



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم الإلكتروميكانيك
Département Electromécanique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Electromécanique Minière

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque à l'aide du modèle Takagi-Sugeno

Par

SOUIAH HANA

Devant le jury :

Mr.HOUAM Ala	MAA	Président	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Mr.ATTIA Moussa	MAA	Encadreur	Université Larbi Tebessi – Tébessa
Mr. DAOUADI Rabah	MAA	Examineur	Université Larbi Tebessi – Tébessa

Promotion 2020-2021

UNIVERSITÉ LARBI TEBESSI - TEBESSA

INSTITUT des Mines

تبسة في:/...../2020



رقم:/...../2020 م.م/ت

جامعة العربي التبسي-تبسة

معهد المناجم

رفع التحفظات

اسم و لقب الأستاذ المناقش: ذوادي رايح
عنوان المذكرة: Modélisation et simulation d'un
système photovoltaïque à l'aide du
modèle TAKAGI - SUGENO.

الطالبة:

1- سويح هتاء

2- ✓

التخصص: Electromécanique، القسم: Electromécanique
minière.

موافق على وضع المذكرة في المكتبة بعد إجراء التصحيح المطلوب

موافق على وضع المذكرة في المكتبة و هي معفية من التصحيح

إمضاء الأستاذ المناقش

ذوادي رايح

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) لسويح هناء الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالبة

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 110633598 و الصادرة بتاريخ 2018.09.15

المسجل بمعهد المتاحم قسم الإلكترونيات

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque
à l'aide du modèle TAKAGI-SUGENO.

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2021/15/06

إمضاء المعني (ة)




مدير/ رئيس المجلس العلمي
و يمسك نسخة
إمضاء الأستاذة
كتيب رائقن



Année universitaire : 2020-2021

Tébessa le : 16/06/2021

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1. SOUIAH. Hana.
2. _____
3. _____

Niveau : 2^{ème} A. Master Option : Electronique minière

Thème : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque à l'aide du modèle TAKAGI-SUGENO

Nom et prénom de l'encadreur : _____

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
CH1 Généralité sur les systèmes PV.	
CH2 Modélisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque.	
CH3 Commande MPPT d'un système PV.	
CH4 Simulation et discussion des Résultats.	



DEDICACES

*Je dédie ce travail, en premier lieu, aux êtres les plus chers
au monde : mes parents, ma mère*

DAIF Ouarda

*Quoi que je fasse je ne pourrai leur rendre ce qu'ils ont fait
pour moi ; si je suis arrivée là c'est bien
grâce à eux, que Dieu les bénisse, leur accorde longue
vie et les protège.*


A la mémoire de mon Père SOUIAH Boubaker

A Mes sœurs, Zina, Affef, Fatima, Karima

A mes frères, A. Rezzak, Issmail, A. Hamid

A mon âme sœur MERABTI Anfel

A toute ma famille et toutes mes amies





REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour terminer ce modeste travail.

Il nous est agréable d'exprimer nos profondes reconnaissances ainsi que nous sincère gratitude à tous ceux qui nous ont encouragé et qui ont contribué directement ou indirectement à l'élaboration de ce modeste travail et particulièrement à :

Mon promoteur, M. ATTIA Moussa pour sa disponibilité et ses précieux conseils répétés, d'être très serviable avec moi, et pour toute l'aide rapportée durant les étapes de réalisation de ce travail.

Je veux remercier les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail

L'ensemble des enseignants de l'Institut des Mines.

Je tiens également à remercier chaleureusement les messieurs (ALLOUANE Kamal, TRAD Khaled) pour leur grande aide dans la

Formation du Stage, à la société SONELGAZ Bir El Ater.

A tous les enseignants qui nous ont enseigné durant toutes les étapes scolaires de notre vie,

UN GRAND MERCI.



Liste des symboles ;

- I_{ph} :photo-courant.
- I_d : Courant traversant la diode.
- n :Facteur de qualité.
- q :Chargé d'électron.
- E :L'éclairement.
- K : La constante de Boltzmann.
- K_1 : Coefficient de la température du courant de court-circuit.
- V_T :Tension thermique.
- I_S :Courant de saturation.
- I_{RS} :Courant de saturation réversible.
- V :Tension aux bornes de la diode.
- T :Température absolue (en kelvin).
- T_{ref} :Température de référence de la cellule.
- E_g : Energie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule.
- R_S :La résistance série.
- R_p : La résistance parallèle.
- N_S :Nombre de module en série.
- N_P :Nombre de module en parallèle.
- V_{pv} :tension à la sortie du générateur PV
- I_{pv} :Courant à la sortie du générateur PV
- P_{pv} :Puissance à la sortie du générateur PV
- V_m :L'amplitude de la porteuse
- F_{abc} :Fonctions de commutation des interrupteurs.
- V_{dc} :Tension continue appliquée à l'onduleur.
- $V_{ab,bc,ca}$:Tensions composées.
- m :L'indice de modulation.
- V_{ref} , b_{ref} , c_{ref} :Tensions de référence.
- $V_{a,b,c}$:Tensions de phase du réseau.
- $I_{a,b,c}$: Courants de phase du réseau.

Liste des Abréviations

- MPPT:Poursuite du point de puissance maximale.
- PV:Photovoltaïque.
- GPV:Générateur Photovoltaïque.
- PPM:Point de Puissance Maximale.
- MLI:Modulation de Largeur d'Impulsion.
- P&O: Perturbation et Observation.
- TS: Takagi Sugeno

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques...	16
Tableau 3.1 .Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.....	64

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE 1	
Figure 1.1 spectre solaire hors atmosphère.....	7
Figure 1.2 Les systèmes photovoltaïques autonomes.....	9
Figure 1.3 Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau.....	9
Figure 1.4 principe de fonctionnement d'une jonction P-N.....	11
Figure 1.5 Structure basique d'une cellule solaire.....	12
Figure 1- 6 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire dont la structure est une jonction P-N	13
Figure 1.7 : Modèle de cellule photovoltaïque idéale.....	17
Figure 1.8: Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.....	18
Figure 1.9 : Courbe caractéristique P-V.....	20
Figure 1.10: Un module photovoltaïque	21
Figure 1.11 Composants d'un champ de modules PV.....	23
CHAPITRE 2	
Figure 2.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	28
Figure 2.2 Modèles simplifiés d'une cellule solaire.....	29
Figure 2.3 Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire.....	30
Figure 2.4 Module photovoltaïque.....	32
Figure 2.5 Modèle du générateur PV.....	33
Figure 2.6 Caractéristique $I=f(V)$ d'un module PV ($N_S=N_P=1$).....	34
Figure 2.7 Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique du module.....	35
Figure 2.8 Effet de la température sur la caractéristique du module.....	35
Figure 2.11 Champ photovoltaïque.....	37
Figure 2.12 Variation des caractéristiques $I=f(V)$ avec l'ensoleillement et la température.....	38
Figure 2.14 Schéma fonctionnel général du système P-V avec MPPT.....	40
Figure 2.15 Convertisseur boost entre les formes d'ondes de la figure 2.16.....	42
Figure 2.16 Formes typiques d'ondes du convertisseur boost.....	42
CHAPITRE 3	
Figure 3.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	49
Figure 3.2 Principe de la commande MPPT.....	50
Figure-3.3 Algorithme de la Tension Constante de différences situées dans la plage de tolérance [C5].	53
.....	
Figure- 3.4 Algorithme du courant constant.....	54
Figure- 3.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	55
Figure- 3.6 l'algorithme de P&O classique.....	56
Figure- 3.7 Divergence de la méthode P&O.....	58
Figure-3.8 Algorithme du point de puissance maximale.....	59
Figure- 3.9 Positionnement du point de fonctionnement ($G=1\text{ kW/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).....	61
Figure- 3.10. Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN).....	62
Figure- 3.11. Structure de base de la commande floue.....	63
CHAPITRE 4	
Figure 4.1. Secteur non linéaire global	72
Figure 4. 2 Configuration du système d'énergie photovoltaïque.....	76
Figure 4. 3 Diagramme P-V pv utilisant.....	79
Figure 4.4. Diagramme I_{pv} - V_{pv} utilisant le contrôleur flou T-S.....	79
Figure 4. 5 Niveaux de rayonnements solaires.....	80
Figure 4. 6 Puissance PV (w).....	80
Figure 4. 7 La tension de sortie du générateur photovoltaïque basée sur le contrôle MPPT..	80
Figure 4. 8 Courant PV (A).....	82

Figure 4. 9 Réponse en puissance PV basée sur le contrôleur flou T-S.....	82
Figure 4. 10 Le courant de sortie du générateur photovoltaïque basé sur le contrôleur flou	82
Figure 4. 11 Niveaux de température.....	83
Figure 4. 12 Puissance PV (w).....	83
Figure 4. 13 La tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	83
Figure 4. 14 Courant PV (A).....	83
Figure 4. 15 Réponse de puissance PV.....	84
Figure 4. 16 Le courant de sortie du générateur photovoltaïque.....	84

Résumé:

Dans ce travail nous avons modélisé et simulé un système PV autonome régulé sans commande et par la commande de la logique floue (MPPT flou TAKAGI SUGENO), et enfin avec un observateur pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le GPV.

La modélisation floue de type TakagiSugeno avec observateur du système composé de générateur photovoltaïque, un convertisseur élévateur " Boost " et une charge. Les résultats de simulation montrent que le modèle reproduit fidèlement le comportement du système non linéaire et il est stable.

Mots clés: système PV- logique floue – MPPT - convertisseur DC/DC- TakagiSugeno TS - observateur

Abstract:

In this work we modeled and simulated an autonomous PV system regulated without control and by the control of fuzzy logic (fuzzy MPPT TAKAGI SUGENO), and finally with an observer to ensure the pursuit of the maximum power point provided by the GPV.

Fuzzy modeling of the Takagi Sugeno type with observer of the system composed of a photovoltaic generator, a Boost converter and a load. The simulation results show that the model faithfully reproduces the behavior of the nonlinear system and it is stable.

Key words: PV system – fuzzy logic - MPPT – DC converter – Takagi Sugeno TS - observer

ملخص:

في هذا العمل قمنا بنمذجة ومحاكاة نظام كهروضوئي مستقل، في البداية دون أي متحكم ثم تحكنا فيه بالمنطق الضبابي، وأخيرًا مع إضافة مراقب لضمان الوصول إلى نقطة الاستطاعة العظمى من الطاقة التي يوفرها المصدر الكهروضوئي.

إن النمذجة الضبابية نوع تاكاجيسوجينو مع مراقب للنظام يتكون من مولد كهربائي ضوئي ومحول رافع للجهد وحمل ذو تيار مستمر، تظهر نتائج المحاكاة أن النموذج يعيد إنتاج سلوك النظام غير الخطي بأمانة وأنه مستقر.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي – المنطق الضبابي – تتبع نقطة الاستطاعة العظمى – محول الجهد – تاكاجيسوجينو TS – مراقب

Table des matières

Dédicace

Remercîment

Liste des symboles:

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumés

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I :GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

1.1 Introduction 4

1.2 Les ressources des énergies renouvelables 4

1.3 L'énergie solaire 5

1.4 L'énergie photovoltaïque 8

1.5 La cellule photovoltaïque 11

1.6 Différentes technologies de cellules solaires 13

1.7 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque 18

1.8 Le module photovoltaïque 21

1.10 Avantages et inconvénients de l'énergie PV..... 24

1.11 Conclusion 26

CHAPITRE 2:MODELISATION D'UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. Introduction 28

2.2.Modélisation d'unecellulephotovoltaïque..... 28

2.3.Rendementd'unpanneauPV 32

2.4.Simulationdupanneauphotovoltaïque 34

2.4.2.Effetdetempératuresurlescaractéristiques $I=f(V)$ 35

2.5.ModélisationduconvertisseurDC-DC 40

CHAPITRE 3:COMMANDE MPPT D'UN PHOTOVOLTAÏQUE

3.1Introduction 49

3.2.1PrincipeDeLaCommandeMPPT 49

3.3 Classification Des Commandes MPPT	50
3.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.	50
3.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	51
3.4 Les Algorithmes MPPT	52
3.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)	52
3.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current):	53
3.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)	55
3.4.4 Conductance Incrémentale (Inc Cond, Incremental Conductance)	60
3.4.5 La Commande MPPT Flou	62
3.4.6 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels	65
3.4.7 Autres Méthodes	66
3.5 Critères d'évaluation d'une commande MPPT	67
3.5.1 Simplicité et Coût	67
3.5.2 Réponse dynamique	68
3.5.3 Flexibilité	68
3.5.4 Compétitives sur une large gamme de puissance	68
3.6 Conclusion	68

CHAPITRE IV: SIMULATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

4.1 Introduction	70
4.2 La Modélisation floue de Type Takagi Sugeno TS d'un système photovoltaïque (Panneau PV + Convertisseur Elévateur (Dc/Dc Boost Converter)).	70
4.2.1. Concepts de base et formulations de la méthode Takagi Sugeno Floue	70
4.2.2. STABILITE DES MODELES TAKAGI-SUGENO (T-S)	73
4.2.3. OBSERVATEURS POUR LES SYSTEMES DE TAKAGI-SUGENO	74
4.2.4. VARIABLES DE DECISION MESURABLES (VDM)	75
4.2.5. VARIABLES DE DECISION NON MESURABLES (VDNM)	76
4.2.6. Construction du modèle flou pour système proposé	76
Conclusion :	84
CONCLUSION GENERALE	86
Bibliographie	88

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Parmi les énergies renouvelables, qui peuvent remplacer les énergies fossiles, on peut citer l'énergie solaire via le photovoltaïque. Cette énergie propre et écologique ne nécessite pas beaucoup d'entretien. Les principaux inconvénients d'un système photovoltaïque (PV) sont son coût d'installation élevé et son faible rendement. (Moins de 20%).

La production d'énergie photovoltaïque dépend de la température et de la puissance du rayonnement solaire. Pour extraire la puissance maximale, il est nécessaire de faire fonctionner le générateur photovoltaïque à sa puissance maximale (MPP), via une interface électronique entre le système PV et la charge.

Le générateur photovoltaïque, étant un système non linéaire doit être modélisé pour fonctionner à sa puissance maximale. Le rendement du MPPT appliqué au générateur photovoltaïque via le convertisseur DC-DC dépend de l'algorithme de contrôle utilisé. Ainsi, de nombreuses techniques MPPT ont été proposées, implémentées et comparées dans la littérature.

L'un des algorithmes les plus populaires de MPPT est la technique Perturb and Observe (P&O); Par rapport à la méthode de conductance incrémentale (IC), la méthode P&O prend une convergence plus rapide pour atteindre le point de puissance maximale.

Bien que, lors du suivi de MPPT, certains problèmes de convergence et quelques oscillations puissent survenir autour de certains points, en particulier dans les zones à variation rapide de l'irradiation solaire, l'utilisation de la méthode de conductance incrémentale permet de réduire ces oscillations mais nécessite plus de temps pour atteindre le point de puissance maximale.

Pour améliorer les performances des algorithmes P&O et IC, nous appliquerons, dans les systèmes PV, le contrôle logique flou (FLC) au contrôle MPPT qui fonctionne mieux que les méthodes conventionnelles.

Les performances FLC traditionnelles dépendent des fonctions d'appartenance au type considérées et des règles de contrôle FLC. Ainsi, la présence d'une connaissance de fonctionnement du système étudié est obligatoire pour optimiser simultanément les fonctions d'appartenance et les règles de commande floue.

Depuis 1984, et selon la représentation du modèle flou de Takagi-Sugeno, les systèmes non linéaires, comme les systèmes PV, peuvent être décrits par des règles floues SI-ALORS qui ont des sous-systèmes dynamiques linéaires locaux dans la partie consistante.

Jusqu'à présent, le contrôle basé sur le modèle flou T-S est devenu une méthode populaire et efficace pour contrôler des systèmes non linéaires complexes. Le contrôleur flou T-S permet de piloter le convertisseur Boost en agissant sur son rapport cyclique et permettant ainsi de faire fonctionner le générateur photovoltaïque à sa puissance maximale.

Dans cet article, nous avons utilisé une méthode avec un contrôle intelligent pour le Power Point Tracking maximum d'un système photovoltaïque avec des variations de la température et des rayonnements. Le MPPT est basé sur l'approche du modèle flou de Takagi-Sugeno.

Le système composé du générateur photovoltaïque et du convertisseur DC-DC est simulé sur Simulink en considérant différentes variations climatiques. Le fonctionnement du système à sa puissance maximale montre l'efficacité de l'algorithme de contrôle utilisé.

Ce mémoire est organisé comme suit:

Dans le chapitre I, une généralité sur les systèmes photovoltaïque. Et une description des organes la chaîne PV (Générateur photovoltaïque, convertisseur élévateur et abaisseur) et sa modélisation mathématique est dans le chapitre II. Et une étude comparative entre les méthodes de commande dans le chapitre III. Et enfin; la technique de contrôle floue T-S proposée est présentée par la simulation & discussion des résultats dans le dernier chapitre.

CHAPITRE I
GENERALITE SUR LES SYSTEMES
PHOTOVOLTAÏQUES

1.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [1]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque. Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta.

Ce phénomène fut découvert au 19^{ème} siècle par le physicien [Alexandre Edmond Becquerel].

La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utilisé pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [2]

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques.

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir [3]:

- Les systèmes autonomes,
- Les systèmes connectés au réseau,
- Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).

1.2 Les ressources des énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. ce sont des énergies de flux, par

opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...) [4]. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [5][6].

1.2.1 Définition d'énergie renouvelable

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [5], [7].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [5], [8], [4].

1.3 L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [9], les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (1.1)$$

h : la constante de planck,

C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (1.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

-6% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm).

-74% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm).

-77% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

1.3.1 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ $0.5\mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [10] :

- Diamètre de soleil $D_s=1.39.10^9\text{m}$
- Diamètre de la terre $D_t=1.27.10^7\text{m}$
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts}=1.5.10^{11}\text{m}$

1.3.2 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [11] :

- **Rayonnement direct**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère [11].

- **Rayonnement diffus**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [11].

- **Rayonnement réfléchi**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend

directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$ [11].

- **Rayonnement global**

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [11].

1.3.3 Spectre du rayonnement

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

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [12]:

Ultraviolet Uv	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	6.4%	Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%
Infrarouge Ir	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%			

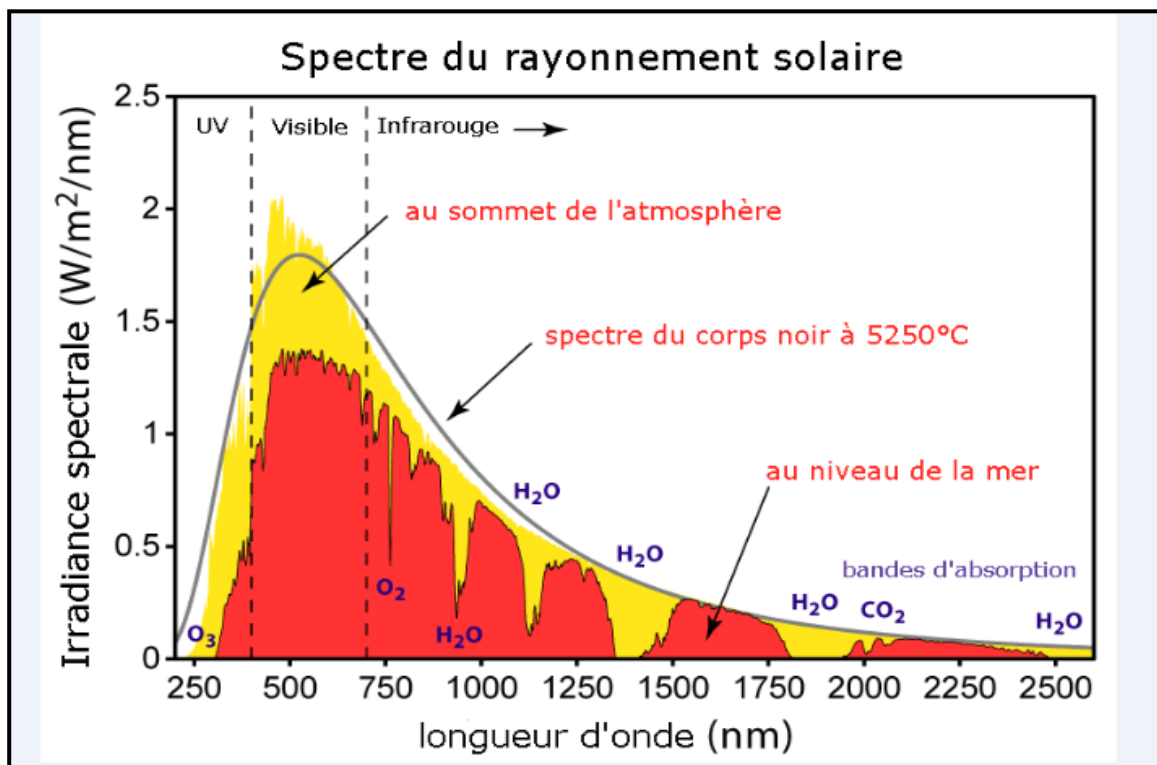


Figure 1.1 spectre solaire hors atmosphère.

1.3.4. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés

on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.

1.4 L'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [13].

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique [14].

1.4.1 Topologies de systèmes photovoltaïques

IL existe deux types de systèmes PV: les systèmes autonomes et les systèmes connectés au réseau. **Les systèmes photovoltaïques autonomes** avec des puissances PV maximales peuvent avoir des milliwatts à plusieurs kilowatts. Ils ne sont pas connectés à un réseau électrique. Afin d'assurer l'approvisionnement du système autonome avec alimentation électrique également dans les moments sans rayonnement ou avec très faible rayonnement, les systèmes autonomes ont généralement un système de stockage intégré. Si les systèmes sont utilisés seulement pendant le temps où le rayonnement est suffisant pour alimenter le système en énergie électrique directement, un système de stockage n'est pas nécessaire. Ceci s'applique également à la situation dans laquelle le produit. Livres par le système peuvent être stockés. Il existe actuellement une très grande variété de systèmes autonomes. Les exemples vont du solaire calculatrices et montres aux systèmes de contrôle du trafic, aux systèmes capables de fournir un ou plusieurs plusieurs bâtiments situés dans des zones reculées alimentés en électricité. Ils peuvent être des systèmes à courant continu avec ou sans batterie de stockage, ou ils peuvent être des systèmes AC avec un onduleur. Les systèmes PV connectés au réseau sont toujours connectés au réseau public onduleur adapté car un module PV ne délivre que du courant continue [15].

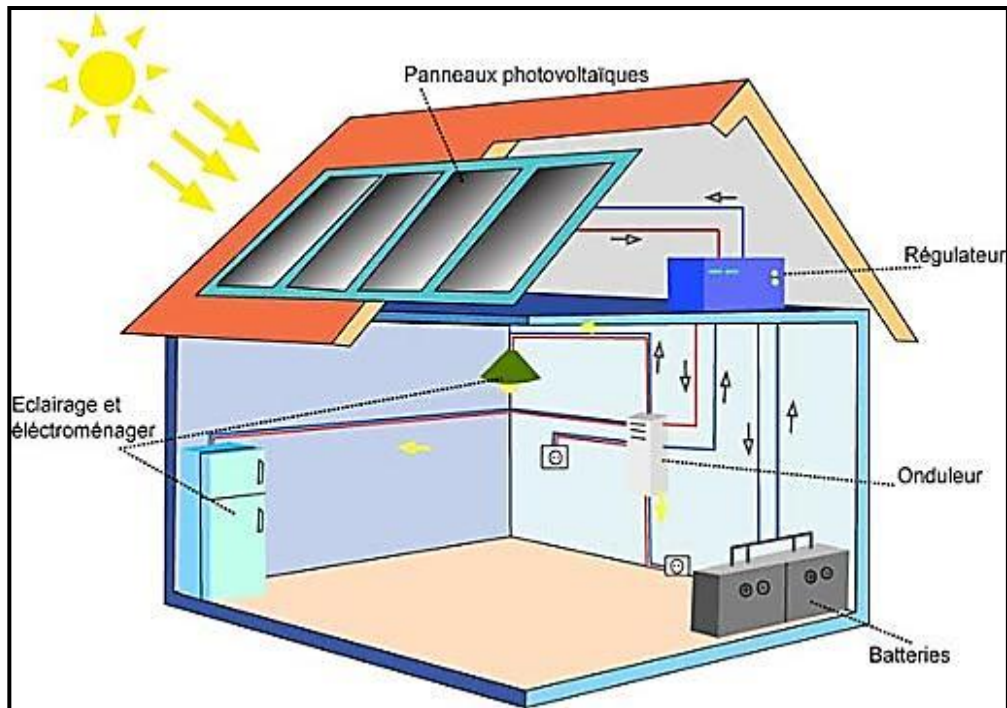


Figure 1.2 Les systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau

Ont principalement une petite plage de puissance et sont installés sur le toit des bâtiments (installation sur toit plat) ou intégré aux façades des bâtiments Les systèmes PV connectés au réseau central ont une puissance installée allant jusqu'à la plage en MW. Avec une telle central photovoltaïque, il est possible d'alimenter directement le réseau moyenne ou haute tension [15].

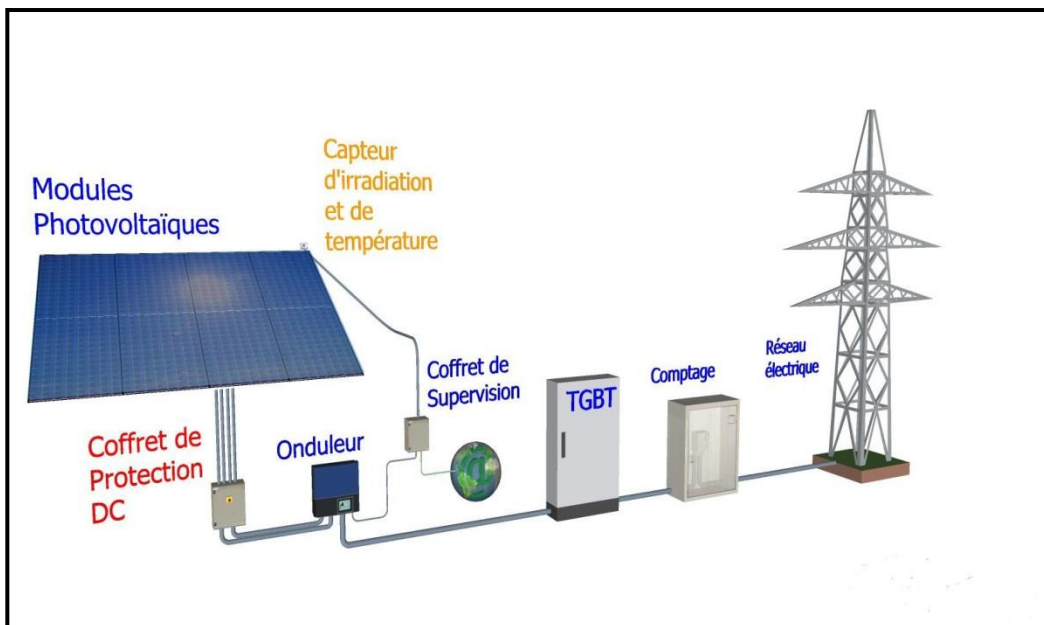


Figure 1.3 Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau.

1.4.2 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé Cellule solaire [16].

1.4.3 Principe générale

La formation d'une jonction réalisée par le dopage du silicium représente le principe de base de la cellule solaire. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de la lumière dans le matériau. Lors de la formation de la jonction, les électrons diffusent vers la zone p et les trous vers la zone n (alignement du niveau de Fermi), afin de tendre vers un équilibre Thermodynamique. Le dipôle, créé aux bords de la jonction, entraîne la formation d'un champ Électrique qui s'oppose à l'équilibre à tout déplacement de charges. La polarisation de la Jonction en direct permet alors de diminuer la hauteur de la barrière de potentiel et donc L'intensité de champ électrique permettant le passage de porteurs de charges. A l'opposé, une Polarisation inverse augmentera la hauteur de la barrière [17].

La relation courant-tension pour une diode idéale à l'obscurité est donnée par la relation:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q \cdot v}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de la diode

n : facteur d'idéalité de la diode

k : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

q : charge électrique (en coulomb)

T : température en Kelvin

- **Dopage de type N** : Le dopage de type N (négatif), qui consiste à introduire dans la structure cristalline du Semi-conducteur des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron Excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal (ex : le phosphore) [8].
- **Dopage de type P** : Le dopage de type P (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau Cristallin donnera un trou excédentaire. (ex : le bore) [8].

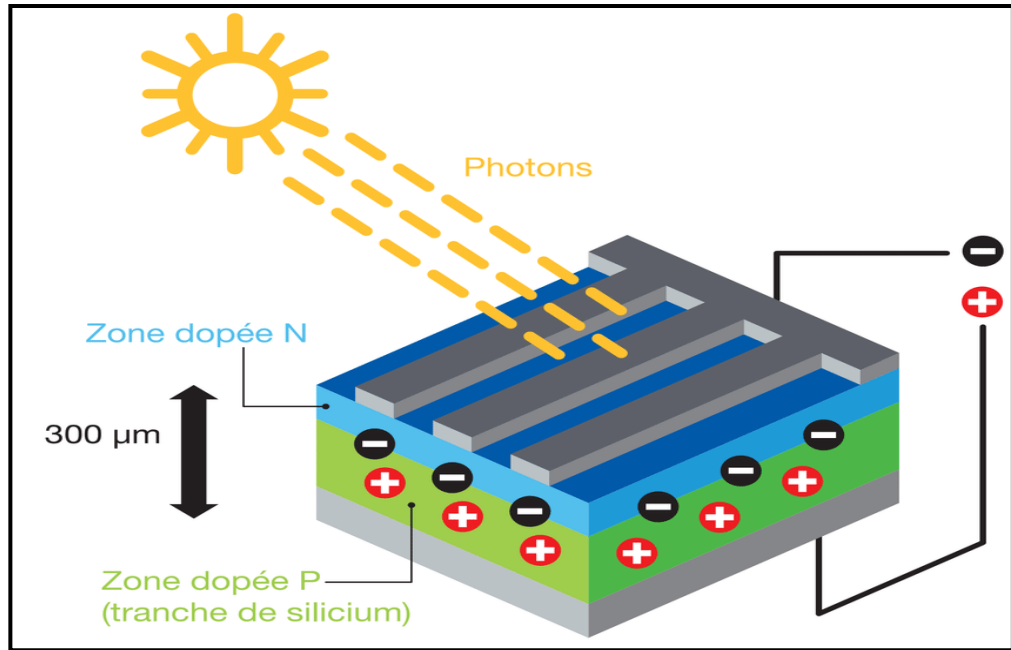


Figure 1.4 principe de fonctionnement d'une jonction P-N

1.4.4 La Jonction PN utilisée comme capteur

En polarisant électriquement une jonction PN classique à base de Si, on obtient la caractéristique statique d'une diode. La particularité du Si est lorsque la jonction PN est éclairée, un courant proportionnel à l'éclairement apparaît. C'est cette particularité qui est employée dans les générateurs solaires photovoltaïques [14].

1.5 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, elle est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que la température et du vieillissement de la cellule. Composée de matériaux semi-conducteurs, les cellules photovoltaïques sont constituées de :

- ❖ D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- ❖ D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- ❖ D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur dessous ou anode.

- ❖ Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

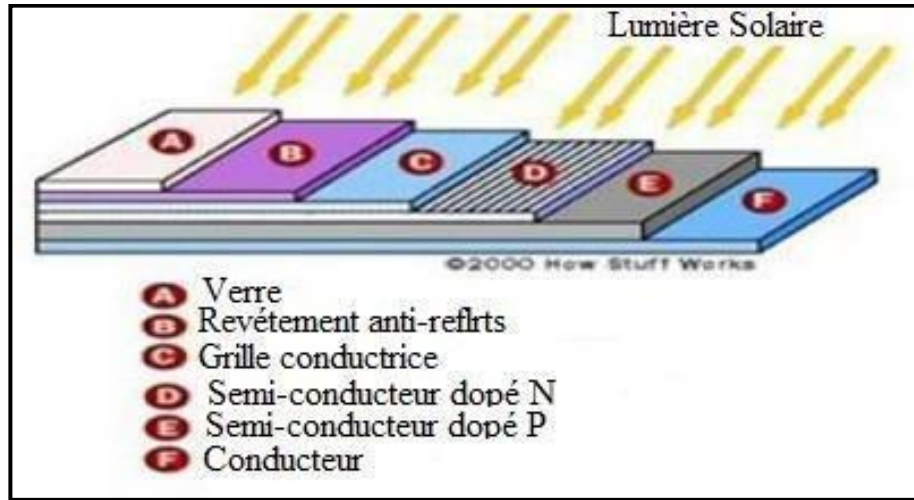


Figure 1.5 Structure basique d'une cellule solaire

1.5.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque est illustré sur la figure (1-6), qui représente le fonctionnement d'une jonction PN où la zone de charge d'espace créée est une région dépourvue de porteurs libres qui se comporte comme une zone intrinsèque. Les photons incidents $h\nu$ créent des porteurs dans chacune des régions P, I, N, et leur comportement diffère suivant la région de la jonction où ils sont créés. Dans les régions électriquement neutres P et N, les photo porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique, dirigé de la partie chargée positivement à la partie chargée négativement (voir figure 1-6), vers la région où ils deviennent majoritaires. Il y a donc une séparation des porteurs dans la ZCE vers les régions p et n. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération. [13]

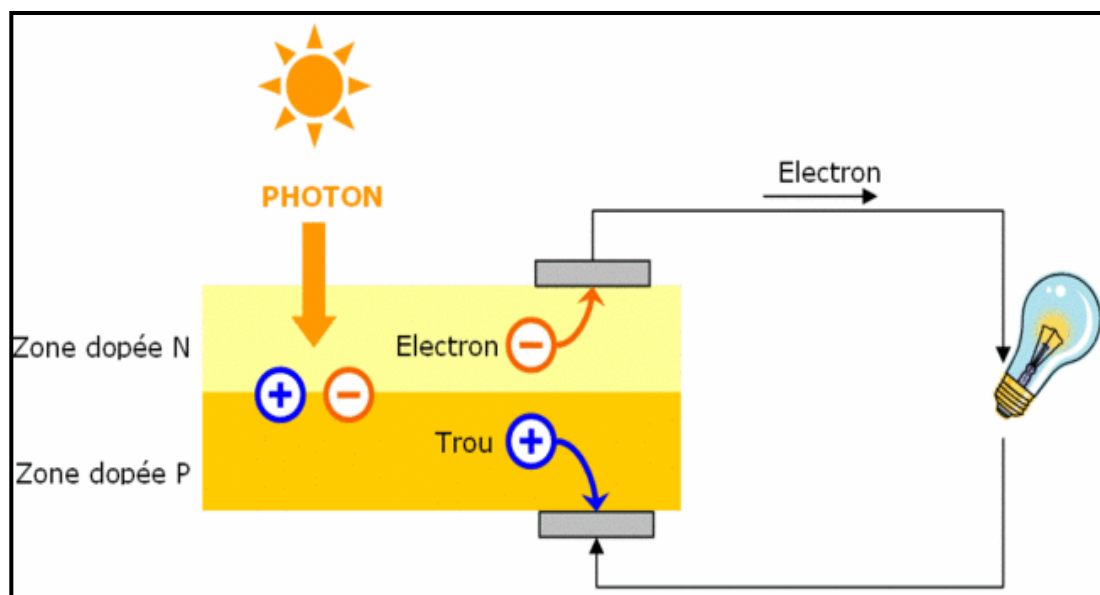


Figure 1- 6 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire dont la structure est une jonction P-N [13].

Sur cette figure, on constate l'existence de trois régions : les régions P et N séparées par une large zone de charge d'espace isolante, symbolisée par la lettre I.

1.6 Différentes technologies de cellules solaires

Une grande variété de cellules photovoltaïques existe et peut être partagée en trois grandes familles selon les technologies utilisées. La première génération existe depuis plusieurs dizaines d'années, elle offre de loin le meilleur rendement pour un rapport qualité/ prix assez satisfaisant. La deuxième génération, récemment apparue regroupe les technologies dites « couches minces », leurs rendement est encore inférieur à celui des cellules cristallines mais tend à s'améliorer pour un coût inférieur. La dernière et troisième génération, celle des cellules organiques est en cours de développement et vise de hauts rendements avec des coûts de productions de plus en plus bas.

1.6.1 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin

Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la Première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin. Le silicium monocristallin reste encore plus cher que le silicium poly cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 19.8% contre 24.7% de rendement en laboratoire [18][19].

➤ Cellule monocristalline

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Cependant

pour arriver à ce résultat la fabrication est complexe et coûteuse en énergie, les rendements de conversion obtenue varient entre 14 et 16% [20].

➤ **Cellule poly cristalline**

Contrairement à la cellule monocristalline, la cellule poly cristalline n'a pas besoin d'un silicium aussi pur et ordonné. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage des monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en plaquettes. Les rendements de conversion industrielle qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980 sont actuellement de 16 à 17% [12]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

1.6.2 Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince

Les premiers essais de couches minces remontent au milieu du XX^{ème} siècle avec de fins dépôts sur cristaux massifs puis finalement des structures complètement à base de couches minces [21]. Ces technologies reposent sur des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire, et promettent un avenir prometteur vu leurs croissance importante ces dernières années.

➤ **Les cellules amorphes**

Les cellules amorphes sont à base d'un matériau composé de silicium hydrogéné (état non cristallin) déposé sur un substrat de verre, elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, et sont souvent utilisées dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ces derniers est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). Leur rendement est assez faible de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire, mais ne nécessite que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevés.

➤ **Le tellure de Cadmium (CdTe)**

Il s'agit d'une technologie extrêmement prometteuse, permettant d'obtenir des rendements tout à fait convenables (16,5% en laboratoire). De part une bande interdite de 1,45eV parfaitement adaptée au spectre solaire [22] et un très fort coefficient d'absorption, seule une couche de 2 µm est nécessaire pour obtenir un matériau très opaque et absorbant une grande partie du spectre solaire. Cependant la limite principale au déploiement de grande ampleur de cette technologie reste la toxicité du cadmium.

➤ **Cuivre indium sélénium (CIS) / Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS)**

Cette filière présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grandes quantités.

1.6.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques »

Apparues dans les années 1990, les cellules organiques font aujourd'hui l'objet d'un sujet d'étude très actif en laboratoire, ce sont des cellules photovoltaïques dont, au moins, la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types : les cellules photovoltaïques organiques moléculaires et les cellules photovoltaïques organiques en polymères.

Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment annoncés (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures d'exposition).

Les nanosciences ouvrent cependant de nouvelles voies à leurs améliorations. Leur avenir industriel n'est pas encore établi mais ces technologies ouvriraient la voie à des modules à très bas coût, biodégradables et pouvant être intégrés à toutes formes de surface.

Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir.

	Technologies	Rendement	Avantages	Inconvénients	Durée de vie
1 ^{ère} Génération	Silicium monocristallin	14-17%	Bon rendement pour une cellule	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
	Silicium polycristallin	12-15%	Bon rendement pour un module	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
2 ^{ème} Génération	Silicium Amorphe	6-10%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	<10 ans
	Cdte	8-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	Non évaluée
	CIS/CIGS	10-12%	Energie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	5 ans
3 ^{ème} Génération	Cellules Organiques	10%	Faible coût de fabrication, Flexible	Rendement encore trop bas	Faible actuellement

Tableau 1.1 : Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques.

1.6.4 Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure (1.7) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. D'après la loi de noeuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.4)$$

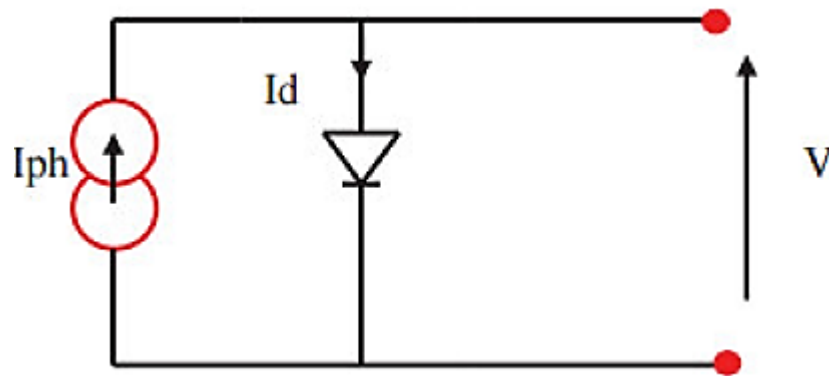


Figure 1.7 : Modèle de cellule photovoltaïque idéale

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode

$$V = V_d \quad (1.5)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{v_d}{v_t}\right) - 1 \right) \quad (1.6)$$

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode [A].

V_d : La tension aux bornes de la diode [V].

V_t : Potentielle thermique.

Donc la relation devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{v_d}{v_t}\right) - 1 \right) \quad (1.7)$$

1.6.5 Cellule photovoltaïque réelle :

Le modèle photovoltaïque précédent ne prenait pas en compte tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_S et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_P .

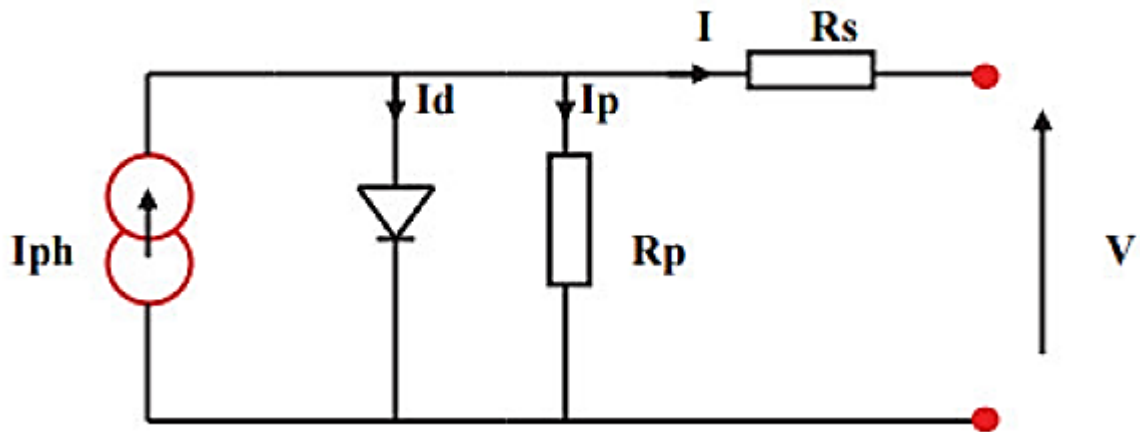


Figure 1.8: Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.8)$$

$$I_p = \left(\frac{v + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (1.9)$$

$$I_d = I_0 \left(\text{Exp} \left(\frac{V + I \cdot R_s}{v_t} \right) - 1 \right) \quad (1.10)$$

I : Le courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

R_s : Résistance en série.

R_p : Résistance en parallèle.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\text{Exp} \left(\frac{V + I \cdot R_s}{v_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (1.11)$$

1.7 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{co} , FF, η) extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

1.7.1 Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V=0$). Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire :

$$I_{cc} (V=0) = I_{ph} \quad (1.12)$$

1.7.2 Tension de circuit ouvert V_{co}

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

$$V_{CO} = \ln \frac{nkt}{q} \quad (1.13)$$

n : Facteur d'idéalité de la diode.

K : constante de Boltzmann (1,381.10-23 Joule/Kelvin).

T : Température de la jonction p-n des cellules.

q : Charge d'électron (1,602.10-19 C).

E : Eclairement reçu.

E0 : Eclairement de référence.

Il peut aussi être calculé par :

$$V_{oc} = \frac{nkt}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.14)$$

I_{cc}: Courant continu de la cellule.

I_s: Courant de saturation de la diode.

1.7.3 Puissance maximale

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairement, température, etc.), la puissance électrique (P) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni (I) par une tension continue donnée (V) :

$$P = I * V$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV (Watt).

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

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère).

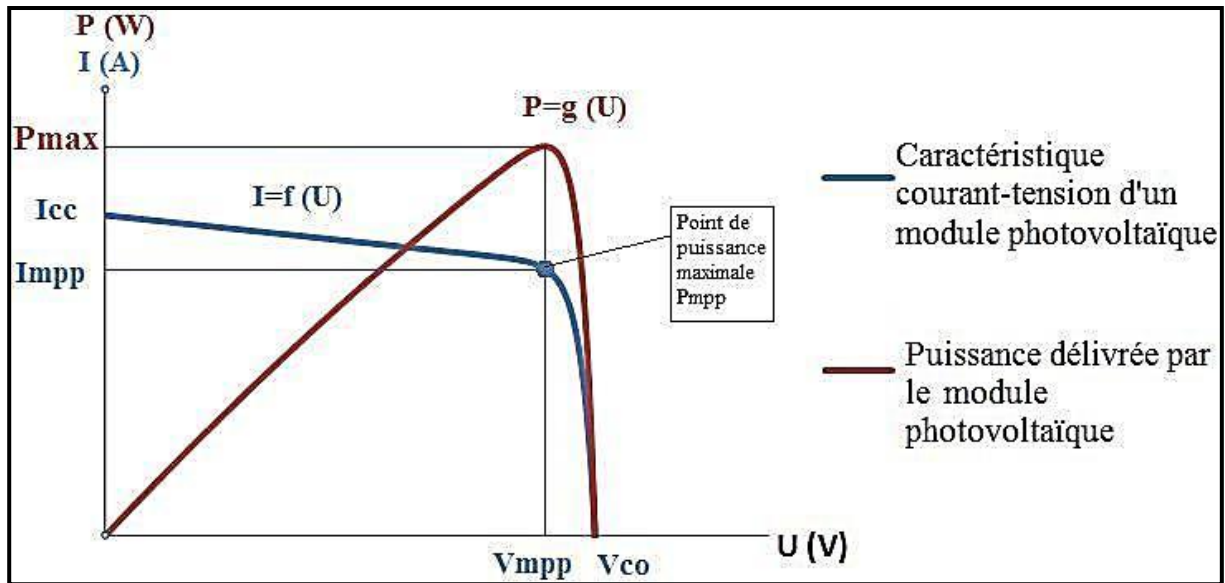


Figure 1.9 : Courbe caractéristique P-V

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

$$P_{max_idéale} = V_{co} * I_{cc} \quad (2.12)$$

$P_{max_idéale}$: Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale (Watt).

V_{co} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt).

I_{cc} : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère).

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC). Ce paramètre n'est autre que la puissance maximale mesurée sous ces conditions (en général un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C).

1.7.4 Le facteur de forme FF

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} , et le produit du courant de court-circuit (I_{cc}) par la tension de circuit ouvert (V_{co}) (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}}$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_0}$$

FF : Facteur de forme

1.7.5 Rendement de conversion

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est

défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF * V_{CO}}{P_{in}}$$

P_{in} : Puissance incidente.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

1.8 Le module photovoltaïque

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les technologies .Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [23].

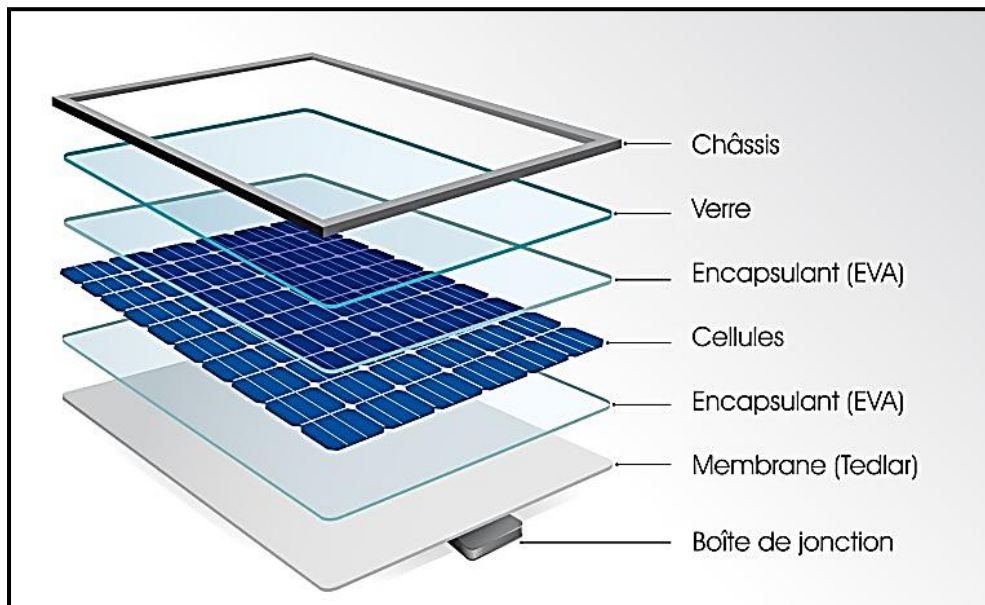


Figure 1.10: Un module photovoltaïque.

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de Conversion (énergie électrique produite / énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%). poly cristallin

(28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15 %) ou silicium amorphe (13% 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) [24].

1.8.1 Caractéristiques d'un module :

Voici la description des paramètres d'un module:

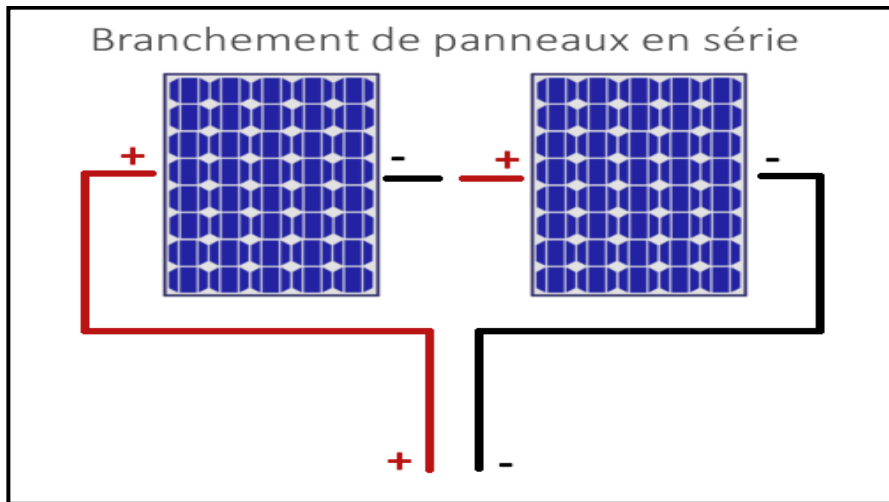
- ❖ **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standard (25°C et un éclairement de (1000 W/m²). **La caractéristique (1.9)** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ❖ **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- ❖ **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement " plein soleil ".
- ❖ **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- ❖ **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ❖ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$ [25].

1.8.2 Association des modules photovoltaïques

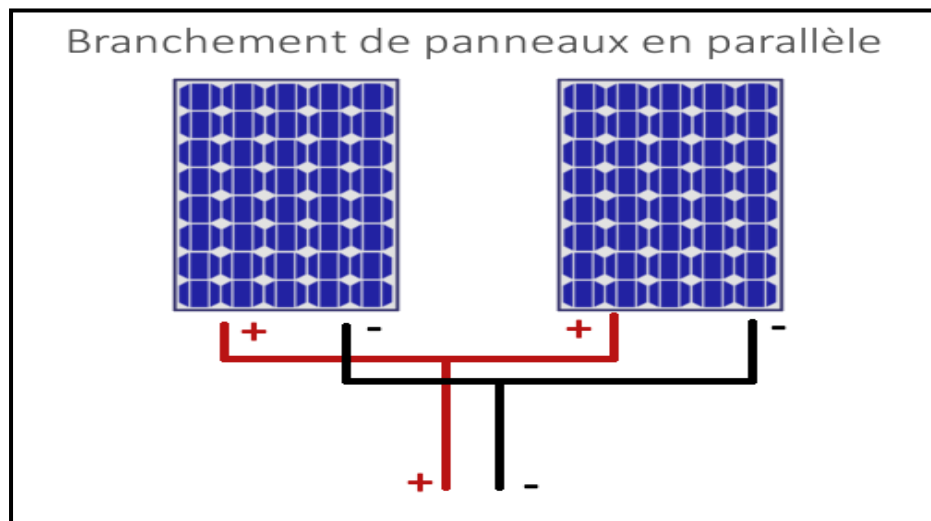
Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur en, associe " N_p " modules en parallèle comme montrer dans les figures (1.11-b) et (1.11-a). pour obtenir une augmentation de la tension du générateur en, associe " N_s " modules en série comme Le montrent les figures précédentes.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque Figure (1.11-c). [26].

a) Association en série



b)-Association en parallèle



c) Association mixte (Série + Parallèle)

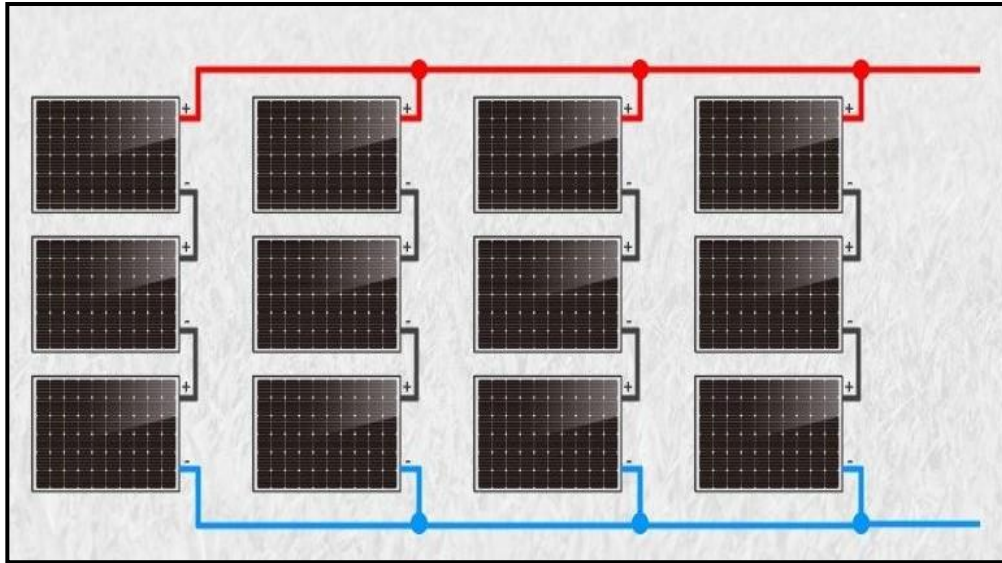


Figure 1.11 Composants d'un champ de modules PV

1.9 Le panneau solaire:

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [27].

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure [28].

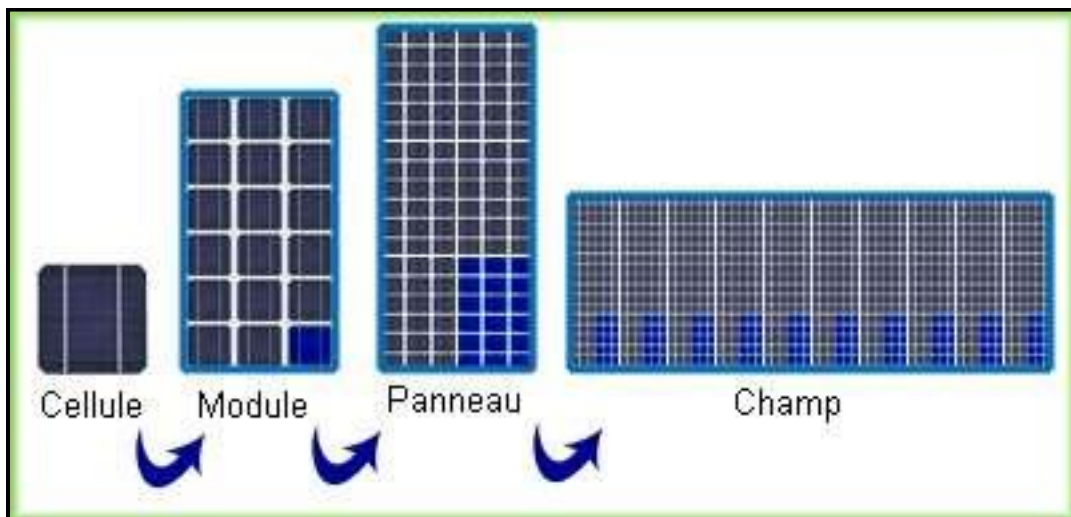


Figure 1.12 Composants d'un champ de modules PV

1.10 Avantages et inconvénients de l'énergie PV

1.10.1. Inconvénients

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des Investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles de mandes d'énergie en régions isolées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes.

1.10.2. Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation 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.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt Le coût de fonctionnement est très faible vu les entre tiens réduits et il ne nécessite combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

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, ce n'est pas l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, leurs différents types et leur application dans le domaine photovoltaïque, nous avons ensuite expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Et une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement Nous avons rappelé aussi les modules photovoltaïques et leurs associations.

CHAPITRE 2

MODELISATION D'UNE

CHAINE DE CONVERSION

PHOTOVOLTAÏQUE

2.1.Introduction

L'énergie en sortie d'un système photovoltaïque n'est pas automatiquement adaptée à la charge. Donc, un étage d'adaptation, comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques, permet de transformer les grandeurs électriques continues en grandeurs adaptées à celle-ci. En générale, cet étage est contrôlé par une MPPT qui permet de faire fonctionner GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Et ce, quelques soient les conditions météorologiques (température et irradiation).

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système de conversion photovoltaïque autonome le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant, et nous présentons les modèles relatifs à chaque partie de la chaîne de conversion.

2.2.Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode est représenté par la figure 2.1.

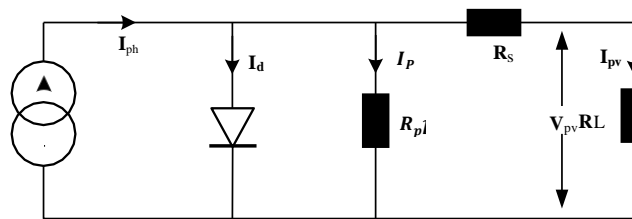


Figure 2.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Pour une cellule idéale, le courant électrique débité par la cellule s'exprime par :

$$I(V) = I_{ph}(\Phi) - I_d(V) \quad (2.1)$$

Avec

$$I_d(V) = I_s e^{\frac{qV-1}{kT}} \quad (2.2)$$

Où,

- $I(V)$: courant disponible;
- V : tension aux bornes de la jonction;
- Φ : flux lumineux;
- I_{ph} : courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel à Φ ;

- kT/q vaut 26 mV à 300 K pour le silicium ;
- J : coefficient d'idéalité de la diode;
- I_S : courant de polarisation de la diode.

Cette représentation schématisée de la photopile est idéalisée. Une photopile comporte, en réalité, une résistance série (R_S) et une résistance en parallèle ou shunt (R_P). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile:

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci est réalisée.

Cependant, pour la modélisation d'une telle cellule, on considère que la résistance shunt est négligée. Donc, le modèle simplifié est montré par la figure 2.2.

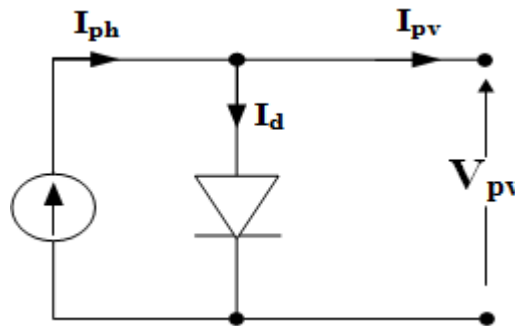


Figure 2.2 Modèle simplifié de diode d'une cellule solaire

La relation du courant en fonction de la tension peut être approximativement exprimée par les équations (2.3) à (2.8) [29, 30].

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(\exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right) \right] \quad (2.3)$$

Où,

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{V_{mp}}{C_2 V_{oc}}\right) \quad (2.4)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)} \quad (2.5)$$

Pour d'autres niveaux d'ensoleillement G (W/m^2) et des températures T ($^{\circ}C$), le modèle décale n'importe quel point (V_{ref}, I_{ref}) des courbes de référence ($I-V$) à un nouveau point (V, I) sur la base des équations (2.6) à (2.10)

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2.6)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (2.7)$$

Où, α : est défini comme un coefficient courant de changement de la température à la référence ensoleillement [$Amp/^{\circ}C$].

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (2.8)$$

Et, β : est défini tant que coefficient de tension de changement de la température [$V/^{\circ}C$].

$$I_{new} = I_{ref} - \Delta I \quad (2.9)$$

$$V_{new} = V_{ref} - \Delta V \quad (2.10)$$

La figure 2.2 montre l'allure de la caractéristique courant-tension $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque

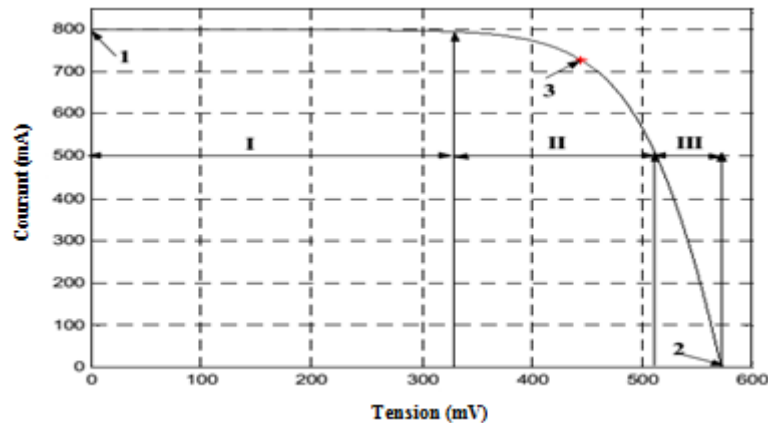


Figure 2.3 Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire

On remarque qu'il y a trois points caractéristiques:

- Point un (1) correspond au courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension zéro (courant à court-circuit);
- Point trois (2) correspond à la tension maximale de la cellule solaire sans charge, conditions (circuit ouvert) ;
- Point deux (3) correspond à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire. Sans tenir compte de la tension courant (I-V), la caractéristique peut être divisée en trois intervalles différents:

- L'intervalle où, dans la cellule solaire, est considérée comme source courant ; Ainsi le courant étant constant alors la tension est variable (intervalle **1**).
- L'intervalle, où dans une cellule solaire, n'est ni considérée comme source de courant ni source de tension (intervalle **2**).
- L'intervalle où dans une cellule solaire, est considérée comme une source de tension, comme la tension est variable, le courant est constant (intervalle **2I**). Une fois qu'une cellule solaire est chargée avec une charge résistive constante, la charge est présentée avec un point quel que part sur la caractéristique de cellules d' I-V. Quand la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace le long de la caractéristique vers la droite. Cependant, une diminution de la charge fait monter le point de fonctionnement de la caractéristique vers la gauche de la direction.

Le rendement de conversion (η) d'une cellule dépend de la tension à circuit ouvert (V_{oc}), du courant à court-circuit (I_{cc}) et du facteur de suffisance (FF) qui sont déterminés à partir des caractéristiques. Ces grandeurs sont généralement données par les «datasheet» du fabricant.

- **Courant de court-circuit**

Le courant de court-circuit (I_{cc}) est le courant obtenu quand les bornes de cellules sont court-circuitées ($V=0$). Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et est relié sur la surface éclairée, le spectre du rayonnement solaire et la température.

- **Tension de circuit ouvert**

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de cellules est nul. Il est lié à la résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation.

- **Facteur de suffisance**

Le facteur de suffisance d'une cellule solaire est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Pendant que la cellule solaire se dégrade avec l'âge, sa résistance en série tend à augmenter le résultat en un facteur inférieur de suffisance

$$FF = \frac{V_{op} I_{op}}{V_{sc} I_{sc}} \quad (2.11)$$

- **Rendement de la cellule**

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule à la puissance lumineuse incidente.

$$\eta_s = \frac{V_{op} I_{op}}{GA} \quad (2.12)$$

Où,

A : surface génératrice en m² ;

G: l'ensoleillement en W/m².

La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension ou l'intensité d'utilisation, comme le montre la figure 2.4

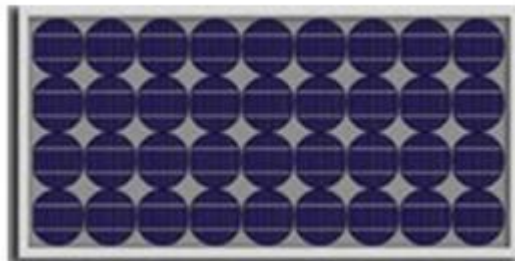


Figure 2.4 Module photovoltaïque

2.3. Rendement d'un panneau PV

Les paramètres caractérisant le module sont les mêmes que ceux de la cellule individuelle. L'intensité du rayonnement (l'éclairement) solaire reçu à la surface de la terre est une valeur dépendante de plusieurs facteurs en particulier de l'altitude, de la saison et des conditions météorologiques [31]. La puissance fournie par la cellule PV dépend aussi des mêmes paramètres. Les performances d'un GPV utilisé ne produisent en réalité qu'une puissance inférieure à celle indiquée dans les conditions standards de test (1000 W/m², AM1,5, 25°). En général, le rendement d'un module PV, fourni par le fabricant, est donné par la relation suivante [32]:

$$\eta = \frac{\frac{P_{max}}{S_m}}{P_{sol}} = \frac{V_{opt} \times \frac{I_{opt}}{S_m}}{P_{sol}} \quad (2.13)$$

Où,

P_{max}: puissance crête électrique fournie par le module dans les conditions standard;

S_m: surface du module;

P_{sol} : puissance de l'éclairement qui est en moyenne égale à 1000 W/m^2 .

En réalité, le rendement (η) du module est le rendement d'une cellule ($\eta_{cellule}$) diminué des pertes dues aux connexions ($\eta_{connexion}$) des cellules entre elles, à la transparence des matériaux de capsulage ($\eta_{encapsulation}$) et éventuellement à la chute de tension dans les diodes anti-retour (η_{diodes}) lorsqu'il faut protéger le panneau contre une éventuelle décharge nocturne de la batterie lorsque celle-ci existe [33]. Il est donné par :

$$\eta = \eta_{cellule} \cdot \eta_{connexion} \cdot \eta_{encapsulation} \cdot \eta_{diodes} \quad (2.14)$$

Pour avoir une puissance suffisante, il va falloir interconnecter plusieurs cellules en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque et atteindre la puissance désirée, ces modules à leur tour sont interconnectés entre eux en série/parallèle afin d'avoir des puissances très grandes, ce qui introduit la notion du générateur photovoltaïque GPV. En conséquence N_s et N_p sont respectivement, le nombre de modules connectés en série dans une branche et le nombre de branches connectées en parallèle, on obtient le schéma équivalent de la figure 2.5 (I_{pv} et V_{pv} sont respectivement le courant et la tension aux bornes de chaque module interconnecté).

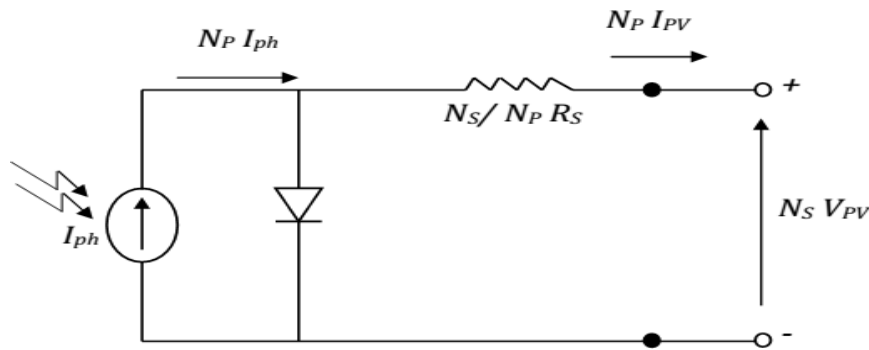


Figure 2.5 Modèle du générateur

PV Maintenant à partir de l'équation (2.1), on déduit la relation suivante

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V_{pv} + \left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_s I_{pv}}{N_s V_T} \right) - 1 \right\} \quad (2.15)$$

: Ce qui donne,

$$\exp \left[\frac{V_{pv} + \left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_s I_{pv}}{N_s V_T} \right] = \frac{N_p I_{ph} - I_{pv}}{N_p I_0} + 1 \quad (2.16)$$

Puis,

$$V_{pv} + \frac{N_s}{N_p} R_s I_{pv} = N_s V_T \ln \left(\frac{N_p I_{ph} - I_{pv}}{N_p I_0} + 1 \right) \quad (2.17)$$

D'où finalement,

$$V_{pv} = N_s V_T \ln \left(\frac{N_p I_{ph} - I_{pv}}{N_p I_0} + 1 \right) - \frac{R_s}{N_p} R_s I_{pv} \quad (2.18)$$

La caractéristique $I = f(V)$ d'un module PV (Siemens Solar module SP75) qu'on a utilisé pour la simulation sous Matlab pour un éclairement de 1000 W/m^2 et une température de 25° est montrée par la figure 2.6.

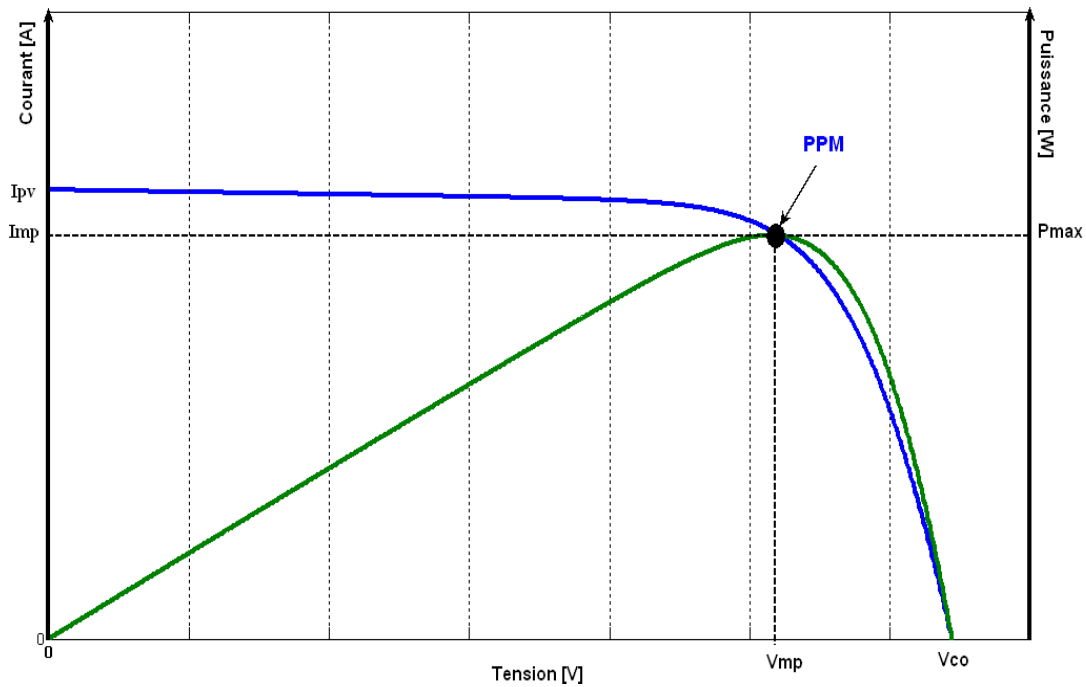


Figure 2.6 Caractéristique $I=f(V)$ d'un module PV ($N_s=N_p=1$)

2.4. Simulation du panneau photovoltaïque

2.4.1. Effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques $I=f(V)$

La figure 2.7 présente la caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque pour différents ensoleillements à température fixe. Comme, on peut voir sur la figure, le courant du module est proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement.

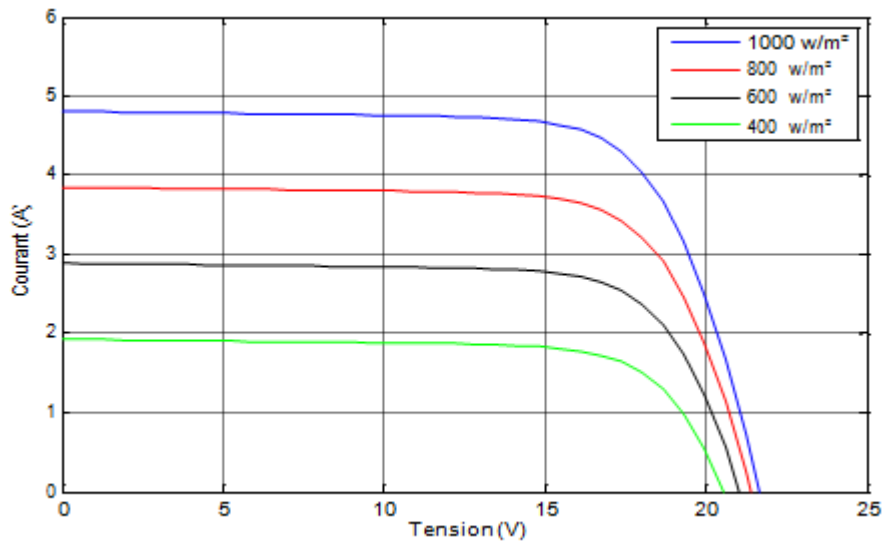


Figure 2.7 Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique du module $I=f(V)$ à $T=25^{\circ}\text{C}$
(marques en signes croix sur la puissance maximale)

2.4.2. Effet de température sur les caractéristiques $I=f(V)$

On peut observer l'effet de la température sur la caractéristique I-V du module sur la figure 2.8 comme le montre la figure, la température a un léger effet sur le courant, mais une augmentation de la température cause une diminution apparente sur la tension de circuit ouvert.

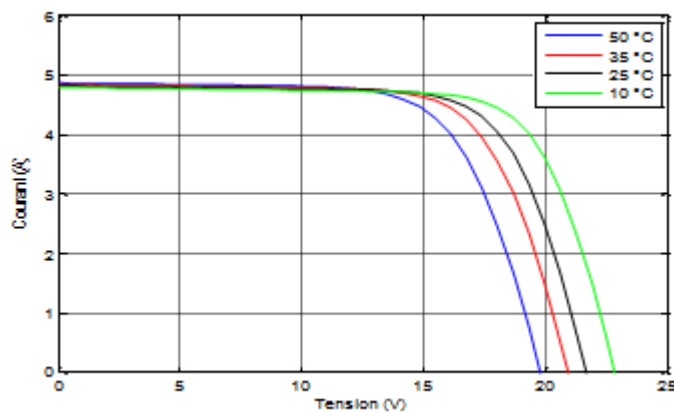


Figure 2.8 Effet de la température sur la caractéristique du module I-V à un ensoleillement constant (1000 W/m^2)

- **Modules en série**

Dans le cas idéal, quand le nombre (n) des modules photovoltaïques identiques sont reliés en série, la tension de circuit-ouvert est égale à la $n^{\text{ième}}$ tension du module individuel. La tension de sortie V_{SG} du générateur solaire et du circuit ouvert V_{OC} peut être donnée par les relations

$$V_{SG} = \sum^1 V_n = V_n + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 \dots + V_n \quad (I > 0)$$

$$V_{SG} = nV_{oc1} = nV_{oc2} = nV_{oc3} = \dots = nV_{ocn} \quad (I=0)$$

Lescaractéristiquescourant-tensionde
N
modulesidentiques

ensériesontprésentéessurlafigure 2.9.

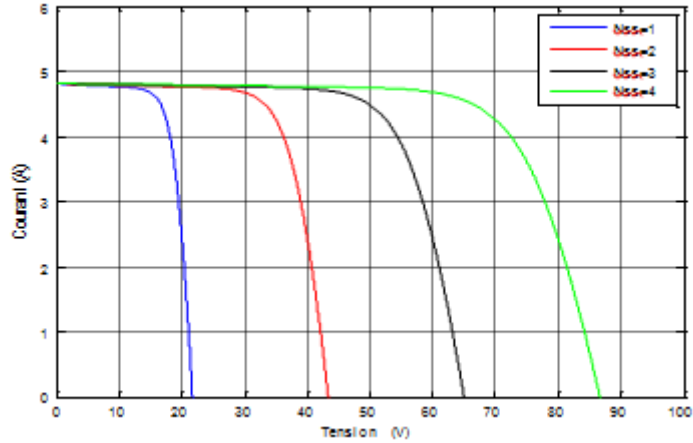


Figure 2.9 Caractéristiques $I=f(V)$ des modules en série aux conditions standards

- **Module en parallèle**

Le nombre (n) de modules identiques sont connectés en parallèle. La tension résultante V_{SG} est la même pour chaque module et le courant résultant I_{SG} est la somme des courants respectifs I_j jusqu'à I_n du module.

$$I_{SG} = \sum^n I_n = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_n$$

$$V_{SG} = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = \dots = V_n \quad (2.20)$$

Lescaractéristiques (I-V) de N modules identiques en parallèles sont présentées sur la figure 2.10.

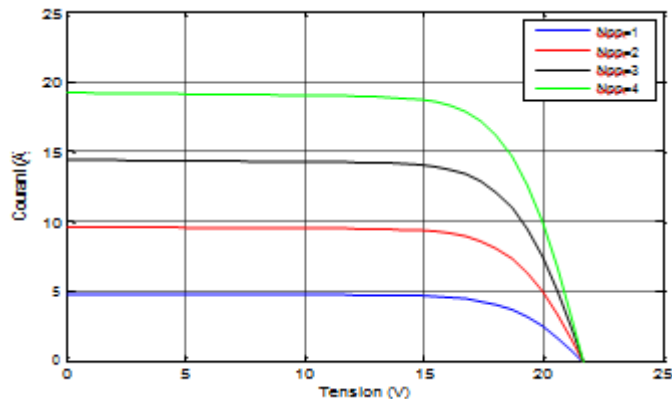


Figure 2.10 Caractéristiques $I=f(V)$ de différents modules parallèles pour des cellules à une température et un ensoleillement constant

- **Générateur photovoltaïque**

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules formés par un certain nombre de cellules photovoltaïques, connectées ensemble en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaires. La performance du générateur dépend de la variabilité des modules que comprend le générateur et les cellules comprises par les modules. La tension de sortie du générateur photovoltaïque dépend du nombre de modules en série alors que le courant de sortie dépend du nombre de modules en parallèle. L'ensemble intégré des modules photovoltaïques ainsi que la structure de soutènement est défini comme rangée photovoltaïque, montré par la figure 2.11. [34]

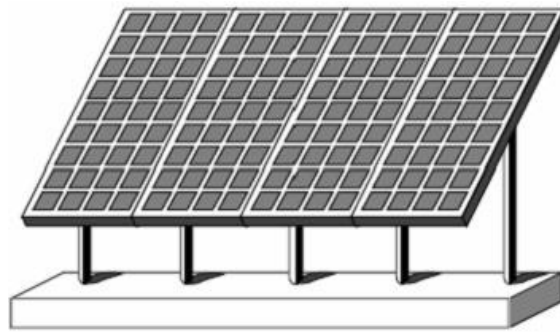


Figure 2.11 Champ photovoltaïque

Le courant et la tension de sortie du générateur solaire dans une rangée photovoltaïque sont

$$V_{out} = \sum_n^1 V_n = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_N$$

$$I_{out} = \sum_m^1 I_m = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_m \quad (2.21)$$

La puissance de sortie du générateur solaire (P_{out}) est donnée par :

$$P_{out} = \sum_n^1 V_n \sum_m^1 I_m = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_n)(I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_m) \quad (2.22)$$

L'effet double de l'ensoleillement et de la température de cellule sur les caractéristiques $I=f(V)$, est montré sur la figure 2.12. On constate que la tension de circuit ouvert diminue légèrement avec l'augmentation de la température des cellules des 25°C à 55°C, tandis que le courant augmente quand l'ensoleillement augmente de 200 W/m² à 1000 W/

- **Effet de l'ensoleillement et de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$**

L'effet double de l'ensoleillement et de la température de cellule sur les caractéristiques $I=f(V)$, est montré sur la figure 2.12. On constate que la tension de circuit ouvert diminue légèrement

avec l'augmentation de la température des cellules des 25°C à 55°C, tandis que le courant augmente quand l'ensoleillement augmente de 200 W/m² à 1000 W/m².

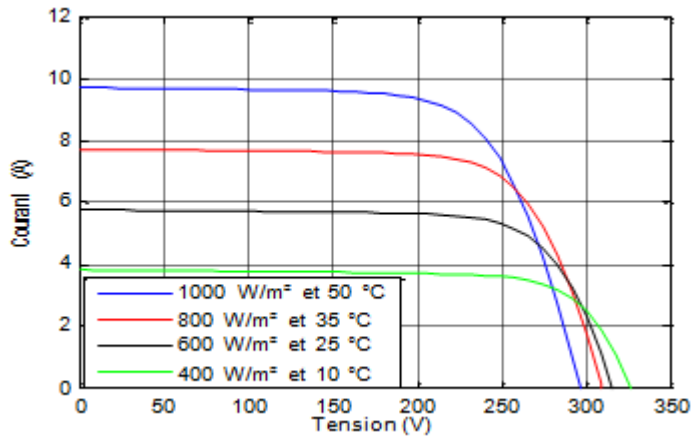
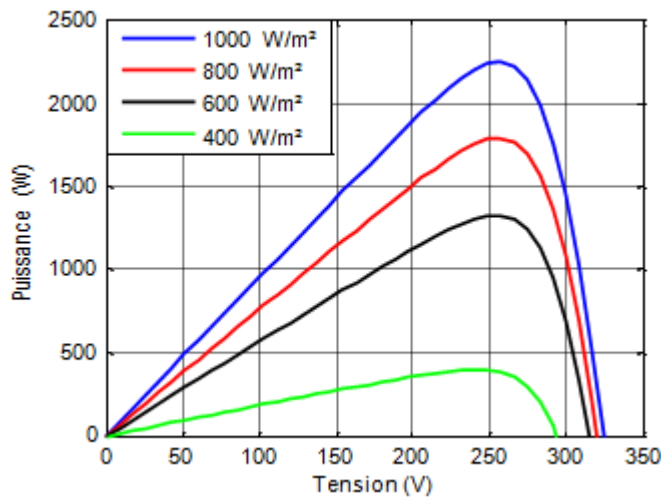


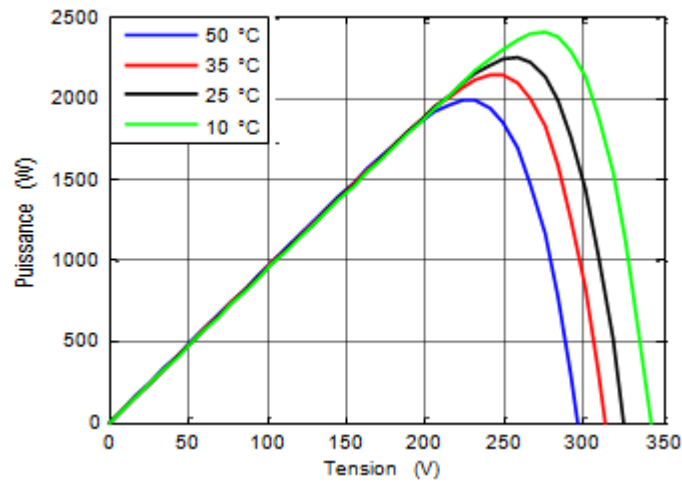
Figure 2.12 Variation des caractéristiques $I=f(V)$ avec l'ensoleillement et la température des cellules

- **Caractéristiques puissance-tension ($P=f(V)$)**

Sanstenircomptedes caractéristiques $I=f(V)$, le générateur photovoltaïque peut être défini avec ses caractéristiques de tension-puissance ($P=f(V)$). Figure 2.13_a montre les caractéristiques photovoltaïques $P=f(V)$ de générateur pour des valeurs différentes d'ensoleillement à une température fixe, alors que la figure 2.13_b présente les caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes valeurs de températures à un ensoleillement fixe.



-a-



-b-

Figure 2.13 Caractéristiques

$P=f(V)$ du générateur pour : différents ensoleillements (a) et différentes températures de la cellule (b)

De la figure 2.13(a) et 2.13(b), on note que la caractéristique $P=f(V)$ subit des changements considérables lorsque le niveau d'ensoleillement varie, alors qu'elle varie peu avec la variation de la température.

- **Systèmes photovoltaïques**

Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en trois catégories : autonome, raccordé au réseau et systèmes hybrides. Pour les endroits qui sont loin d'un système de production d'électricité conventionnel, des systèmes autonomes d'alimentation en énergie photovoltaïque ont été considérés comme une meilleure alternative.

Dans ces systèmes, l'exécution du système $P-V$ se fonde sur les conditions de fonctionnement. Puis, la puissance maximale extraite à partir du générateur PV dépend fortement de trois facteurs : ensoleillement, impédance de charge et température de cellules ; le rendement des cellules est supposé fixe. Néanmoins, les systèmes $P-V$ devraient être conçus pour fonctionner à leurs niveaux de puissance maximum et de rendement pour n'importe quelle température et niveau solaire d'irradiation à tout moment. Le dernier facteur significatif qui détermine la puissance de sortie $P-V$ est l'impédance de la charge. Cependant, on devrait noter qu'une telle impédance n'est pas constante. Quand un générateur $P-V$ est directement relié à la charge, le système fonctionnera à l'intersection de la ligne de courbe et de charge $I-V$ qui peut être loin du point maximum de puissance (MPP). La production de puissance maximale est basée sur

l'ajustement de ligne de charges sous changement de conditions atmosphériques. D'ailleurs, la charge, dans beaucoup de cas, exige un niveau de puissance constant.

2.5. Modélisation du convertisseur DC-DC

Dans la chaîne de conversion photovoltaïque la connexion directe entre un GPV et une charge continue exige l'existence d'un point de fonctionnement qui correspond à l'intersection de la caractéristique $I(V)$ du GPV et la caractéristique $I(V)$ de la charge électrique quel que soit sa nature. Toutefois, ce point d'intersection pourrait être loin du point maximum de puissance (PPM). Alors, afin de palier à cet effet indésirable sur la puissance de sortie P-V et avoir une puissance maximale, il est possible d'insérer un convertisseur DC/DC entre le générateur PV et la charge, en commandant un suiveur de point maximum de la puissance (MPPT). Ce convertisseur est appelé traqueur maximum de point de puissance (MPPT) géré par un algorithme de suivi de PPM. Comme le montre la figure 2.14, l'entrée du convertisseur DC-DC est la rangée P-V et la sortie est la charge. Le rôle du MPPT est d'assurer le fonctionnement du générateur P-V à son PPM, extrayant la puissance disponible maximale.

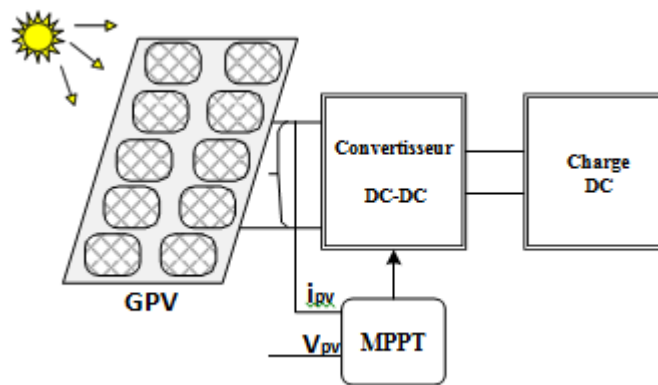


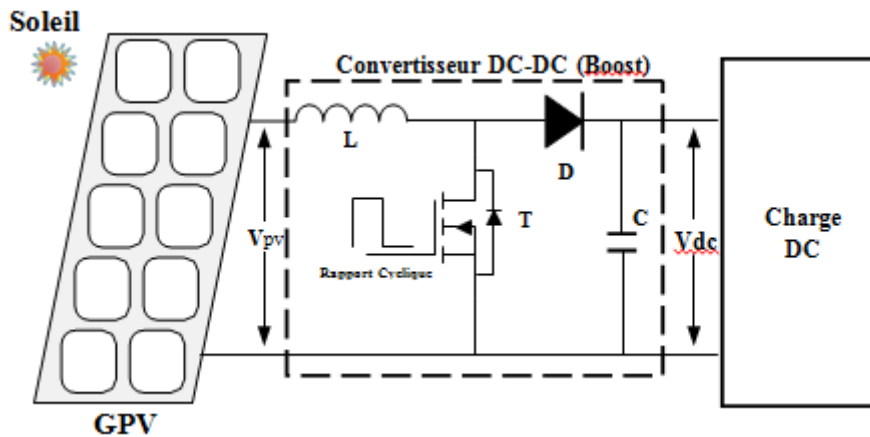
Figure 2.14 Schéma fonctionnel général du système P-V avec MPPT

2.5.1. Convertisseur DC-DC pour MPPT

Un MPPT peut être conçu à la base de topologies buck ou boost. Le convertisseur buck est généralement employé pour abaisser la tension de sortie et le convertisseur boost est employé pour obtenir des tensions de sortie plus élevées.

2.5.1.1. Structure et modèle du convertisseur Boost

Le schéma de principe est représenté par la figure 2.15. Quand le semi-conducteur (T) est passant, la diode est polarisée en inverse, le courant traverse l'inductance (L), l'alimentation d'énergie (rangée de cellule solaire) alimentant de ce fait la charge. En même temps, la charge reçoit sa puissance du condensateur. Quand T est bloqué, le courant circule de l'alimentation à travers la charge et la diode D pour recharger, et simultanément, pour assurer la puissance à la charge.



En considérant les hypothèses suivantes :

- ✓ tous les éléments sont idéaux ;
- ✓ temps de commutation très faible par rapport à la constante électrique de temps du circuit, donc une approximation linéaire peut être employée.

On peut ainsi représenter les formes d'ondes de la figure 2.16

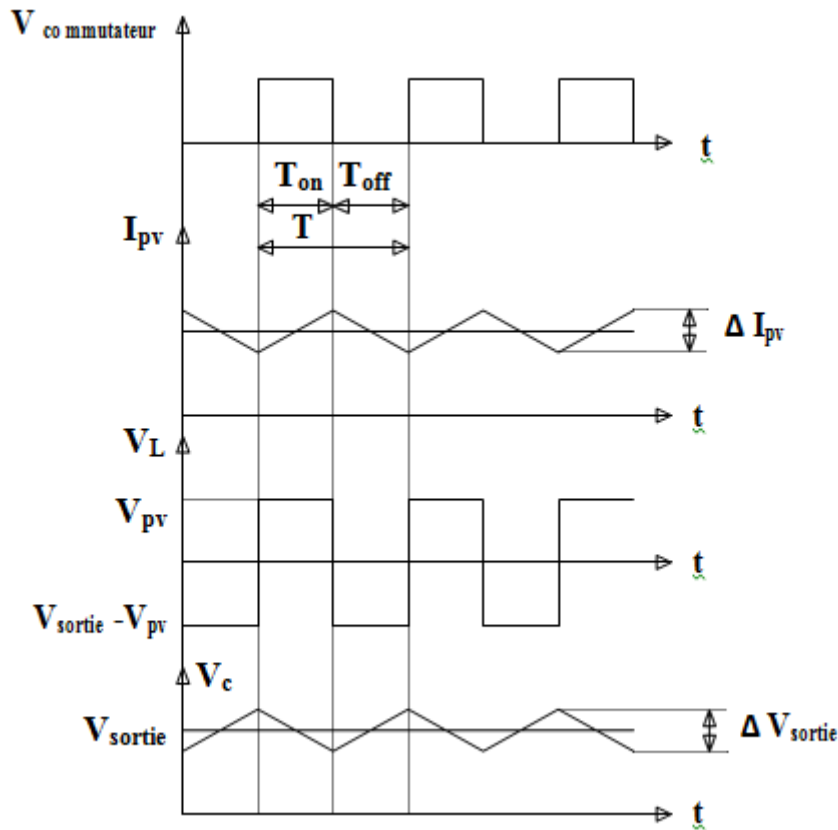


Figure 2.16 Formes typiques d'onde du convertisseur boost

❖ **Equation de la tension de sortie**

Lorsque le convertisseur est en régime permanent, la tension moyenne est nulle durant la période de commutation (T). D'où,

$$V_{pv} t_{on} = (V_{out} - V_{pv}) t_{off} \quad (2.23)$$

Et ainsi,

$$V_{out} = \frac{V_{pv} t_{on} + V_{pv} t_{off}}{t_{off}} \quad (2.24)$$

Où

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (2.25)$$

Le rapport $\frac{t_{on}}{T}$ s'appelle le rapport cyclique (d)

l'ajustement de la charge sous changement de conditions atmosphériques. D'ailleurs, la charge, dans beaucoup de cas, exige un niveau de puissance constant.

$$V_{out} = \frac{V_{pv}}{1-d} \quad (2.26)$$

Où,

V_{out} : tension de sortie;

V_{pv} : tension d'entrée (cellules solaires);

t_{on} : temps durant lequel le commutateur est fermé.

2.5.1.2. Structure et modèle du convertisseur Buck

Le circuit d'un convertisseur Buck est montré par la figure 2.17, or, la tension et les formes d'onde du courant sont montrées sur la figure 2.18.

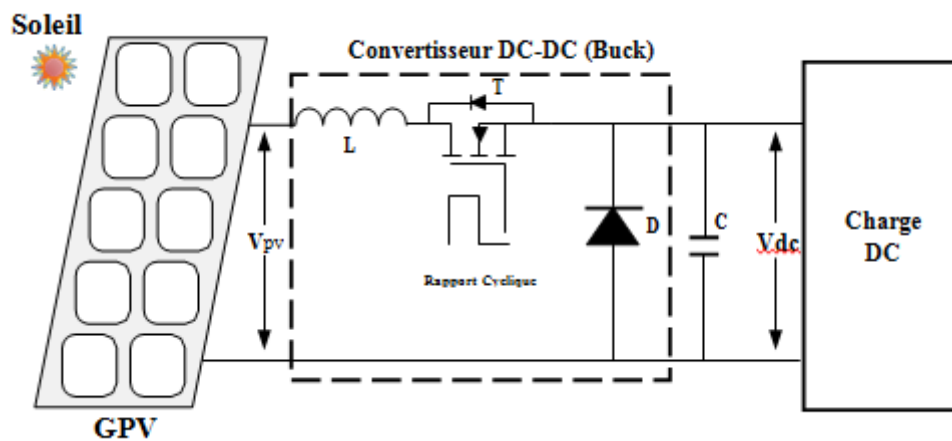


Figure 2.17 Convertisseur buck

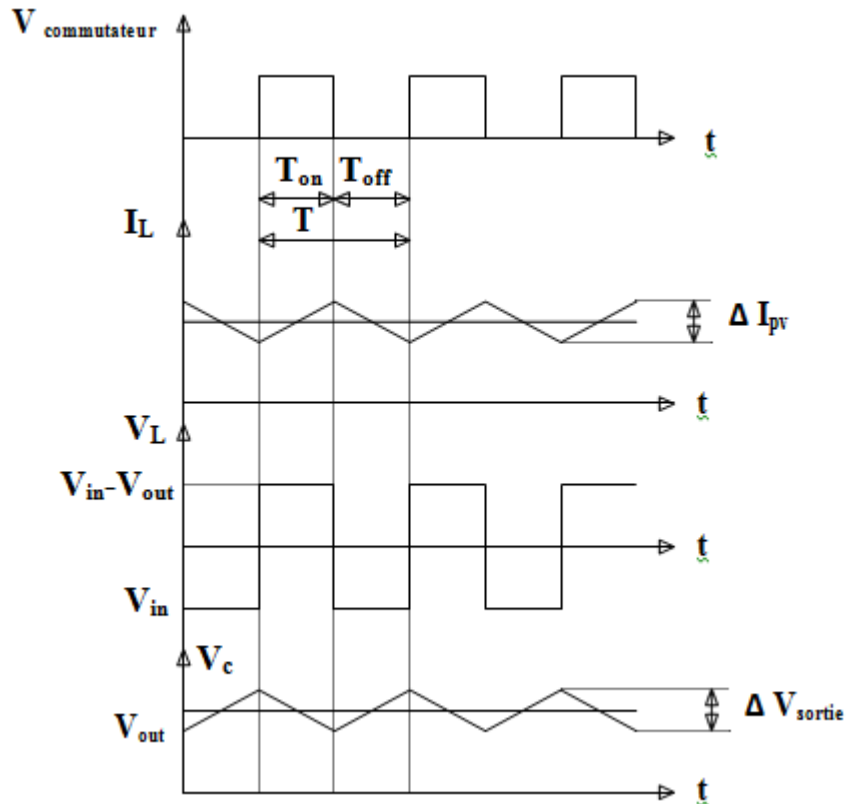


Figure 2.18 Signaux typiques de convertisseur buck

❖ Equation de la tension de sortie

Comme dans l'analyse de convertisseur boost, la tension moyenne du moteur asynchrone est nulle sur toute la période T de commutation, ainsi nous pouvons écrire:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \alpha \tag{2.27}$$

Le rapport entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie dépend du rapport cyclique. Supposant un rendement de 100%, donc:

$$V_{\text{in}} I_{\text{in}} = V_{\text{out}} I_{\text{out}} \tag{2.28}$$

Et, la charge optimale peut être obtenue selon

$$R_{\text{charge}} = \frac{V_{\text{in}}}{I_{\text{in}}} \tag{2.29}$$

Convertisseur Buck-Boots

Le convertisseur *Buck-Boost* est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée. Le hacheur *Buck-Boost* est caractérisé par une fonction de transfère qui peut être soit supérieur soit inférieur à l'unité .

Nous représentons en (2.19) un système photovoltaïque constitué d'un *GPV*, un hacheur *Buck-Boost*et une charge résistive R_L .

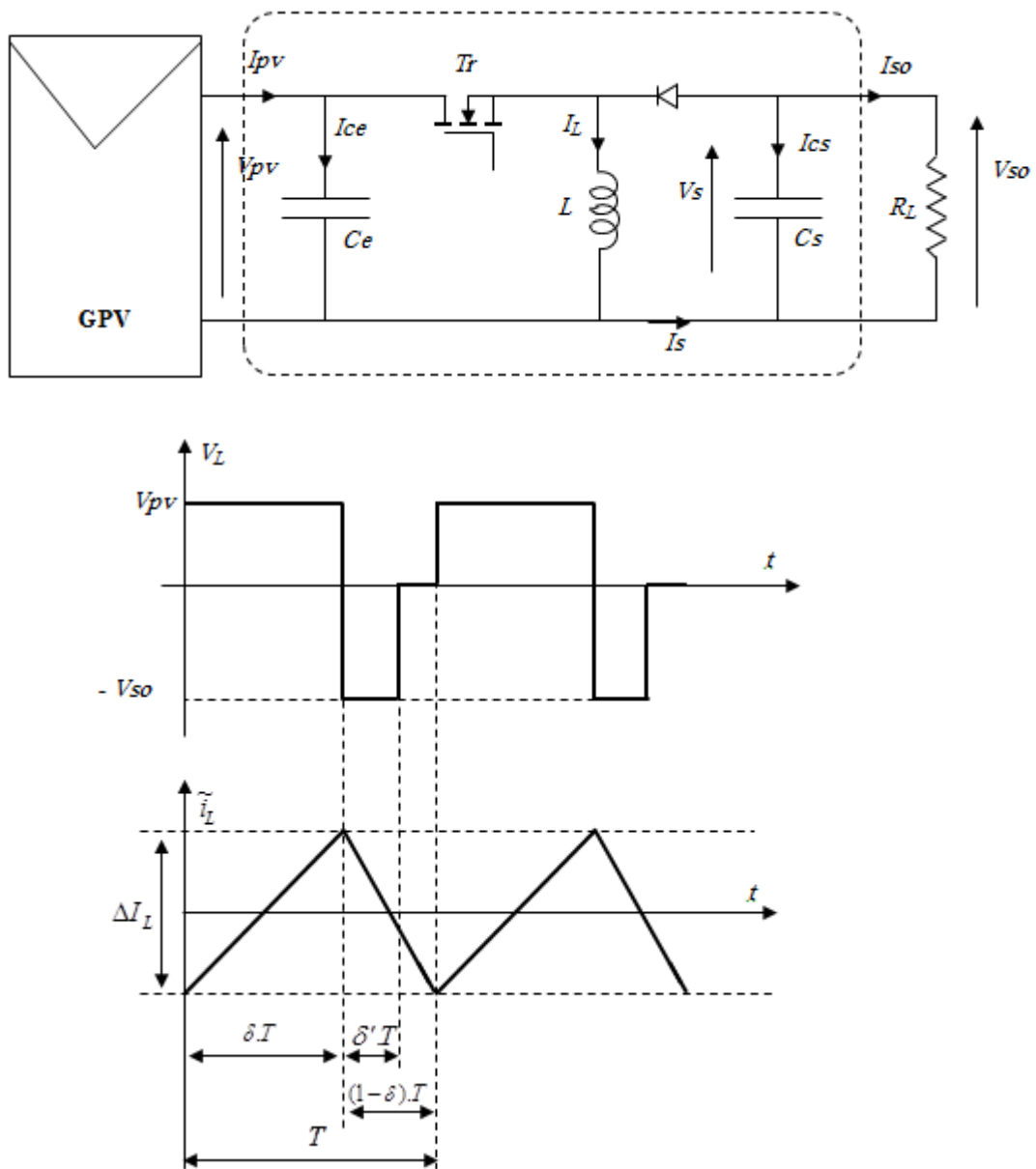


Figure 2.19: Conduction discontinue

Évaluons, à présent, le courant en sortie du convertisseur ; nous avons, d'après les hypothèses de travail adoptées, $I_{so} = -\langle I_s \rangle$, en outre $I_s = I_L$ lorsque la diode est passante.

$$I_{so} = \frac{-1}{2} \cdot \Delta I_L \cdot \delta \quad (2.30)$$

il vient

$$I_{so} = \frac{-1}{2.L} \cdot V_{pv} \cdot \delta \cdot T \cdot \frac{V_{pv}}{V_{so}} \cdot \delta$$

Soit
$$I_{so} = \frac{-V_{pv}^2}{2.L.f.V_{so}} \cdot \delta^2 \quad (2.31)$$

qui s'écrit également
$$\frac{V_{so}}{V_{pv}} = \frac{-V_{pv}}{2.L.f.I_{so}} \cdot \delta^2 \quad (2.32)$$

Nous définissons, à l'instar des convertisseurs *Buck et Boost*, les variables normalisées suivantes :

$$y = \frac{\langle V_s \rangle}{V_{pv}} = \frac{V_{so}}{V_{pv}}$$

et

$$x = \frac{L.f.I_{so}}{V_{pv}}$$

On obtient :

Régime continu :
$$\frac{V_{so}}{V_{pv}} = \frac{-\delta}{(1-\delta)} \Rightarrow y = \frac{-\delta}{(1-\delta)} \quad (2.33)$$

Régime discontinu :
$$\frac{V_{so}}{V_{pv}} = \frac{V_{pv}}{2.L.f.I_{so}} \cdot \delta^2 \Rightarrow y = \frac{-\delta^2}{2.x} \quad (2.34)$$

Le hacheur *Buck-Boost* fonctionne en régime critique lorsque :

$$I_{so} = I_{so_{limite}} = \frac{-1}{2} \cdot \frac{V_{pv}}{L.f} \cdot \delta \cdot (1-\delta) \quad (2.35)$$

Soit
$$x = \frac{-y}{2.(y-1)^2} \quad (2.36)$$

le tracé de ces relations en variables normalisées est donné figure (2I-15) pour plusieurs valeurs du rapport cyclique δ .

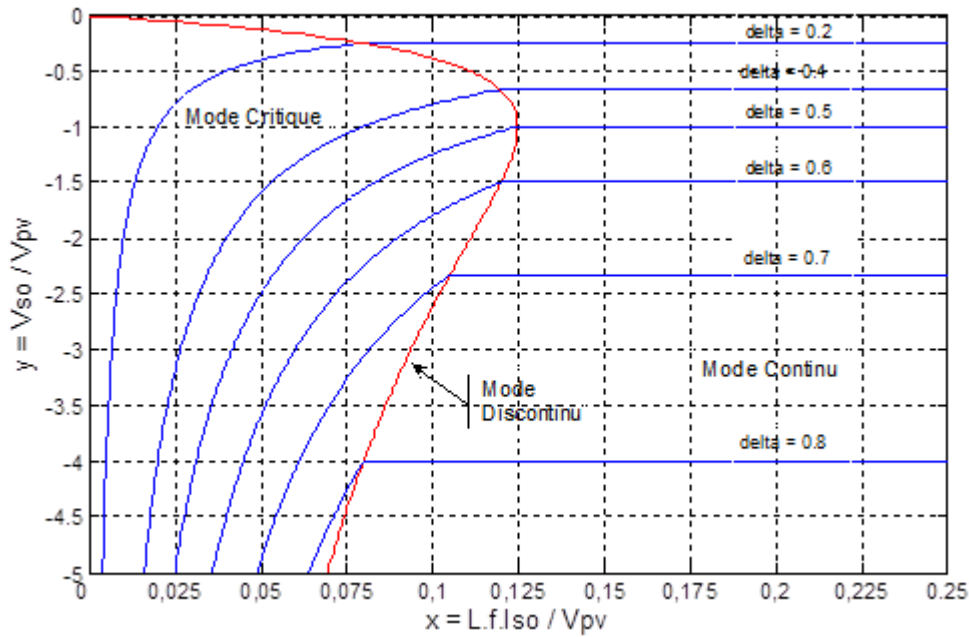


Figure 2.20 : Caractéristique de sortie du hacheur Buck-Boost représentées en variables normalisées

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs Statiques (convertisseur DC-DC). Nous avons montré théoriquement que la valeur moyenne de la tension de sortie peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique. Pour produire une puissance maximale et obtenir une efficacité maximale, l'ensemble du panneau photovoltaïque doit fonctionner à ce point particulier. Le point de puissance maximum du panneau PV continue de changer en fonction des conditions environnementales changeantes telles que l'irradiance solaire et la température de la cellule. Ainsi, pour extraire la puissance maximale disponible d'un module PV, Des algorithmes MPPT sont mis en œuvre.

CHAPITRE 3

COMMANDE MPPT D'UN

SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

3.1 Introduction

Des lois de commande spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. [35]

3.2 Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique α de la CS au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs états appliqués. Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT. Cette partie fera l'objet suivant.

3.2.1 Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [35]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure 3.1

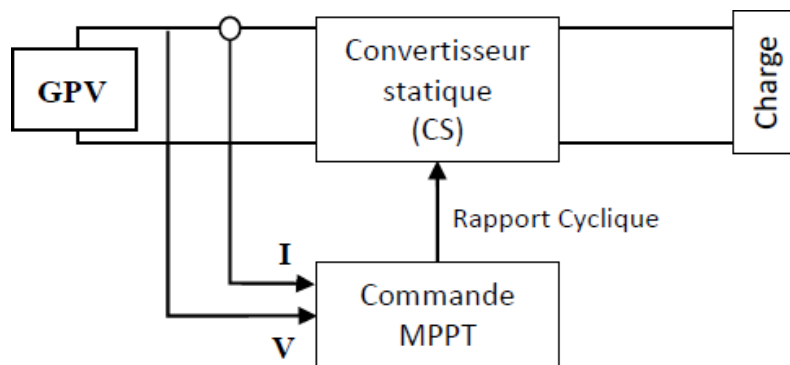


Figure 3.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur Boost, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. [36]

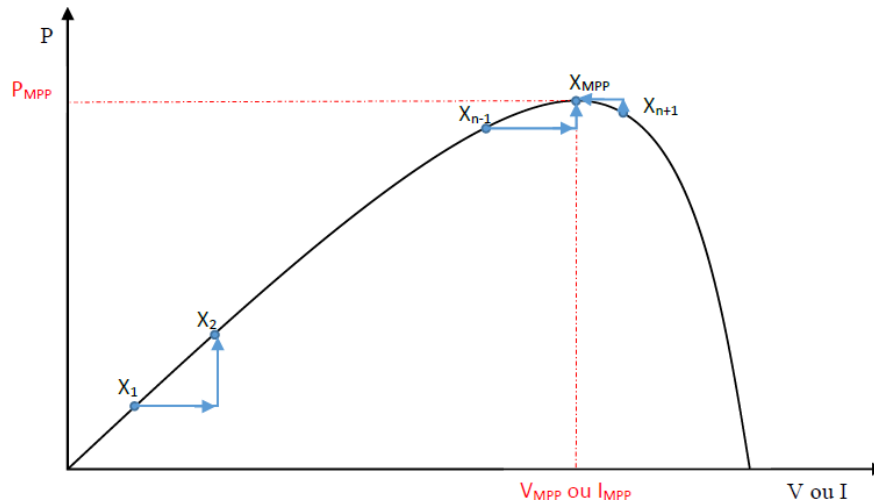


Figure 3.2 Principe de la commande MPPT

3.3 Classification Des Commandes MPPT

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [37].

3.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.

A. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb & Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien les commandes qui sont basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximale (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces

commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [37].

A. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [37].

3.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

A. MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [38-37].

B. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers.

Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour

du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide d'un niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. [38-37]

3.4 Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer.

3.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert VOC et la relation linéaire approximative (3-1) liant cette tension avec la tension de point maximal VMPP du GPV [39-40]

$$VMPP = K1 * VOC \quad (3.1)$$

Où $K1$ est une constante de proportionnalité. Il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que $K1$ est déterminé, le VMPP peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (3.1) avec VOC mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension VMPP est alors prise comme tension de référence.

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle VPV et la tension de référence Vref (VMPP). Le signal d'erreur est traité pour rendre.

$$V = V_{ref} \quad (\text{Figure-3.3})$$

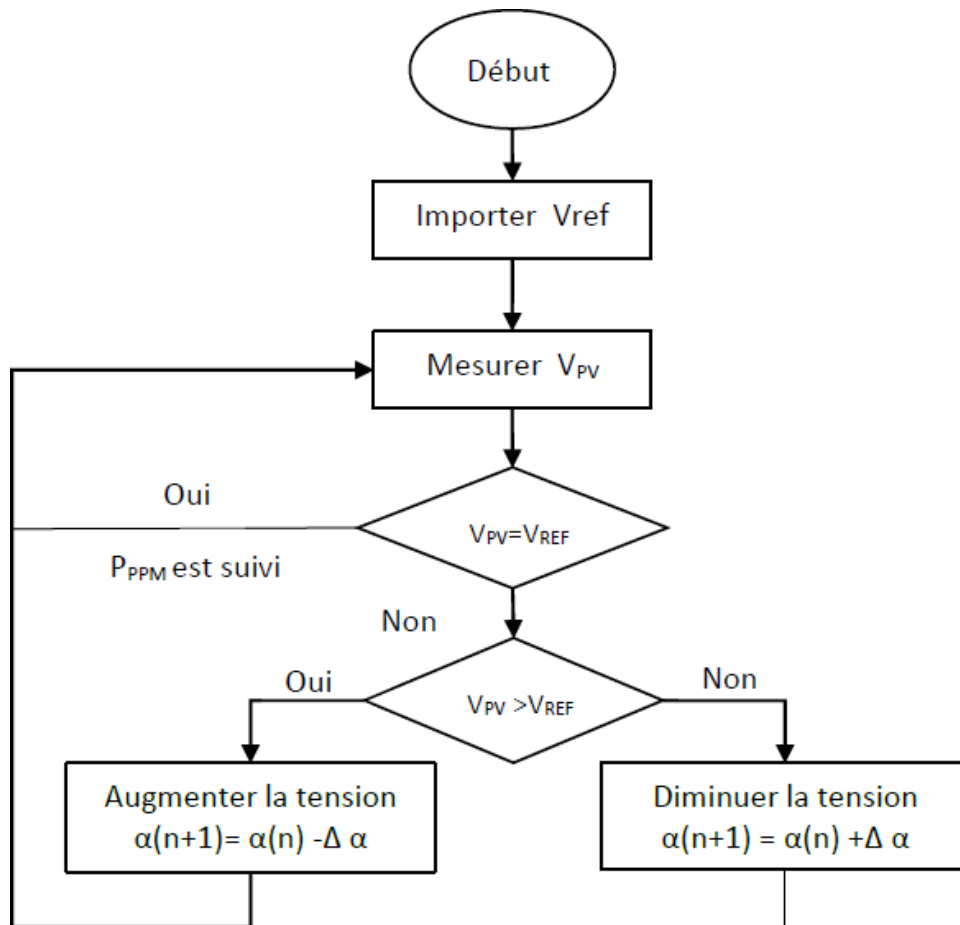


Figure-3.3 Algorithme de la Tension Constante

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire [39]. Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année. Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension V_{oc} et n'oublie pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV [41].

3.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current):

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{sc} (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (3.2) liant ce courant avec le courant de point maximal I_{MPP} du GPV [40]:

$$I_{MPP} = k_2 \cdot I_{sc} \quad (3.2)$$

Avec k_2 constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV, k_2 est déterminée pour le GPV utilisé. La constante k_2 est généralement comprise entre 0.78 et 0.92 [45].

La mesure du courant ISC durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant ISC à l'aide d'un capteur de courant.

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrémente en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (I_{MPP}) correspondent, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance [39]. Figure- 3.4

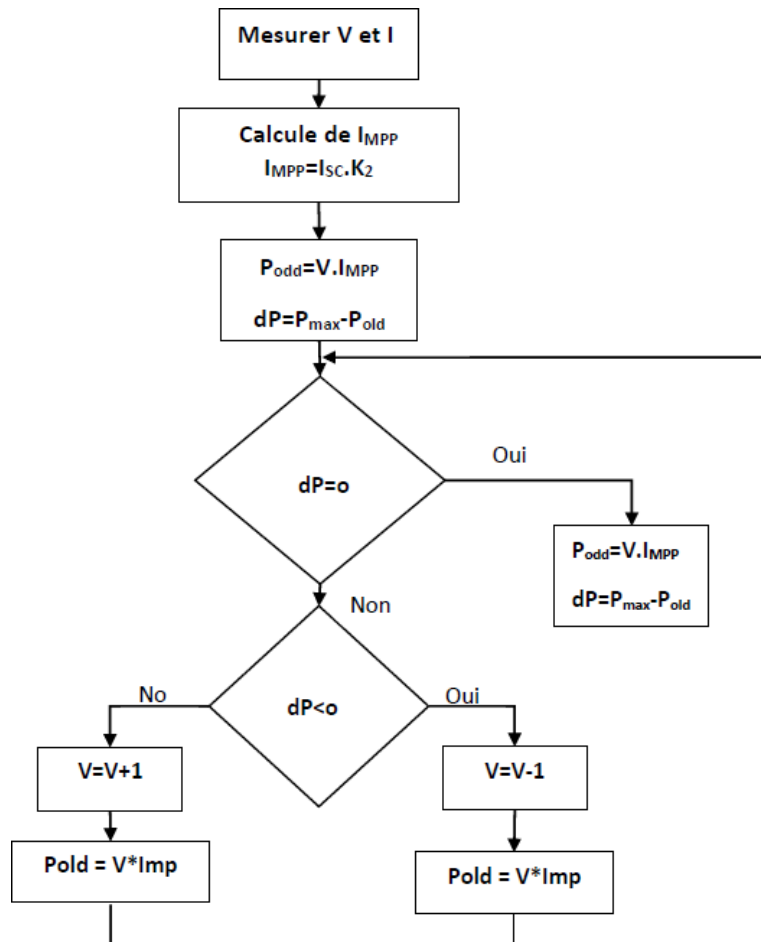


Figure- 3.4 Algorithme du courant constant

3.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [42]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [43].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV} , ce qui engendre une variation de la puissance [44]. Figure- 3.5 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

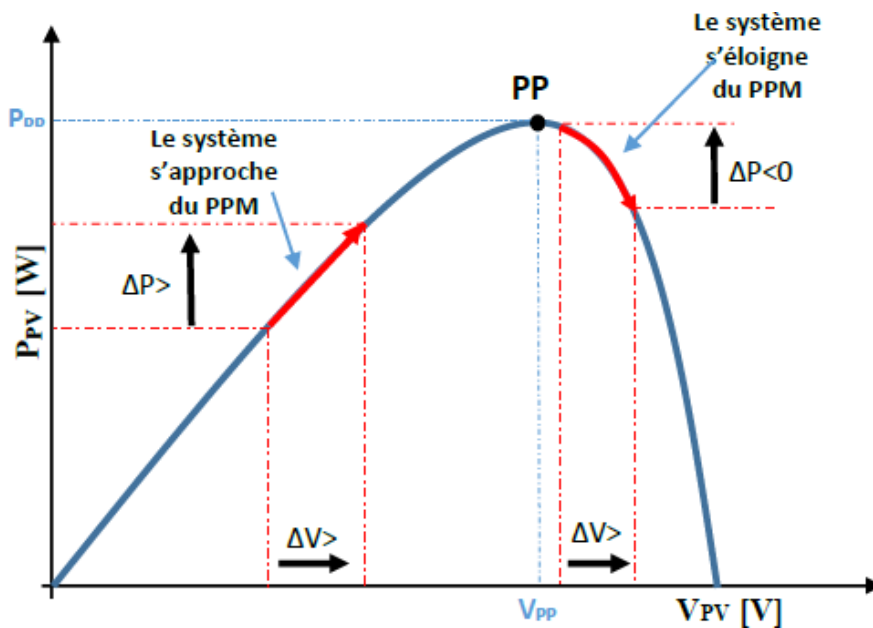


Figure- 3.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport

au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [45].

La Figure- 3.6 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

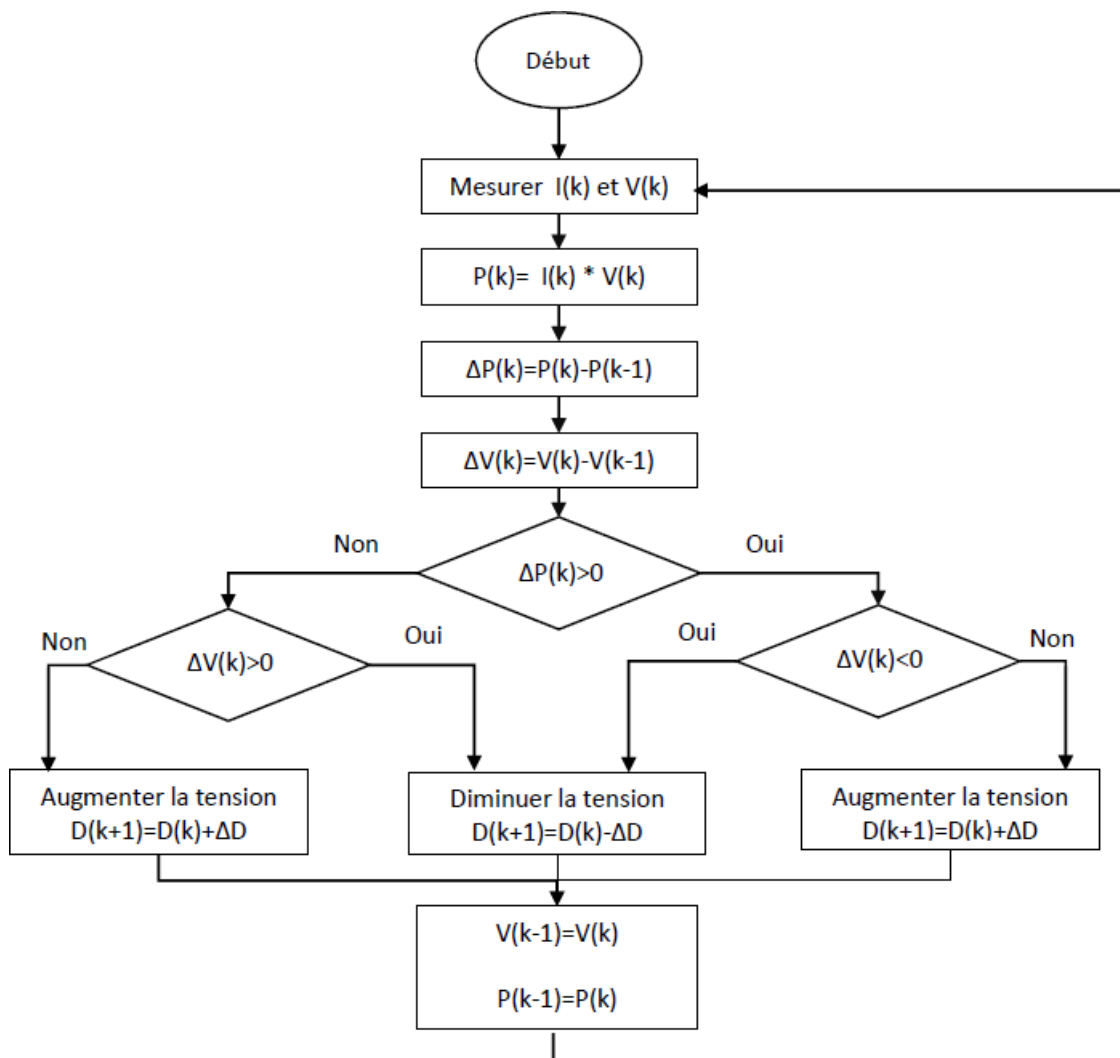


Figure- 3.6 l'algorithme de P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint [46]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation : [47]

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Figure- 3.7

Commençant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairage augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. [45]

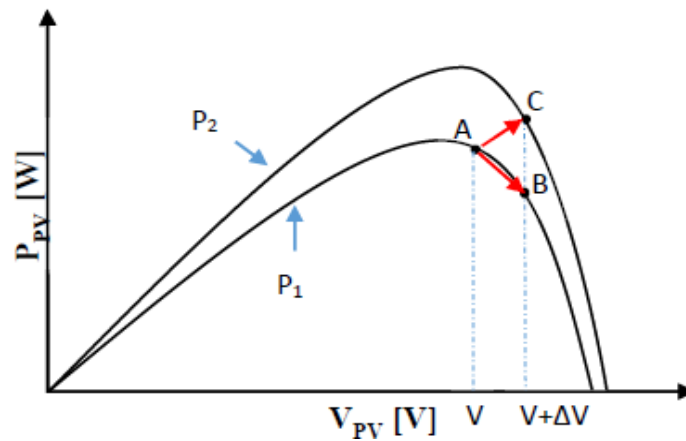


Figure- 3.7Divergence delaméthodeP&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, des versions améliorées del'algorithmeP&O sontproposées:

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant deprendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans la Figure-3.8 avec les trois points sont pointactuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sensopposédu pointB [37].

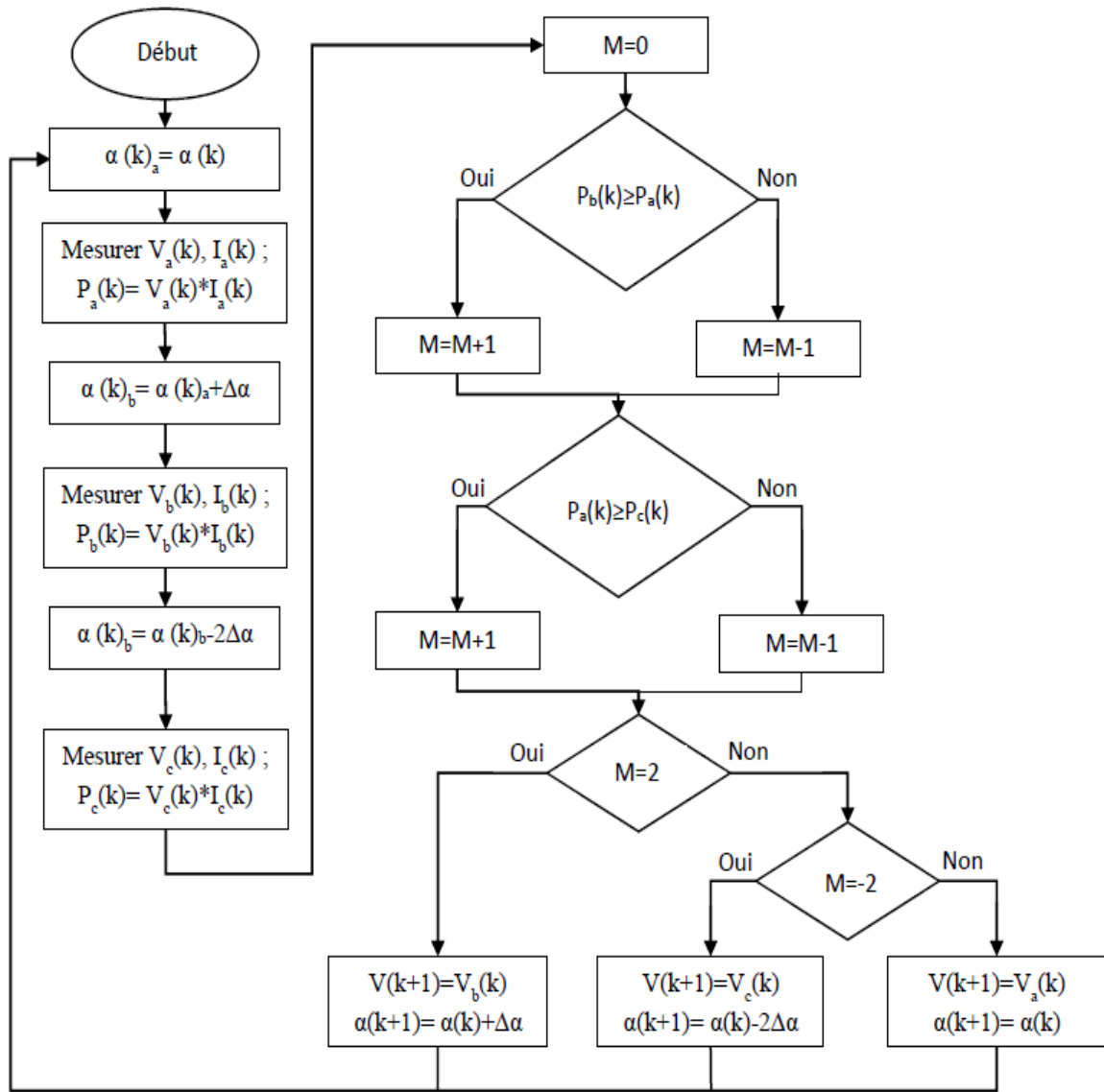


Figure-3.8 algorithme du point d'intersection à trois points

Une autre solution sera de garder le même algorithme de la méthode p&o classique sauf que le pas de perturbation est variable. où plusieurs échantillons de puissance P_{pv} est utilisé pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manière qu'il est diminué quand il est proche du point maximum. Certaines études [37] proposent que le pas soit :

$$\alpha(K) = \alpha(K - 1) \mp N \left| \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)} \right| \quad (3.3)$$

3.4.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM.

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.4)$$

Une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (3.5)$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (**PPV**) par rapport à la tension (**VPV**) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. [39]

La (Figure- 3.9) permet d'écrire les conditions suivantes

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM

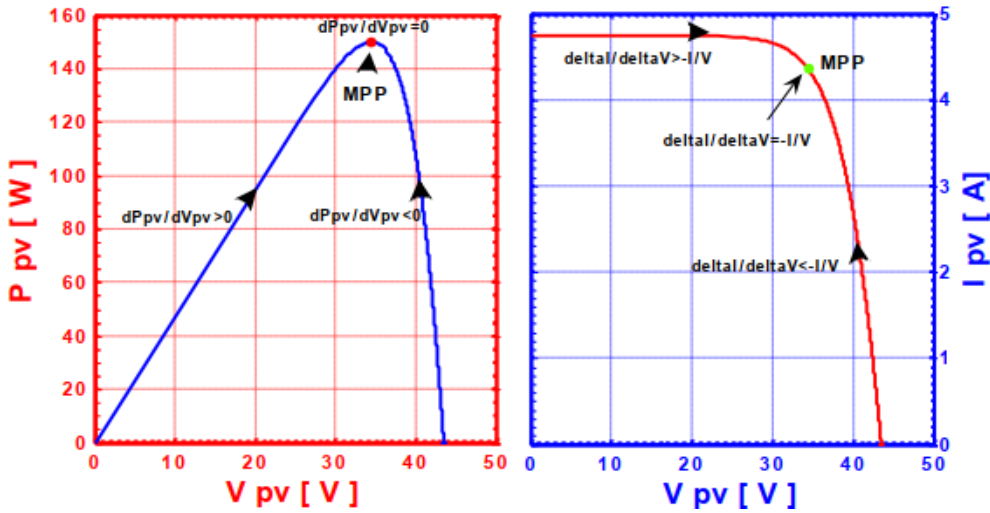


Figure- 3.9Positionnementdupointdefonctionnement($G=1\text{kW}/\text{m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (3.8) et la dérivée de la puissance $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$

peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} - \frac{d[I_{pv} + V_{pv}]}{dV_{pv}} I_{pv} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (3.6)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance commecellesdonnéespar (V .6) surladérivéedepuissance:

- Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ lepointdefonctionnementestà gaucheduPPM,
- SI $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ lepoint defonctionnement estsur lePPM,
- SI $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ lepoint de fonctionnement est sur ladroitedu PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance avec (V_{pv}) celle de l'incrément de conductance $\left(\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}\right)$

Comme L'illustre l'algorithme de la (Figure- IV.9). Vr correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur.

Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale VOPT. Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔIPV .

Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à

rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la (Figure- 3.10).

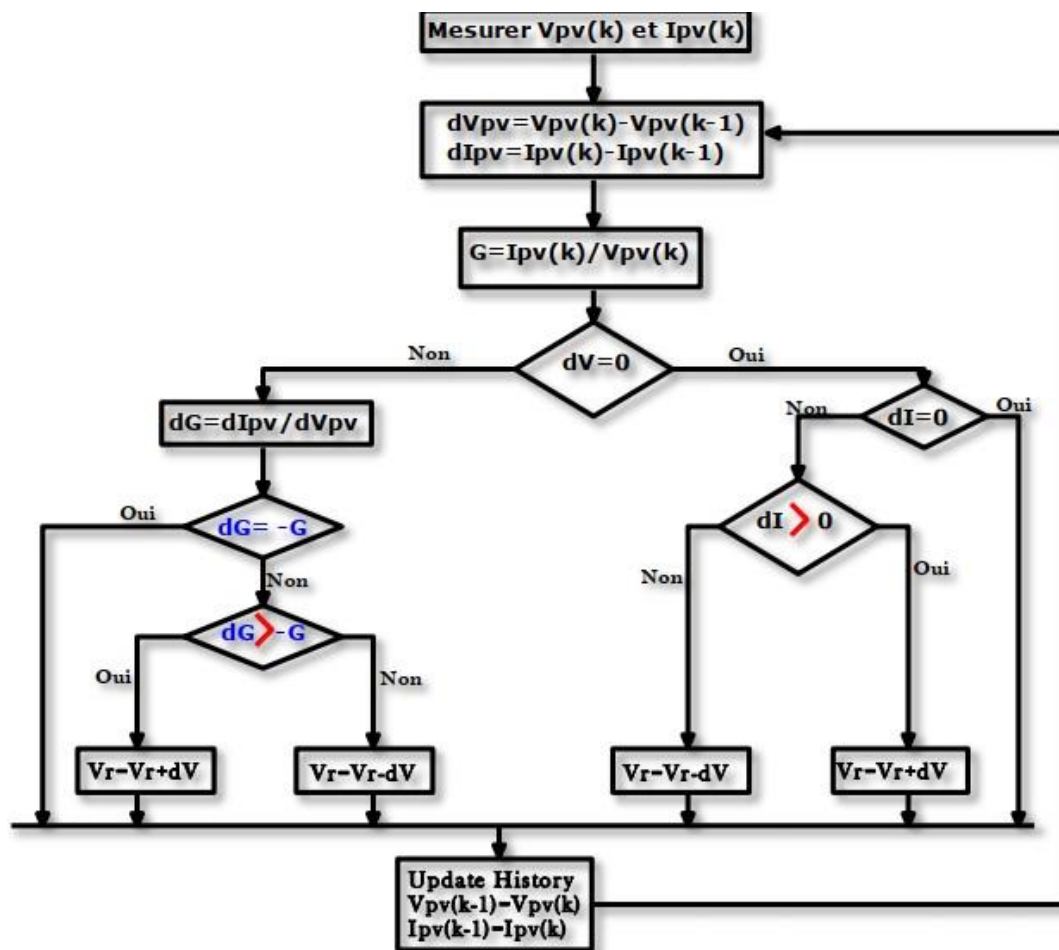


Figure- 3.10. Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN)

3.4.5 La Commande MPPT Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [49-50]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées

peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non-linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature:

✓ la fuzzification,

✓ la lecture de la table de vérité,

✓ la défuzzification

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB: Negative Big,
- NS: Negative Small,
- ZE: Zero,
- PS: Positive Small,
- PB: Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure 3.11

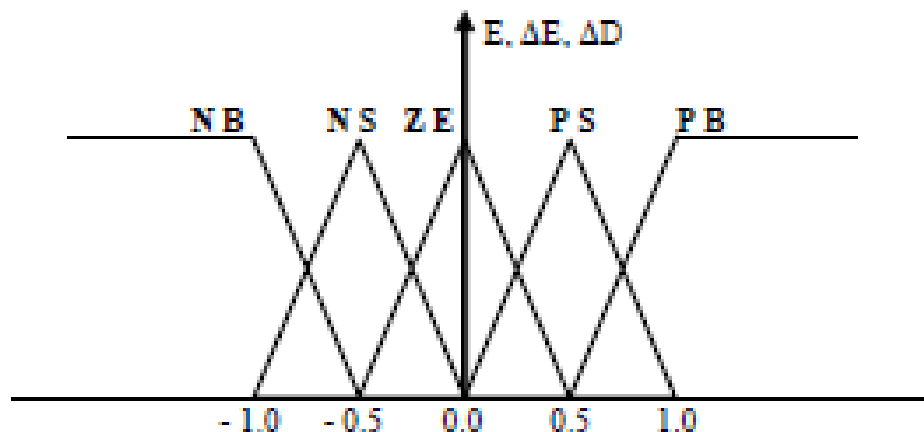


Figure- 3.11. Structure de base de la commande floue Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liés aux équations suivantes

$$E(n) = \frac{(n) - P(n-1)}{(n)(n-1)} \quad (3.7)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n - 1) \quad (3.8)$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau (V.1), Une valeur est attribuée au paramètre de sortie ΔD .

$E \backslash \Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tableau 3.1. Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

La variable linguistique assignée à ΔD , dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie ΔD est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM.

En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à ΔD s'affinent jusqu'à atteindre le PPM. La défuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie ΔD , afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. Noppadol Khaehintung a démontré en 2004 que l'emploi d'une commande MPPT basée sur le principe de la logique floue permet d'améliorer d'un facteur 8 le temps de réponse par rapport à une commande P&O classique.

Dans cet article, aucune indication n'est donnée sur la variable d'incrément, mais après analyse des relevés, on en déduit que celle-ci est relativement petite car les oscillations autour du PPM. Sont très faibles expliquant la différence en termes de réponse dynamique. Un phénomène

secondaire à prendre en compte est le temps mis par cette commande pour se stabiliser sur un nouveau PPM. La commande floue met 1,75 s pour s'immobiliser sur le PPM, alors que la commande P&O s'y positionne au bout de 1,25s, c'est-à-dire dès qu'elle l'atteint. Une comparaison plus fine est donc nécessaire pour affirmer les gains de ce nouveau type de commande à l'égard de l'algorithme de base très complexe.

La commande logique floue est comparée directement à la méthode Hill Climbing. Les différents oscillogrammes montrent que le temps de réponse est légèrement amélioré, par contre l'erreur statique obtenue est relativement faible. Ici, contrairement à l'exemple cité ci-dessus, la valeur de l'incrément est importante. Malheureusement la qualité des relevés ne permettent pas de déterminer avec précision le gain en termes de temps de recouvrement ainsi que le rendement de cette commande à cause d'une échelle de temps et des calibres de mesure trop grands.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité. De la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau.

Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM. Mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût. [51][52]

3.4.6 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, nommées:

- Couche d'entrée (Input layer),
- Couche cachée (Hidden layer),

- Couchesortie(Outputlayer).
- Commelemontréla(Figure- V .12).

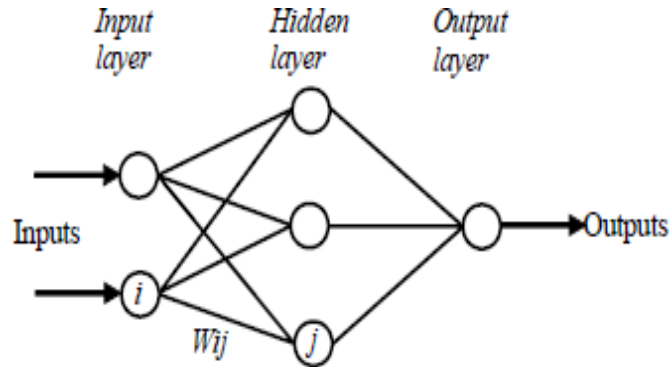


Figure- 3.12.Exemple d'unréseaudeneurones

Le nombre de noeuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré d'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (VOC, ICC) associées ou non à des données atmosphériques comme la température. Ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le CS pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, L'importance entre deux noeuds de la valeur du poids choisi W_{ij} est à prendre en compte. Pour identifier avec précision les différents PPM.

Éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance. Bien qu'il existe une grande quantité de ces commandes MPPT dans la littérature, nous ne connaissons pas d'application industrielle les utilisant. [51]

3.4.7 Autres Méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer:

- méthode de look-up table

- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de β
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

3.5 Critères d'évaluation d'une commande MPPT

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance P_{in} effectivement délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur (MPPT, asservissement de tension, connexion directe, ...). Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{mppt} permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance.

En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{mppt} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \quad (3.9)$$

Les performances d'une commande MPPT ne résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}).

D'autres critères, présentés dans la suite du document, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance est importante pour évaluer les qualités de ce type de commande. [53]

3.5.1 Simplicité et Coût

En plus de ses performances théoriques, il est important de connaître le niveau de complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implémentation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.

En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte énergétique fortement concurrentiel, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue énergétique recouvrant le surplus économique. Sinon, cette solution ne sera jamais viable du point de vue industriel. Dans le cas contraire, la commande aussi performante qu'elle

soient en termes de rendement, présente trop de contraintes pour être choisie pour ce type d'application.[51]

3.5.2 Réponse dynamique

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.[51]

3.5.3 Flexibilité

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de Panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse. [51]

3.5.4 Compétitive sur une large gamme de puissance

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.[54]

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale et tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuelle évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

CHAPITRE IV
SIMULATION ET
DUSCUSSION DES
RESULTATS

4.1 Introduction

Les travaux engagés dans ce chapitre de thèse ont pour objectif d'évaluer dans ce dernier chapitre les différents résultats obtenus des travaux réalisés dans le cadre de ce travail, concernant l'optimisation d'énergie photovoltaïque dans les systèmes photovoltaïques autonomes sous l'effet de changement d'ensoleillement.

Comme nous l'avons expliqué dans les chapitres précédentes l'optimisation, le dimensionnement et la simulation des systèmes PV, notamment celles impactées par les changements des conditions environnementales.

Nous allons présenter dans un premier temps, le comportement d'un générateur photovoltaïque utilisé Matlab/Simulink. Nous présentons ensuite notre approche concernant l'optimisation des générateurs PV en utilisant les commandes MPPT, pour cela on propose les deux méthodes MPPT, sous changement rapide d'ensoleillement avec les différentes étapes de la mise en œuvre de ces commandes. Premièrement nous abordons l'architecture de l'incrémentale conductance améliorée et son comportement. Par la suite on donne le principe de la deuxième méthode proposée, qui est la méthode *TAKAGI SUGENO* floue, où nous développons par simulation ces différentes réponses.

4.2 La Modélisation floue de Type Takagi Sugeno TS d'un système photovoltaïque (Panneau PV + Convertisseur Elévateur (Dc/DcBoostConverter)).

4.2.1. Concepts de base et formulations de la méthode Takagi Sugeno Floue

L'avantage majeure des modèles flous est leur comportement qui n'oblige pas un modèle mathématique. Ils deviennent un attrait utile, quand un système n'a pas un modèle mathématique précis et pour les systèmes ont un modèle non linéaire complexe. La principale contribution de la théorie de la commande floue est sa capacité à gérer de nombreux problèmes pratiques qui ne peuvent être adéquatement traités par des méthodes de contrôle classiques [55]. La structure d'un modèle flou est décrite par un ensemble de règles où chacune est constituée par une prémisse et une conclusion. Deux grandes classes de modèles flous sont répertoriées selon la nature des conclusions de leurs règles : Les modèles flous de *Mamdani* qui utilisent une conclusion symbolique et les modèles flous de *Takagi-Sugeno* où les conclusions sont numériques [56].

Le modèle TS est un modèle flou plus fréquent pour la linéarisation des modèles. Il est inventé par les deux chercheurs *TOMOHIRO TAKAGI et MICHIO SUGENO* en 1985[57]. Les modèles de Takagi-Sugeno (T-S) constituent une représentation mathématique très intéressante des systèmes non linéaires car ils permettent de représenter tout système non linéaire, quelle que soit

sa complexité, par une structure simple en s'appuyant sur des modèles linéaires interpolés par des fonctions non linéaires positives ou nulles et bornées [58].

L'approche T-S permet de représenter le comportement d'un système sous forme de plusieurs modèles linéaires. Avec les notations $\mathbf{R}^i : (i = 1, 2, \dots, r)$ la $i^{\text{ème}}$ règle, r étant le nombre de règles "Si ... alors", $F_j^i : (j = 1, 2, \dots, r)$ les sous ensembles flous des prémisses, $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ le vecteur d'état, $u(t) \in \mathbf{R}^m$ le vecteur des entrées, $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^q$ le vecteur des sorties, $A_i \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $C_i \in \mathbf{R}^{q \times n}$ et $z_1(t) \sim z_p(t)$ les variables des prémisses (variables dépendant de l'état et/ou des entrées), les modèles flous TS sont représentés sous la forme suivante, où MFC et MFD indiquent, respectivement, les modèles flous continus et les modèles flous discrets[60].

❖ MODELES FLOUS CONTINUS (MFC)

Règle R^i du modèle:

Si $z_1(t)$ est F_1^i et $z_2(t)$ est F_2^i ... et $z_p(t)$ est F_p^i

$$\text{Alors } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad (4.1)$$

$i = 1, 2, \dots, r$

Chaque conséquence de la règle est représentée

par des relations dans l'espace d'état: $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t)$

est appelée un *sous-modèle*. A chaque règle R^i est attribué un poids $\omega_i(z(t))$ qui dépend de la valeur de vérité (ou du degré d'appartenance) des $z_j(t)$ aux sous-ensembles flous F_j^i , notée $F_j^i(z_j(t))$, et du choix de la modélisation du connecteur (opérateur) "et" reliant les prémisses. Le connecteur "et" est souvent choisi comme étant le produit, d'où:

$$\omega_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p F_j^i(z_j(t)), i = 1, 2, \dots, r \text{ avec } \forall t, \omega_i(z(t)) \geq 0 \quad (4.2)$$

Car les fonctions d'appartenances prennent leurs valeurs $[0 \ 1]$. [61]

Les sorties finales du modèle flou sont inférées par la défuzzification.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))}, y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))} \quad (4.3)$$

En posant :

$$\text{Avec } h_i(z(t)) = \frac{\omega_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))} \text{ Avec } \forall t, \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1 \quad (4.4)$$

Elles peuvent être réécrites

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\} \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) \end{cases} \quad (4.5)$$

De la même manière, les modèles flous discrets sont définis par :

❖ MODELES FLOUS DISCRETS (MFD)[62]

Règle R^i , $i=1, 2, \dots, r$, du modèle :

Si $z_1(t)$ est F_1^i et $z_2(t)$ est $F_2^i \dots$ et $Z_p(t)$ est F_p^i

$$\text{ALORS } \begin{cases} x(t+1) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

Et les sorties finales du modèles flous sont définies par :

$$x(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))}, \quad y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))} \quad (4.7)$$

En posant :

$$h_i(z(t)) = \frac{\omega_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))} \quad \text{Avec } \forall t, \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1,$$

Elles peuvent être réécrites [118]

$$x(t+1) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}, \quad y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) \quad (4.8)$$

Généralement pour obtenir un modèle flou TS, deux approches existent, la première est basée sur l'utilisation des méthodes d'identification à partir des signaux d'entrée/sortie. Cette approche se justifie principalement lorsqu'une représentation analytique du système à partir des lois de la physique est inconnue ou complexe. La deuxième famille d'approche suppose l'existence d'un modèle analytique non linéaire à partir duquel est déduit un modèle TS. Ce dernier peut être obtenu soit par linéarisation autour de différents points de fonctionnement, comme dans le cas des approches multi-modèles, soit en utilisant une méthode appelée secteur non linéaire (**Sector Nonlinearity**)[62]. Le secteur de non-linéarité est basé sur l'idée suivante:

Considérons un système non linéaire simple décrit par:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) \text{ où } f(0) = 0 \quad (4.9)$$

L'objectif est de trouver le secteur global tel que:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) \in [a1 \ a2]x(t) \quad (4.10)$$

La figure (I.1) illustre l'approche par secteurs non linéaires.

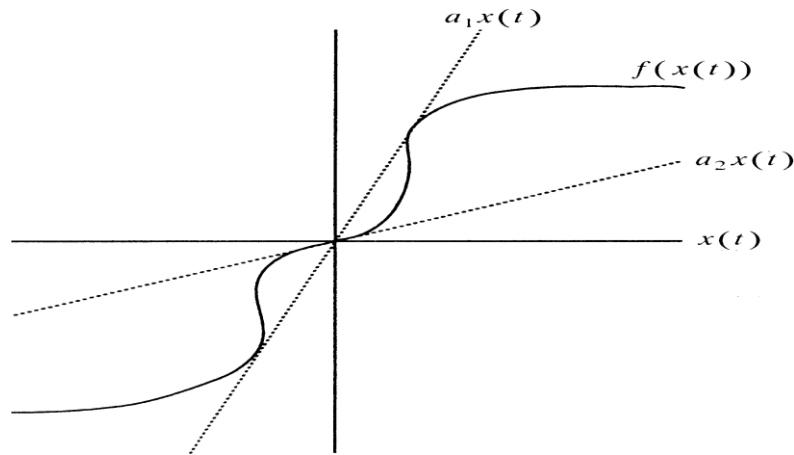


Figure 4. 1Secteur non linéaire global.

Cette approche consiste à partir d'un modèle non linéaire à obtenir un modèle TS qui représente exactement le comportement du modèle non linéaire dans un compact de l'espace d'état. Le principe est le suivant, considérons un modèle non linéaire, affine en la commande, donné par l'équation suivante:

$$\dot{x}(t) = F(x(t))x(t) + G(x(t))u(t) \quad (4.11)$$

avec $x(t) \in R^n, u(t) \in R^n$ et $F(x(t)), G(x(t))$ sont des fonctions bornées. Le modèle flou TS du modèle non linéaire décrit par l'équation (4.11) peut être calculé par l'utilisation du lemme suivant:

Lemme[60-63]:

Si $x(t) \in [a, b]$, avec $a, b \in R^+$ et $f(x(t)): R \rightarrow R$ une fonction bornée sur $[a, b]$, alors il existe deux fonctions $\omega_1(x(t))$ et $\omega_2(x(t))$ ainsi que deux réels f_{\min} et f_{\max} tels que $f_{\min} \leq f(x(t)) \leq f_{\max}$ et $f(x(t)) = f_{\min} \cdot \omega_1(x(t)) + f_{\max} \cdot \omega_2(x(t))$

$$\omega_1(x(t)) + \omega_2(x(t)) = 1, \quad \omega_1(x(t)) \geq 0, \omega_2(x(t)) \geq 0 \quad (4.12)$$

Pour assurer que $\omega_1(x(t))$ et $\omega_2(x(t))$ vérifient la propriété de somme convexe, il suffit de prendre

$$\omega_1(x(t)) = \frac{f_{\max} - f(x(t))}{f_{\max} - f_{\min}}$$

et
$$\omega_2(x(t)) = \frac{f(x(t)) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (4.13)$$

Ce type de présentation permet de traiter les problèmes multi-variables et d'aborder l'étude de la stabilité grâce à la méthode de Lyapunov.

4.2.2. STABILITE DES MODELES TAKAGI-SUGENO (T-S)

L'étude de la stabilité et la synthèse des contrôleurs flous pour les modèles T-S sont généralement basées sur la théorie de Lyapunov[64-65]. Le principe de cette dernière est inspiré d'une réalité physique. En effet, si l'énergie d'un système est continûment dissipée, au

final le système va atteindre un point d'équilibre. Dans la suite, sans perte de généralité, on suppose que le point d'équilibre est l'origine.

L'étude de la stabilité des modèles TS standards *MTSS* autonomes (I.4) permet d'établir si sa dynamique est intrinsèquement stable lorsqu'il n'est soumis à aucune excitation externe ($u(t) = 0$). Les résultats de nombreux travaux sur la stabilité des MTSS sont donnés sous forme *d'Inégalités Matricielles Linéaires (LMI)*. Le résultat suivant traite de la stabilité des MTSS décrits en temps continu :

Théorème 4.1 [62] : *Le modèle TS standard MTSS continu autonome ($u(t) = 0$) (V.4) (respectivement (4.8) dans le cas discret) est asymptotiquement stable s'il existe une matrice $P=P^T$, telles que les LMI suivantes sont vérifiées pour $i = 1, \dots, r$:*

$$\begin{aligned} A_i^T P + P A_i < 0 & \quad (\text{cas continu}) \\ A_i^T P A_i - P < 0 & \quad (\text{cas discret}) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Preuve : (cas continu) En considérant la fonction candidate quadratique de Lyapunov

$$V(x(t)) = x^T(t) P x(t) \quad (4.15)$$

Le modèle TS standard MTSS autonome (V.4) ($u(t) = 0$) est stable si:

$$\dot{V}(x(t)) = \dot{x}^T(t) P x(t) + x^T(t) P \dot{x}(t) < 0 \quad (4.16)$$

C'est-à-dire si :

$$\dot{V}(x(t)) = \dot{x}^T(t) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (A_i^T P + P A_i) \right) x(t) < 0 \quad (4.17)$$

qui est vérifiée si les conditions suffisantes du théorème V.1 le sont.

4.2.3. OBSERVATEURS POUR LES SYSTEMES DE TAKAGI-SUGENO

Il est fréquemment nécessaire d'estimer certaines variables décrivant l'état d'un système qui ne sont pas directement mesurables pour des raisons techniques ou économiques. Ce problème trouve une solution par l'utilisation de "capteurs logiciels" appelés généralement *observateurs* [58-59]. La construction d'un observateur, afin d'estimer ces variables, s'appuie sur un modèle mathématique représentant le comportement du système. La structure d'observateur basée sur la structure multi-modèle la plus utilisée dans la littérature est une extension de celle de l'observateur de *Luenberger* [64] proposée pour les systèmes linéaires. Ce choix s'avère naturel sachant que la structure multi-modèle est une combinaison linéaire de sous-modèles linéaires.

Considérons le modèle T-S suivant pour lequel la sortie est une fonction d'état linéaire

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i(\xi(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= C x(t) \end{aligned} \quad (4.18)$$

L'observateur proposé, inspiré de celui construit pour le cas linéaire à la forme suivante :

$$\begin{aligned}\hat{\dot{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i \left(\hat{\xi}(t) \right) \left(A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t)) \right) \\ \hat{y}(t) &= C \hat{x}(t)\end{aligned}\quad (4.19)$$

Afin de déterminer les gains L_i de l'observateur (4.19), la stabilité du système générant l'erreur d'estimation d'état étant définie par :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (4.20)$$

Sa dynamique est régie par une équation différentielle qui dépend de la connaissance ou non des variables de décision intervenant dans les fonctions d'activation. On définit alors deux cas selon que les variables de décision sont mesurables ou non mesurables.

4.2.4. VARIABLES DE DECISION MESURABLES (VDM)

Il est fréquemment nécessaire d'estimer certaines variables décrivant l'état d'un système qui ne sont pas directement mesurables pour des raisons techniques ou économiques. Ce problème trouve une solution par l'utilisation de "capteurs logiciels" appelés généralement observateurs. La construction d'un observateur, afin d'estimer ces variables, s'appuie sur un modèle mathématique représentant le comportement du système.

La majeure partie des travaux effectués sur la conception d'observateurs d'état pour les systèmes TS s'appuie sur l'hypothèse de disponibilité des variables de décision. De ce fait, l'observateur utilise les mêmes variables de décision que le modèle du système ce qui permet une factorisation par les fonctions d'activation lors de l'évaluation de la dynamique de l'erreur d'estimation d'état. Plus précisément, cette dernière s'écrit :

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i \left(\xi(t) \right) (A_i - L_i C) e(t) \quad (4.21)$$

Les gains L_i de l'observateur sont déterminés par analyse de la stabilité du système TS (4.21).

L'analyse de la stabilité via une fonction de Lyapunov quadratique a permis l'obtention de conditions LMIs pour la synthèse de l'observateur :

Théorème 4.2. [65]

L'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro s'il existe une matrice

$P = P^T > 0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ et des matrices $K_i \in \mathbb{R}^{n \times n y_i}$ telles que les conditions suivantes soient satisfaites :

$$P A_i + A_i^T P - K_i C - C^T K_i^T < 0 \quad i = 1, \dots, r \quad (4.22)$$

Les gains de l'observateur sont obtenus à partir de l'équation :

$$L_i = P^{-1} K_i \quad (4.23)$$

Preuve.

Elle s'appuie sur l'étude de la stabilité par la théorie de Lyapunov en utilisant une fonction de Lyapunov quadratique $(x(t)) = e^T(t) P e(t) \geq 0$. L'importante propriété de somme convexe des fonctions d'activation a permis l'obtention de conditions suffisantes de stabilité du système (4.21)

généralisant l'erreur d'estimation d'état. Afin d'obtenir des inégalités linéaires, le changement de variable $K_i = PL_i$ est utilisé.

La stabilité a été étudiée par la théorie de Lyapunov et les conditions obtenues sont formulées en utilisant des LMIs.

4.2.5. VARIABLES DE DECISION NON MESURABLES (VDNM)

Dans le cas où les variables de décision ne sont pas connues, leur factorisation n'est plus possible et la dynamique de l'erreur d'estimation d'état s'écrit alors sous la forme :

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(\xi(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) - \sum_{i=1}^r \mu_i(\hat{\xi}(t)) (A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i C e(t)) \quad (4.24)$$

En analysant la forme de l'équation d'état (V.24), on conclut que les résultats obtenus dans le cas des systèmes TS à VDM ne sont pas applicables pour la détermination des gains L_i de l'observateur. Dans ce cas des résultats classiques de stabilité des multi-modèles à variables de prémisses non mesurables peuvent être appliqués. Des résultats proposent des conditions de convergence d'estimation d'état vers zéro en se basant sur l'observateur de Thau-Luenberger [65]

Théorème 4.3. [66] *L'erreur d'estimation d'état entre le modèle T-S et l'observateur converge asymptotiquement vers zéro, s'il existe des matrices symétriques et définies positives $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ et $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ainsi qu'un scalaire positif γ tels que:*

$$A_i^T P + P A_i - C^T K_i^T - K_i C < -Q \quad i = 1, \dots, r \quad (4.25)$$

$$\begin{bmatrix} -Q + \gamma^2 & P \\ P & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.26)$$

4.2.6. Construction du modèle flou pour système proposé

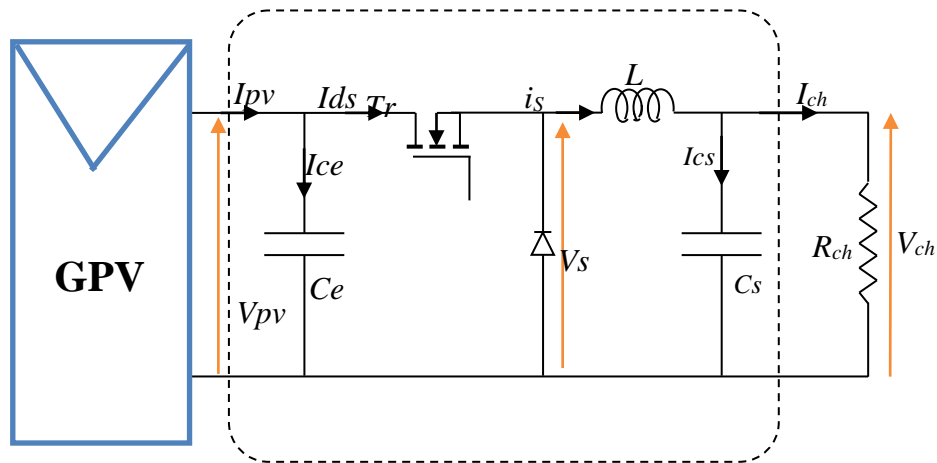


Figure 4. 2 Configuration du système d'énergie photovoltaïque

A l'aide de la figure 4. 2, il est possible de donner le modèle dynamique exprimé par les équations d'état suivantes:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_L - \frac{1}{L}V_{ch} + \frac{V_{ch}}{L}u + \frac{1}{L}V_{pv} \\ \frac{dV_{ch}}{dt} = \frac{1}{C_e}i_L - \frac{1}{C_e R_{ch}}V_{ch} - \frac{i_L}{C_e}u + \frac{1}{R_b C_e}(E_b - V_{ch}) \end{cases} \quad (4.27)$$

Où: i_L est le courant dans l'inductance L et V_{ch} est la tension de charge. R_L et R_b sont respectivement les résistances de l'inductance et de la batterie, E_b est la force électromotrice de la batterie et u est le rapport cyclique pour commander le MOSFET de commutation, $u \in \{0,1\}$.

Les contrôleurs à logique floue conviennent aux systèmes photovoltaïques caractérisés par une non-linéarité élevée, des fluctuations d'entrée et des variations environnementales [67]. En fait, le suivi du point de puissance maximale est mis en œuvre à l'aide d'un contrôleur flou T-S.

Le contrôleur flou T-S détermine le rapport cyclique u du convertisseur dc-dc boost et permet au générateur photovoltaïque de fonctionner à sa puissance maximale.

Le vecteur d'état du système est défini comme suit :

$$x = [i_L V_{ch}]^T \text{ et } \dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{ch}}{dt} \end{bmatrix}^T \quad (4.28)$$

Pour trouver le point de puissance maximale du système PV et parce que le MPPT se produit à

$\frac{dP}{dV_{pv}} = 0$, nous calculons la dérivée partielle $\frac{dP}{dV_{pv}} = 0$ comme sortie de contrôle :

$$y(t) = \frac{dP}{dV_{pv}} \quad (4.29)$$

L'équation d'état du système devient :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{ch}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_e} & -\frac{1}{C_e R_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{ch} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{ch}}{L} \\ -\frac{i_L}{C_e} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (4.30)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & \frac{I_{pv}}{V_{ch}} - \frac{V_{pv}}{V_{ch}} \cdot \frac{N_p I_0}{N_s V_T} \exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s V_T}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{ch} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Ainsi, on peut donner la forme matricielle suivante :

$$\dot{x}(t) = A(x).x(t) + B(x).u(t) + B_0.b_d \quad (4.32)$$

$$y(t) = C(x).x(t) \quad (4.33)$$

En utilisant la méthode de modélisation floue et les expressions définies ci-dessus, nous devons fuzzifier les matrices $A(x)$, $B(x)$ et $C(x)$. A cet effet, les variables de prémisses floues peuvent être exprimées par :

$$q_1 = \frac{V_{ch}}{L} \quad (4.34)$$

$$q_2 = i_L \quad (4.35)$$

$$q_3 = \frac{I_{pv}}{V_{ch}} \quad (4.36)$$

$$q_4 = \frac{V_{pv}}{V_{ch}} \cdot \frac{N_p I_0}{N_s V_T} \exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s V_T}\right) \quad (4.37)$$

Ainsi, les matrices de sous-systèmes appropriées sont données par:

$$A_i = A = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_e} & -\frac{1}{C_e R_{ch}} \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} q_{1i} \\ -\frac{1}{C_e} q_{2i} \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } C_i = [0 \quad q_{3i} - q_{4i}]$$

Les règles floues T-S peuvent être exprimées comme suit: Si $q_1(t)$ est F_{1i} et ... $q_4(t)$ est F_{4i} alors:

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + B_0 b_d \quad (4.38)$$

$$y(t) = C_i x(t) \quad i = 1, 2, \dots, r$$

Où F_{ji} sont les ensembles flous et r est le nombre de règles floues ($r = 16$). Le modèle global du système flou T-S est :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(q(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t) + B_0 b_d\} \quad (4.39)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(q(t)) C_i x(t) \quad (4.40)$$

On définit le vecteur de variables prémisses $q(t)$ par :

$$q(t) = [q_1(t) q_2(t) q_3(t) q_4(t)]^T \quad (4.41)$$

$\mu_i(q(t))$ Est le degré d'activation pour chaque règle i . Elle est donnée par la forme normalisante:

$$\mu_i(q(t)) = \frac{w_i(q(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(q(t))} \quad (4.42)$$

$$\text{Avec: } w_i(q(t)) = \prod_{j=1}^4 F_{ji}(q(t)) \quad (4.43)$$

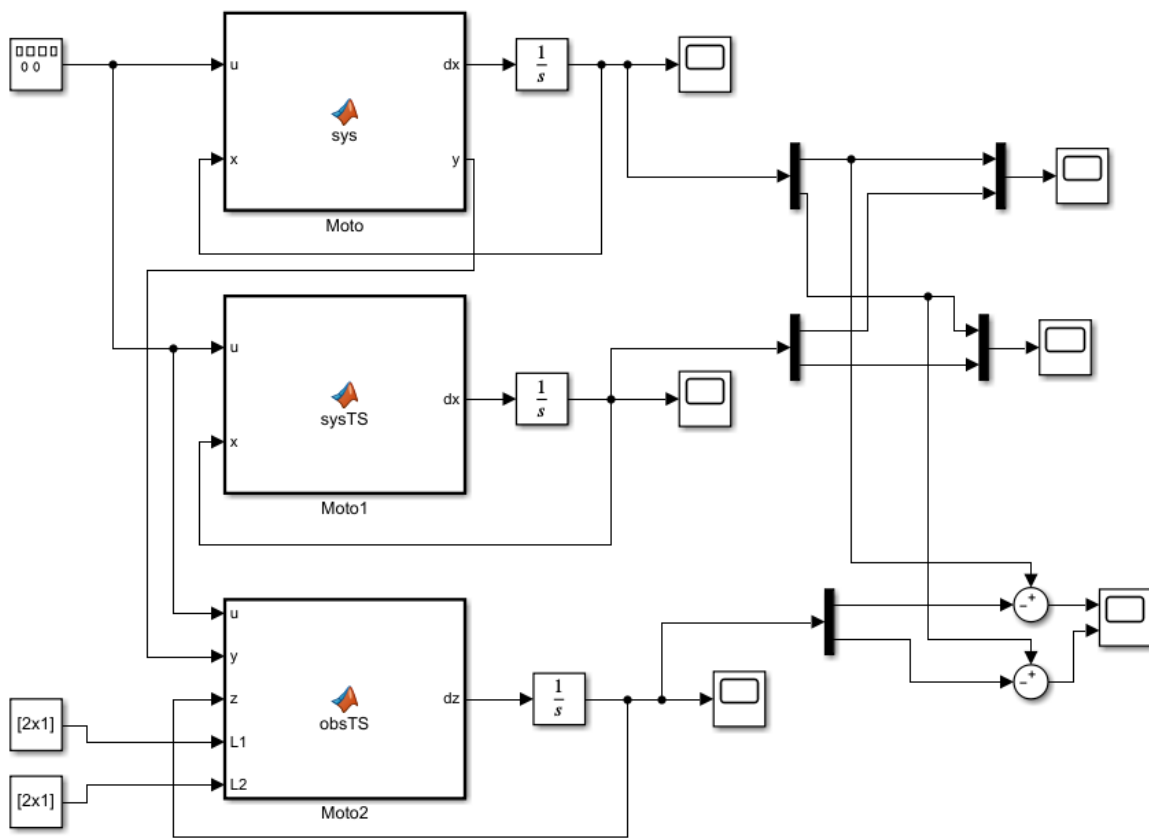
Ce qui implique que : $\sum_{i=1}^r \mu_i(q(t)) = 1$ pour tous t .

La forme générale des fonctions d'appartenance est donnée par:

$$f_{aj} = \frac{q_j(t) - q_{mj}}{q_{Mj} - q_{mj}} \text{ Et } f_{bj} = 1 - f_{aj}$$

Où q_{Mj} et q_{mj} sont les bornes supérieure et inférieure de la variable (t) pour $j = 1, 2, 3, 4$.

❖ Schéma Bloc de la chaine de converssion Photovoltaïque:



❖ Résultats de simulation

Afin de tester les performances de cet algorithme, nous présentons dans ce qui suit les résultats de simulation obtenus avec un suivi du MPP en faisant varier les conditions climatiques.

Dans un premier temps, une variation sinusoïdale du rayonnement solaire sera faite selon l'équation:

$(600 + 400\sin\omega t)$. Ensuite, le rayonnement solaire est varié à l'aide d'une forme d'escalier sur paliers de durée à fronts montants.

Les résultats de simulation obtenus avec la variation sinusoïdale du rayonnement solaire et la température fixe $T=30^{\circ}C$ sont représentés sur les Fig.3 et Fig.4.

Car, après le calcul de la loi de commande, on peut remarquer que les sorties du générateur photovoltaïque dépendent du rayonnement solaire et de la température ambiante.

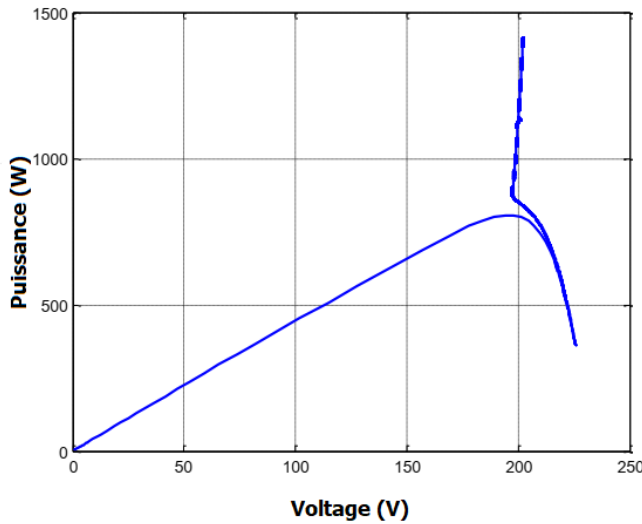


Figure 4. 3 Diagramme P-Vpv utilisant le contrôleur flou T-S

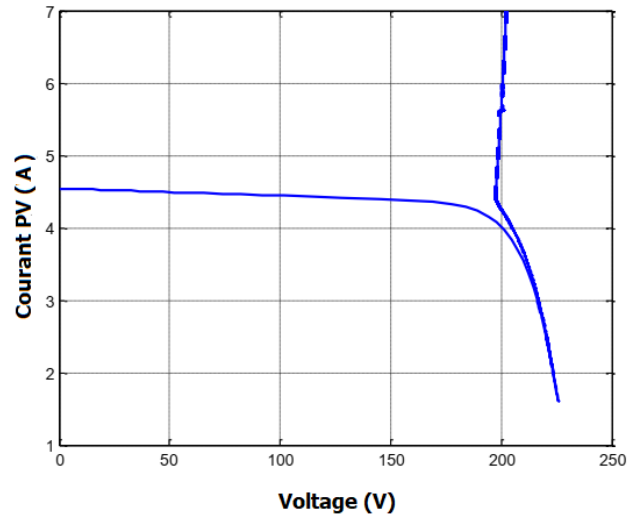


Figure 4. 4 Diagramme Ipv-Vpv utilisant le contrôleur flou T-S

Figures. 3 et 4 représentent les caractéristiques $P = (V_{pv})$ et $I_{pv} = (V_{pv})$ pour différentes valeurs de rayonnement solaire G (qui suit une variation sinusoïdale), avec une température ambiante constante $T = 30^{\circ}C$. On note que le générateur photovoltaïque peut fonctionner à son point de puissance maximum pour différentes valeurs de rayonnement solaire.

Ensuite, on ne modifie que la variation de l'ensoleillement qui suivra l'évolution représentée par la figure 5.

Nous montrons sur les figures 6 à 8 les réponses dynamiques du système photovoltaïque piloté par l'algorithme MPPT en termes de génération de puissance de sortie, de tension et de courant.

Figures. 6-8 montrent qu'en changeant l'irradiation le système s'adapte rapidement à ces variations avec une bonne stabilisation et que la méthode MPPT suit le nouveau MPP avec une bonne précision après chaque changement d'ensoleillement. Ainsi, on peut conclure que l'irradiation solaire n'a aucun effet sur l'ensoleillement de la méthode proposée. Ainsi, on peut conclure que l'irradiation solaire n'a aucun effet sur la méthode proposée.

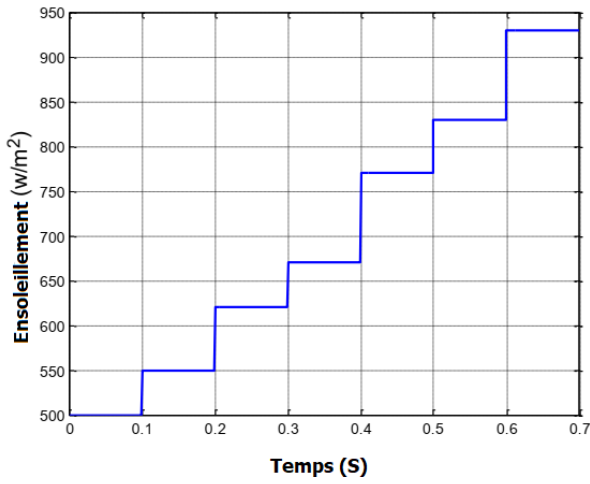


Figure 4. 5Niveaux de rayonnementsolaire

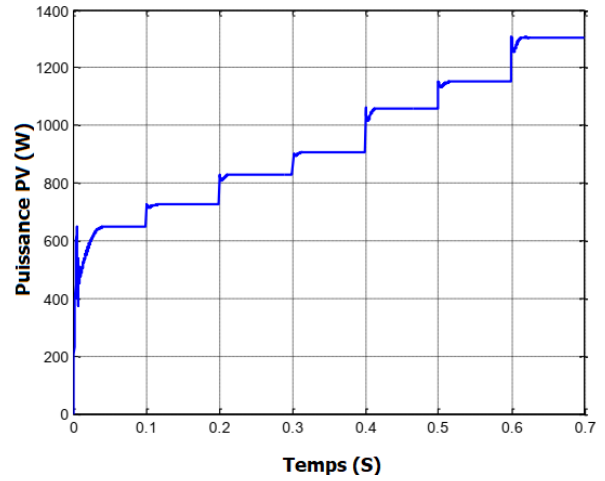


Figure 4. 6Puissance PV (w)

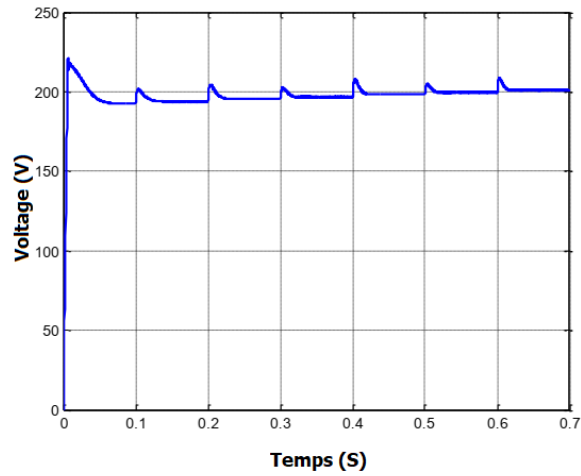


Figure 4. 7La tension de sortie du générateurphotovoltaïque basée sur le contrôle MPPT

Il y a juste une légère variation à l'instant de variation de l'irradiation qui va s'éliminer au période d'un lapse de temps et le système converge vers le MPP.

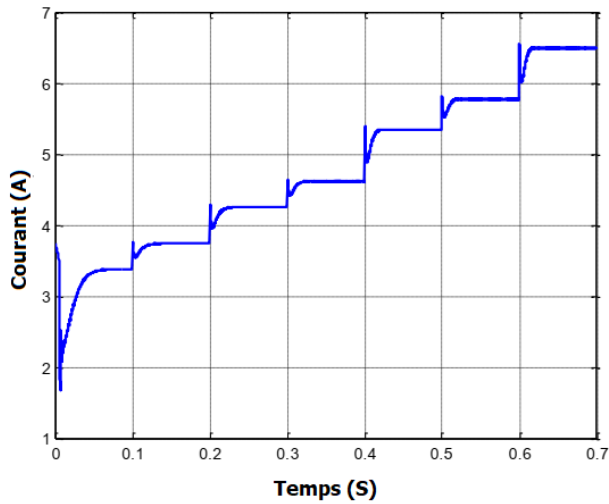


Figure 4. 8 Courant PV (A)

Pour mieux visualiser et observer le comportement du générateur photovoltaïque contrôlé par le contrôleur flou proposé, les caractéristiques puissance-tension ($P-V_{pv}$) et courant-tension ($I_{pv}-V_{pv}$) sont présentées dans les Fig. 9 et 10.

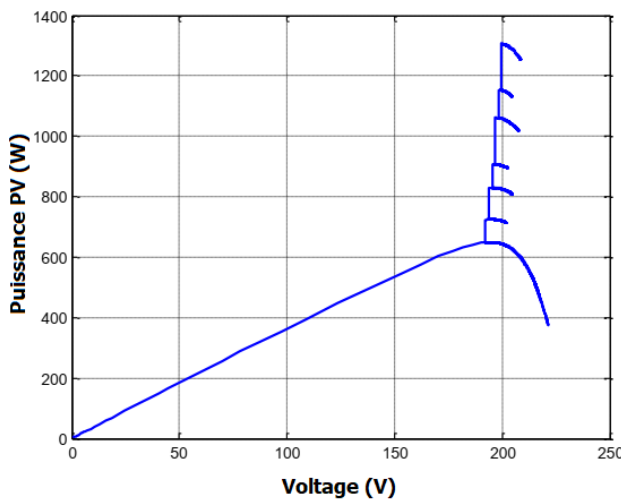


Figure 4. 9 Réponse en puissance PV baséesur le contrôleurflou T-S

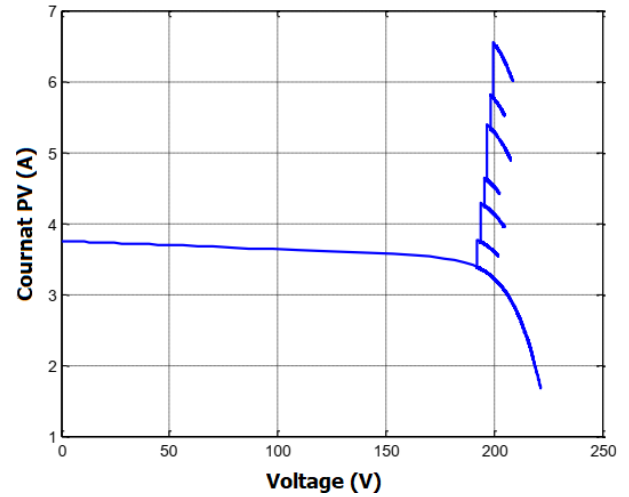


Figure 4. 10 Le courant de sortie du générateur photovoltaïque basé sur le contrôleur flou T-S

Dans les conditions d'irradiation considérées, sept pics sont détectés comme le montre la figure 9-10.

Enfin, nous représentons les résultats obtenus en faisant varier l'éclairement (Fig.5) ainsi que la température dont la variation est donnée par la Fig. 11:

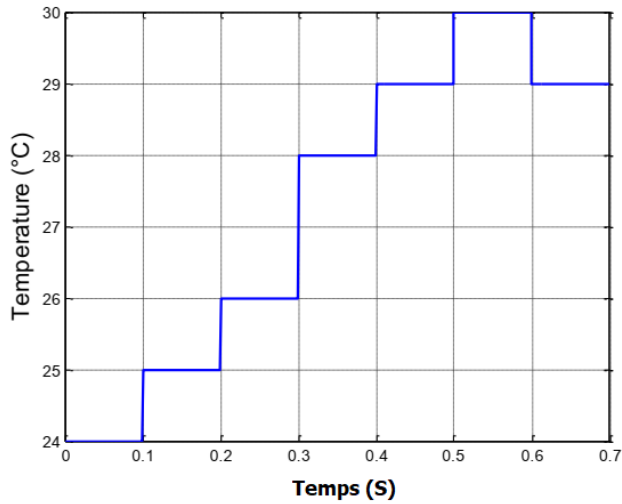


Figure 4. 11Niveaux de temperature

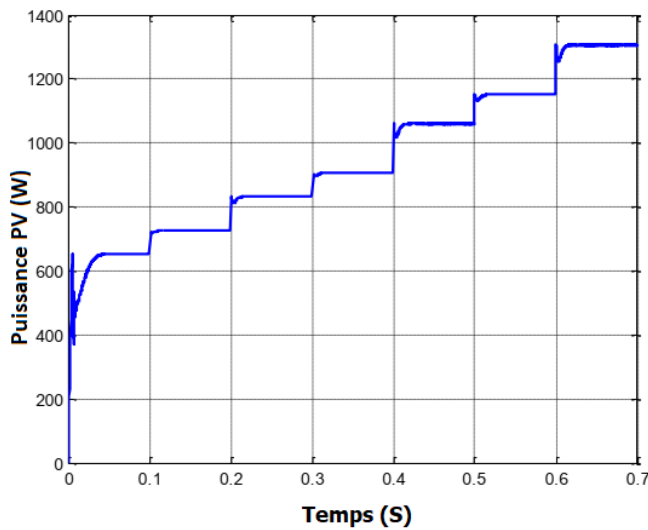


Figure 4. 12Puissance PV (w)

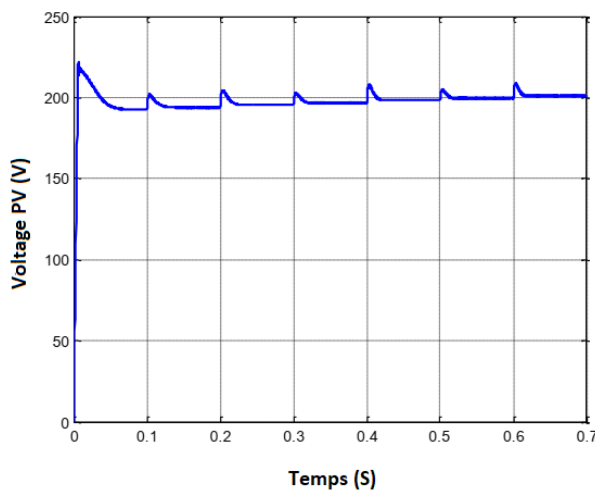


Figure 4. 13La tension de sortie du générateur photovoltaïque

En appliquant l'algorithme MPPT au système photovoltaïque, les réponses dynamiques du panneau peuvent être représentées sur les « Figures 12-16 ».

Sur la base des résultats de simulation, l'algorithme flou T-S permet de faire fonctionner le générateur PV à sa puissance maximale en présence de variations de rayonnement solaire et de température. En agissant sur le rapport cyclique du convertisseur élévateur, la loi de commande élaborée permet de faire varier la tension du générateur photovoltaïque à la valeur optimale correspondant à la puissance maximale du générateur.

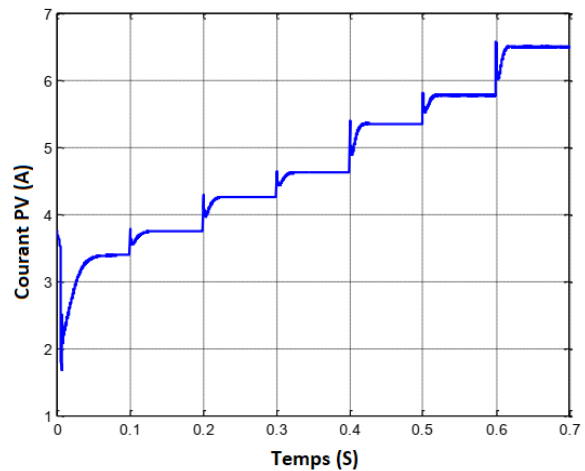


Figure 4. 14Courant PV (A)

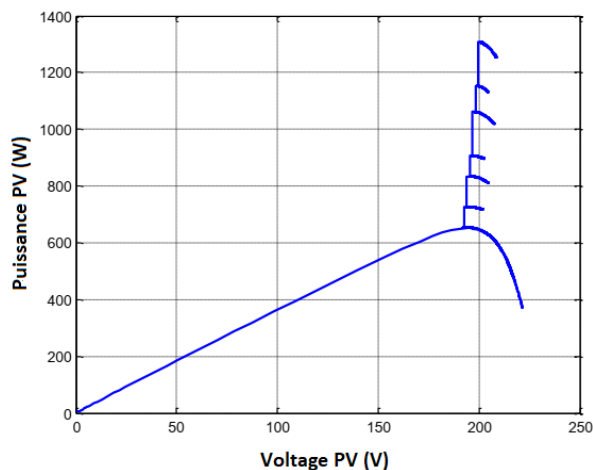


Figure 4. 15Réponse de puissance PV

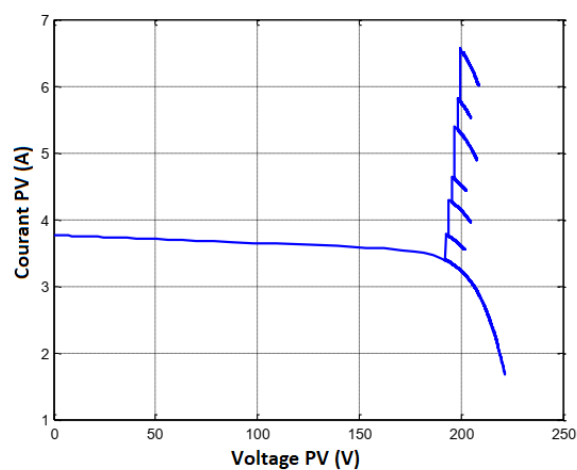


Figure 4. 16Le courant de sortie du générateur photovoltaïque

Conclusion :

Cemémoirevisait à faire fonctionner le générateur photovoltaïque à sa puissance maximale. La mise en œuvre de ce système utilise un convertisseur Boost piloté par un contrôleur flou de type T.S dont les performances ont été prouvées. Ce contrôleur permet au générateur de fournir la puissance maximale en cas de changements rapides des conditions météorologiques. Une simulation basée sur Matlab/Simulink du système de générateur photovoltaïque et d'un convertisseur Boost a été réalisée pour valider la méthode MPPT proposée.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la méthode MPPT proposée. Les principaux avantages de la méthode de contrôle développée sont la convergence rapide vers la puissance maximale, l'élimination des oscillations autour du maximum et la robustesse. Ce système sera introduit dans de futurs travaux dans une ligne de production d'électricité pour alimenter le réseau via un onduleur.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans notre travail, nous avons étudié la modélisation & simulation de la chaîne photovoltaïque composé de générateurs photovoltaïques et d'étages d'adaptation (convertisseur DC/DC), une charge DC (résistance) et un étage de contrôle Convertisseur de variateur (dans ce cas la commande MPPT classique est utilisée pour la première fois commandes P&O, IncCond et MPPT Fuzzy), et une commande avec contrôleur flou a l'aide du modele Takagi-Sugeno plus un observateur.

Dans ce cas, nous avons montré un système d'énergie renouvelable Particulièrement intéressé par les systèmes photovoltaïques, qui sont principalement composés de Générateur photovoltaïque (GPV) et convertisseur élévateur DC-DC. Modèle électrique en La diode unique de GPV décrite par le modèle mathématique est étudiée. De même Modèle électrique et équation mathématique du convertisseur Boost expliqué. Effectuer différentes simulations dans l'environnement Matlab/Simulink Mettre en évidence l'impact des changements de conditions climatiques (éclairage et Température) sur le MPP avec la puissance de fonctionnement du système la plus faible.

Les commandes MPPT, qu'elles soient classiques (P&O, IncCond) ou Fuzzy, sont autorisées Une meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge, cela force Toujours fonctionner au point de puissance maximum, cependant, une étude comparative Les résultats de la simulation montrent que la commande Fuzzy MPPT& TS-flou+Observateur provoque Meilleures performances (réduire le temps de réponse et l'erreur en régime permanent). Nous espérons qu'à travers ce travail, pour la recherche Caractéristiques photovoltaïques des cellules solaires, recherche sur les systèmes photovoltaïques Contrôle MPPT indépendant, classique et TS-flou.

Du point de vue de ce travail, il sera intéressant de continuer à mettre en œuvre Matériel qui simule la technologie MPPT, un système basé sur un microcontrôleur ou DSP ou arduino pour vérifier les résultats de la simulation et confirmer les performances obtenues.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] : (2010) <http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [2] : "BOUALEM DENDIB" Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative." Université Ferhat Abbes-Sétif mémoire de magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [3] : S. NAOUAL, "modélisation et extraction automatique des Paramètres d'un générateur," université Ferhat Abbas de Sétif mémoire de magister, département d'électrotechnique 2010.
- [4] : baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université mentouri de Constantine 2007.
- [5] : Olivier Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [6]: Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister en Microélectronique –Photovoltaïque, centre universitaire de Bechar, 2008
- [7]: Site Internet, <http://www.scribd.com/doc/46661921/Les-energies-renouvelables> , consulté Le12/06/2013
- [8]: B .Flèche, D. Delagnes, « energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2014.
- [9] : J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. „ Le pompage photovoltaïque“, université d'Ottawa, 1998.
- [10]: M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne», Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.
- [11] Alain Bilbao lerreta « Réalisation de commande MPPT Numériques», Université Rovira Virgil Toulouse, Rapport de stage projet fin d'études, septembre 2006.
- [12] KALAJDI Farah et CHEKROUNI Nesrine «commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT) », Université ABOU BAKR BELKAID de Tlemcen, Thèse de Master, 2013/2014.
- [13] N.BENLOUCIF, « Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches », thèse doctorat, Constantine,
- [14] Labani Imad Eddine riadh et Attig Abdelkrim, « modélisation simulation d'un system photovoltaïque adapte par une commande MPPT perturbation et observation (P&O) », Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, Thèse de Master, 22/06/2017.

- [15] Zhao J., Wang A., Campbell P., Green M.A. "A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping". *Electron Devices, IEEE Transactions*, Volume 46, Issue 10, Oct. 1999, Page(s): 1978–1983.
- [16] MESSAOUDI Mohammed Tahar «Simulation d'un système photovoltaïque autonome régulé par logique floue», UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Thèse de Master, 08/06/2015.
- [17] Belaout Abdeslam «Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes Photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension», UNIVERSITE – SETIF-1, Thèse de Magister, 28/10/2014.
- [18] FABRIZIO OLITA «ADVANCED CONTROL AND CONDITION MONITORING PV SYSTEMS», Université Aalborg, Danemark, Master Thesis, **June** 2012.
- [19] Boukhers Djamil «optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage. » Magister en électrotechnique université Mentouri de Constantine 28/ 11/ 2007.
- [20] **M. Blhadj** "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome " Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [21] Luque, S. Hegedus. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd edition). John Wiley and Sons, 2011.
- [22] Géotzberger A, Luther J, Willeke G. *solar cells: past, present, future, solar anergie materials & solar cells*.
- [23] Anne Laburet, Michel Viloz : *énergie solaire photovoltaïque 3e édition* dunod paris 2006.
- [24] solarelectripower.org. consulté le 23 Avril 2009.
- [25] F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004.
- [26] Frank Jackson : *Planning and Installing Photovoltaic Systems Green*
Dragon Energy, A guide for installers, architects and engineers second edition Berlin October 2007.
- [27] C. Bernard, J. Chauvin, D. Lebrun, J.F. Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » 2006.
- [28] www.cmhc-schl.gc.ca/.
- [29]. S. Aminata, "Simulation du système hybrides Photovoltaïque". Thèse de Doctorat, canada, 1998.
- [30] W. Xiao, W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems", *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'04*, Vol. 3, pp. 1957-1963, Jun. 2004.

- [31] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N. C. Voulgaris, “Development of a microcontroller based photovoltaic maximum power point tracking control system”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 16, pp. 46-54, Jan. 2001.
- [32] Weidog .Xiao, “A novel modelling method for photovoltaic cells”, 35th annual IEEE Power Electronics Specialists conference, Aachen, pp 1950-1956, 2004.
- [33] D. Weiner. “An optimal design of a photovoltaic D.C motor coupled water pumping system”. IEEE, conference, pp 268-274, 1990.
- [34] S. Petibon, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques”, Thèse Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Jan 2009.
- [35] Yassine LASMI. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d’un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Université Sétif
- [36] A. Tchapo singo “système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome ”, Thèse de doctorat université Henri Poincar2010.
- [37] BENADEL Faiza. Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA.
- [38] BENSACI Wafa , «Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla,2012.
- [39] M.BEDRANE Farid. Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Université Abderrahmane MIR de Bejaia.
- [40] Anantapuram, “investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output” ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlalnehru technological university,2012.
- [41] Ahmad Zbeeb, “a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications” for the degree of master of applied science, concordia university Montréal,quebec,canada,2009.
- [42] Akihiro Oi, “ design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of california polytechnic state university, 2005.
- [43] Hajar Bagheri “advances in electric power engineering” publisher: lulu (usa), 2015.
- [44] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi ,,,active power control for a single-phase grid connected PV system ”, international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.

- [45] D. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy, "an improved mppt converter using current compensation method for small scaled PV-applications," IEEE applied power electronics conf. And exposition, vol. 1, pp. 540-545, 2003.
- [46] Bisker Asma, Chiri Meriem, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme
- [47] M. S. Jamri and T. C. Wei Modeling and Control of a Photovoltaic Energy System Using the State- 57 Space Averaging Technique", American Journal of Applied Sciences 7 (5): 682-691, 2010.
- [48] M. Frederick design and implementation of a digitally controlled stand-alone photovoltaic power supply", Department of electrical. Power engineering, Norwegian university of science and technology.
- [49] Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam « etude d' une chaine de conversion photovoltaïque »,diplôme d'ingenieur d'etat en genie electrotechnique, universite de Msila, 2010.
- [50] C. Cédric "optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque ", Thèse de doctorat université de Toulouse 2008.
- [51] M. S. Aït Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras Maximum power point tracking using a fuzzy logic control schème ", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3 (2007) 387 – 395.
- [52] A. Cid bastor conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ", Thèse de doctorat l'institut national des sciences appliquées de Toulouse 2006.
- [53] A. Dolera, R. Faranda, S. Leva "Ennery comparison of seven mppt techniques for PV systems", 59 scientific research j. Electromagnetic analyses & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009.
- [54] M. Veerachary, T.Senjuand K. Uezato, "feedforward maximum power point tracking of PV systems using fuzzy controller", IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, July 2002.
- [55]MS Saoud, HA Abbassi, S Kermiche, D Nada"Improved incremental conductancemethod for maximum power point tracking using cuk converter"WSEAS Trans Power Syst, 2013.
- [56]Safari, Azadeh, and Saad Mekhilef."Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 58.4 (2011): 1154-1161.
- [57]Eksin, İbrahim, And Osman Kaan Erol. "A fuzzy identification method for nonlinear systems." Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 8.2 (2000): 125-135.

- [58]El Ougli, Abdelghani. "Intégration des techniques floues à la synthèse de contrôleurs adaptatifs."Thèse de doctorat Université Sidi Mohamed Ben Abdellah,Fès (2009).
- [59]Takagi, Tomohiro, and Michio Sugeno. "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* 1 (1985): 116-132.
- [60]Ichalal, Dalil."Estimation et diagnostic de systèmes non linéaires décrits par un modèle de Takagi-Sugeno". These doctorat . Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2009.
- [61]Kruszewski, Alexandre"Lois de commande pour une classe de modèles non linéaires sous la forme Takagi-Sugeno: Mise sous forme LMI". These de doctorat Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2006.
- [62]MORÈRE, Yann. "Mise en œuvre de loi de commandes pour les modèles flous de type Takagi-Sugeno". 2001. Thèse de doctorat.
- [63]Chiu, Chian-Song, and Ya-Lun Ouyang. "Robust maximum power tracking control of uncertain photovoltaic systems: A unified TS fuzzy model-based approach." *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 19.6 (2011): 1516-1526.
- [64]Saad saoud M.et al"Modeling and Search of Global Power Peak Under Partial Shading Conditions on PV Array" International Conference on Electro-Energy ICEE 2014 , November, 10-11, 2014, Skikda, Algeria .
- [65]Elgendy, M.A.; Zahawi, B.; Atkinson, D.J. "Comparison of Directly Connected and Constant Voltage Controlled Photovoltaic Pumping Systems," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on* , vol.1, no.3, pp.184,192, Oct. 2010.
- [66]Ouada, M., Meridjet, M. S. & M. Saad Saoud "Study of new configuration photovoltaic pumping system." In *Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, International Conference on (pp. 1-5). IEEE 2014.
- [67]V. Courtecuisse, J. Sprooten, B. Robyns, M.Petit, B. Francois, J. Deuse, "A methodology to design a fuzzy logic based supervision of Hybrid RenewableEnergy Systems", *Mathematics and Computers inSimulation*, Volume 81, Issue 2, Pages 208-224,October 2010.