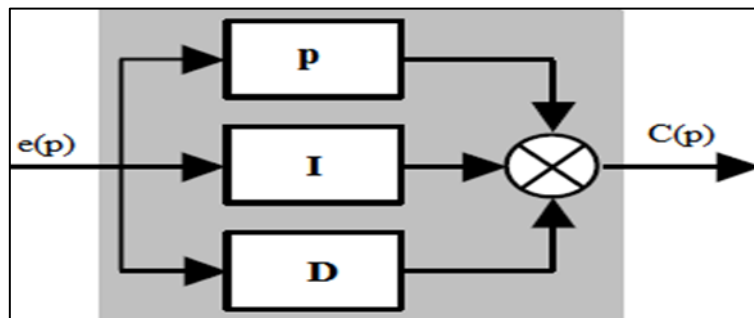


Figure. III.7: La structure parallèle

La loi de commande est de la forme :

$$C(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{III.8})$$

Soit d'après la transformée de Laplace :

$$C(p) = k_p e(p) + k_i \cdot \frac{e(p)}{p} + k_d \cdot p \cdot e(p) \quad (\text{III.9})$$

III.5.3.2. La structure mixte

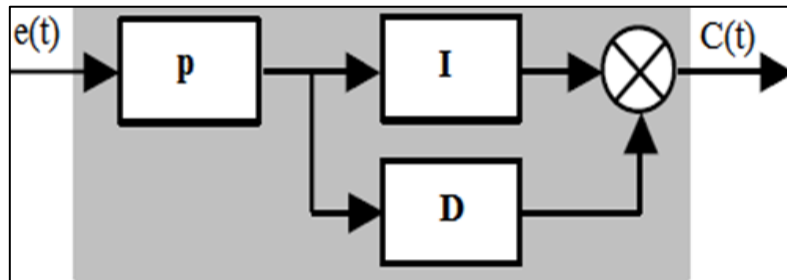


Figure. III.8: La structure mixte

Soit d'après la transformée de Laplace, La loi de commande est de la forme :

$$C(p) = k_p \cdot e(p) \cdot [k_i \cdot \frac{1}{p} + k_d \cdot P] \quad (\text{III.10})$$

III.5.3.3. La structure série

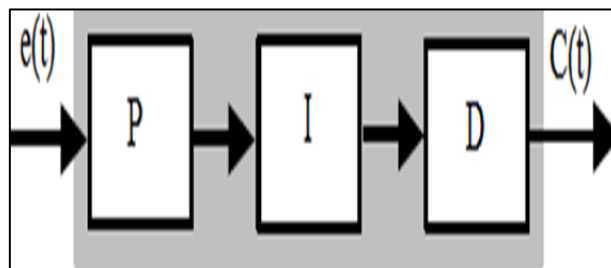


Figure. III.9: La structure série.

Soit d'après la transformée de Laplace, La loi de commande est de la forme :

$$C(p) = e(p) \cdot k_p \cdot [k_i \cdot \frac{1}{p}] \cdot [k_d \cdot P] \quad (\text{III.11})$$

III.5.4. Contrôleur $PI^\lambda D^\mu$ d'ordre fractionnaire

Récemment, les chercheurs ont constaté que l'utilisation d'un régulateur FOPID a permis d'améliorer considérablement les performances du régulateur PID conventionnel [31].

Le régulateur FOPID ($PI^\lambda D^\mu$) a été présenté pour la première fois par Podlubny (1999) comme un cas général de régulateur PID conventionnel, dans lequel l'ordre de la dérivée μ et de l'intégrale λ n'est pas un entier. En d'autres termes, le FOPID offre deux degrés de liberté supplémentaires (λ, μ) dans le réglage du contrôleur et offre de meilleures performances dynamiques que le PID classique. Ces dernières années, le contrôleur FOPID a fait l'objet d'une attention accrue dans les domaines suivants, dans diverses applications techniques telles que les systèmes de contrôle aérospatiaux, les véhicules hypersoniques, la stabilisation des systèmes à retard fractionnaire et la régulation automatique de la tension dans les systèmes électroniques de puissance [31].

Le principal avantage du contrôleur FOPID est qu'il dispose de deux paramètres réglables supplémentaires par rapport au contrôleur PID conventionnel [31].

Ces deux paramètres supplémentaires confèrent au contrôleur une plus grande flexibilité dans l'ajustement de la dynamique du système et une moindre sensibilité aux variations des paramètres.

Ces deux paramètres supplémentaires offrent au contrôleur une plus grande flexibilité dans l'ajustement de la dynamique du système et une moindre sensibilité aux variations des paramètres dans le système contrôlé. En outre, le contrôleur FOPID a une plus grande efficacité, une bonne convergence et l'obtention d'un minimum global [31].

L'équation de sortie du correcteur $PI^\lambda D^\mu$ d'ordre fractionnaire dans le domaine de temps est donnée sous la forme :

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} D^{-\lambda} e(t)] + T_d D^\mu(e(t)) \quad (\text{III.12})$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (III.12) avec les conditions initiales nulles,

La fonction de transfert de ce correcteur peut être exprimé par :

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s^\lambda} + k_d s^\mu \quad (\text{III.13})$$

Où les d'intégration k_i et de dérivation k_d sont liés aux paramètres de la forme classique par

Les relations suivantes :

$$k_i = \frac{k_p}{T_i} \quad (\text{III.14})$$

$$k_d = k_p k_a \quad (\text{III.15})$$

La fonction de transféré (s) d'un correcteur est :

$$c(s) = k_p \left(I + \frac{1}{T_i s^\lambda} + T_i s^\delta \right) \quad (\text{III.16})$$

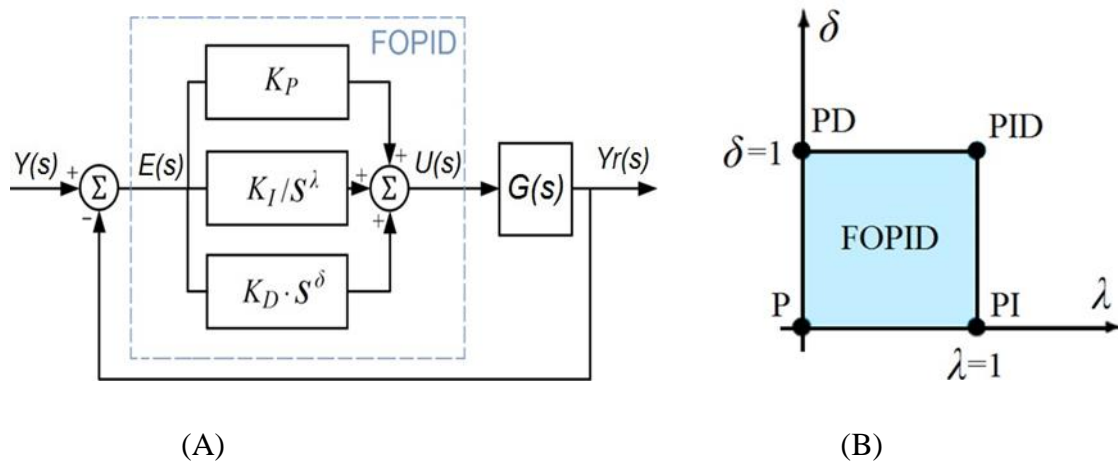


Figure. III.10: Le contrôleur FOPID : (A) structure dans une boucle de contrôle ;

(B) présentation graphique dans le plan \$\delta\$-\$\lambda\$

III.6. Réglage d'un Régulateur FOPID par PSO

III.6.1. Processus de réglage

- La clé de conception des régulateurs consiste à trouver la bonne valeur des paramètres ajustés dans chaque régulateur.
- Souvent, la sélection de ces paramètres est basée sur des essais et des erreurs.
- Pour surmonter les inconvénients de l'utilisation des essais et des erreurs dans le processus de sélection, le processus de réglage dans cette étude est formulé comme un problème d'optimisation
- Ensuite, une technique d'optimisation est utilisée pour résoudre le problème

III.6.2. Problème d'optimisation

Trouver la meilleure solution parmi l'ensemble des solutions possibles.

- ✓ Terminologie de l'optimisation.

- Objectif de la fonction
 - La fonction que l'on souhaite maximiser ou minimiser.
- Variable de décision
 - Une quantité que le décideur contrôle.
- Espace de recherche

III.6.3. Optimisation du régulateur PID et FOPID

- Variable de décision

$$\begin{array}{ll} k_p & \lambda \\ k_I & u \\ k_D & \end{array}$$

- Objective fonction :

Les indices de performance sont utilisés pour évaluer les réponses du système.

Intégrale temporelle de l'erreur absolue (TIAE) :

$$TIAE = \int_0^t t|E| dt \quad (III.17)$$

III.6.4. Optimisation par essais de particules (PSO)

- Une technique de recherche utilisée en informatique pour trouver des solutions presque optimales à des problèmes d'optimisation.
- PSO est une intelligence en essaim inspirée du comportement social et des mouvements dynamiques des insectes, des oiseaux et des poissons.
- Elle utilise un certain nombre de particules qui constituent un essaim se déplaçant dans l'espace de recherche à la recherche de la meilleure solution.
- Chaque particule dans l'espace de recherche ajuste son "vol" en fonction de sa propre expérience de vol ainsi que de l'expérience de vol des autres particules.
- Termes clés
 - ✓ Particules i
 - ✓ Toute solution possible.
 - ✓ Population N Groupe de toutes les particules.
 - ✓ Espace de recherche $[a, b]$ Toutes les solutions possibles au problème.
 - ✓ Chaque particule est supposée avoir deux caractéristiques :

- Une position x_i
- Une vitesse v_i
- ✓ Chaque particule garde une trace:
 - Meilleur personnel p_{besti}
 - Meilleur global g_{besti}

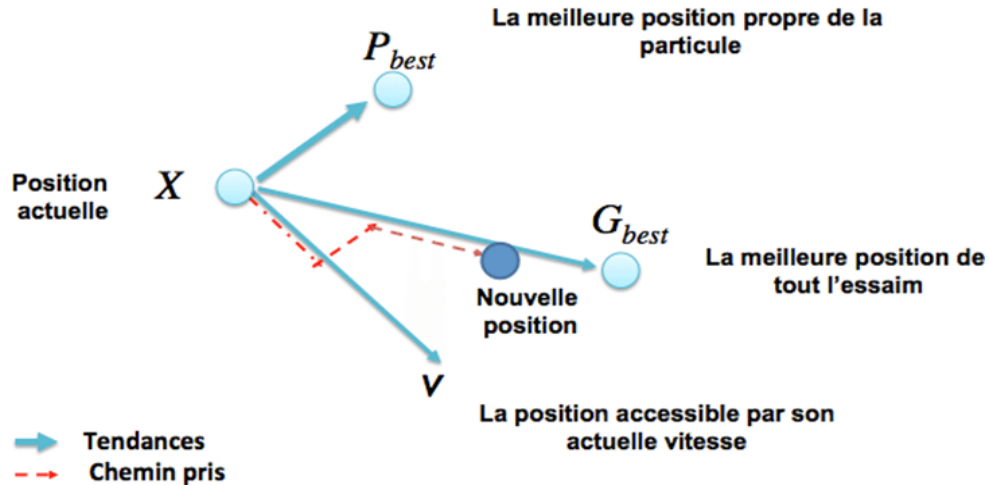


Figure III.10: Illustration géométrique du mouvement des particules dans le processus PSO Les particules sont mises à jour selon les équations suivantes.

- Procédure
- ✓ Population initiale (nombre de particules N)
 - Position initiale (x) et vitesse initiale (v)
 - Attribution du p_{besti} et du g_{besti} (sur la base de la fonction objective)
- ✓ Mise à jour
 - La vitesse et la position de chaque particule sont mises à jour

$$v_i(t) = \theta v_i(t - 1) + c_1 r_1 (p_{best,i} - x_i(t - 1)) - c_2 r_2 (g_{besti} - x_i(t - 1)) \quad (III.18)$$

$$x_i(t) = x_i(t - 1) + v_i(t) \quad (III.19)$$

- ✓ Terminaison
 - Les étapes de l'algorithme PSO sont répétées de manière itérative jusqu'à ce que le nombre maximal de générations soit atteint ou qu'un critère de terminaison soit satisfait.

Paramètres demandés à l'utilisateur :

- ✓ Taille de la population (N)

- ✓ Position initiale (x) et vitesse initiale (v)
- ✓ Poids d'inertie (0)
- ✓ La cognition individuelle et sociale (c_1 et c_2)
- ✓ Des nombres aléatoires uniformément distribués (r_1 et r_2) dans l'intervalle $(0,1)$
- ✓ Critères de terminaison (c.-à-d. nombre d'itérations T)

III.7. Discussion de simulation et résultats

Comme chacun sait, l'énergie photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable très intéressante .

Cependant, les caractéristiques non linéaires des cellules solaires et le faible rendement de conversion de l'énergie sont les principaux inconvénients .

Pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire, il est nécessaire de suivre la puissance maximale. Le point de fonctionnement optimal du réseau photovoltaïque est déterminé en pilotant le convertisseur en modifiant le rapport cyclique du convertisseur DC-DC .

Les algorithmes les plus couramment utilisés pour le MPPT dans les systèmes photovoltaïques sont basés sur pas fixe qui sont faciles à mettre en œuvre mais les problèmes d'oscillation et de précision sont inévitables .

Sont inévitables. Pour surmonter ces inconvénients, un nouvel algorithme P&O à pas variable basé sur PSO est proposé .

P&O basé sur PSO est proposé. La taille de pas variable de P&O est optimisée en pilotant le contrôleur PID

Réglé par l'optimisation par essaim particulaire. Le PSO sélectionne les valeurs des paramètres FOPID k_p , k_i et k_d et λ et μ qui optimisent le transfert de puissance à travers le convertisseur DC-DC .

Les résultats de l'algorithme PSO pour le contrôleur FOPID sont présentés dans le tableau suivant et les meilleurs paramètres qui réduisent TIAE sont les plus efficaces :

Tab III.1 : Paramètres de PID et FOPID synthèses par PSO

Paramètres	PSO-PID	PSO-PID Fractionnaire
K_P	5,8225	6,8688
K_i	8,8071	9,8806
λ	-----	0,6618
K_d	5,5903	7,8504
μ	-----	0,8484

Les valeurs de rayonnement solaire et une température variables sont appliquées au panneau photovoltaïque entrées contenues dans les figures (11 et 12) :

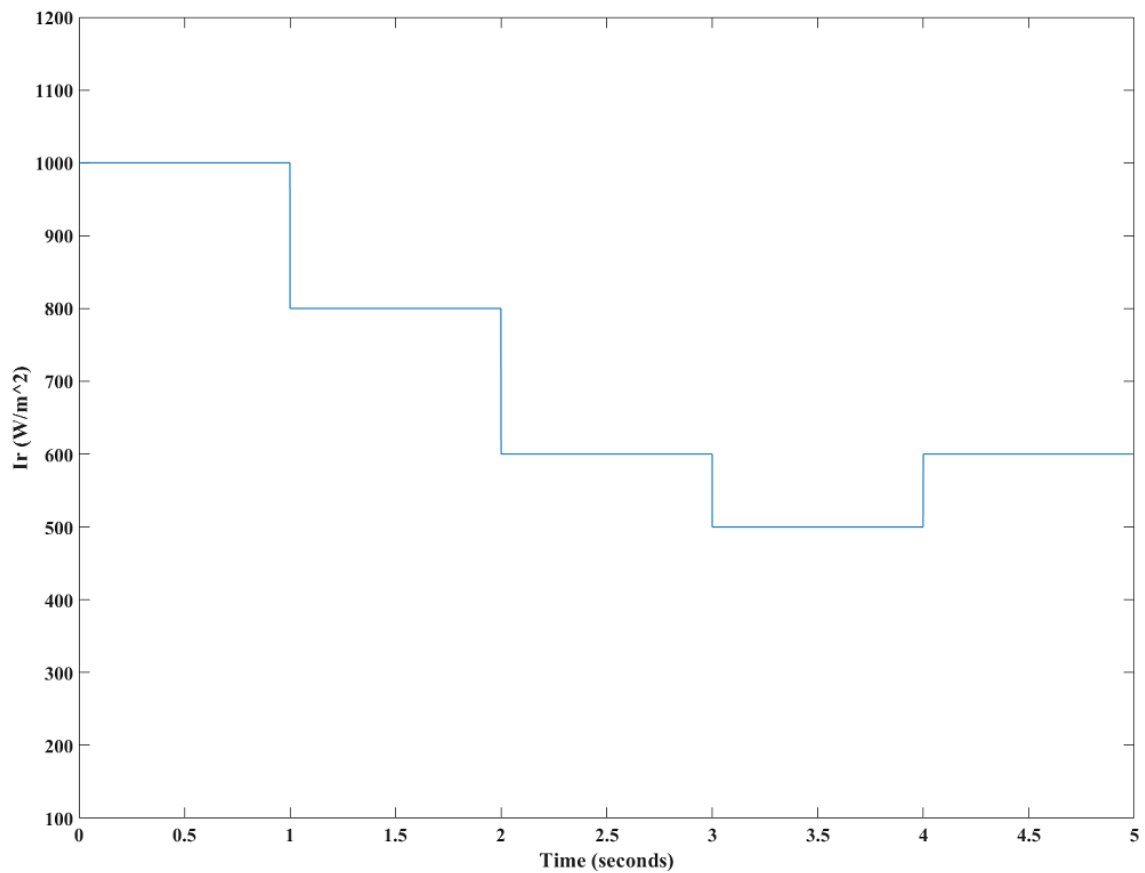


Figure. III.11: Données d'irradiation solaire.

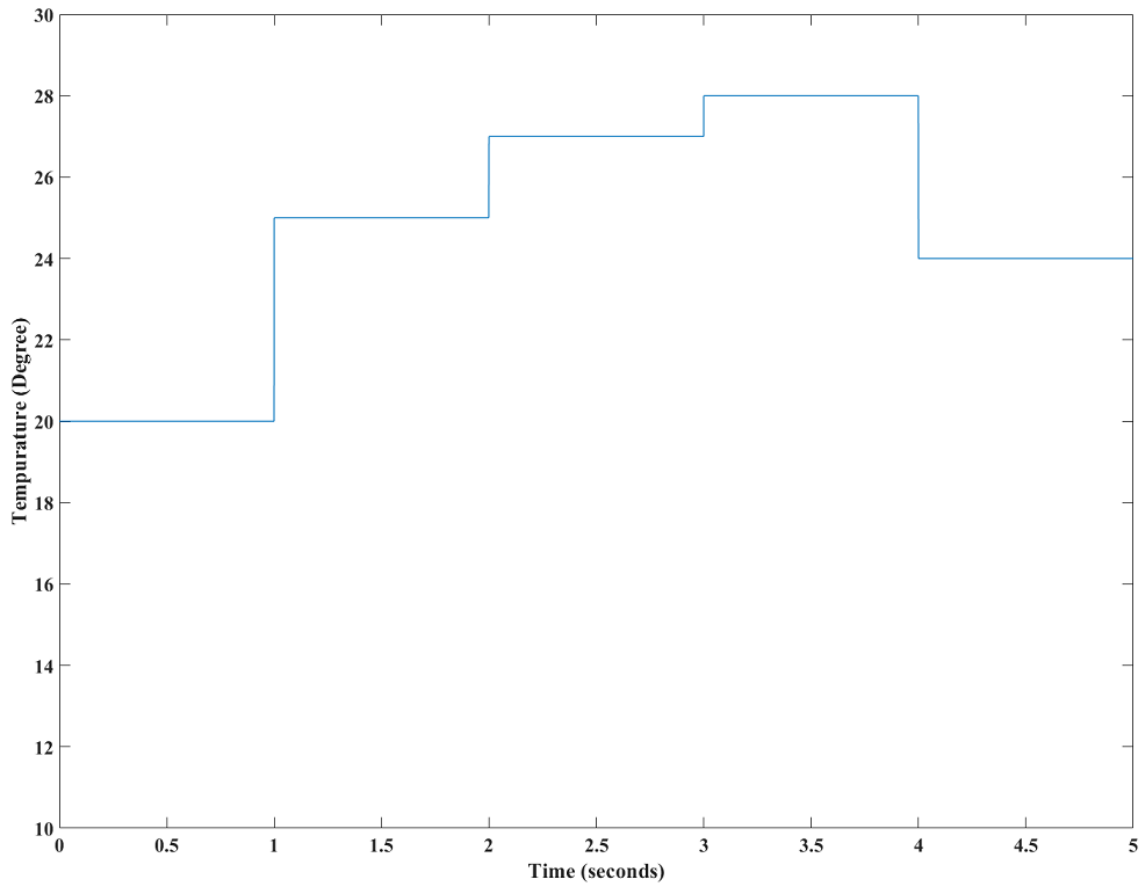


Figure. III.12: Données température.

La réponse de la puissance de la sortie panneau PV avec Le FOPID

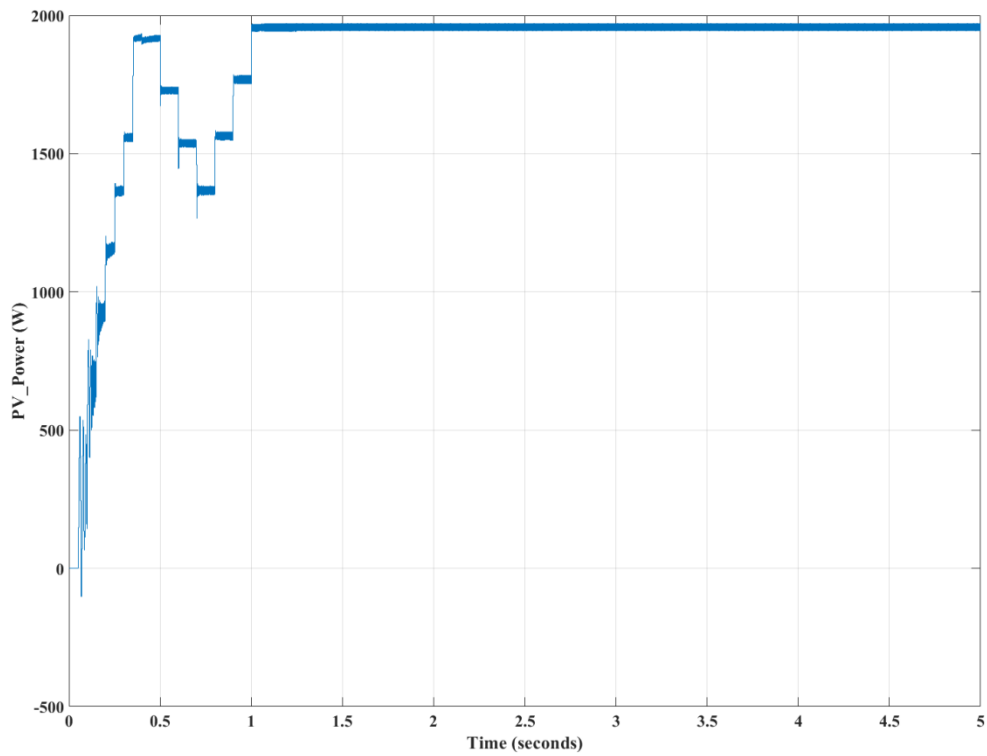


Figure. III.13: Réponse de Puissanc PV de sortie avec FOPID.

La Réponse de courant de sortie avec FOPID

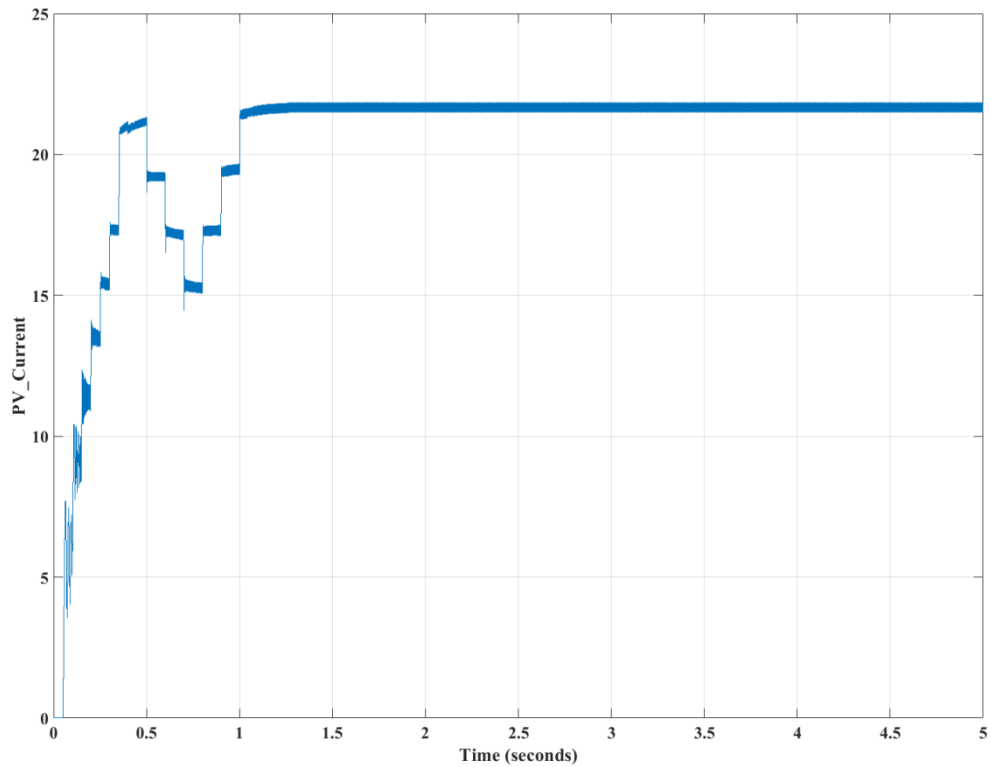


Figure. III.14: Réponse de courant PV de sortie avec FOPID

La Réponse de tension PV de sortie avec FOPID

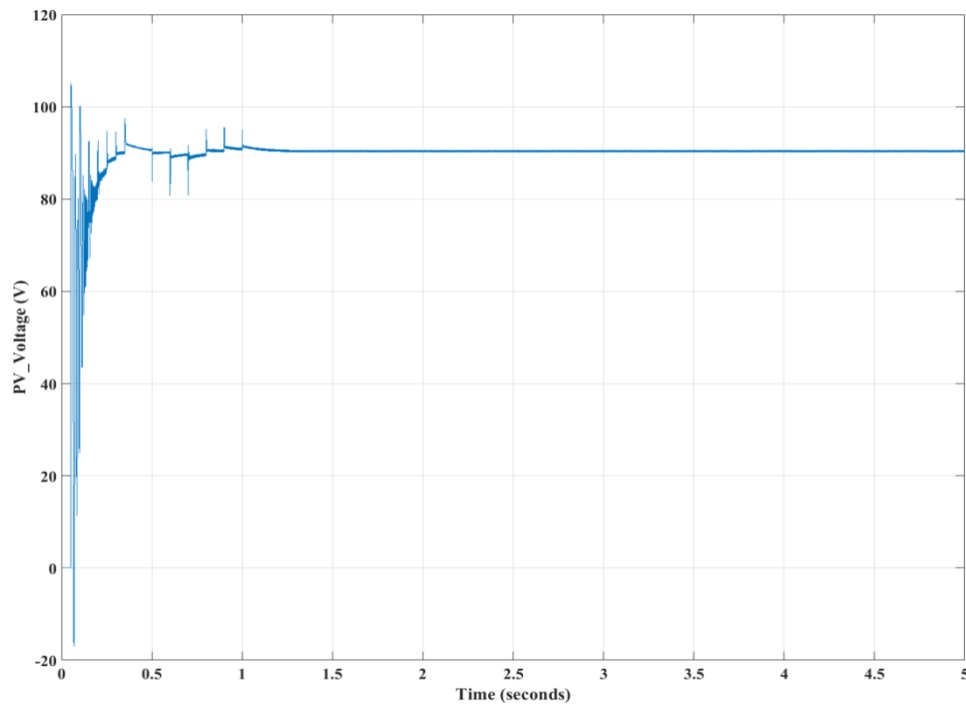


Figure. III.15: Réponse de tension PV de sortie avec FOPID

Nous notons que la courbe oscille puis se stabilise, et qu'il n'y a pas d'ondulations ou d'oscillations en régime permanent tout en maintenant un faible niveau d'erreur en régime permanent au lieu d'ondulations et d'oscillations autour de P ou (I et V) en peu de temps, ce qui indique que la simulation se passe bien.

Alors qu'il y a amélioration au temps de réponse .

La Réponse de Puissanc de sortie boost

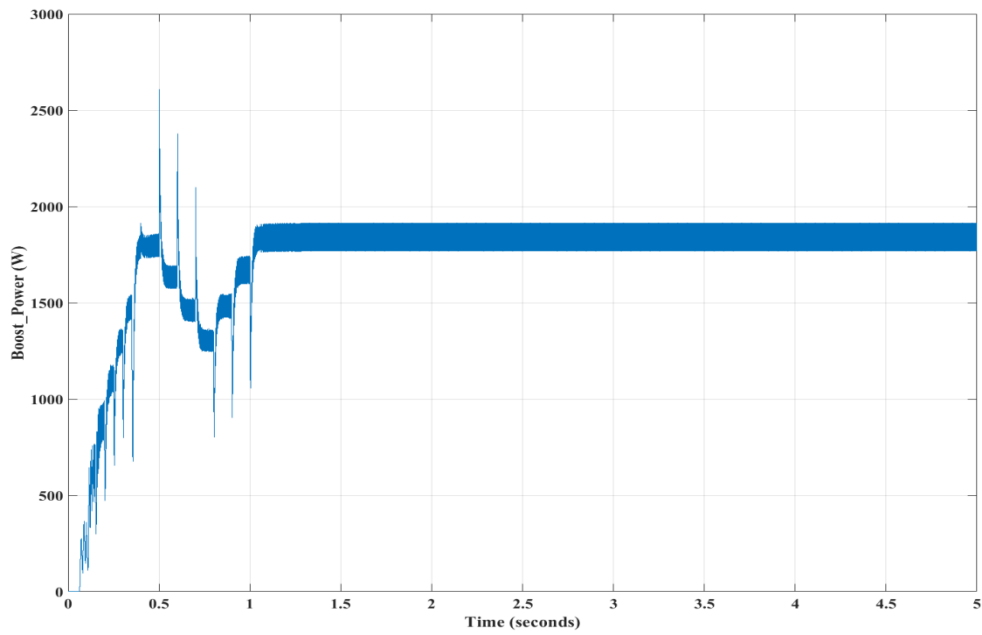


Figure. III.16: Réponse de Puissanc Boost

La Réponse de courant Boost de sortie

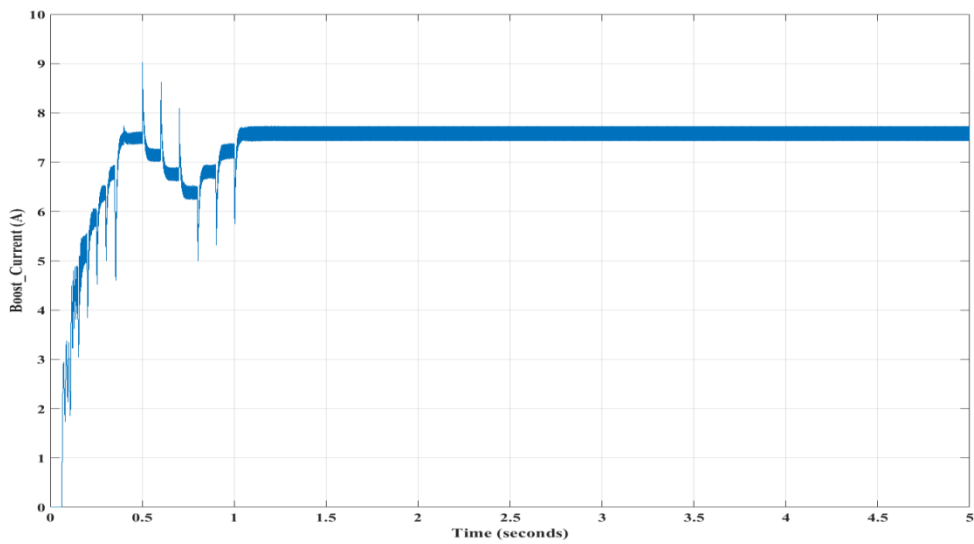


Figure. III.17: Réponse de courant Boost

Réponse de tension Boost

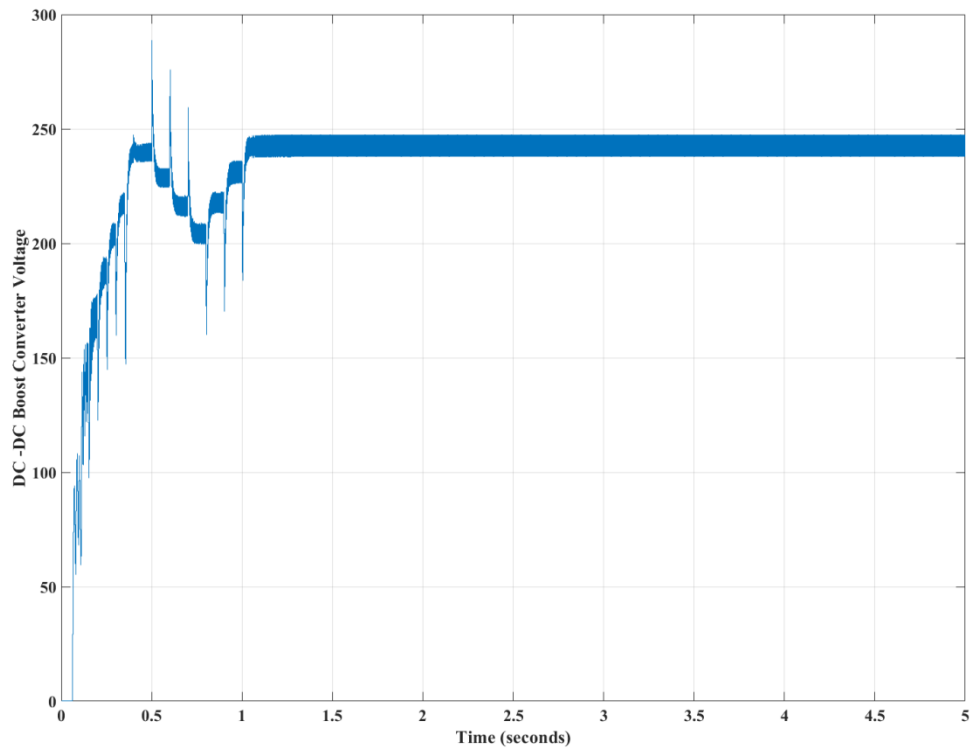


Figure. III.18: Réponse de Tension Boost

convertisseur Boost Augmente la tension d'entrée pour une tension de sortie supérieure valeur.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a été présenté l'application de l'algorithme PSO pour l'auto-ajustement de la prise en charge d'un contrôleur FOPID utilisé pour le contrôle de la système photovoltaïque.

Les tests de robustesse prouvent la fiabilité et l'efficacité de l'algorithme PSO-FOPID à pas variable P&O MPPT proposé.

Les résultats montrent l'amélioration apportée par l'algorithme proposé en dynamique et en régime permanent, ce qui a un impact direct sur la réduction du gaspillage d'énergie.

**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour les travaux de recherche, nous avons utilisé l'optimisation de l'essaim de particules, une méthode d'inspiration biologique, pour trouver les gains optimaux du contrôleur FOPID. Ce contrôleur est utilisé pour réguler la taille des pas variables de la turbulence et superviser l'algorithme de puissance maximale en fonction d'un indicateur qui combine les performances transitoires et constantes de l'état. Les paramètres du contrôleur FOPID sont calculés en utilisant d'abord l'optimisation PSO. Ensuite, nous avons simulé l'algorithme P&O MPPT (Maximum Power Point Tracking) à l'aide du modèle Matlab/Simulink, en prenant en compte différents aspects du système et des paramètres.

Les résultats de la simulation démontrent l'efficacité de l'algorithme à pas variables PSO-FOPID proposé pour améliorer la précision, la vitesse, l'ondulation et le dépassement. Nous avons également évalué la robustesse de l'algorithme PSO-FOPID en utilisant un diagramme de rayonnement solaire et de température aléatoire.

De plus, nous avons réalisé des tests de durabilité de l'algorithme PSO-FOPID avec le MPPT à pas variables, dans des conditions de lumière solaire et de température aléatoire. Ces tests sont considérés comme les plus difficiles pour tous les contrôleurs MPPT. Les résultats ont démontré des performances élevées et une bonne efficacité de l'algorithme PSO-FOPID.

Conclusion générale

REFERENCES

Références

Références

- [1] DJESSAS ZAHIRA : « Extraction des paramètres physique d'une cellule solaire a deux exponentiels par la méthode des algorithmes génétique », Mémoire magister, Université Ferhat Abbas–SETIF ,2010
- [2] Luc Chancelier et Eric Laurent «l'électricité solaires» Edition : GRET. Ministère de la coopération. France. 1996.
- [3] solarelectripower.org
- [4] S.ABOUDA. « Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïque » Thèse. Université de Reims Champagne-ardenne.2015
- [5] A. Ould Mohamed Yahia et al « étude et modalisation d'un générateur photovoltaïque » revue des Energie Renouvelables Vol.11 N° 3 2008 pp 473-483, 2008.
- [8] BELHOUR Souad. Elaboration d'une stratégie optimale pour l'exploitation combinée des énergies renouvelables. Energétique. Université des Frères Mentouri-Constantine 1. 2016.
- [9] DJESSAS ZAHIRA : « Extraction des paramètres physique d'une cellule solaire a deux exponentiels par la méthode des algorithmes génétique », Mémoire magister, Université Ferhat Abbas–SETIF ,2010.
- [10] GUEDAOURIA H., ‘‘ Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar ‘’, Mémoire de Master, Université Tahrir Mohammed Bechar, 2017.
- [11] AMRANI ABDERRAHIM et BEN GLIA RAMDANE : « Modélisation et Optimisation d'un système photovoltaïque interconnecté au réseau électrique », Mémoire Académique L'Université Echahid Hamma Lakhdar, d'El Oued 2017.
- [12] D. U. Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaic», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004.
- [13]. BELHOUR Souad. Elaboration d'une stratégie optimale pour l'exploitation combinée des énergies renouvelables. Energétique. Université des Frères Mentouri-Constantine 1. 2016
- [14] I.-B. Zubair Rehmann, "MultiinputDC–DC converter sin renewable energy applications – An overview," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 41, no. Journal pompage: www.elsevier.com/locate/rser, p. 521, (2015).

Références

- [15] B. M. e. D. B. Anes, Étude et réalisation des convertisseurs DC-DC de type Boost et Buck, Université Mohamed Khider de Biskra: MÉMOIRE DE MASTER, Le : lundi 27 juin 2022.
- [16] A. safà, Réalisation d'un convertisseur BUCK - MPPT, Université LARBI BEN M'HIDI Oum El-Bouaghi: MEMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master LMD Spécialité : Génie Electrique, Année Universitaire : 2016/2017.
- [17] Etude, Modélisation et Contrôle Robuste des Systèmes Photovoltaïques à Deux Etages, UNIVERSITE SAAD DAHLAB, BLIDA 1: MASTER EN ENERGIE RENOUVELABLE., Promotion 2020-2021.
- [18] B. L. M. Ammar, Etude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS., UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA: Mémoire MASTER ACADEMIQUE, Année universitaire 2020/2021.
- [19] M. A. Nabil, Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE: MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTRONIQUE Option : Photovoltaïque, Année universitaire 2008/2009.
- [20] B. ILYAS, Conception D'un Hacheur Buck-, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE DE CONSTANTINE DEPARTEMENT EEA Spécialité : ELECTROTECHNIQUE: RAPPORT MINI PROJET, Année Académique 2017/2018.
- [21] M. Z. A. I. d. e. G. E. d. l. d. Batna, ETUDE EXPERIMENTALE D'UN CONVERTISSEUR DC/DC CONTROLER PAR UNE COMMANDE ROBUSTE, UNIVERSITE DE BATNA FACULTE DE TECHNOLOGIE: Mémoire de Magister En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique Option : Commande électrique, Soutenu le : 26/06/2014 devant le Jury.
- [22] Eddine, Bay Mohamed Mamoun Zerguine Saif. Synthèse d'un contrôleur PID fractionnaire utilisant PSO. Université Larbi Tébessa – Tébessa – : MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique En : Automatique, Promotion : 2020 /2021.
- [23] Podlubny, I. ' Fractional order systems and PI λ D μ controllers'. s.l. : ', IEEE Transactions on automatic control., 1999 . Vol. 44, No. 1, pp 208-214.
- [24] Meguetta, Zine-Eddine. Méthodologie de Conception Sûre de Fonctionnement d'un Système de Contrôle/Commande. Français. : THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE LILLE ' 1, Soutenu publiquement le 20 Juillet 2015. HAL Id: tel-01742007.

Références

[25] Boukerche, Ghania. Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application. جامعة باجي مختار-عنابة: MEMOIRE DE MASTER DOMAINE: Sciences et Technologies FILIERE: Électrotechnique OPTION: Commande des Systèmes industriels. Promotion: juin 2017.

[26] Amine, Bensaoula Mohamed. Conception du Contrôleur PID pour le Moteur à Courant Continu (MCC) à Excitation indépendante Simulation sous Matlab/Simulink. UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA : MÉMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, Année 2019.

[27] EH, Philippe de Larminat. : Commande des systèmes linéaires. S.I. Automatique.

[28] Nedjmeddine, • BOUTANA Walid • YKHELFOUNE. Etude comparative en simulation entre un régulateur PID et un régulateur flou. Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel : Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master en Electronique Option : Electronique des systèmes embarqués, Promotion : Juillet 2019.

[29] Elhachemi, DEHANE Mohamed amine BOUKHRIS Mohamed. Régulation de vitesse d'un machine asynchrone commende par DTC. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA : Mémoire MASTER ACADEMIQUE Domaine : Sciences et technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Machine électrique et électronique de puissance, Année universitaire 2013/2014.

[30] Mangaroo, Eric. "Cours de régulation". Université de Caen, France.

[31] Bouchafaa, Boualam Benlahbib*Farid. Fractional order PID controller for DC link voltage regulation in hybrid system including wind turbine- and battery packs- experimental validation. Algiers, Algeria : Faculté d'Electronique et d'Informatique USTHB, Algiers, Algeria, Int. J. Power Electronics, Vol. 10, No. 3, 2019

[32]. DAHHANI, Omar. Optimisation et commande d'un système énergétique renouvelable hybride. En vue de l'obtention du titre de : Docteur Spécialité : Génie électrique Laboratoire d'électronique, Signaux-Systèmes et Informatique : Centre d'études doctorales „,sciences et technologies“ Fès, Maroc, Soutenue le 03/11/2018 devant le jury composé de .

Sites:

[6].<http://wzeu.ask.com/r?t=p&d=eu&s=uk&c=a&app=a16&dqi=&askid=&l=dis&o=38302770&oo=38302770&sv=0a65290d&ip=29621b59&id=B4011E3025F896AF23B4A41C3E046CB0&q=Une+cellule+photovolta%C3%AFque+%28ou+photopile%29+est+un+dispositif+qui+transforme+l%27%C3%A9nergie+lum.>

Références

[7].<https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/12>.