

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Électromécanique

Présenté par

ABADLI Moussa – NISSE Brahim et ZAOUI Houssam Eddine

Thème

**Etude et amélioration le rendement d'un système
photovoltaïque en utilisant les cellules PV
multi-jonction**

Dédicaces

*Je dédie ce modeste mémoire au bon dieu qui
nous a aidé à réaliser ce travail.*

A la belle mémoire de mon père : Mouhamed.

*Ma très chère mère : merci pour ta douceur
ton encouragement et tes précieux conseils.*

*A ma chère épouse, merci pour ta patience
et ton aide.*

*A mes adorables petits enfants : Abderrahmane,
Khalil et Firas que dieu vos bénisses.*

A toutes ma grande famille.

*A Mes deux partenaires : NISSE Brahim
et ZAOUI Houssam Eddine*

A tous ce qui m'aime de prés et de loin.

ABADLI Moussa

Dédicaces

*Merci Allah mon dieu de nous avoir donné
la capacité d'écrire et de réfléchir,
la patience et la force d'y croire jusqu'au bout du
rêve
et le bonheur de lever nos mains vers le ciel
et de dire : "Ya hay ya kayoum"*

*Je dédie ce modeste travail
à ceux qui m'ont donné la vie,
le symbole de tendresse, qui se sont sacrifiés
pour mon bonheur et ma réussite
à : Ma mère Mes grandes mères et grand père
à mes adorables enfants à tous ceux qui
m'aiment.*

*Mes deux partenaires : ABADLI Moussa
et ZAOUI Houssam Eddine
Je dédie ce travail.*

NISSE Brahim

Dédicaces

*Merci Allah mon dieu de nous avoir donné
la capacité d'écrire et de réfléchir,
la patience et la force d'y croire jusqu'au bout du
rêve*

*et le bonheur de lever nos mains vers le ciel
et de dire : "Ya hay ya kayoum"*

*Je dédie ce modeste travail
à ceux qui m'ont donné la vie,
le symbole de tendresse, qui se sont sacrifiés
pour mon bonheur et ma réussite
à : Ma mère Mes grandes mères et grand père
à mes adorables enfants à tous ceux qui
m'aiment.*

*Mes deux partenaires : ABADLI Moussa
et NISSE Brahim*

Je dédie ce travail.

ZAOUI Houssam Eddine

Remerciements

Avant tout, tous nos remerciements à ALLAH,
Dieu le tout puissant pour nous avoir donné
le courage,
La force et la volonté pour accomplir ce
travail.

Nous tenons à remercier nos encadrateurs
GUIA Hossem et BEGGAT Feteh pour leurs
conseils et leurs soutiens.

Nous remercions également tous les
enseignants de l'électromécanique de
l'université d'El-Oued.

Nos remerciements aussi aux membres de
jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y
apporter leur soutien.

Résumé

La puissance de sortie d'un générateur PV dépend d'un quelques nombre des paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des méthodes MPPT. Il existe des techniques MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et les techniques avancées, telle que la MPPT floue. Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab/Simulink, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT flou sont bien meilleures que ceux du contrôleur MPPT P&O.

Mots clés : PV, convertisseur DC-DC, MPPT. P&O, logique floue.

Abstract :

The output power of a generator PV depends on a some of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc. Because of the highly nonlinear electrical characteristics of PV cells and their associations, the system performance can be improved by PV based solutions MPPT methods. There are techniques MPPT classical commonly used, namely the perturbation and observation (P&O) and the techniques called advanced, such as fuzzy MPPT. This thesis presents a comparative study of different techniques MPPT to analyze, simulate, and evaluate the overall system PV power under varying operating conditions. To do the mathematical models of system components PV (GPV, DC-DC converter, load) have been developed. Simulation results, obtained using Matlab Simulink tool, showed that in general the performances of fuzzy controller in maximum power tracking of PV array is much better than the P&O MPPT controller.

Key words: PV, converter DC-DC, MPPT, P&O, fuzzy logic.

Liste des Figures

CHAPITRE I État de l'art des techniques d'améliorer le rendement d'un système photovoltaïque

Figure .I-1. Principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire	5
Figure .I-2. <i>Schéma simplifié d'un système photovoltaïque</i>	6
Figure .I-3. Module photovoltaïque.....	7
Figure .I-4. Cellule PV.....	8
Figure .I-5. Différent types d'onduleurs photovoltaïque, le monophasé, l'hybride et le micro-onduleur.....	12

CHAPITRE II Etude et modélisation des cellules solaires à triples-jonctions

Figure .II-1. Circuit équivalent d'une cellule du modèle à une seule diode.....	16
Figure .II-2. Circuit équivalent d'une cellule du modèle à double diodes.....	18
Figure .II-3. La structure de la cellule solaire à triple-jonction utilisée dans cette étude ..	21

CHAPITRE III Commande MPPT Basée sur l'Approche Floue

Figure .III-1. MPPT floue.....	25
Figure .III-2. Schéma Fonctions FUZZY MPPT sous MATLAB/SIMULINK.....	27
Figure .III-3. Fonctions d'appartenance de la variable E (MPPT floue type I).....	27
Figure .III-4. Fonctions d'appartenance de la variable ΔE (MPPT floue type I).....	27
Figure .III-5. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD (MPPT floue type I).....	28
Figure .III-6. Fonctions d'appartenance de la variable ΔP (MPPT floue type II).....	28
Figure .III-7. Fonctions d'appartenance de la variable ΔV (MPPT floue type II).....	28
Figure .III-8. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD (MPPT floue type II).....	28
Figure .III-9. Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue.....	30
Figure .III-10. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type I.....	30
Figure .III-11. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type II.....	31

CHAPITRE IV Simulation, Résultat et discussions

Figure IV.1 Schéma bloc sous Simulink du système global.....	33
Figure IV.2 Déploiement I_{ph} détaillé.....	34

Figure IV.3 Déploiement I_{0_ref} détaillé.....	34
Figure IV.4 Déploiement I_{pv} détaillé.....	34
Figure IV.5 Déploiement I_0 détaillé.....	35
Figure IV.6 Modèle de simulation du GPV.....	35
Figure IV.7 Schéma de block de la commande MPPT flou.....	36
Figure IV.8 Figure .III-8. Réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards : la température $T= 25^{\circ}C$ et l'ensoleillement $E= 1000W /m^2$	36,37
Figure IV.9 Figure .III-9 Réponses des trois contrôleurs pour une augmentation d'ensoleillement (échelon $E= 500$ a $1000 w/m^2$) à température constante $T =25^{\circ}C$...	38,39

Liste des Tableaux

Tableau I-1. Les différents types des cellules avec leur rendement.....	9
Tableau I-2. Variation de puissance de panneau suivant sa dimension.....	11
Tableau II-1 : Réglage des paramètres [122].....	20
Tableau III.1. Base de règles du MPPT floue (type I).....	29
Tableau III.2. Base de règles du MPPT floue (type II).....	29

Sommaire

Introduction générale.....	2
-----------------------------------	----------

Chapitre I: État de l'art des techniques d'améliorer le rendement d'un système photovoltaïque

I.1. Introduction.....	5
I.2. Les systèmes photovoltaïques	5
I.3. Les panneaux photovoltaïques.....	6
I.4. Module photovoltaïque.....	6
I.5. L'effet photovoltaïque	7
I.6. La cellule photovoltaïque	7
I.7. Type et rendement des cellules photovoltaïques	8
I.7.1. Type et rendement des cellules photovoltaïques	8
I.7. 1.1.Les cellules monocristallines	8
I.7. 1.2.Les cellules poly cristallines ..	8
I.7. 1.3. Les cellules amorphes	8
I.7.2. Rendement d'une cellule	8
I.7. 3.Le panneau solaire haut rendement	9
I.7. 4.Le panneau photovoltaïque hybride	9
I.7. 5. Le panneau photovoltaïque bifaces.....	10
I.7. 6. La cellule solaire en pérovskite	10
I.7. 7. La technologie PERC	10
I.8.L'améliorer le rendement d'un panneau solaire.....	10
I.8. 1. La dimension du panneau solaire	10
I.8. 2. L'orientation du panneau solaire	11
I.8. 3. L'inclinaison du panneau solaire	11
I.8. 4. Éviter les zones d'ombre	12
I.9. Le rendement de l'onduleur photovoltaïque.....	12
I.10. Conclusion.....	12

CHAPITRE II: Etude et modélisation des cellules solaires à triples-jonctions

II.1. Introduction	14
II.2. Les cellules solaires à triples-jonctions.....	14

II.2.1. Les modèles du circuit équivalent	16
II.2.1.1 Le modèle à une seule diode	16
II.2.1 .2 Le modèle à double diodes	18
II.2.1.3. Configuration du modèle	19
II.3. Les procédures de modélisation	21
II.3. 1 Réglage des paramètres	21
II. II.3.2. Méthode de modélisation :	22
II.4. Conclusion :	24

CHAPITRE III Commande MPPT Basée sur l'Approche Floue

III.1. Introduction.....	26
III.2. Contrôleur MPPT flou.....	26
III.3. Fonctions d'appartenance.....	27
III.4. Règles floues	30
III.5. Conception du contrôleur MPPT flou.....	31
III.6. Conclusion.....	32

CHAPITRE IV Simulation, Résultat et discussions

IV.1. Introduction.....	34
IV.2 Simulation du système photovoltaïque.....	34
IV.2.1. Simulation d'un GPV	35
IV.2.2. Simulation L'algorithme MPPT flou	36
IV.3. Résultats de Simulation :	37
IV.3.1. Fonctionnement sous des Conditions Constantes :	37
IV.3.2.Comportement du système face à un changement des conditions météorologiques	39
IV.4. Conclusion.....	41
Conclusion générale	43

Liste des abréviations et Symboles

J_{sc} : Courant du court-circuit,

J_0 : Courant inverse de saturation de la diode

J_L : Courant de charge

i : Numéro de la sous-cellule (1 = haut, 2 = milieu et 3 = bas)

K_B : Constant de Boltzmann $1.3806503 \cdot 10^{-23}$ [J/K]

T : La température absolue,

V : La tension,

n : Facteur d'idéalité de la diode,

R_s : Résistance série

R_{sh} : Résistance shunt, respectivement,

A : L'aire de la cellule.

γ : est typiquement comprise entre 0 et 2

α et σ : Sont des constantes qui dépendent du matériau

q : La charge élémentaire $= 1.60217646 \cdot 10^{-19}$ [C]

$A_{1-x}B_x$: étant la composition d'alliage

$\underline{J_m}$: Le courant à la MPP.

$\underline{V_m}$: La tension à la MPP

G : Le flux incident à l'orifice du concentrateur

C : le ratio de concentration

RMS :Root Mean Square

$\underline{X_{ij}}$: est la quantité calculée (tension du circuit ouvert ou rendement),

$\tilde{\underline{X_{ij}}}$: est la quantité mesurée à la condition d'opération

i,j : représentent la concentration et la température en ordre.

BSF : back surface field

D :est le coefficient de diffusion [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

K_L :le coefficient de dommage

$\underline{\tau_B}$, $\underline{\tau_{Aug}}$ et $\underline{\tau_{SRH}}$: sont la durée de vie de la recombinaison bande à bande,

SRH : Shockley-Read-Hall.

S_F : la vitesse de recombinaison de la surface avant [cm.s^{-1}].

S_R : la vitesse de recombinaison de la surface arrière [cm.s^{-1}].

d : L'épaisseur [cm],

B : le coefficient de la recombinaison de bande à bande [$\text{cm}^3 .\text{s}^{-1}$].

C : le coefficient de la recombinaison Auger [$\text{cm}^6 .\text{s}^{-1}$],

P la concentration des porteurs de type p de la base [cm^{-3}],

le coefficient de la recombinaison Auger [$\text{cm}^6 .\text{s}^{-1}$], et la concentration des porteurs de type p de la base [cm^{-3}], respectivement. Dans cette

le coefficient de la recombinaison de bande à bande [$\text{cm}^3 .\text{s}^{-1}$], le coefficient de la recombinaison Auger [$\text{cm}^6 .\text{s}^{-1}$], et la concentration des porteurs de type p de la base [cm^{-3}], respectivement. Dans cette

Introduction Générale

Introduction générale:

Depuis très longtemps on a recourt à l'énergie renouvelable dans ces différentes formes, celles-ci sont exploitées par l'homme de puis des temps long tins. Autre fois, malins à eau, à vent, feu de bois, fraction animale, bateau à voiles, ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles étaient aussi importantes et aussi variées que la production alimentaire.

Les énergies renouvelables et en particulier l'énergie photovoltaïque sont devenues très prometteuses dans les ressources énergétiques futures d'un pays e tout d'abord de sa nature propre, mais également à cause de la chute des réserves des ressources traditionnelles (pétroles, gaz, ...), de la croissance démographique et économique de ce pays excitant à produire plus d'énergies électriques.

Plusieurs ressources d'énergies renouvelables ont été découvertes ces dernières décimes notamment, l'énergie éolienne, hydraulique et photovoltaïque, cette dernière est l'une des énergies les plus renouvelables dans le monde.

L'énergie photovoltaïque est directement obtenue à partir de rayonnement solaire. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque.

D'autre part, Selon l'Organisation mondiale de la santé, le changement climatique est la plus grande menace pour la santé mondiale du XXIe siècle, car il menace les éléments essentiels d'une bonne santé: air pur, eau potable sûre et adéquate, approvisionnements alimentaires nutritifs et abris sûrs. Pour éliminer ces impacts, il est impératif de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Le réchauffement climatique découle directement de l'utilisation d'une énorme quantité de combustibles non renouvelables depuis le début de la révolution industrielle, et les effets négatifs associés aux émissions de combustion de ces sources obligent la société à trouver des solutions durables aux problèmes énergétiques. Sources d'énergie dans le moyen terme doit être converti en sources naturellement disponibles et en énergies renouvelables, les principales étant l'énergie solaire, la géothermie, l'énergie éolienne, la biomasse et l'hydroélectricité. Parmi tout cela, l'énergie solaire est sans aucun doute la plus grande source d'énergie disponible sur Terre. En fait, son énergie potentielle est multiple de la consommation d'énergie mondiale. Le défi technologique est de récupérer cette énergie de manière efficace, rentable et durable.

Depuis plusieurs années, le marché de l'énergie solaire est très largement dominé par les cellules photovoltaïques en silice poly-cristalline, ou monocristalline pour les plus performantes. Bien que de moins en moins cher les recherches sur l'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique convergent vers un rendement varié de (15-20%). Dans ce travail nous choisissons une cellule solaire à jonctions multiples et un convertisseur DC-DC à contrôleur MPPT floue pour rendre l'amélioration de rendement globale de système photovoltaïque.

Chapitre I

État de l'art des techniques d'améliorer le rendement d'un système photovoltaïque

I.1. Introduction:

L'énergie photovoltaïque est produite de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique à l'aide de cellules généralement à base de silicium cristallin qui demeure la filière la plus développées sur les plans technologiques et industrielles, en effet le silicium est l'un des éléments les abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Le mot photovoltaïque provient du Grec "photo" signifie lumière et "voltaïque" qui est déduit du nom du savon physique italien Alessendre Volta (1754-1827) qui a énormément contribué à la découverte de l'électricité bref : photovoltaïque signifie littérairement "lumière électricité".

Dans ce chapitre nous donnons la brève généralité sur le système photovoltaïque.

Le principe de la conversion de l'énergie photovoltaïque consiste à transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide des cellules photovoltaïque figure (1)

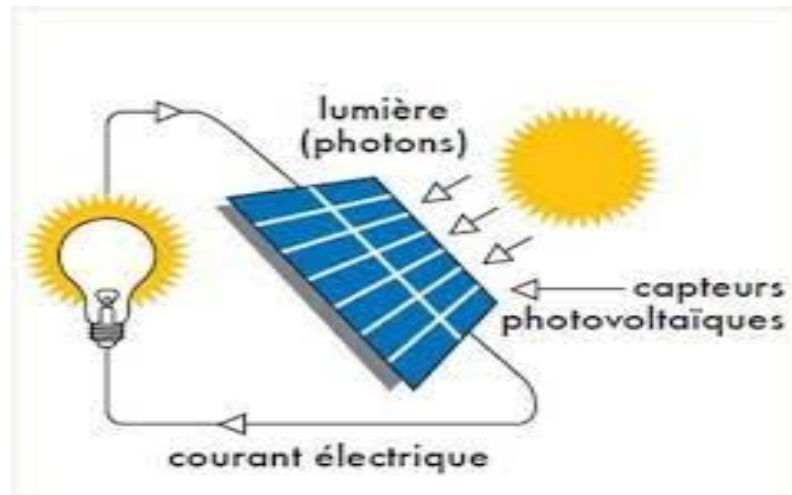


Figure .I-1. *Principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire*

I.2. Les systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque est composé de plusieurs éléments. C'est un ensemble de quelque éléments associés étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique. Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- Panneaux photovoltaïque (structure du support).
- Un convertisseur DC/DC.
- Un convertisseur DC/AC.
- Réseau électrique (charge)

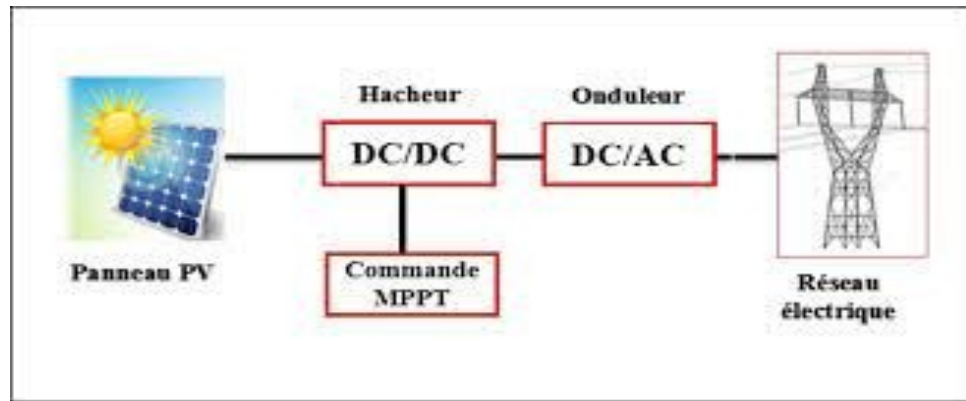


Figure .I-2. Schéma simplifié d'un système photovoltaïque

I.3.Les panneaux photovoltaïques

Le panneau solaire ou champ solaire se compose de modules photovoltaïque interconnecté en série et/ou en parallèle à fin de produire la puissance requise. Ces modules sont monté sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique pour chaque panneau, on peut avoir autant de sortie que des modules, ce qui fait qu'on aura besoin des boites de dérivation qui les regroupent. Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure de montage qui à comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

I.4. Module photovoltaïque

Le composant indispensable de toute l'installation PV est le module photovoltaïque composé de cellules solaires en la connectées.

Ces modules sont reliés entre eux à fin de produire des champs pour nous permettre à aboutir à différents niveaux de besoins en énergie la figure (**I-3**) représente un module photovoltaïque.

Des modules de plus en plus robustes et puissants sont disponibles sur le marché, essentiellement pour la connexion aux réseaux, par contre il y a tout de même un seul lié au poids et à la manipulation.



Figure .I-3.Module photovoltaïque

I.5. L'effet photovoltaïque_

L'effet photovoltaïque est un processus physique qui caractérise certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité quand ils sont exposés à la lumière. La plus répandue de ces dernières est le silicium cristallin qui est utilisé de nos jours à 90% pour la fabrication des panneaux produits dans le monde, mais il existe de nombreuses autres technologies déjà industrialisés comme les couches minces ou en phase de recherches.

Les cellules à l'aide de l'effet photovoltaïque produisent du courant continu par absorption des rayons solaire. Ce phénomène permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électrique.

I.6. La cellule photovoltaïque_

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteur, l'un ayant un excès d'électrons et l'autre un manque d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites à dopées de type N et de type P. le dopage des cristaux de silicium c'est le rajout d'autre atomes pour améliorer la conductivité des matériaux.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteur, l'un ayant un excès d'électrons et l'autre un manque d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites à dopées de type N et de type P. le dopage des cristaux de silicium c'est le rajout d'autre atomes pour améliorer la conductivité des matériaux. Un atome de silicium contient quatre électrons périphériques, l'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore contenant cinq électrons (soit un électron de plus que le silicium). On parle de dopage de type N comme négatif, car les électrons (charge négative) sont en excès. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont trois électrons (un électron moins que le silicium).

On parle alors de dopage de type P comme positif, car le manque d'électron est ainsi créé. Lorsque le premier est en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N s'échappent vers le matériau P

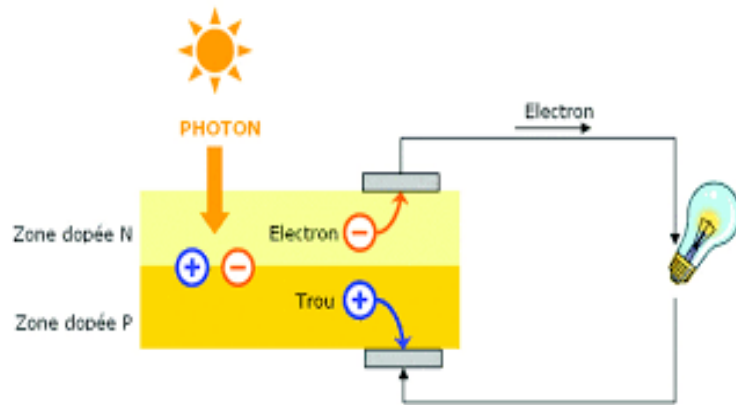


Figure .I-4. Cellule PV

I.7. Types et rendement des cellules photovoltaïques

I.7.1. Types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques), et chaque type de cellule a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle. [19]

I.7. 1.1.Les cellules monocristallines: Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

I.7. 1.2.Les cellules poly cristallines: Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.

I.7. 1.3.Les cellules amorphes: Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

I.7. 2.Rendement d'une cellule : Le tableau suivant (1-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement.

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

Tableau I-1. Les différents types des cellules avec leur rendement. [19]

$$\eta_{stc} = \frac{P_m}{E_{stc} * S_{cellule}}$$

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

P_m : La puissance produite par le générateur PV ;

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

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

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs :

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

I.7. 3.Le panneau solaire haut rendement

Vous l'avez compris, un [panneau solaire haut rendement](#) c'est avant tout un panneau solaire monocristallin. Mais ce n'est pas tout, des nouveaux modules solaires font leur apparition.

Ces modules "haut rendement" produisent plus d'électricité. Leur coût est un peu plus élevé mais c'est un investissement rentable. [19]

Il en existe déjà plusieurs types.

I.7. 4.Le panneau photovoltaïque hybride

Leur rendement est nettement supérieur à celui des capteurs photovoltaïques. Le panneau hybride est refroidi par la circulation d'eau froide, grâce à ça il produit plus d'électricité.

Si vous voulez en savoir plus sur l'hybride, [19]

I.7. 5. Le panneau photovoltaïque bifaces

Les modules bifaces sont pour les installations au sol uniquement. Ici votre panneau possède des cellules sur la face avant et aussi sur la face arrière.

Ça veut dire qu'il capte la lumière qui vient directement du ciel mais pas que. Il est aussi capable de convertir la lumière qui est réfléchi. Du coup il produit plus qu'un module photovoltaïque classique. [19]

I.7. 6. La cellule solaire en pérovskite

La pérovskite est utilisée à la place du [silicium](#). Un panneau en pérovskite pourrait atteindre des rendements de 30% dans des conditions extérieures optimales.

C'est une cellule qui est beaucoup plus sensible à la lumière du soleil. Pour le moment c'est toujours en développement. [19]

I.7. 7. La technologie PERC

Pour terminer, il existe une nouvelle technologie appelée PERC. PERC ça veut dire "Passivated Emitter und Rear Cell" on peut traduire ça par "émetteur passivé et cellule arrière".

En fait la cellule est la même, on ajoute juste une couche de "passivation" sur la face arrière. Ça augmente son efficacité. [19]

Voilà pour les nouvelles technologies solaires permettant d'obtenir de meilleurs rendements. Attention le meilleur panneau solaire n'est pas forcément un capteur à haut rendement.

I.8.L'améliorer le rendement d'un panneau solaire

La puissance d'un panneau solaire et son rendement dépendent de 5 paramètres [19]:

- sa dimension
- son orientation
- son inclinaison
- les zones d'ombre
- la qualité des autres composants.

I.8. 1. La dimension du panneau solaire

Je vous ai préparé un tableau avec les surfaces à prévoir. Je vous ai mis trois dimensionnements différents :

Puissance installée requise	Puissance moyenne d'un panneau à l'unité	Nombre de panneaux requis	Mesure moyenne d'un panneau à l'unité	Surface nécessaire
3 000 Wc	375 Wc	8 panneaux	1,7 m ²	16 m ²
6 000 Wc	375 Wc	16 panneaux	1,7 m ²	32 m ²
9 000 Wc	375 Wc	24 panneaux	1,7 m ²	48 m ²

Tableau I-2. Variation de puissance de panneau suivant sa dimension. [19]

Attention, la dimension d'un panneau solaire n'est pas vraiment un élément à prendre en compte. On regarde plutôt le nombre de cellules photovoltaïques par mètre carré.

L'équation est simple : plus la surface de panneaux solaires est grande, plus on peut mettre de cellules. Forcément plus il y a de cellule, plus le module produit d'électricité

I.8. 2. L'orientation du panneau solaire

[L'orientation des panneaux solaires](#) est super importante. Ils doivent capter un maximum de rayonnement solaire tout au long de la journée.

Comme le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest, une orientation plein sud permet de profiter d'une plus grande quantité de rayonnement. C'est vrai pour l'hémisphère nord mais en dessous de l'équateur il faut inverser.

Si vous n'avez pas d'exposition plein sud ce n'est pas très grave. Vos modules solaires seront quand même rentables à l'est et à l'ouest, il faut juste bannir le nord.

L'orientation des panneaux solaires joue un rôle important sur leur production. [19]

I.8. 3.L'inclinaison du panneau solaire

[L'inclinaison des panneaux solaires](#) détermine la quantité de la lumière que vont recevoir les cellules en fonction de la position du soleil sur l'horizon. Dans l'idéal, nos capteurs seraient perpendiculaires aux rayons solaires.

Problème : la position de l'astre sur l'horizon varie en fonction des saisons. Il est plus bas en hiver et plus haut en été. Techniquement, il faudrait incliner les panneaux à 60° l'hiver et à 10° l'été. [19]

Puisque ce n'est pas toujours possible, il faut trouver un équilibre : l'inclinaison de 30° est idéale.

I.8. 4. Éviter les zones d'ombre

Ce n'est un secret pour personne, les zones d'ombrage font diminuer la production de vos capteurs. Il faut donc bien faire attention à tous les obstacles qui pourraient faire de l'ombre à votre installation (arbre, cheminée, maison voisine...) [19]

I.9. Le rendement de l'onduleur photovoltaïque

L'onduleur joue aussi un rôle important, est l'appareil qui transforme le courant électrique continu, générée par les panneaux solaires, en courant alternatif. C'est le courant alternatif qu'est consommé par la charge.

Il contrôle également le bon fonctionnement de l'installation et permet de suivre la consommation quotidienne.

Un onduleur performant améliore le rendement global de votre installation photovoltaïque.



***Figure .I-5.** Différent types d'onduleurs photovoltaïque, le monophasé, l'hybride et le micro-onduleur. [19]*

I.10. Conclusion

On a vu ensemble qu'il y avait beaucoup de paramètres à prendre en compte quand on parle de rendement.

Pour résumer simplement le rendement d'un panneau solaire se situe aujourd'hui entre 18 et 22%.

Pour optimiser votre production vous pouvez jouer sur[19] :

- L'inclinaison de vos modules solaires
- L'orientation
- La technologie du panneau solaire

Chapitre II

Etude et modélisation des cellules solaires à triples- Jonctions



II.1. Introduction:

La caractérisation de la performance des cellules solaires multi-jonctions est essentielle pour la conception du photovoltaïque de haute concentration (HCPV). Ces cellules peuvent fonctionner sur une plage de flux du rayonnement incident, généralement entre quelques centaines jusqu'à 1000 soleils, et une gamme de températures de fonctionnement allant jusqu'à environ 100°C. La dépendance de la performance de la cellule sur ces deux paramètres devrait alors être bien définie.

II.2. Les cellules solaires à triples-jonctions :

Des données expérimentales ont été publiées pour les cellules à triples-jonctions largement utilisées InGaP/InGaAs/Ge: pour les cellules faites par Sharp, les données sont pour des températures de 25 à 120°C et une concentration de 1 à 200× [1-2], et pour les cellules faites par Spectrolab les données sont pour 25 à 120°C et 1 à 1000× de concentration [3-4].

Des modèles semi-empiriques pour les cellules ont été proposées pour relier la performance de la cellule, pour connaître des mécanismes physiques et pour la prédire comme une fonction de la température et de la concentration [3-5-6]. Les modèles à deux diodes pour les circuits équivalents ont été proposées dans [5-7], mais les effets combinés de la haute température et le flux élevé du rayonnement incident n'ont pas été étudiés. Le modèle présenté dans [5] était étalonné par rapport aux données de la cellule InGaP/InGaAs/Ge seulement à température ambiante et 1 soleil. Le modèle présenté dans [8] a été calibré par rapport aux mesures à température ambiante et à une gamme de concentration de 1 à 1000×. Les prédictions de la sensibilité à la température du modèle donné dans [7-8] ont été comparées avec succès avec les données de la cellule Sharp à 1 soleil en utilisant des températures inférieures 120°C [7]. Les coefficients ont été optimisés pour s'adapter aux données mesurées pour les courbes I - V . Dans tous les cas, les coefficients semi-empiriques obtenus n'ont pas été signalés.

Un modèle de circuit équivalent à une seule diode, calibré à la fois pour des niveaux élevés de concentration et de température, a été présenté en [9]. Le modèle comprenait une relation I - V distinct pour chaque sous-cellule. Les prévisions du modèle ont été calibrées par rapport aux données de la cellule Sharp [1-2], en optimisant les coefficients pour adapter le rendement mesuré en tant que les données I - V n'étaient pas disponibles. Les résultats ont montrés qu'à des concentrations élevées, la tension du circuit ouvert et les prévisions des coefficients de température du rendement qu'ils sont essentiels, sont écartées par rapport aux données.

Un modèle à une seule diode, calibrée par rapport aux données de la cellule faite par Spectrolab C1MJ à température et à intensité élevées, a été proposé plus tard dans [3] où une relation a été considérée entre I - V d'une cellule localisée et un seul facteur d'idéalité. Les coefficients résultants ont été de loin dépassés la fourchette prévue. Une comparaison qualitative entre les coefficients de la température prédits et mesurés du circuit ouvert à différents niveaux de concentration a été présentée, mais une comparaison entre les coefficients de la température du rendement prédits et mesurés n'a pas été donnée. Un modèle à une seule diode a été également suggéré par [6].

Le modèle a été étalonné par rapport aux données d'une cellule à triple-jonction à des températures inférieures à 120°C et à un niveau de concentration supérieur à 700×. Pour extraire les coefficients du modèle, une procédure d'ajustement par rapport aux erreurs RMS dans les prédictions I - V a été réalisée. Les valeurs des coefficients résultants n'étaient pas signalées. Les erreurs RMS résultantes étaient au dessous de 2%, mais une comparaison entre les coefficients de la température prédits de la cellule et les valeurs mesurées n'ont pas été fournies. Du fait que les coefficients de la température prédits aux hauts niveaux de concentration n'ont pas été présentés, l'inexactitude du modèle à une seule diode dans ces conditions, comme cela a été dévoilée plus tôt [9].

Des modèles plus sophistiqués ont été récemment proposés, comme le modèle de la cellule distribuée (réseau). Dans cette approche, la cellule est divisée en de nombreuses petites cellules élémentaires (des centaines ou des milliers) pour augmenter la précision. L'inconvénient de cette approche est qu'elle est très complexe de la mettre en œuvre et nécessite des ressources de calcul élevées. Un modèle pour la cellule distribuée d'une seule jonction de GaAs a été présenté dans [10] et validé par des données empiriques de la température ambiante et des niveaux de concentration de 1, 50 et 560 soleils. Un modèle de cellule distribuée triple-jonction InGaP/InGaAs/Ge a été suggéré dans [11] et validé par des données empiriques de la température ambiante et des niveaux allant jusqu'à 5 soleils de concentration. Les résultats ont montré que sous le spectre d'AM1.5 et un éclairage uniforme, les prédictions du modèle distribué sont semblables à ceux du beaucoup plus simple des modèles de la cellule localisée (non distribué), et donc la complexité accrue des modèles distribués est difficile à justifier. Un avantage évident des modèles distribués est signalé seulement dans le cas d'un éclairage non uniforme sur la cellule.

Un modèle de cellule robuste qui sera valide et précis sur une large gamme de températures et de concentration de flux qui devrait aussi prendre en compte les variations dans les propriétés des matériaux sur l'intervalle de fonctionnement prévue. Les modèles présentés dans la littérature, décrivent que le comportement de la diode présente une forte dépendance de la température, mais dans de nombreux cas, supposons que la largeur de la bande pour chaque jonction est constante. Alors que la variation de la température dans la bande interdite du matériau est faible par rapport aux variations du courant de la diode, néanmoins, il peut être important lorsqu'en nécessitant une grande correspondance du modèle aux données empiriques. Un autre aspect généralement ignoré dans les modèles publiés, celui de la différence dans la composition de l'alliage de soudure entre les cellules fournies par différents fabricants, ce qui affect également la bande interdite de la jonction. Cet aspect devrait être abordé dans un modèle généralisé aussi bien qu'il n'est pas limité à une cellule particulière.

Ainsi, un modèle de performance satisfaisante pour des cellules à triples-jonctions, et la prédiction des caractéristiques de performance de la cellule et de la température sur un large éventail de conditions de fonctionnement et pour différentes cellules, n'est pas encore disponible. Dans l'étude actuelle, les modèles à une seule diode et à double diodes des circuits équivalents pour les cellules à triples-jonctions sont analysés en détail en se concentrant sur les effets de la température et de la concentration. Les modèles ont été calibrés par rapport aux données expérimentales publiées à l'aide des analyses de régression. Basées sur les résultats actuels, deux questions de modélisation liées aux variations des propriétés des matériaux sont indiquées comme une direction prometteuse pour améliorer encore le modèle de performance de la cellule.

II.2.1. Les modèles du circuit équivalent :

II.2.1.1 Le modèle à une seule diode:

Un modèle de circuit équivalent à deux bornes d'une cellule à triple-jonction avec une seule diode pour chaque jonction est présenté sur la figure (II.1). La relation des sous-

$$I_L = J_{sc,i} - J_{0,i} \left(\exp \left(\frac{q(V_i + J_L R_{s,i})}{n_i K_B T} \right) - 1 \right) - \frac{V + J_L R_{s,i}}{A R_{sh,i}} \quad (\text{II.1})$$

Où i représente le numéro de la sous-cellule (1 = haut, 2 = milieu et 3 = bas), J_{sc} , J_0 et J_L sont les densités du : courant du court-circuit, courant inverse de saturation de la diode et courant de charge, respectivement (courant par unité de surface de la cellule), K_B est la constant de Boltzmann, T est la température absolue, V est la tension, q est la charge élémentaire, n est le facteur d'idéalité de la diode, R_s et R_{sh} sont les résistances série et shunt, respectivement, et A est l'aire de la cellule.

On suppose que la température de la cellule est uniforme. La densité du courant inverse de saturation est fortement dépendante de la température et elle est donnée par :

$$J_{0,i} = k_i T^{(3+\gamma_i/2)} e^{\left(-E_g / n_i K_B T\right)} \quad (\text{II.2})$$

Où E_g est l'énergie de la bande interdite, k et γ sont des constantes telle que γ est typiquement comprise entre 0 et 2. En raison de l'équation (II.1), le courant inverse de saturation est modélisé par un seul terme, il représente la recombinaison dans la région d'épuisement et la région quasi-neutre à la fois.

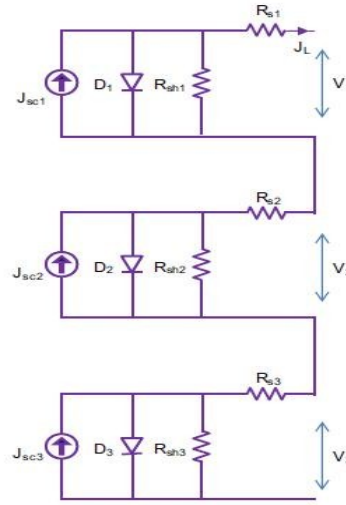


Figure .II-1: Circuit équivalent d'une cellule du modèle à une seule diode.

L'énergie de la bande interdite est une fonction faiblement décroissante de la température ; donc le courant du court-circuit augmente avec la température. Cette variation est parfois négligée dans les modèles de cellule publiés où l'écart du gap est considéré comme une constante. Cependant, quand une grande précision des prédictions du modèle sur une large gamme de température est souhaitée, cet effet du second ordre peut être important. La largeur de la bande est donnée en fonction de la température :

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T - \sigma} \quad (\text{II.3})$$

Où α et σ sont des constantes qui dépendent du matériau.

Lorsque les jonctions dans une cellule sont fabriquées à partir d'alliages plutôt qu'un matériau pur, et la composition d'alliage choisi par chaque fabricant est quelque peu différente, les différences de la bande interdite peut se produire même si les matériaux sont nominalemt similaires. Y compris l'incidence de la composition du matériau dans un modèle de cellule permet une plus grande souplesse pour représenter des cellules différentes dans le même modèle.

La largeur de la bande interdite des alliages semi-conducteurs peut être déterminée par la superposition linéaire suivante :

$$E_g(A_{1-x}B_x) = (1-x)E_g(A) + xE_g(B) - x(1-x)P \quad (II.4)$$

$A_{1-x}B_x$ étant la composition d'alliage et P [eV] est un paramètre dépendant d'alliage qui tient compte des écarts par rapport à l'approximation linéaire. Le courant du court-circuit, J_{sc} dépend de l'énergie de la bande interdite et est donc fonction de la température.. Les deux premières sous-cellules des cellules abordées sont composées d'alliages, l'équation (II.4) doit être utilisée afin de modéliser correctement la dépendance en température de la bande interdite.

Si la résistance shunt est suffisamment importante pour être négligée, la tension simple jonction peut être extraite à partir de l'équation (II.1) comme suite:

$$V = \sum_{i=1}^3 v_i \quad ; \quad v_i = \frac{n_i K_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{sc,i} - J_L}{J_{0,i}} + 1 \right) - J_L A R_{s,i} \quad (II.5)$$

Réarrangeant l'équation (II.5) on obtient :

$$V = \frac{K_B T}{q} \left[n_1 \ln \left(\frac{J_{sc,1} - J_L}{J_{0,1}} + 1 \right) + n_2 \ln \left(\frac{J_{sc,2} - J_L}{J_{0,2}} + 1 \right) + n_3 \ln \left(\frac{J_{sc,3} - J_L}{J_{0,3}} + 1 \right) \right] - J_L A R_s \quad (II.6)$$

La résistance série totale est $R_s = R_{s,1} + R_{s,2} + R_{s,3}$. Les diodes tunnels situées entre les sous-cellules sont modélisées comme des résistances faisant partie de la résistance R_s . La tension du circuit ouvert est obtenue pour J_L

$$V_{oc} = \frac{K_B T}{q} \left[n_1 \ln \left(\frac{J_{sc,1}}{J_{0,1}} + 1 \right) + n_2 \ln \left(\frac{J_{sc,2}}{J_{0,2}} + 1 \right) + n_3 \ln \left(\frac{J_{sc,3}}{J_{0,3}} + 1 \right) \right] \quad (II.7)$$

Le point de puissance maximale (MPP: maximum power point) est obtenu par la mise en

dP/dJ_L où la puissance est $P = J_L V A$. L'équation résultante est :

$$\frac{K_B T}{q} \left[n_1 \ln \left(\frac{J_{sc,1} - J_L}{J_{0,1}} + 1 \right) + n_2 \ln \left(\frac{J_{sc,2} - J_L}{J_{0,2}} + 1 \right) + n_3 \ln \left(\frac{J_{sc,3} - J_L}{J_{0,3}} + 1 \right) \right] - J_L \left[\frac{K_B T}{q} \left(\frac{n_1}{J_{sc,1} - J_L + J_{0,1}} + \frac{n_2}{J_{sc,2} - J_L + J_{0,2}} + \frac{n_3}{J_{sc,3} - J_L + J_{0,3}} \right) + 2A R_s \right] = 0 \quad (II.8)$$

Ceci doit être résolu numériquement pour la densité du courant J_m à la MPP. La tension V_m à la MPP, est alors obtenue en substituant $J_L = J_m$ dans l'équation (II.6). Le modèle à une seule diode contient dix paramètres empiriques qui doivent être déterminés par un étalonnage par rapport aux données mesurées expérimentalement: k_i, γ_i, n_i et R_s .

II.2.1.2. Le modèle à double diodes :

Le modèle à une seule diode fusionne les deux termes du courant de saturation inverse (recombinaison dans la région d'épuisement et la région quasi-neutre) en un seul terme. Dans une forme plus générale, ces deux termes sont séparés de telle sorte que le circuit comprend deux diodes comme montré sur la figure (II.2).

Négligeant les effets de la branche inverse (en raison de l'éclairage uniforme) et la résistance shunt, la relation I - V pour chaque sous-cellule devient :

$$J_L = J_{sc,i} - J_{01,i} \left(e^{\left(\frac{q}{K_B T}\right)(V_i + J_L A R_{s,i})} - 1 \right) - J_{02,i} \left(e^{\left(\frac{q}{2K_B T}\right)(V_i + J_L A R_{s,i})} - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

Les termes du type à double diodes sur le côté droit représentent les deux mécanismes de recombinaison. On suppose une recombinaison linéaire (la vitesse de recombinaison est linéaire dans la densité des porteurs). Les facteurs d'idéalité sont fixés à des valeurs de 1 à 2 dans cette forme du modèle à double diodes, tandis que d'autres valeurs fixes ont également été proposées. Les courants de saturation sombres, qui sont fonction de la température, sont :

$$\begin{cases} J_{01,i} = K_{1,i} T^3 e^{(-E_{g,i}/K_B T)} \\ J_{02,i} = K_{2,i} T^{3/2} e^{(-E_{g,i}/2K_B T)} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Où K_1 et K_2 sont des constantes. Avec l'incorporation des équations : (II.3) - (II.4) pour les bandes d'énergies interdites et le courant du court-circuit, les dépendances de la température et de la concentration, le modèle est terminé. A noter que, contrairement au modèle à une seule diode, ici la tension n'est pas une fonction explicite du courant et elle doit être extraite

de manière itérative. Le modèle à double diodes contient sept paramètres empiriques qui doivent être déterminés par un étalonnage par rapport aux données mesurées expérimentalement: $K_{1,i}$, $K_{2,i}$ et R_s . La seule résistance série localisée est la seule résistance qui doit être identifiée, comme la chute de tension en série dans le circuit est simplement la somme des effets des trois résistances distinctes

: $J_L (R_{s,1} + R_{s,2} + R_{s,3}) = J_L R_s$, comme on peut le déduire de la figure (II-2).

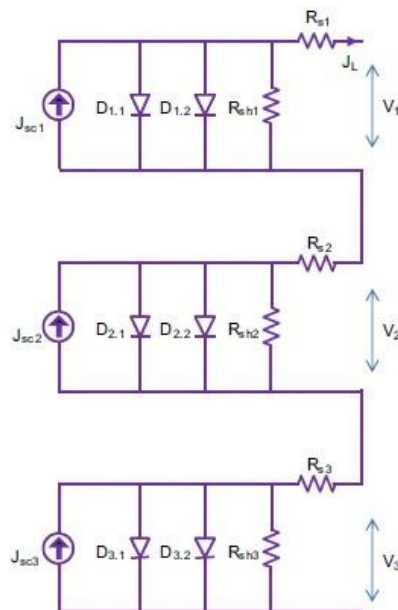


Figure II-2: *Circuit équivalent d'une cellule du modèle à double diodes.*

II.2.1.3. Configuration du modèle :

Le rendement η_c de la cellule est défini comme la puissance maximale de sortie divisée par la puissance incidente à la cellule :

$$\eta_c = \frac{P_m}{ACG} = \frac{J_m V_m}{CG} \quad (\text{II.11})$$

Où G est le flux incident à l'orifice du concentrateur et C est le ratio de concentration. Assumant que le courant du court-circuit est proportionnel au flux de la radiation incidente, la concentration est exprimée comme suite :

$$C = \frac{J_{sc}}{J_{sc}(1 \text{ soleil})} \quad (\text{II.12})$$

Pour la cellule Sharp : 1 soleil est équivalent à 1 kW/m² , tandis que pour la cellule faite par Spectrolab : 1 soleil est défini par la valeur 0.9 kW/m² . Les valeurs actuelles du court-circuit sont considérées comme des entrées du modèle et ont été adoptées à partir des données du constructeur. Pour les deux cellules, nous évaluons la densité du courant du court-circuit pour les deux cellules, respectivement, comme : $J_{sc,i}(C, T) = C, J_{sc,i}(C = 1, T)$. Pour la cellule de

Spectrolab, mais la variation avec la température de chaque sous-cellule $J_{sc,i}$ n'a pas été spécifiée.

Par conséquent, la même dépendance en température du courant du court-circuit a été supposée pour les deux cellules. Ces données ont été obtenues sous le spectre d'AM1.5G ; la performance des cellules dans d'autres spectres peut différer, et la représentation de la performance dans des spectres différents, nécessite un réétalonnage du modèle.

Les coefficients P dans l'équation (II.4) ont été tirés en ajustant les corrélations du gap (Eq. (II.3) et (II.4)) aux données mesurées. Les compositions des alliages des deux sous cellules, du haut et du milieu ont été prises comme : In_{0.49}Ga_{0.51}P et In_{0.01}Ga_{0.99}As, respectivement. Les valeurs résultantes de P sont : 1.018 et 1.157 eV pour les deux cellules Sharp et Spectrolab, respectivement. Pour GaInAs, les valeurs calculées sont 1.192 et 2.909 eV pour les deux cellules Sharp et Spectrolab, respectivement. Ces valeurs dépassent de façon importante la gamme mentionnée préalablement pour les coefficients P : 0.39 - 0.76 eV pour InGaP et 0.32 - 0.46 eV pour GaInAs.

Les coefficients des modèles ont été extraits en minimisant l'erreur RMS (Root Mean Square) totale, quelle est définie comme la moyenne entre les deux erreurs RMS, celle de la tension du circuit ouvert et celle du rendement.

$$e_{RMS,tot} = \frac{e_{RMSV_{oc}} + e_{RMS\eta_c}}{2} \quad (\text{II.13})$$

L'erreur RMS est définie par :

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{x_{ij} - \hat{x}_{ij}}{\hat{x}_{ij}} \right)^2} \quad (\text{II.14})$$

Où X_{ij} est la quantité calculée (tension du circuit ouvert ou rendement), $\tilde{X}_{ij}$ est la quantité mesurée à la condition d'opération et i,j représentent la concentration et la température en ordre. Dans ce processus d'optimisation, seuls les ensembles des données incluant les quantités mesurées ont été considérés (température à une concentration fixe, et vice-versa).

La convergence a été obtenue quand la différence entre deux itérations consécutives était inférieure à 10^{-6} . Les coefficients de la température du rendement ont été calculés en appliquant une adaptation linéaire sur les prévisions du rendement en variant la température à une valeur fixée de la concentration.

II.3. Les procédures de modélisation :

II.3. 1 Réglage des paramètres :

Pour le calcul de la performance de sortie, les valeurs des propriétés physiques (par conséquent, déjà installées dans PC1D) par défaut ont été utilisées en tant que paramètres des sous cellules GaAs et Ge, excepter la concentration des porteurs intrinsèques de GaAs. $1.79 \times 10^6 / \text{cm}^3$ a été utilisée pour la concentration des porteurs intrinsèques de GaAs [13]. Étant donné que les paramètres physiques d'InGaP ne sont pas installés dans PC1D, ces valeurs étaient ceux cités dans les revues et le site Web [13-14]. Les valeurs sont représentées sur le tableau (II-3). Les valeurs des vitesses de recombinaison de la surface avant et arrière augmentent en fonction de la fluence du proton [12].

Paramètres InGaP	
Référence de surface	Valeurs expérimentales
Mobilité des électrons (300K)	2500 (min), 3000 (max) $\text{cm}^2/\text{V.s}$
Mobilité des trous (300K)	80 $\text{cm}^2/\text{V.s}$
Énergie du gap	1.86 eV
Concentration des porteurs (300K)	1200/ cm^3 [13]
Indice de réfraction	3.6036 [18]
Coefficient de recombinaison Auger (n, p)	$5 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$ [15]
Coefficient de recombinaison bande à bande	$1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ [14]
La durée de vie des porteurs minoritaires (initiale)	50 ns
La durée de vie des porteurs majoritaires (initiale)	100 ns
Paramètres GaAs	
Référence de surface	Référence de surface
Concentration des porteurs (300K)	$1.79 \times 10^6 / \text{cm}^3$ [15]
La durée de vie des porteurs minoritaires (initiale)	15 μs
La durée de vie des porteurs majoritaires (initiale)	10 μs
Paramètres Ge	
Référence de surface	Référence de surface
La durée de vie des porteurs minoritaires (initiale)	20 ms
La durée de vie des porteurs majoritaires (initiale)	40 ms

Tableau II-1 : Réglage des paramètres [12].

II.3.2. Méthode de modélisation :

Les détails de la modélisation de la dégradation du rayonnement en utilisant PC1D sont comme suite. Comme le montre la figure (II-3), la cellule solaire à triple-jonction est divisée en trois pièces pour éviter l'échec de la convergence sous le fonctionnement de PC1D: une sous-cellule InGaP, une sous-cellule GaAs sous une couche de filtrage InGaP de type p et une sous-cellule Ge sous une couche de filtrage GaAs de type p. On a supposé que ces sous cellules sont connectées en série. La couche de filtrage InGaP de type p sur la sous-cellule GaAs a été réglée pour avoir la même structure et les mêmes propriétés physiques que celles de la sous-cellule du milieu GaAs (épaisseur, durée de vie des porteurs, concentration des porteurs, la vitesse de recombinaison en surface). Cependant, la couche de filtrage n'a pas des couches d'émetteur n^+ et du champ p^+ de la surface arrière (BSF : back surface field). C'est la même chose pour la couche de filtrage GaAs de type p sur la sous-cellule Ge. Afin d'ajuster des rendements quantiques pour des longueurs d'ondes inférieures à 350 nm, une couche de filtrage sur la sous-cellule InGaP a également été prise en compte [12].

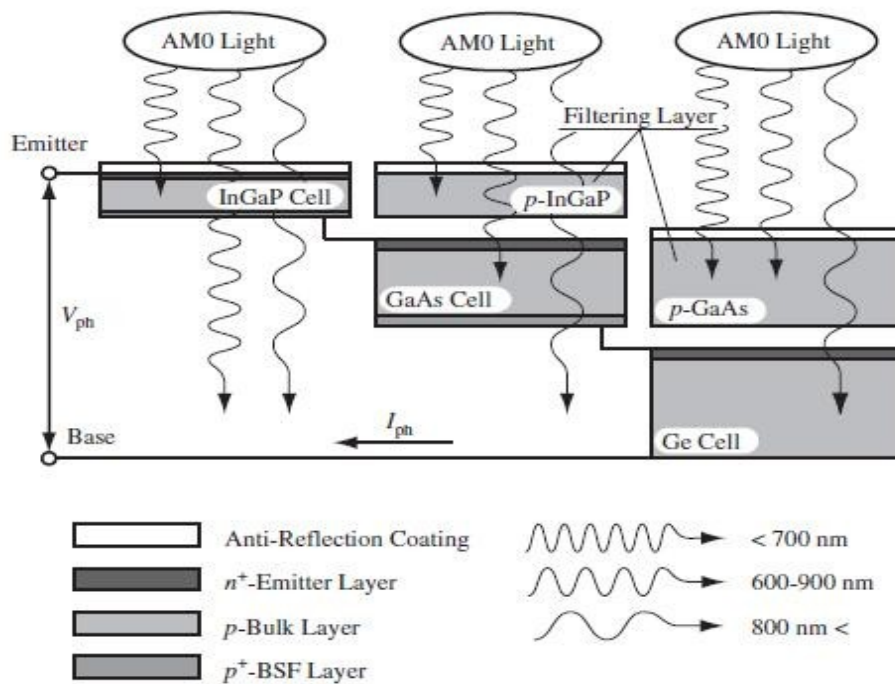


Figure .II-3: La structure de la cellule solaire à triple-jonction utilisée dans cette étude [12].

Dans ce modèle, lorsque la lumière AM0 illuminant la cellule, la sous-cellule InGaP n'absorbe que la lumière de longueur d'onde plus courte que 700 nm. La sous-cellule GaAs absorbe seulement la lumière de longueur d'onde moyenne (600-900nm) car la lumière de longueur d'onde plus courte est absorbée par la couche de filtrage InGaP de type p. La sous-cellule Ge absorbe seulement la lumière de longueur d'onde plus longue que 800 nm pour la cellule solaire à triple-jonction est égale au plus faible courant du court-circuit même raison. Dans ce cas,

il est possible de supposer que le courant du court-circuit (I_{oc}) de dans les trois sous-cellules (InGaP, GaAs, et Ge) et la tension du circuit ouvert (V_{oc}) de la cellule solaire à triple-jonction est la somme de leurs V_{oc} [12]:

$$I_{sc} = \min I_{sc,i} , \quad V_{oc} = \sum V_{oc,i} \quad i = (InGaP, GaAs, Ge) \quad (II.15)$$

Lorsque les cellules solaires à triples-jonctions ont été irradiées avec des faisceaux de protons, deux propriétés physiques ont été utilisées comme paramètres de dégradation : la durée de vie des porteurs (la longueur de diffusion) et la concentration des porteurs de la couche de type p de la base. La durée de vie des porteurs minoritaires effective τ_{eff} de la couche de la base est représentée par [12]:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_{Aug}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{S_F + S_R}{2d} = Bp + Cp^2 + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{S_F + S_R}{2d} \quad (II.16)$$

Où τ_B , et τ_{SRH} sont la duré de vie de la recombinaison bande à bande, la duré de vie de la recombinaison Auger et la(es) duré(s) de vie(s) de la recombinaison piège-assisté (SRH : Shockley-Read-Hall), respectivement. S_F et S_R désignent les vitesses de recombinaison de la surface avant et arrière [cm.s^{-1}], respectivement ; d, B, C et p sont l'épaisseur [cm], le coefficient de la recombinaison de bande à bande [$\text{cm}^3 .\text{s}^{-1}$], le coefficient de la recombinaison Auger [$\text{cm}^6 .\text{s}^{-1}$], et la concentration des porteurs de type p de la base [cm^{-3}], respectivement. Dans cette équation, τ_{SRH} diminue et les deux S_F et S_R augmentent avec la fluence des protons. En utilisant τ_{eff} la longueur de diffusion des porteurs minoritaires L s'exprime [12]:

$$L = \sqrt{D\tau_{eff}} \quad (II.17)$$

Où D est le coefficient de diffusion [$\text{cm}^2 .\text{s}^{-1}$]. Afin de s'adapter les rendements quantiques externes (EQEs) des cellules solaires à triples-jonctions irradiées par protons, les valeurs de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires (majoritaires), la concentration des porteurs dans la couche de la base de type p, et la vitesse de recombinaison de la surface avant (arrière) ont été variées. Compte tenu des paramètres décrits ci-dessus, les EQEs des cellules solaires à triples-jonctions dégradées par rayonnement ont été ajustés aux données expérimentales [12].

Puis, I_{sc} et V_{oc} ont été estimés en utilisant les paramètres obtenus par adaptation. Par la suite, les résultats estimés ont été comparés avec les résultats expérimentaux (I_{sc} et V_{oc}). En outre, le taux d'enlèvement des porteurs (R_C) [cm^{-1}] et le coefficient de dommage (K_L) dans chaque sous-cellule ont été calculés à partir de la dépendance de L et p de la fluence des protons en utilisant les équations suivantes [16-17] :

$$P_{\emptyset} = P_0 \exp\left(\frac{-R_C \emptyset}{P_0}\right) \quad (II.18)$$

$$\frac{1}{L_\emptyset^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \emptyset \tag{II.19}$$

Dans ces équations, Φ désigne la fluence d'irradiation du proton [cm^{-2}]. Les indices 0 et Φ se réfèrent, respectivement, aux conditions initiales et après irradiation.

II.4. Conclusion :

Les modèles à une seule diode et à double diodes du circuit équivalent pour les cellules solaires à triples-jonctions ont été présentés, ils sont calibrés par rapport aux données expérimentales sur une large gamme de la concentration et de la température. Les deux modèles ont générer des erreurs RMS totales inférieures à 2.5%, ce qui indique que même le modèle à une seule diode peut-être suffisant pour des applications pratiques. Le modèle à double diodes a produit des résultats légèrement meilleurs que le modèle à une seule diode.

Les comportements de dégradation des cellules solaires à triples-jonctions sur une large gamme d'énergie (30 keV-10 MeV) peuvent être explorés en considération de K_L et R_C dans chaque sous-cellule. Ceci suggère que la modélisation de la dégradation montrée dans cette étude est utile pour le développement de nouvelles structures ainsi que pour prédire la durée de vie des cellules solaires à triples-jonctions.

Chapitre III

Commande MPPT Basée sur L'Approche Floue

III.1. Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter en bref un rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue ainsi que son application pour l'optimisation d'un système photovoltaïque. Nous introduisons d'abord quelques notions de la logique floue; nous nous limiterons aux propriétés essentielles, puis nous appliquerons cette technique d'optimisation pour maximiser le rendement du système PV.

Au cours de cette dernière décennie des techniques du soft computing ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue afin d'augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques. Pas mal de travaux dans ce domaine ont fait l'objet d'une étude comparative entre une commande MPPT floue et d'autres techniques comme la méthode P&O (perturbation et observation) et à chaque fois la commande MPPT floue donne de meilleurs résultats.

Bien que la commande MPPT floue tienne une place respectable par rapport à pas mal de méthodes MPPT proposées dans la littérature, la conception d'une commande MPPT floue présente quelques difficultés liées au choix optimal des paramètres des fonctions d'appartenance du contrôleur flou associé à la commande MPPT.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une commande MPPT floue en utilisant l'approche FLOU. [20]

III.2. Commande MPPT floue :

La figure ci-dessous donne la structure de la commande MPPT floue utilisée pour la poursuite de la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

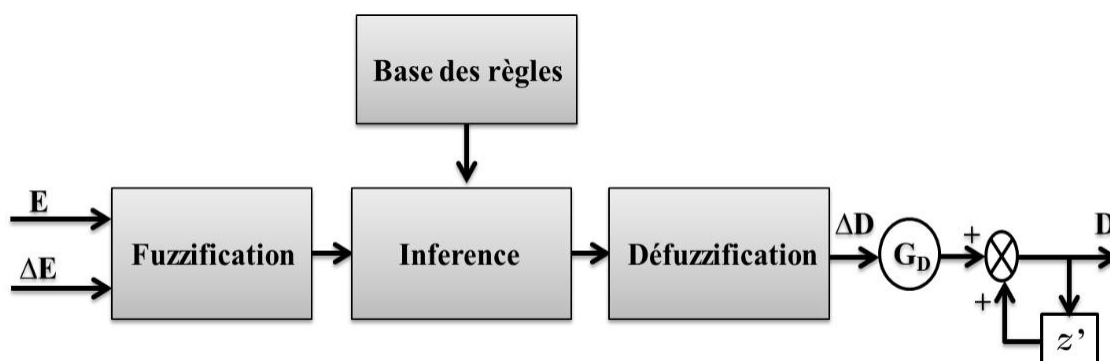


Figure .III-1. MPPT floue[20]

Dans le premier type de la commande MPPT floue les entrées du contrôleur sont l'erreur

$E(k)$ et la variation de l'erreur $E(k)$ exprimées par : [20]

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (\text{III -1})$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III -2})$$

avec : P_{pv} et V_{pv} sont respectivement la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

La première entrée $E(k)$ permet de savoir si le point de fonctionnement de la charge est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe P-V, tandis que l'entrée $\Delta E(k)$ montre la direction du point de fonctionnement. La sortie du contrôleur flou est ΔD qui représente la variation du rapport cyclique du convertisseur DC-DC [30]. Nous utilisons un contrôleur flou de type PI, la sortie du contrôleur $D(k)$ est considérée comme un incrémental du rapport cyclique $D(k)$: [20]

$$D(k) = D(k-1) + GD \times \Delta D(k) \quad (\text{III -3})$$

Nous avons aussi une deuxième proposition de la commande MPPT floue (type II), où est les entrée du contrôleur sont la variation de la puissance $\Delta P_{pv}(k)$ ($P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)$) et la variation de tension $\Delta V_{pv}(k)$ ($V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)$) du générateur photovoltaïque. [20]

III.3. Fonctions d'appartenance :

Chaque variable du contrôleur est définie par cinq (5) fonctions d'appartenance. Nous utilisons des fonctions de triangulaires et trapézoïdales aux extrémités des univers de discours pour les variables d'entrée (E et ΔE) et des fonctions de type singleton pour la variable de sortie (ΔD). Les termes linguistiques associés aux fonctions d'appartenance sont: PB (positif grand), PS (positif petit), Z (Zéro), NS (négatif petit) et NB (négatif grand).

Les figures III-2, III-3 et III-4 donne respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables E, E et ΔD le premier contrôleur de type I. [20]

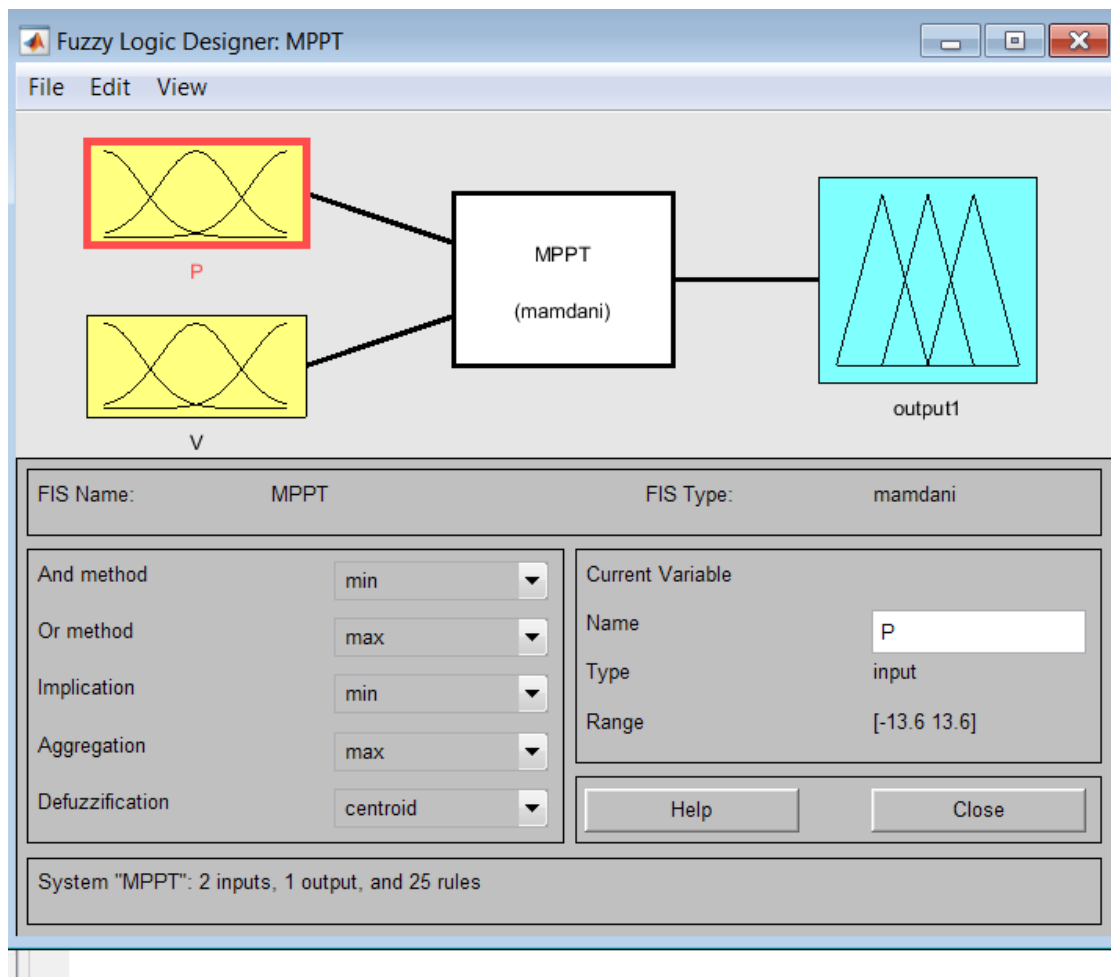


Figure .III-2. Schéma Fonctions FUZZY MPPT sous MATLAB/SIMULINK

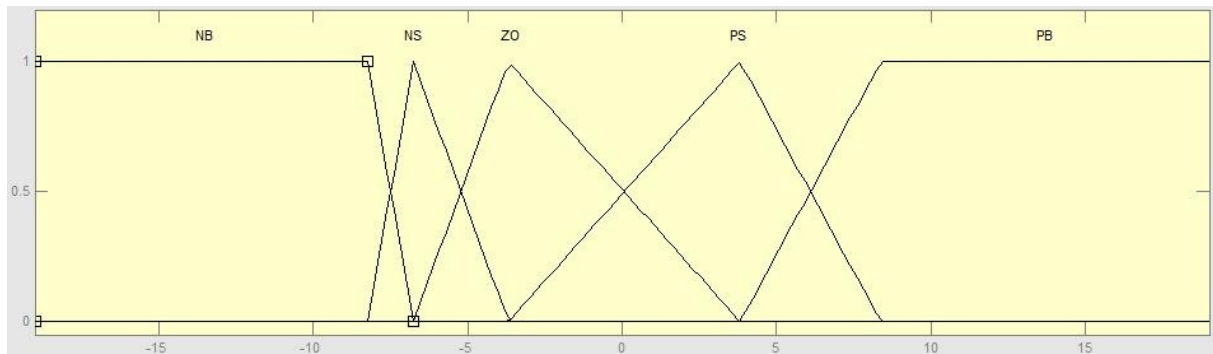


Figure .III-3. Fonctions d'appartenance de la variable E (MPPT floue type I)

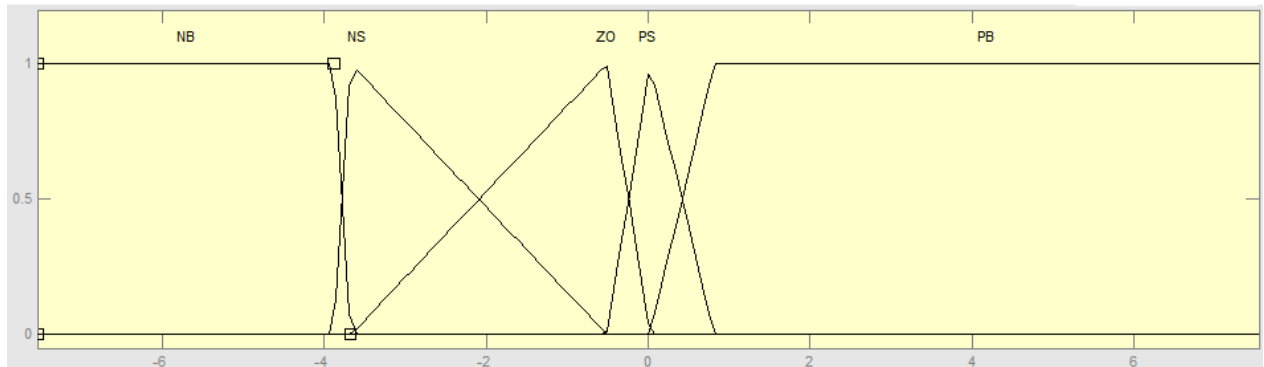


Figure .III-4. Fonctions d'appartenance de la variable ΔE (MPPT floue type I)

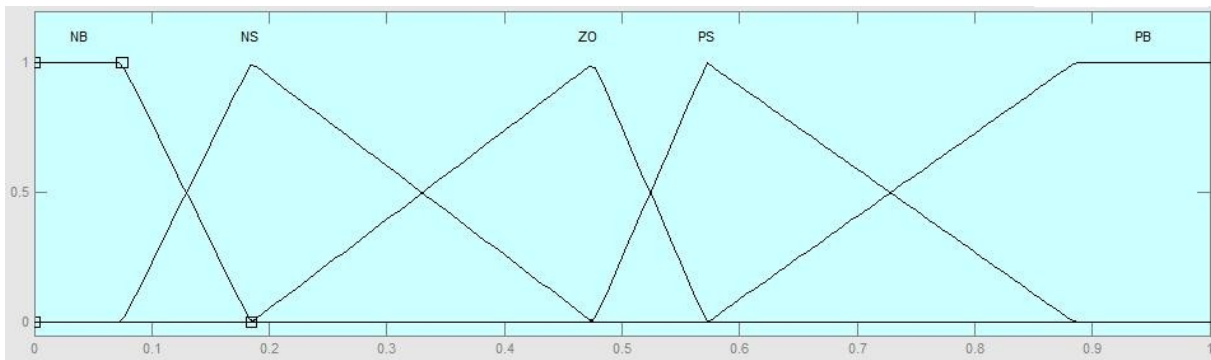


Figure .III-5. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD (MPPT floue type I)

Les univers de discours sont respectivement $[-19.01 \ 19.01]$, $[-7.54 \ 7.54]$ et $[0, 1]$ pour les variables E , ΔE et ΔD .

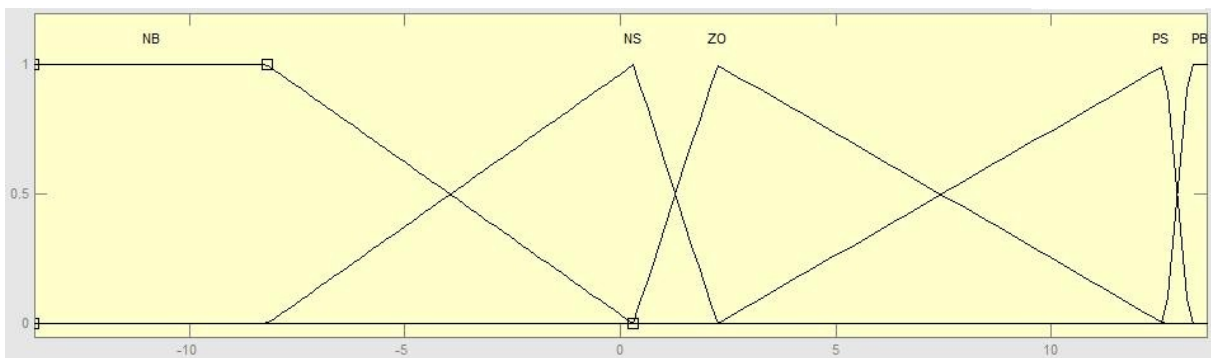


Figure .III-6. Fonctions d'appartenance de la variable ΔP (MPPT floue type II)

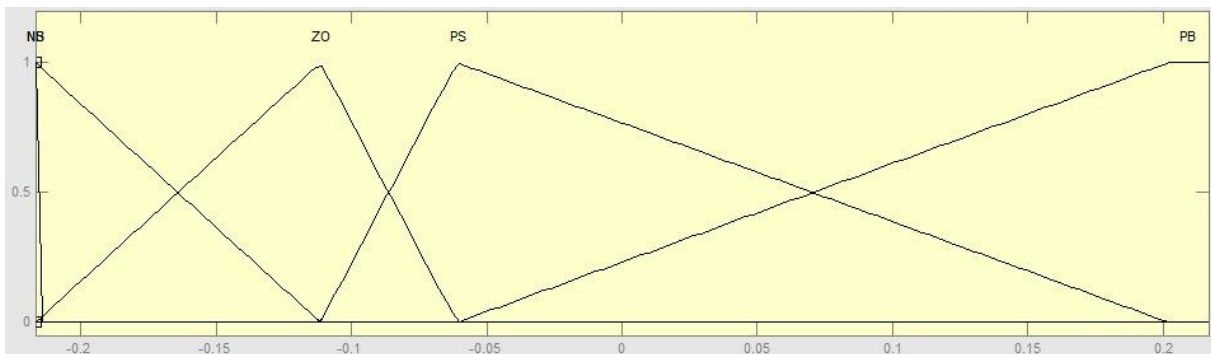


Figure .III-7. Fonctions d'appartenance de la variable ΔV (MPPT floue type II)

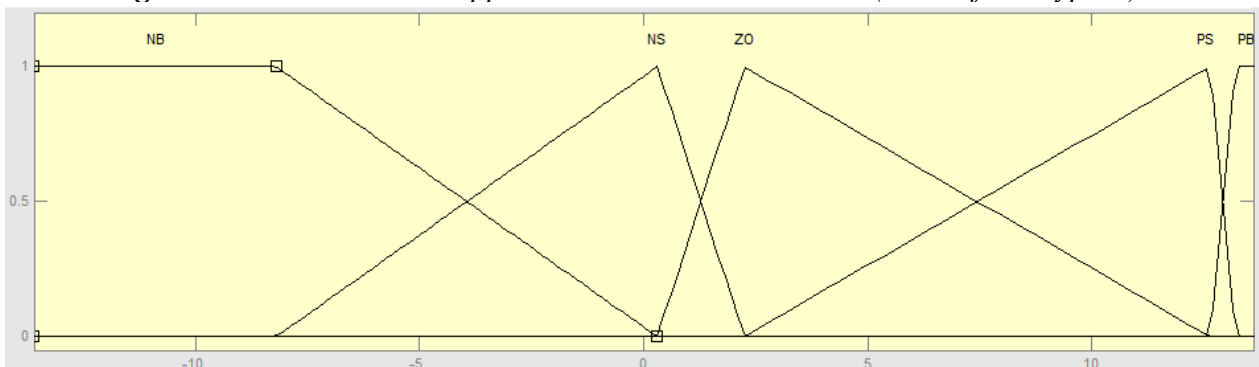


Figure .III-8. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD (MPPT floue type II)

Les figures III-5, III-6 et III-7 donne respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables E , E et ΔD la deuxième contrôleur de type II. Les univers de discours sont respectivement $[-13.6 \ 13.6]$, $[-0.2169 \ 0.2169]$ et $[0, 1]$ pour les variables ΔP , ΔV et ΔD .

III.4. Règles floues :

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des règles qui permettent de déterminer le signal de sortie ΔD du régulateur MPPT en fonction des signaux d'entrées (E et ΔE). Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E doit être toujours nulle [20].

		ΔE					
		ΔD	NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	PS	NS	NB	ZO	NS	
	NS	NS	ZO	ZO	ZO	NS	
	ZO	NB	NB	NS	PS	ZO	
	PS	NB	NS	NS	PB	PB	
	PB	ZO	NS	NS	PB	PS	

Tableau III.1. Base de règles du MPPT floue (type I)

La règle correspondante à la cellule rouge du tableau est interprétée comme suit :

Si E est Positif Grand et ΔE est Zéro Alors ΔD est Négatif petit.

Ce qui veut dire que :

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (MPP) vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe $P(V)$ est environ de Zéro; Alors en diminuer le rapport cyclique largement pour atteindre le "MPP".[20]

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des règles qui permettent de déterminer le signal de sortie ΔD du régulateur MPPT floue type II en fonction des signaux d'entrées (ΔP et V).

		ΔV					
		ΔD	NB	NS	ZO	PS	PB
ΔP	NB	ZO	ZO	NB	ZO	PS	
	NS	NB	ZO	ZO	NB	PS	
	ZO	NS	NS	PS	NB	ZO	
	PS	NB	ZO	PS	NS	PS	
	PB	PS	NS	PB	NS	ZO	

Tableau III.2. Base de règles du MPPT floue (type II)

C'est la méthode d'inférence de Mamdani qui a été utilisée pour le traitement des règles floues. Elle consiste à modéliser l'opérateur MIN pour le ET flou et l'opérateur MAX pour le OU flou.

Nous avons également utilisé la méthode du centre de gravité comme méthode de défuzzification. [20]

III.5. Conception du contrôleur MPPT flou :

Dans ce travail nous utilisons la conception des contrôleurs flous (CF) appliqué à la poursuite du point de puissance maximale (commande MPPT floue).

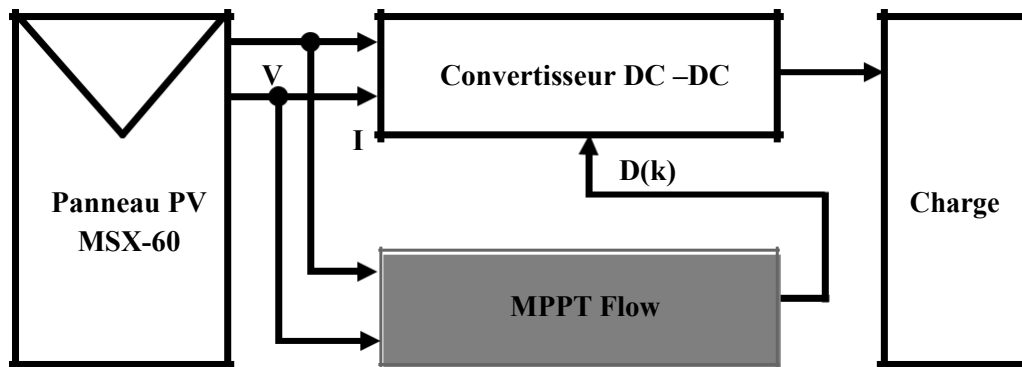


Figure .III-9. Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue[20]

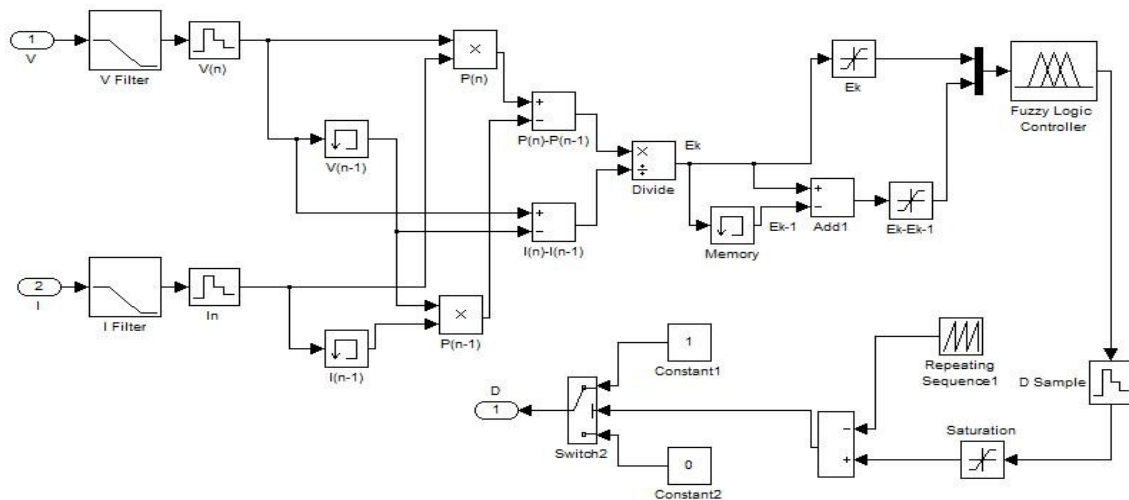


Figure .III-10. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type I

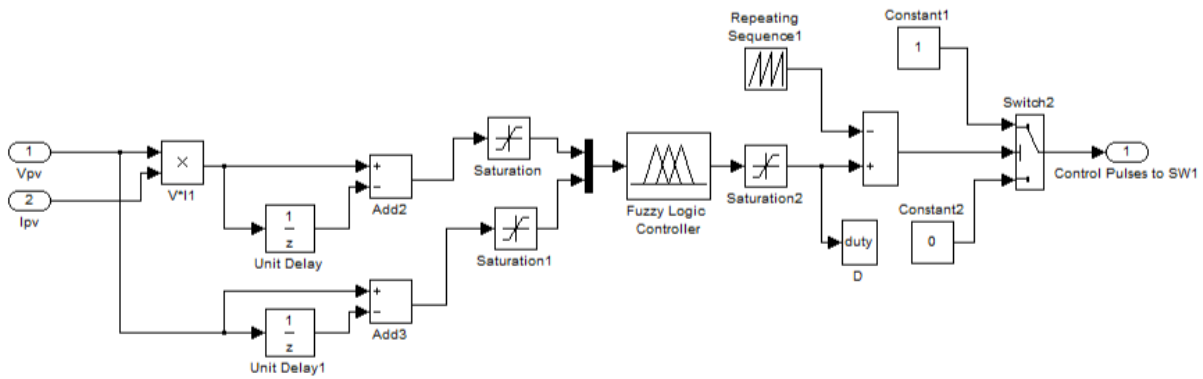


Figure .III-11. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type II

La figure III-9 illustre la stratégie de cette approche que l'on peut présenter la schéma synoptique d'un contrôleur MPPT flou types I et II dans la figure III-10.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit la Commande MPPT Basée sur l'Approche Floue et on présente un rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue ainsi que son application pour l'optimisation d'un système photovoltaïque.

Chapitre IV

Simulation, Résultat et discussions.

IV.1. Introduction :

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale. Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système. [21]

IV.2 Simulation du système photovoltaïque

La Figure IV.1 donne le schéma block de notre system photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés: GPV, DC-DC et MPPT

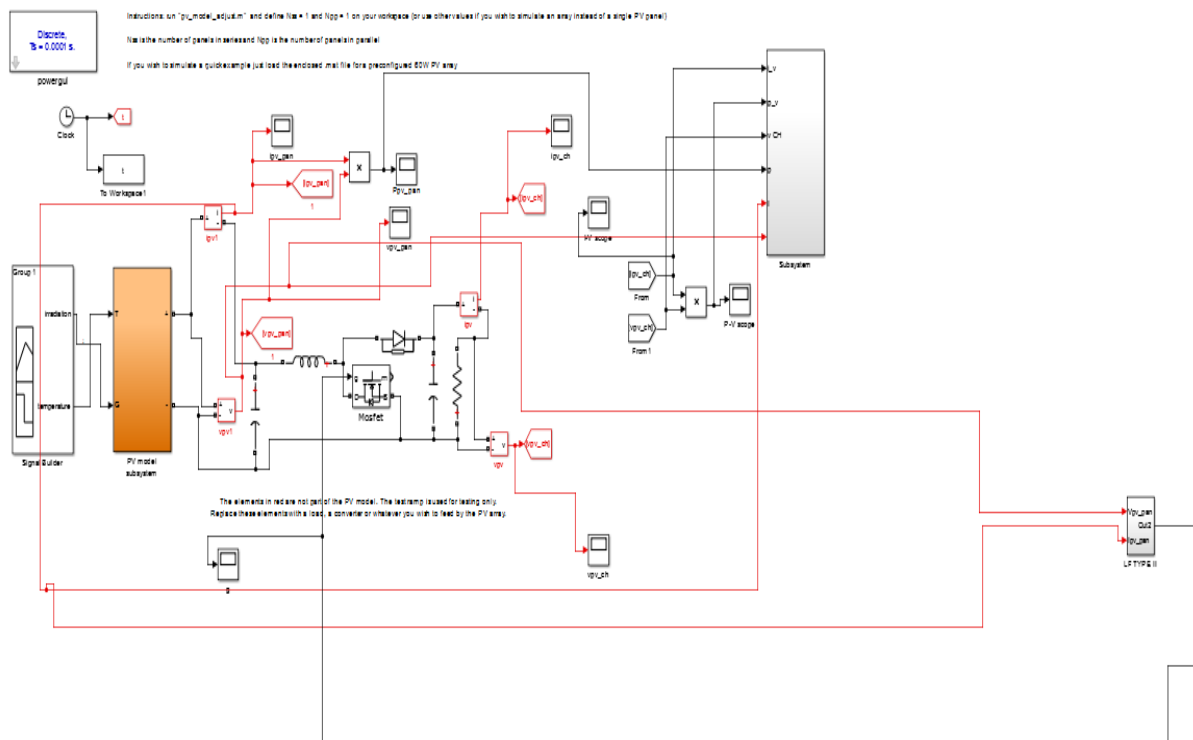
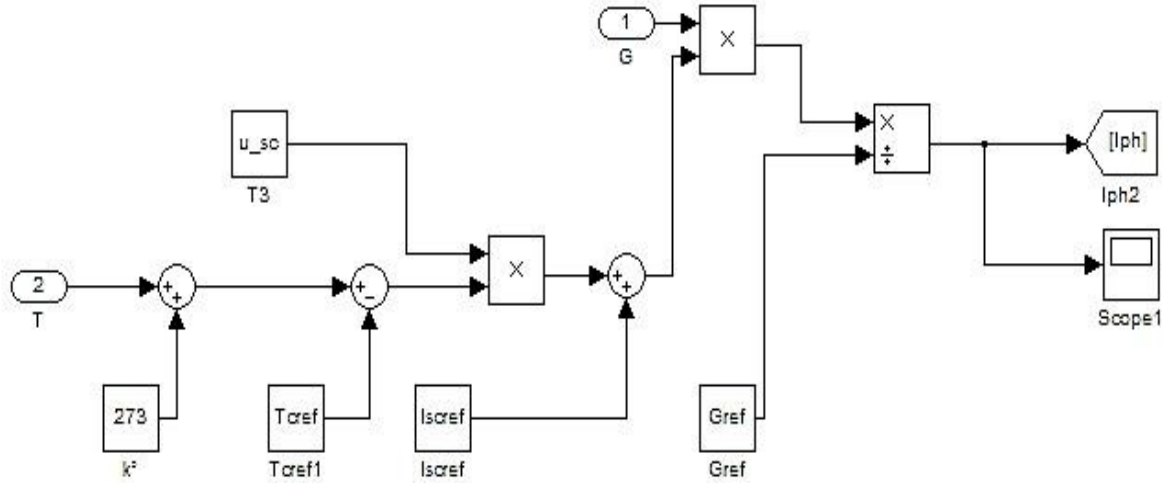
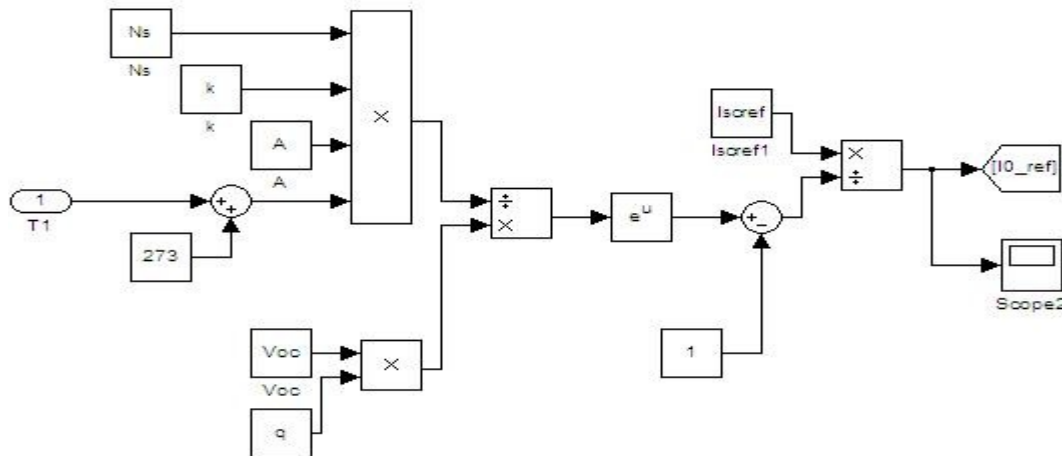
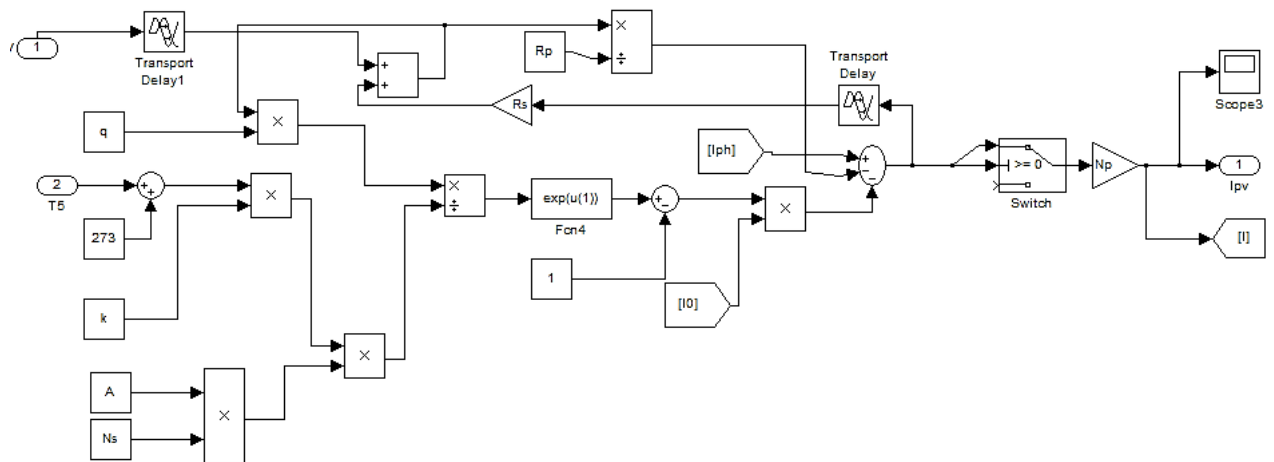


Figure IV.1 Schéma bloc sous Simulink du système global

IV.2.1. Simulation d'un GPV

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en se basant sur le modèle mathématique décrit dans le chapitre II. L'implémentation sous Simulink du modèle mathématique du GPV est illustrée sur la Figure IV.1.

Figure IV.2. Déploiement I_{ph} détailléFigure IV.3 Déploiement I_{0_ref} détailléFigure IV.4 Déploiement I_{pv} détaillé

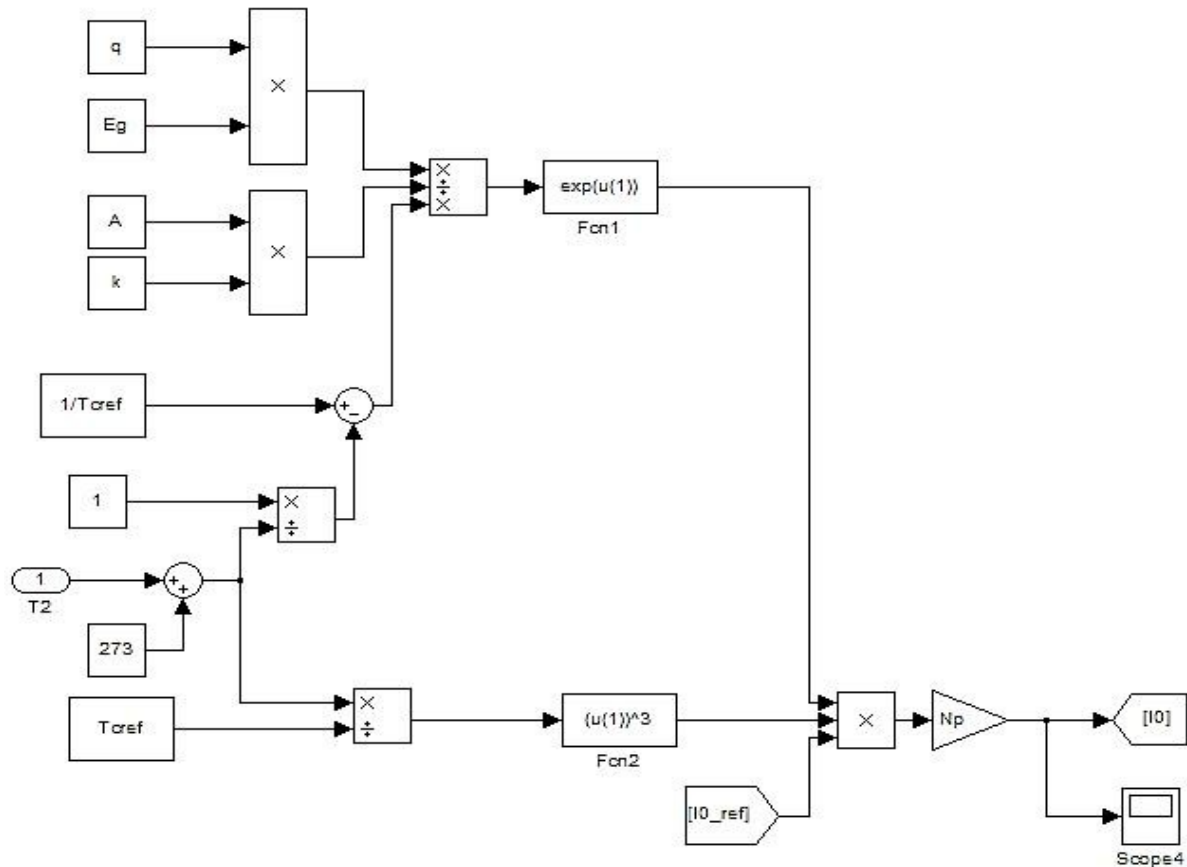
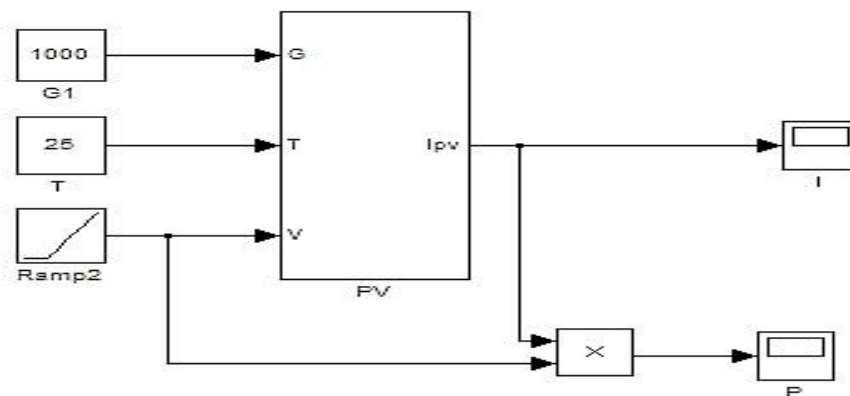
Figure IV.5 Déploiement I_0 détaillé

Figure IV.6 Modèle de simulation du GPV

IV.2.2. Simulation L'algorithme MPPT flu

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme MPPT flu, en nous basant sur l'étude illustrée dans le chapitre III. La Figure IV.3 donne le bloc Simulink

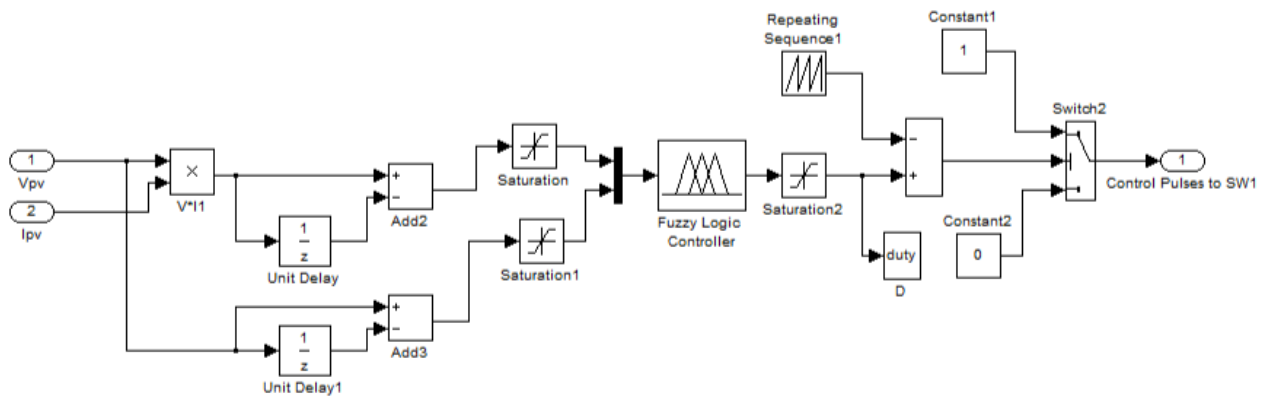


Figure IV.7 Schéma de block de la commande MPPT flou

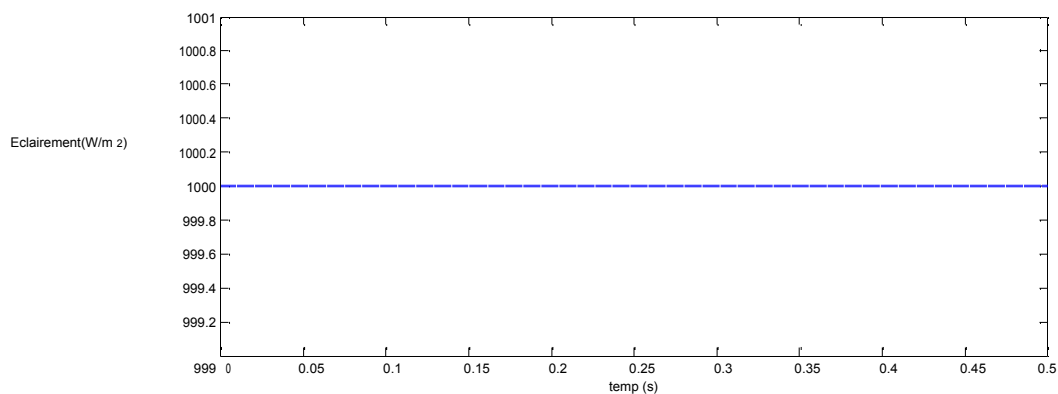
IV.3. Résultats de Simulation :

Dans cette partie, on commence par évaluer le système solaire sans régulateur par simulation avec l'outil de simulation MATLAB/Simulink. Ensuite, les deux méthodes de poursuite MPPT sont étudiées; la méthode (P&O), la méthode utilisant le contrôleur flou. Les deux systèmes sont simulés sous les conditions environnementales stables et de nombreux changements des conditions météorologiques.

IV.3.1. Fonctionnement sous des Conditions Constantes :

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température $T = 25^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement $= 1000\text{W/m}^2$. Le but de ces simulations est de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point MPP. Il sert aussi à évaluer les pertes dues aux oscillations autour de ce point.

La Figure.III-11 illustre les réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards ($T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000\text{W/m}^2$).



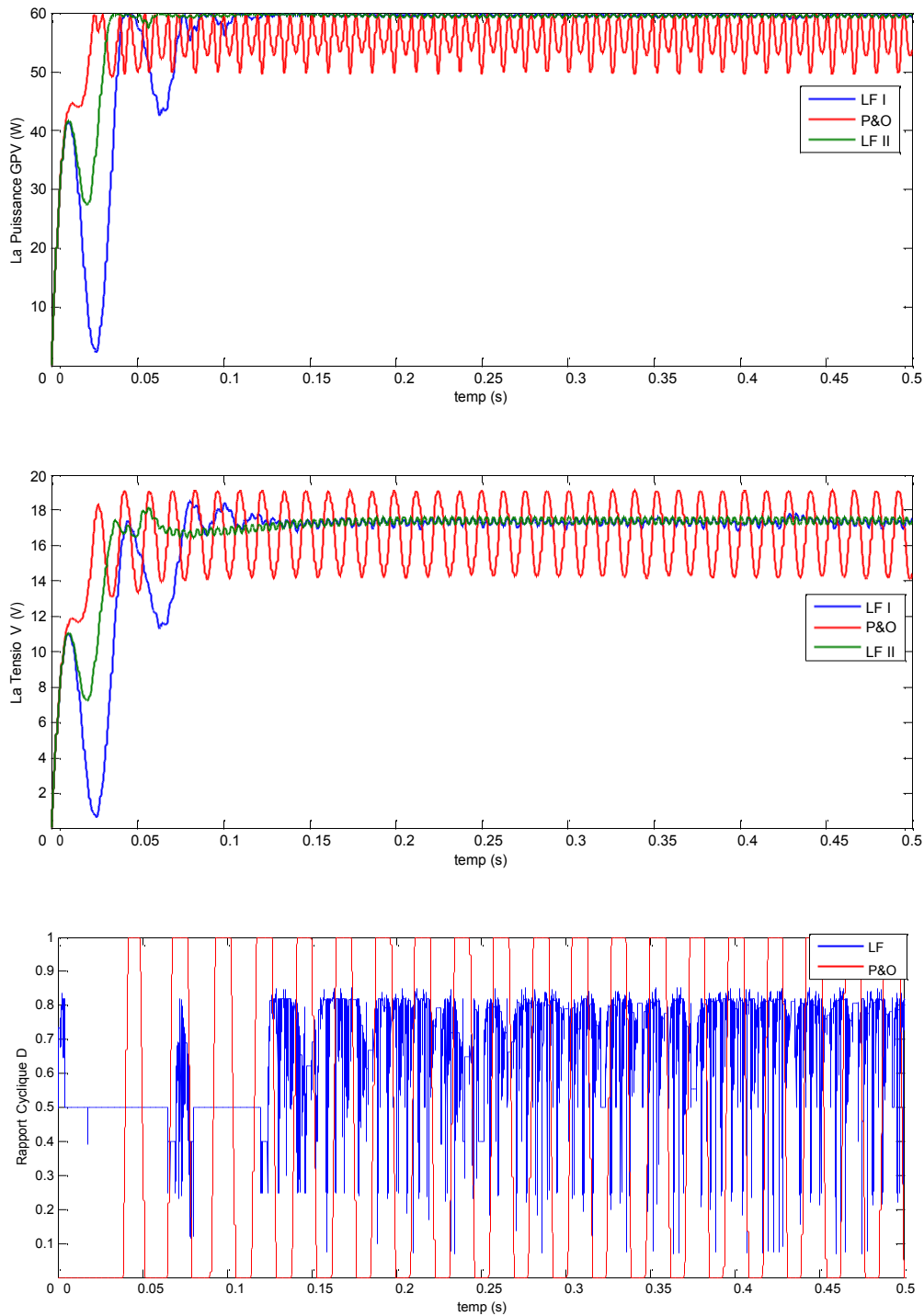


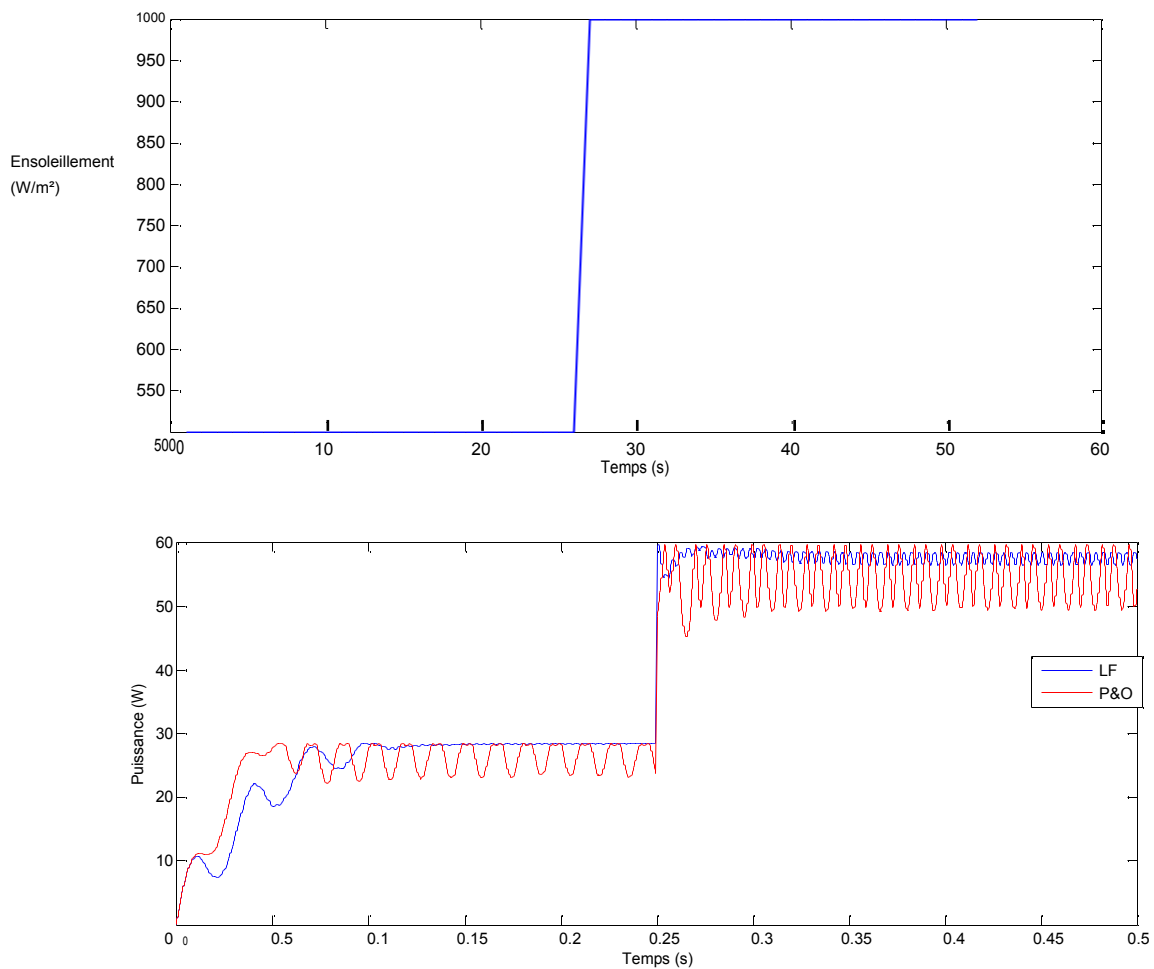
Figure .IV-8. Réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards : la température $T= 25^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement $E= 1000\text{W}/\text{m}^2$.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou conduit à des meilleures performances, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

IV.3.2. Comportement du système face à un changement des conditions météorologiques:

Afin d'évaluer le temps de réponse des deux mécanismes de poursuite, ces derniers sont soumis à des variations des conditions météorologiques. Pour voir le comportement du système face aux changements climatiques on va lui faire subir les tests suivants : d'abord on maintient une température constante (25 °C) et on varie l'éclairement solaire avec signal échelon ($E = 500$ à 1000 w/m^2) et signal rampe. [20]

Figure III-11 et III-12 montrent que le phénomène d'oscillation apparaît au niveau de la commande MPPT P&O, par contre la commande à logique floue réagit avec finesse en déminant toute oscillation possible.



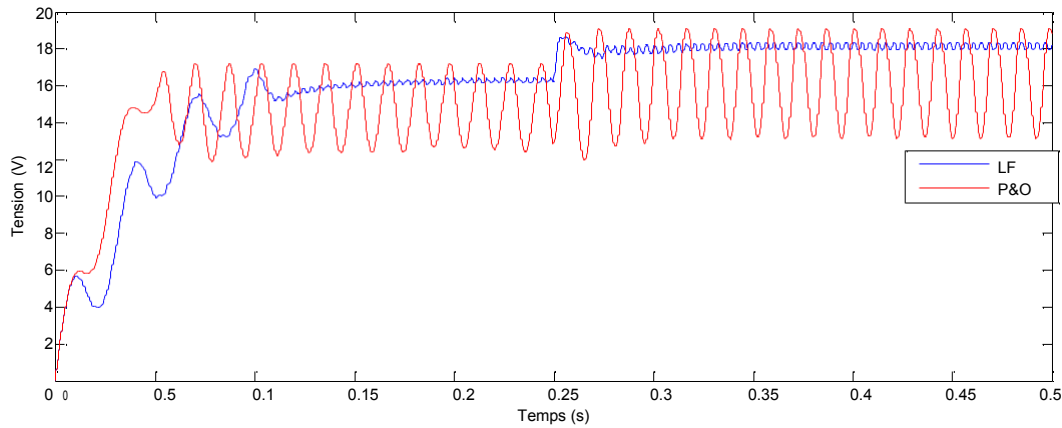


Figure .IV-9 Réponses des trois contrôleurs pour une augmentation d'ensoleillement (échelon $E = 500$ à 1000 w/m^2) à température constante $T = 25^\circ\text{C}$

La figure (III.12) montre comment la puissance de (P&O) augmente presque linéairement, avec un léger retard. On voit que la MPPT floue, dans ce cas, est plus rapide avec une faible oscillation autour du MPP.

Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque et de la charge, pour différentes valeurs d'éclairement et de température, ont été obtenus en simulant les contrôleurs MPPT flou et P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P&O). Le contrôleur P&O présente un temps de réponse rapide. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT floue a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques. [20]

IV.7. Conclusion :

Les simulations effectuées par l'utilisation des techniques P&O, logique floue sous différents conditions météorologiques ont permis de dire que les résultats obtenus par le contrôleur MPPT Flou sont meilleurs que celle du contrôleur MPPT P&O, du point de vue robustesse vis-à-vis des changements des paramètres météorologiques. La puissance de charge suit bien la puissance du GPV quelques soient les variations des paramètres météorologiques pour les deux contrôleurs. La méthode P&O, bien qu'elle soit efficace en termes de poursuite du PPM, présente des pertes de puissance dues à l'oscillation du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale et un régime transitoire long. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT floue a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, mais il provoque aussi des oscillations importantes au démarrage et à chaque phase de transition; ce qui implique une amélioration du rendement du système. [21]

Conclusion générale

Conclusion générale:

Cette étude concerne l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. Il s'agit d'utiliser une commande MPPT à base de logique floue (contrôleur flou) en vue d'améliorer les performances du mécanisme de poursuite du point de puissance maximale en termes de temps de réponse et de robustesse vis-à-vis aux variations des conditions climatiques.

Pour atteindre un tel objectif, nous avons commencé par donner le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque, élément principal dans un générateur photovoltaïque. Cette modélisation a été ensuite appuyée par simulation sous Matlab/Simulink d'un modèle de panneau photovoltaïque de type Solarex MSX-60 qui fournit une puissance maximale de 60 W sous des conditions atmosphériques standards. Cette simulation nous a permis d'une part de valider le modèle du panneau et d'autre part d'étudier l'effet du changement des conditions climatiques (ensoleillement et température) sur les caractéristiques électriques (I-V et P-V) du panneau.

Après l'étape de la modélisation, nous avons abordé le problème de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes de conversion photovoltaïque. Plusieurs techniques de commande MPPT ont été utilisées dans la littérature. Nous nous sommes intéressés à la commande MPPT floue utilisé dans le processus de recherche du point MPP.

Les résultats obtenus par simulation ont montré que la commande MPPT floue est plus robuste par apport à une commande MPPT conventionnelle.

Ainsi, les perspectives futures sont d'améliorer les performances d'une commande MPPT floue on optimiser les paramètres du contrôleur flou par les métaheuristiques pour maximiser la puissance du générateur photovoltaïque.

Références Bibliographies

Références & Bibliographies

- [1] K. Nishioka, et al. Evaluation of temperature characteristics of high-efficiency In-GaP/InGaAs/Ge triple junction solar cells under concentration, *Solar energy materials and solar cells* 85 (2005) 429–436.
- [2] M. Yamaguchi, et al. Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90 (2006) 3068–3077.
- [3] G.S. Kinsey, et al. Concentrator multi-junction solar cell characteristics under variable intensity and temperature, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16 (2008) 503–508.
- [4] G.S. Kinsey, et al. Spectral response and energy output of concentrator multi-junction solar cells, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17 (2009) 279–288.
- [5] K.C. Reinhardt, et al. Multi-junction solar cell iso-junction dark current study, *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2000, pp. 1118–1121.
- [6] C.Domínguez, et al. Multi-junction solar cell model for translating I–V characteristics as a function of irradiance, spectrum, and cell temperature, *Progress in Photovoltaics : Research and Applications* 18(2010) 272–284.
- [7] K. Nishioka, et al. Detailed analysis of temperature characteristics of an In-GaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell, *Journal of Electronic Materials* 39 (2010) 704–708. 7
- [8] K. Nishioka, et al. Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell under concentrated light by simulation program with integrated circuit emphasis, *Japan Journal of Applied Physics* 43 (2004) 882–889.
- [9] Kribus A., et al. Practical cogeneration with concentrating PV, 4th International Conference on Concentrated Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen (ICSC-4), El Escorial, Spain, 2007.
- [10] M. Steiner, et al. Front contact grid optimization of III–V solar cells with SPICE network simulation, 24th European Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 2009.
- [11] V.M. Emelyanov, et al. Distributed resistance effects simulation in concentrator MJ SCS using 3D-network model, 25th European Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 2010.

Références & Bibliographies

- [12] S-I. Sato, et al. Degradation modeling of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells ir-radiated with various-energy protons, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (2009) 768– 773, <http://elsevier.com/locate/solmat>.
- [13] T. Oka, et al. Characterization of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors with a heavily doped base, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40 (2001) 5221–5226.
- [14] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/S>.
- [15] R. Ferrini, et al. Optical functions of InGaP/GaAs epitaxial layers from 0.01 to 5.5 eV, *Eur. Phys. J. B* 27 (2002) 449–458.
- [16] A. Khan, et al. Thermal annealing study of 1MeV electron-irradiation-induced defects in n⁺ p InGaP diodes and solar cells, *J.Appl.Phys.*91(2002)2391–2397.
- [17] J.J. Loferski, et al. Radiation damage in Ge and Si detected by carrier lifetime changes: damage thresholds, *Phys. Rev.* 111(1958)432–439.
- [18] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInP/optic.html>.
- [19] <https://www.nouvelr-energie.com>
- [20] BEHIR Boubaker , KHEMIDA Fathi et GUETROUNE Kheir eddine , **Optimisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT floue.** , Mémoire de Master Académique , Université El Oued , 2019
- [21] BENADEL Faiza , **Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV,** Mémoire de Master Académique , Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016

