

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : de TECHNOLOGIE

Département : Electronique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Système

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Modélisation et Commande d'un panneau solaire

Présenté par : *BOUDERBALA Hamza*

Encadrant : *KHERFANE Hamid*

Pr.

UBM Annaba

Jury de Soutenance :

BENSAKER Bachir	Pr.	UBMA	Président
KHERFANE Hamid	Pr.	UBMA	Encadrant
YAHMEDI Said	Pr.	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

SOMMAIRE

Résumé	
Introduction générale	02
Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes PV	03
1.1 Introduction	04
1.2 L'énergie solaire	04
1.2.1 L'énergie solaire thermique.....	04
1.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque.....	04
1.3 Calcul de l'énergie solaire	04
1.4 Rayonnement solaire	06
1.4.1 Distribution spectrale du rayonnement solaire.....	06
1.4.2 Constante solaire.....	07
1.4.3 Masse d'air.....	08
1.4.4 Composition du rayonnement solaire.....	09
1.5 Semi-Conducteurs.....	10
1.5.1 Le dopage.....	10
1.5.2 Dopage de type N.....	11
1.5.3 Dopage de type P.....	11
1.5.4 Jonction PN.....	11
1.5.5 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	12
1.5.6 Module et types de cellules photovoltaïque.....	13
1.5.7 Association des cellules photovoltaïque.....	14
1.6 Panneau solaire.....	15
1.6.1 Protection des générateurs photovoltaïque	16
1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie PV	17
1.8 L'énergie solaire en Algérie.....	17
1.9 Conclusion.....	18
Chapitre 2 : Modélisation d'un module (cellule) PV	19
2.1 Introduction	20
2.2 Modélisation du module photovoltaïque	20
2.2.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	20
2.3 Présentation du module KYOCERA KC200GT	23
2.4 Influence de la température	24
2.5 Influence de l'éclairement.....	25
2.6 Constitution d'un générateur photovoltaïque	26
2.6.1 Association en parallèle.....	27
2.6.2 Association en série.....	28
2.7 Conclusion	31
Chapitre 3 : Modélisation de MPPT et simulation d'un système Photovoltaïque	32
3.1 Introduction	33
3.2 Conversion de puissance	33
3.2.1 Electronique de puissance.....	33
3.2.2 Convertisseurs électriques.....	33
3.3 Les Convertisseurs (Hacheurs) (DC/DC)	34
3.3.1 Présentation du convertisseur (DC/DC).....	34
3.3.2 Fonctionnalités du convertisseur (DC/DC).....	34

3.3.3 Types de convertisseur (DC/DC).....	35
3.3.4 Convertisseur élévateur BOOST.....	36
3.4 Commande MPPT	38
3.4.1 Principe du MMPT.....	38
3.4.2 Méthode de poursuite du MPP.....	39
3.4.3 Algorithmes de recherches du MPP.....	39
3.4.4 Algorithme P&O.....	40
3.4.5 Fonctionnement de l'algorithme P&O.....	40
3.5 Stockage de charge	42
3.5.1 Système de stockage.....	42
3.5.2 Les batteries.....	42
3.5.3 Types de batterie.....	42
3.6 Réalisation d'un système PV avec Hacheur BOOST et MPPT avec P&O	43
3.7 Simulation du système photovoltaïque.....	49
3.8 Conclusion	54
Conclusion générale	56-57
Bibliographie	58-59

Résumé :

L'énergie solaire étant illimitée et non coûteuse, elle est utilisée dans des endroits éloignés des points de contact du réseau électrique. L'énergie générée par le déploiement de panneaux solaires est utilisée pour alimenter les installations électriques. Si la quantité est suffisante elle peut être raccordée au réseau électrique national (Sonalgaz).

La modélisation de la cellule et du module photovoltaïque a été abordée dans cette thèse qui traite de l'énergie solaire et de son fonctionnement ainsi qu'utilisation, plus spécifiquement la production de cette énergie par les cellules photovoltaïques.

Dans des paramètres standard, cette thèse étudie la modélisation, le contrôle et le concept de fonctionnement du module solaire de type KC200GT.

Nous avons étudié le module PV en général ainsi que son fonctionnement à puissance maximale à l'aide d'un booster hacheur DC/DC contrôlé par un algorithme MPPT de type P&O, et la modélisation d'un générateur photovoltaïque connecté à un système de stockage.

Mots Clés : Générateur photovoltaïque (GPV), Convertisseur Statique, algorithme (MPPT) **Maximum POWER Point Tracking**, Modélisation.

Abstract :

Since solar energy is unlimited and inexpensive, it is used in places far from the contact points of the electrical network. The energy generated by the deployment of solar panels is used to power electrical installations. If the quantity is sufficient, it can be connected to the national electricity network (Sonalgaz).

The modeling of the cell and the photovoltaic module has been approached in this thesis which deals with solar energy and its operation as well as use, more specifically the production of this energy by photovoltaic cells.

In standard parameters, this thesis studies the modeling, control and operating concept of the KC200GT type solar module.

We studied the PV module in general as well as its operation at maximum power using a DC/DC chopper booster controlled by a P&O type MPPT algorithm, and the modeling of a photovoltaic generator connected to a storage system. .

Keywords: Photovoltaic generator (GPV), Static converter, algorithm (MPPT) **Maximum POWER Point Tracking**, Modeling.

الملخص

نظرًا لأن الطاقة الشمسية غير محدودة وغير مكلفة، يتم استخدامها في أماكن بعيدة عن نقاط الاتصال بالشبكة الكهربائية. تستخدم الطاقة الناتجة عن نشر الألواح الشمسية لتشغيل التركيبات الكهربائية. إذا كانت الكمية كافية فيمكن ربطها بشبكة الكهرباء الوطنية (سونالغاز).

تم تناول نمذجة الخلية والوحدة الكهروضوئية في هذه الأطروحة التي تتناول الطاقة الشمسية وتشغيلها وكذلك استخدامها، وبشكل أكثر تحديدًا إنتاج هذه الطاقة بواسطة الخلايا الكهروضوئية.

KC200GT في المعايير القياسية، تدرس هذه الأطروحة مفهوم النمذجة والتحكم والتشغيل لوحدة الطاقة الشمسية من النوع

الذي يتم التحكم فيه بواسطة DC / DC درسنا الوحدة الكهروضوئية بشكل عام بالإضافة إلى تشغيلها بأقصى طاقة باستخدام معزز المروحية ونمذجة مولد الطاقة الكهروضوئية المتصل بنظام التخزين، P&O من النوع MPPT خوارزمية

لكلمات المفتاحية

الحد الأقصى لتتبع نقاط الطاقة، النمذجة (MPPT) المحول الثابت، الخوارزمية، (GPV) المولد الكهروضوئي

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, de m'avoir donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Je tiens également à remercier tout particulièrement, mon directeur de mémoire **Dr. H. KHERFANE**, pour ses conseils et son aide durant toute la période où j'ai effectué ce travail.

Je tiens à remercier aussi **Dr. S. YAHEMDI** qui m'a fait l'honneur d'examiner ce travail.

J'exprime mes remerciements à **Dr. B. BENSAKER** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de par leurs aides ou conseils à la réalisation de ce travail.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : POSITION DU SOLEIL D'APRES LE POINT O.....	(6)
FIGURE 1.2 : ANALYSE AU SPECTROSCOPE DE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	(7)
FIGURE 1.3 : REPRESENTATION DE LA CONSTANTE SOLAIRE ET DE LA DISTANCE TERRE-SOLEIL.....	(8)
FIGURE 1.4 : RAYONNEMENT DU SOLEIL & MASSE D'AIR.....	(8)
FIGURE 1.5 : REPRESENTATION DES 3 COMPOSANTS DU RAYONNEMENTS GLOBAL SUR PLAN INCLINE... .	(9)
FIGURE 1.6 : DOPAGE DE TYPE N.....	(10)
FIGURE 1.7 : DOPAGE DE TYPE P	(11)
FIGURE 1.8 : FONCTIONNEMENT DE LA JONCTION P-N.....	(12)
FIGURE 1.9 : STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	(12)
FIGURE 1.10 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE ET LEURS RENDEMENTS.....	(13)
FIGURE 1.11 : RESULTANTE D'UN GROUPEMENT EN SERIE.....	(14)
FIGURE 1.12 : RESULTANTE D'UN GROUPEMENT EN PARALLELE	(14)
FIGURE 1.13 : RESULTANTE D'UNE ASSOCIATION PARALLELE/SERIE DE CELLULES IDENTIQUES.....	(15)
FIGURE 1.14 : PANNEAUX SOLAIRE (PHOTOVOLTAÏQUE)	(15)
FIGURE 1.15 : BOITE DE DERIVATION (JONCTION)	(16)
FIGURE 1.16 : SCHEMATISATION D'UNE PROTECTION GPV AVEC DIODES BY-PASS ET DIODE ANTI-RETOUR..	(16)
FIGURE 2.1 : SCHEMA EQUIVALENT DU MODELE SIMPLIFIE	(20)
FIGURE 2.2 : SCHEMA EQUIVALENT D'UN MODELE REEL	(21)
FIGURE 2.3 : SCHEMA DE SIMULATION D'UNE CELLULE REELLE	(22)
FIGURE 2.4 : SIMULATION DE LA CARACTERISTIQUE (P-V) [SOUS CONDITIONS STANDARDS]	(23)
FIGURE 2.5 : SIMULATION DE LA CARACTERISTIQUE (I-V) [SOUS CONDITIONS STANDARDS]	(24)
FIGURE 2.6 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION I(V).....	(25)
FIGURE 2.7 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES CARACTERISTIQUES PUISSANCE-TENSION P(V) ...	(25)
FIGURE 2.8 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION I(V).....	(26)
FIGURE 2.9 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LES CARACTERISTIQUES PUISSANCE-TENSION P(V)...	(26)
FIGURE 2.10 : GROUPEMENT DE CELLULE PV EN PARALLELE.....	(27)
FIGURE 2.11 : CARACTERISTIQUE P(V) DE CELLULES PV ASSOCIE EN PARALLELE.....	(27)

FIGURE 2.12 : CARACTERISTIQUE I(V) DE CELLULES PV ASSOCIE EN PARALLELE.(27)
FIGURE 1.13 : GROUPEMENT DE CELLULES PV EN SERIE....	(28)
FIGURE 1.14 : CARACTERISTIQUE P(V) DE CELLULES PV ASSOCIE EN SERIE.....	(28)
FIGURE 2.15 : : CARACTERISTIQUE I(V) DE CELLULES PV ASSOCIE EN SERIE.(29)
FIGURE 2.16 : GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	(30)
FIGURE 2.17 : CARACTERISTIQUE P(V) D'UN GENERATEUR PV (SOUS CONDITIONS STANDARDS)	(30)
FIGURE 2.18 : CARACTERISTIQUE I(V) D'UN GENERATEUR PV (SOUS CONDITIONS STANDARDS)	(30)
FIGURE 3.1 : CONVERTISSEUR (HACHEUR DC/DC) ET SON SYMBOLE.....	(34)
FIGURE 3.2 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR BOOST.....	(35)
FIGURE 3.3 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR BUCK.	(35)
FIGURE 3.4 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR BUCK-BOOST.....	(35)
FIGURE 3.5 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR CUK.	(35)
FIGURE 3.6 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR SEPIC.	(36)
FIGURE 3.7 : CONVERTISSEUR ELEVATEUR ET.....	(36)
FIGURE 3.8 : HACHEUR BOOST EN ETAT FERME (PASSANT).....	(36)
FIGURE 3.9 : HACHEUR BOOST EN ETAT OUVERT (BLOQUE).....	(37)
FIGURE 3.10 : FORMES D'ONDES COURANT/TENSION DANS UN CONVERTISSEUR BOOST.....	(38)
FIGURE 3.11 : CONCEPTION D'UNE CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE SOLAIRE.....	(38)
FIGURE 3.12 : SCHEMA DU PRINCIPE DE LA METHODE P&O.....	(40)
FIGURE 3.13 : SCHEMA DU MPPT EN UTILISANT L'ALGORITHME P&O.....	(41)
FIGURE 3.14 : SCHEMA D'UN SYSTEME PV AVEC HACHEUR BOOST COMMANDE PAR MPPT AVEC REGULATEUR.....	(43)
FIGURE 3.15 : REALISATION DU COURANT DE SATURATION DE LA DIODE ID SOUS SIMULINK.....	(44)
FIGURE 3.16 : REALISATION DU COURANT DE SHUNT ISH SOUS SIMULINK.....	(44)
FIGURE 3.17 : REALISATION DU COURANT DE SATURATION INVERSE IRS SOUS SIMULINK.	(45)
FIGURE 3.18 : REALISATION DU COURANT DE PHOTON IPH SOUS SIMULINK.....	(45)
FIGURE 3.19 : REALISATION DU COURANT PV, IPV SOUS SIMULINK.....	(46)
FIGURE 3.20 : SCHEMA D'UNE CELLULE PV, SOUS SIMULINK.....	(46)
FIGURE 3.21 : COMMANDE MPPT SOUS SIMULINK.....	(47)

FIGURE 3.22 : ALGORITHME P&O POUR COMMANDE MPPT.....	(47)
FIGURE 3.23 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR BOOST, SOUS SIMULINK.....	(48)
FIGURE 3.24 : SIMULATION DU COURANT IL CONVERTISSEUR BOOST.....	(48)
FIGURE 3.25 : SIMULATION DE LA TENSION V0 DU CONVERTISSEUR BOOS.....	(48)
FIGURE 3.26 : SYSTEME PV AVEC CONVERTISSEUR BOOST COMMANDE PAR MPPT AVEC REGULATEUR...	(49)
FIGURE 3.27 : REMPLACEMENT DU MODULE PV (G=IR).....	(50)
FIGURE 3.28 : SCHEMA FINAL DE NOTRE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE SOUS SIMULINK.	(50)
FIGURE 3.29 : COURANT GENERE PAR LE PV (AX100/S).	(51)
FIGURE 3.30 : TENSION DU PV (VX10/S).....	(51)
FIGURE 3.31 : PUISSANCE DELIVRE PAR LE PV (W/S)	(51)
FIGURE 3.32 : COURANT GENERE PAR LE PV (AX100/S).	(52)
FIGURE 3.33 : TENSION DU PV (VX10/S)	(52)
FIGURE 3.34 : PUISSANCE DELIVRE PAR LE PV (W/S).	(52)
FIGURE 3.35 : COURANT GENERE PAR LE PV (AX100/S).	(53)
FIGURE 3.36 : TENSION DU PV (VX10/S).	(53)
FIGURE 3.37 : PUISSANCE DELIVRE PAR LE PV (W/S).	(53)

LISTE DES SYMBOLES

PV	Photovoltaïque
MPP	Point de puissance maximale
MPPT	Maximum power point tracking
GPV	générateur photovoltaïque
I_{ph}	Photo courant
I_d	Courant de diode
I_{cc}	Courant de court-circuit
a	Facteur d idéalité de la diode
E_g	Energie de gap [ev]
R_s	Resistance série
R_p	Resistance parallèle
V_{oc}	Tension de circuit ouvert
V_r	Tension optimal
I_{co}	Courant optimal
G, I_r	Irradiaiton, éclairnement W/m^2
DC	courant continu
AC	courant alternatif

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Lors du premier choc pétrolier en l'an 73, les énergies renouvelables sont devenues un sujet brûlant. Malgré le fait qu'elles bénéficient d'une technologie plus efficace que par le passé, leur expansion est néanmoins entravée par de faibles rendements, des coûts d'exploitation trop élevés et des intérêts industriels bien ancrés. L'énergie renouvelable est un type d'énergie qui se régénère à un rythme suffisamment rapide pour être considérée comme inépuisable à l'échelle humaine. Les énergies renouvelables sont dérivées d'événements naturels qui se produisent de manière régulière ou cohérente, notamment le soleil (rayonnement). Les systèmes photovoltaïques (PV) sont une forme d'énergie fascinante car ils sont non seulement renouvelables mais aussi illimités et non polluantes. Ces propriétés distinctes ont rendu possible la production d'énergie photovoltaïque. Les modules photovoltaïques, qui sont des dispositifs semi-conducteurs qui convertissent le rayonnement solaire incident en énergie électrique, sont utilisés dans les systèmes PV.

L'irradiance solaire et la température ont un impact conséquent sur l'énergie photovoltaïque. Leur taux de production varie en fonction des quantités d'irradiation et de la température [1]. Les modules solaires photovoltaïques sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. L'effet photovoltaïque transforme les rayons du soleil en électricité dans chaque cellule. Les modules PV ont une caractéristique électrique unique que le fabricant précise sous forme de courbes.

Ces derniers reflètent l'évolution du courant et de la puissance en fonction de la tension du module. La caractéristique électrique de ce dernier est de nature non linéaire et possède un point spécifique appelé MPP (**Maximum Power Point**) [2]. Il s'agit du point de fonctionnement optimal où le module atteint sa puissance maximale.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes PV

1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente un recensement des travaux sur les panneaux solaires sur lesquels s'appuie notre thèse. Tout d'abord, nous examinerons la cellule photovoltaïque, qui est le composant le plus fondamental de tout panneau solaire, ainsi que l'influence que peut avoir le groupement de ses cellules (en série ou en parallèle) sur la quantité d'énergie générée. Les nombreux types de cellules photovoltaïques ainsi que leurs différents systèmes seront ensuite abordés.

1.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est accessible à des degrés divers partout dans le monde et est entièrement renouvelable. Son apport varie selon les jours, voire les années, bien qu'elle soit très constante. Sa puissance maximale est de 1 kW/m², même si cela paraît faible, son rendement annuel d'énergie pourrait être des milliers de fois supérieure à la demande énergétique de la plupart des pays. Cette énergie est produite sous deux formes [3] :

1.2.1 L'énergie solaire thermique :

Cela implique essentiellement la production de chaleur grâce à l'utilisation de panneaux sombres (le rayonnement étant employé afin de chauffer un fluide). Nous pouvons également générer de la vapeur à partir de la chaleur du soleil, que nous pouvons ensuite transformer en énergie mécanique puis en électricité.

1.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque :

Cela implique l'utilisation de panneaux solaires pour générer de l'énergie directement à partir des rayonnements du soleil. De nombreux pays, en particulier ceux qui n'ont pas d'approvisionnement énergétique traditionnel comme les hydrocarbures ou le charbon, utilisent déjà ce type d'énergie.

1.3 Calcule de l'énergie solaire

Avant d'entamer les calculs, posons quelques principes et définitions de base notamment les variables, qui nous seront d'une grande utilité par la suite.

- La latitude :

C'est l'angle créé entre le plan équatorial et la direction qui relie le lieu considéré au centre de la terre. Celles l'hémisphère nord reçoivent un signe positif, tandis que celles de l'hémisphère sud reçoivent un signe négatif. [5]

- La Longitude :

L'angle produit par le plan méridien de l'emplacement considéré et le plan d'origine méridien. Ce dernier a 00 pour longitude et passe devant l'observatoire de Greenwich. Celles à l'est de ce méridien sont positives, tandis que celles à l'ouest sont négatives. [5]

- l'altitude :

L'élévation d'un emplacement au-dessus du niveau de la mer, mesurée en mètres, est appelée altitude (m).

- **La déclinaison (δ) :**

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial. Il convertit l'inclinaison du plan équatorial en celle du plan écliptique. La déclinaison varie entre -23,45 degrés (solstice de décembre) et +23,45 degrés (solstice de juin). Cet angle fluctue extrêmement peu au cours de la journée, permettant une rotation sur le cône d'axe d'équateur pour se rapprocher du mouvement quotidien du soleil. [5], [6]

$$\delta = 23.45 \times \sin(2\pi \cdot n/365) \quad (1.1)$$

n : le numéro du jour de l'année.

- **Le temps solaire vrai (TSV) :**

L'angle horaire δ entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré sert à le définir. Lorsque le Soleil atteint le midi réel à un endroit précis, il est mesuré en heures de 0 à 24.

[7]

Le jour solaire vrai n'est pas constant en raison des fluctuations de la vitesse de la Terre sur son parcours. En conséquence, un temps solaire moyen a été retenu comme unité de temps, le jour solaire moyen est défini. [7]

$$TSV = 12 + \delta/15 \quad (1.2)$$

- **La durée et le taux d'insolation :**

Le sol reçoit plus d'énergie solaire sous un ciel clair et une journée d'ensoleillement S_0 (de l'aube au coucher du soleil). Or, dans une journée type, la durée effective d'ensoleillement S est inférieure à cette durée maximale. [6]

Le taux d'insolation est donné par :

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (1.3)$$

La durée maximale S_0 est donné par l'expression : [7]

$$S_0 = (2/15) \cos^{-1}(-\tan \Psi \cdot \tan \delta) \quad (1.4)$$

δ : La déclinaison

Ψ : La latitude du lieu

- **L'angle horaire :**

C'est l'angle créé par le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans son passage d'Est en Ouest, par rapport au méridien local, entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du site. L'angle est nul à midi (solaire), négatif le matin, positif l'après-midi, et monte de 15 degrés toutes les heures (faisant un tour complet de 360 degrés en 24 heures). [8]

- **Position du soleil :**

L'angle d'altitude γ et l'angle d'azimut déterminent la position du soleil sur la sphère céleste (Figure 1.1). Il est déterminé par la date, l'heure de la journée et l'emplacement géographique de l'observateur. [9]

L'angle de déclinaison solaire de la terre, qui est au point O en radians, est déterminé par la date, qui est exprimée en jours n. L'équation suivante le décrit :

$$\delta = 23.45 \frac{\pi}{180} \sin \left(2\pi \frac{284+n}{365} \right) \quad (1.5)$$

L'angle horaire du soleil, en radian, est le reflet de l'heure du jour en heures, et est donné par l'équation :

$$\omega = (T_{SV} - 12h) \frac{\pi}{12h} \quad (1.6)$$

À partir des équations, l'altitude γ et l'azimut ψ à une certaine heure et date, à la longitude et à la latitude, sont calculés.

$$\sin(\gamma) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (1.7)$$

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(\varphi) \sin(\gamma) - \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\gamma)} \quad (1.8)$$

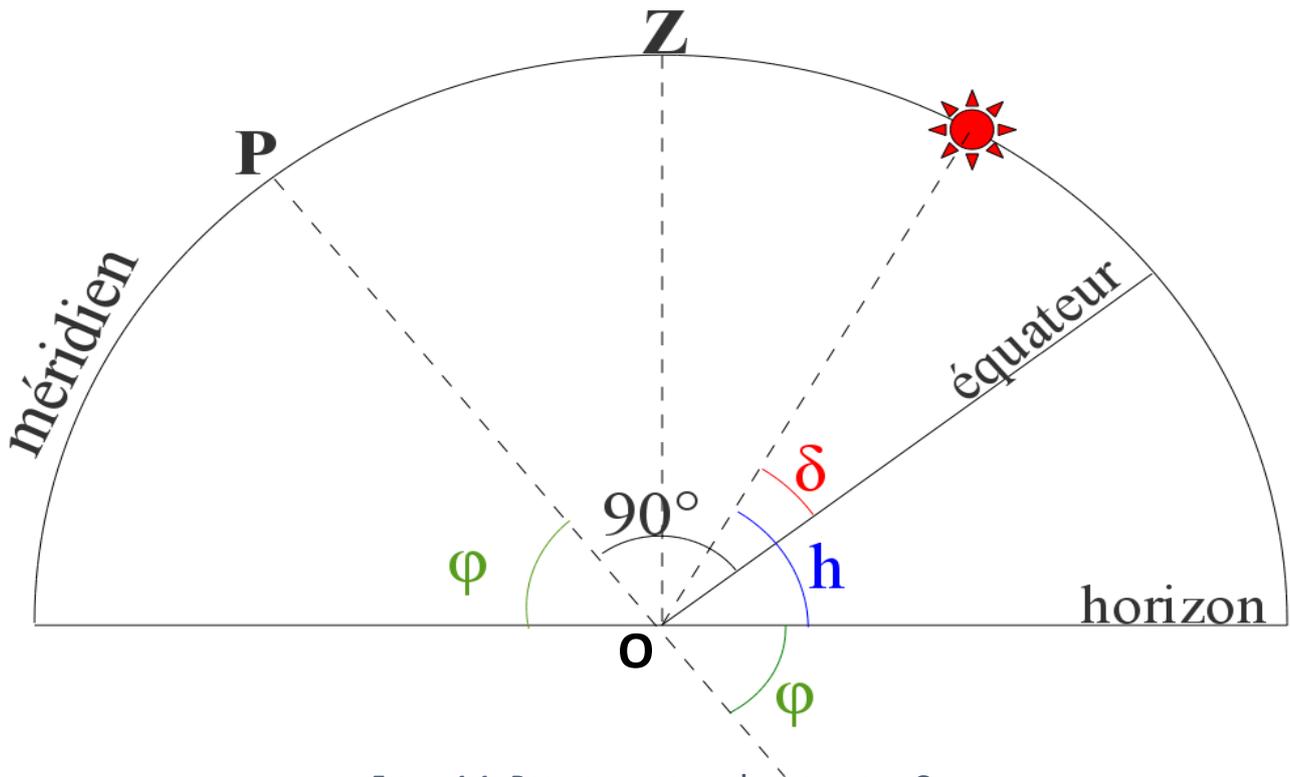


FIGURE 1.1 : POSITION DU SOLEIL D'APRES LE POINT O

1.4 Rayonnement solaire

1.4.1 Distribution spectrale du rayonnement solaire :

Les ondes électromagnétiques émises par le Soleil sont collectivement connues sous le nom de **rayonnement solaire**. Constitué de photons de longueurs d'onde allant de l'ultraviolet (0,2 μm) à l'infrarouge lointain (2,5 μm)

L'énergie associée au rayonnement solaire peut être généralement divisée en :

- Bande visible représentant 47% de l'énergie totale (de longueur d'ondes allant de 0,4 à 0,8 μm).
- Bande d'infrarouges qui représente 44% de cette énergie (de longueur d'ondes supérieur à 0,8 μm).
- Bande d'ultraviolets représentant 9% de l'énergie totale (de longueur d'ondes inférieur à 0,4 μm).

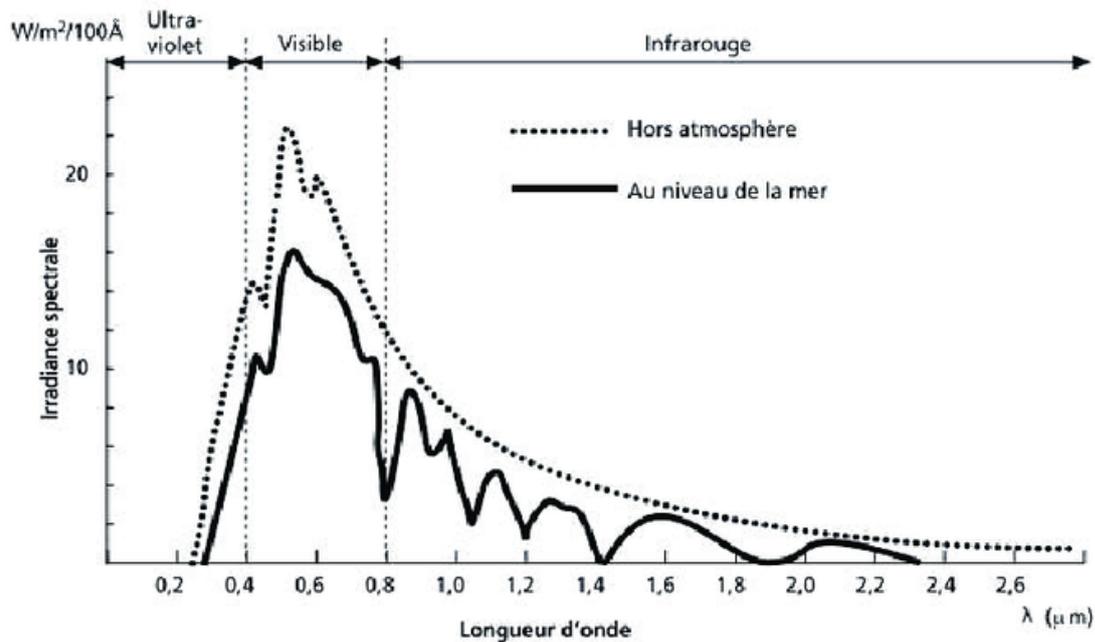


FIGURE 1.2 : ANALYSE AU SPECTROSCOPE DE RAYONNEMENT SOLAIRE

ZONE	$E_{ph}(eV)$	$\lambda(\mu m)$
Infrarouge	0.31	4
Infrarouge	0.62	2
Infrarouge	1.24	1
Visible rouge	1.59	0.78
Visible jaune-vert	2.48	0.5
Visible bleu	3.1	0.4
Ultra-violet	6.2	0.2

TABLEAU 1.1 : VALEURS D'ENERGIES DES PHOTONS OBTENUES A PARTIR DU SPECTRE SOLAIRE

Afin de piéger les photons et de les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons, les capteurs d'énergie solaire doivent être compatibles avec certaines longueurs d'onde.

Le rayonnement solaire doit d'abord être absorbé par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés pour générer un courant électrique global, avant de pouvoir produire un courant électrique dans un matériau particulier et fonctionner comme un capteur. [6]

1.4.2 Constante solaire :

La constante solaire est la quantité d'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère sur une unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires à une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne. Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos ont calculé que la constante solaire était de 1367 W/m² (Suisse).

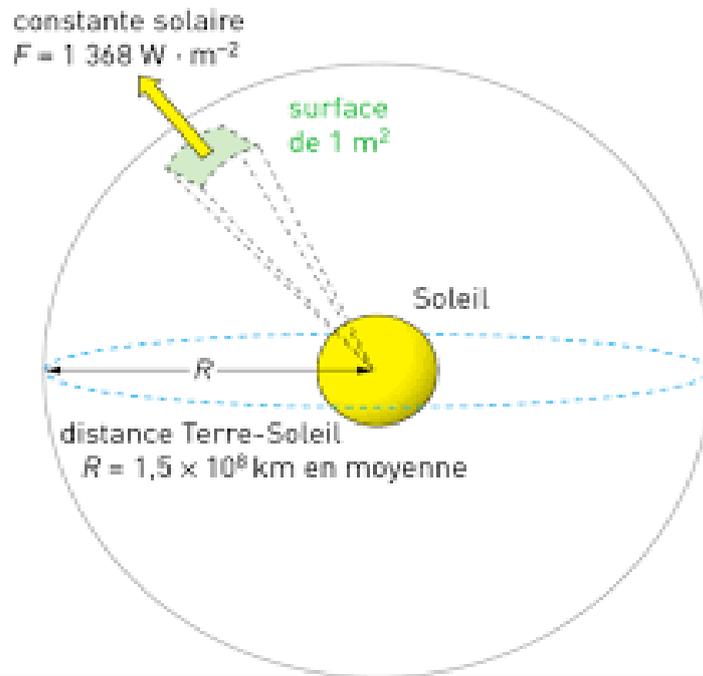


FIGURE 1.3 : REPRESENTATION DE LA CONSTANTE SOLAIRE ET DE LA DISTANCE TERRE-SOLEIL

1.4.3 Masse d'air :

On appelle masse d'air ou masse d'air, le rapport entre l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur parcourue verticalement du lieu.

Déduisant la distance séparant le soleil et l'atmosphère à l'aide des points O, B et A ainsi que l'angle α en s'appuyant sur la figure ci-dessous :

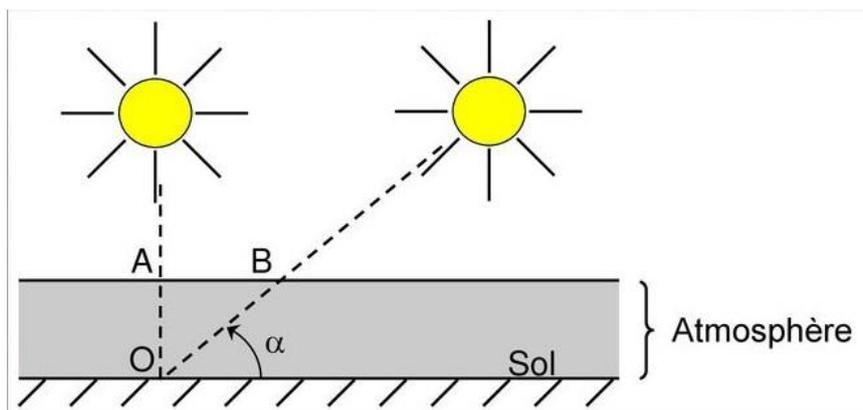


FIGURE 1.4 : RAYONNEMENT DU SOLEIL & MASSE D'AIR

$$OM = \frac{OA}{\sin(h)} \quad (1.9)$$

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin(h)} \quad (1.10)$$

1.4.4 Composition du rayonnement solaire :

Après atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, ce dernier se retrouve composé en 4 formes sur une surface au sol :

1. Rayonnement direct

C'est la proportion d'énergie solaire qui atteint directement la terre, avec un parcours "Linéaire" (déviations mineures) et unique à chaque instant.

Le rayonnement s'exprime comme suit dans le cas d'un plan horizontal :

$$I_h = I \cdot \text{Sin}(h) \quad (1.11)$$

I : rayonnement direct. [12]

h : hauteur du soleil

2. Rayonnement diffuse

Le rayonnement qui vient de partout dans la voûte cosmique est connu sous le nom de rayonnement diffus. Ce rayonnement est causé par l'absorption et la diffusion de l'énergie solaire par l'atmosphère, ainsi que par sa réflexion sur les nuages. En conséquence, il représente 20% de l'énergie totale en ciel clair. L'énergie reçue au sol [5] est en corrélation avec le ciel maussade.

3. Rayonnement réfléchi

Le rayonnement solaire réfléchi par le sol ou par des objets à sa surface est appelé rayonnement réfléchi. Ce dernier est affecté par l'albédo du sol et peut être important lorsque la surface est extrêmement réfléchissante (comme près d'une source d'eau, ou une surface neigeuse).

4. Rayonnement Global

- **Sur surface horizontale**

Il fait référence à tout le rayonnement solaire qui atteint une surface horizontale sur la planète. En conséquence, il comprend la composante verticale de l'énergie solaire directe ainsi que le rayonnement solaire diffus.

- **Sur surface inclinée**

Sur une surface inclinée, le rayonnement global est la somme du rayonnement direct, diffus et réfléchi.

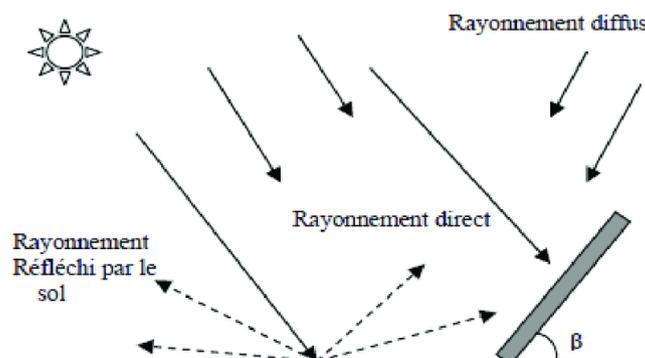


FIGURE 1.5 : REPRESENTATION DES 3 COMPOSANTS DU RAYONNEMENTS GLOBAL SUR PLAN INCLINE.

1.5 Semi-conducteurs :

Ces matériaux ont une conductivité électrique qui se situe entre les isolants et les métaux. Le courant électrique est favorisé dans un semi-conducteur par deux types de porteurs : les électrons et les trous.

Un semi-conducteur est un matériau cristallin dont les capacités de conduction électrique sont dictées par deux bandes d'énergie distinctes : la bande de valence, qui correspond aux électrons dans les liaisons covalentes, et la bande de renouvellement, qui comprend les électrons dans un état excité qui peuvent voyager dans le cristal.

Ces deux bandes sont séparées par un gap, qui est une bande interdite que les électrons ne peuvent traverser qu'avec une stimulation externe (par exemple, l'absorption d'un photon).

La bande interdite correspond à une barrière d'énergie de l'ordre de grandeur de l'électronvolt (eV) [6].

1.5.1 Le Dopage :

Le dopage d'un matériau consiste à ajouter des atomes d'un autre matériau dans sa matrice ; ces atomes remplaceront des atomes d'origine spécifiques, introduisant des électrons ou des trous supplémentaires. Les atomes du matériau dopant, également appelés impuretés, sont en phase diluée : leur concentration reste insignifiante par rapport aux atomes du matériau de départ.

Il n'y a pas d'atomes dopants dans un semi-conducteur intrinsèque ou pur. En conséquence, tous les électrons de la bande de conduction proviennent de la bande de valence. Par conséquent, il y a autant d'électrons que de trous : $n = p = n_i$. Tout dopage contribue à modifier l'équilibre des électrons et des trous afin d'augmenter la conduction électrique via l'un des deux types de porteurs.

n_i : représente la concentration intrinsèque.

1.5.2 Dopage de type N (négatif) :

Des atomes de la colonne V avec 5 électrons sur leur couche de valence sont introduits dans le cristal semi-conducteur lors du dopage de type N. Ces éléments sont appelés dopants N. Lorsqu'un dopant N et un semi-conducteur tel que le silicium entrent en contact, ils essaient de partager des paires d'électrons. Ils peuvent ainsi partager deux paires d'électrons, résultant en une coque externe à huit électrons [14].

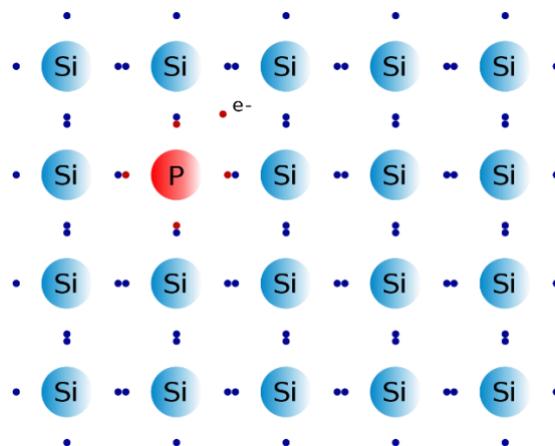


FIGURE 1.6 : DOPAGE DE TYPE N

En conséquence, un électron dopant est orphelin, incapable d'être partagé ou d'habiter la bande de valence (étant déjà remplie). Il sort donc de l'atome et devient un électron libre, capable de conduire l'électricité. Le cristal possède en conséquent, une abondance d'électrons chargés négativement. Le semi-conducteur est dit alors dopé N.

N : pour négatif (-).

1.5.3 Dopant de type P (positif) :

Le dopage de type P consiste à injecter dans le cristal des atomes de la colonne III à 3 électrons sur leur couche de valence. Les atomes de silicium et les dopants P du cristal présentent alors 7 électrons sur leur couche extérieure. Cette couche manque d'un électron. Une charge positive, ou trou, est définie comme le manque d'électrons et donc de charge négative.

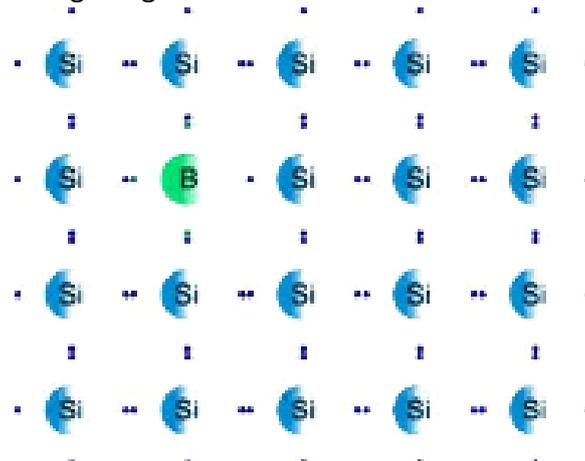


FIGURE 1.7 : DOPAGE DE TYPE P

Cette nouvelle construction est également capable de transporter de l'électricité. En effet, un atome auquel manque un électron peut en accepter un d'un autre atome, qui devient alors déficient en électrons, sous l'effet d'un échauffement, d'une différence de potentiel... Un courant électrique se définit comme un flux d'électrons d'un atome à un autre (ou un flux de trous dans la direction opposée). Un trou est une charge positive qui a la même masse qu'un électron. Un trou, en revanche, n'a pas d'existence physique. Il représente simplement le manque d'un électron. Enfin, le cristal présente un défaut électronique, ou une surabondance de trous chargés positivement. De ce fait, le semi-conducteur est dit dopé P (P pour Positif).

Il est considéré comme dopé N+ (ou P+) lorsqu'un semi-conducteur N (ou P) comprend une concentration importante de dopants sans dégénérer [14].

1.5.4 Jonction P-N :

La mise en contact d'un semi-conducteur dopé N avec un semi-conducteur dopé P forme une jonction P-N. En changeant les bandes, la jonction provoque l'égalisation des niveaux de Fermi. Les porteurs majoritaires positifs (trous) sont repoussés vers la jonction lorsqu'une tension positive est fournie du côté de la région P. Du côté N, les porteurs majoritaires négatifs (électrons) sont attirés vers la jonction au même instant. Lorsque les porteurs atteignent la jonction, soit ils se recombinent (un électron tombe dans un trou) et émettent un photon potentiellement visible (LED), soit ils continuent à travers l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule, et son intensité varie exponentiellement avec la tension. Lorsque la différence de potentiel est inversée, les porteurs majoritaires des deux côtés migrent loin de la jonction, empêchant le courant de la traverser. Cette tendance asymétrique est employée pour corriger le courant alternatif en particulier.



FIGURE 1.8 : FONCTIONNEMENT DE LA JONCTION P-N

La jonction P-N est la base du composant électrique connu sous le nom de diode, qui ne permet au courant de circuler que dans une seule direction. De même, une troisième zone peut être dopée pour générer des transistors bipolaires à doubles connexions N-P-N ou P-N-P. L'émetteur et le collecteur sont les deux semi-conducteurs du même type dans cette situation. La base est un semi-conducteur qui se trouve entre l'émetteur et le collecteur et a une épaisseur d'un micromètre ou moins. La jonction émetteur-base est conductrice lorsqu'elle est entraînée vers l'avant, mais la jonction base-collecteur est bloquée. La base, en revanche, est suffisamment étroite pour que les nombreux porteurs majoritaires injectés depuis l'émetteur (fortement dopé) puissent la traverser avant de se recombiner. Ils aboutissent dans le collecteur, où ils produisent un courant régulé par le courant de base [17].

1.5.5 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur composé principalement de silicium. Il est constitué de deux couches dont l'une est dopée P et l'autre dopée N, ce qui donne une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, leur énergie est transférée aux atomes de la jonction PN, provoquant la libération de leurs électrons, ce qui donne des électrons (charges N) et des trous (charges P). En conséquence, une éventuelle disparité entre les deux couches émerge. Entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule, cette différence de potentiel peut être mesurée.

La structure d'une cellule photovoltaïque est donnée ci-dessous :

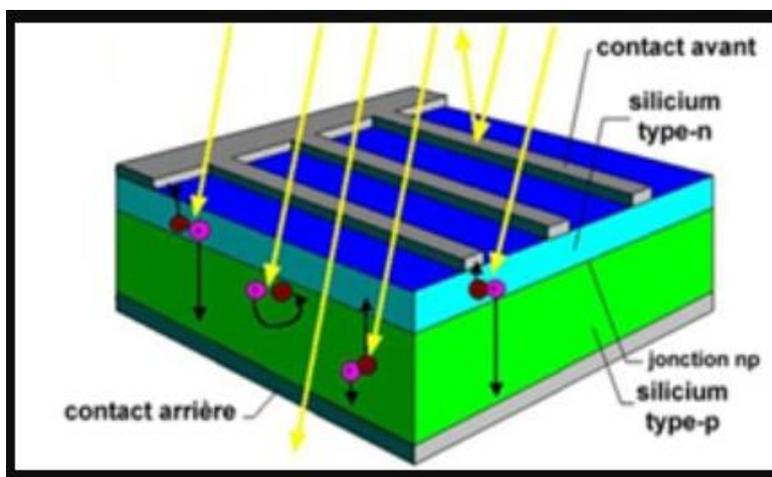


FIGURE 1.9 : STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

1.5.6 Module et types de cellules photovoltaïque :

Par rapport aux exigences de la plupart des applications domestiques ou industrielles, la cellule solaire de base est un producteur d'énergie assez modeste. A une tension inférieure à un volt, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés peut fournir au maximum quelques watts (tension de jonction PN). Un module ou un panneau photovoltaïque doit être construit à partir de nombreuses cellules pour fournir plus d'électricité. Les modules PV, en fait, sont constitués d'une séquence de cellules qui effectuent la conversion réelle de la lumière du soleil en énergie. Ils sont connectés en série et en parallèle pour produire un champ photovoltaïque avec une sortie de pointe déterminée par certaines conditions d'éclairage, de température et de spectre solaire. La majorité des modules disponibles dans le commerce sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallin reliées en série.[18]

Types des cellules photovoltaïque :

- **Cellules monocristallines :**

Les cellules solaires de première génération sont des cellules monocristallines, qui sont fabriquées à partir d'un monocristal de silicium cristallisé. Sa production est chronophage et énergivore, pourtant, il est plus efficace que le silicium polycristallin. Pour fabriquer une tige, du silicium brut est fondu. Un monocristal se forme lorsque le silicium est refroidi lentement et avec précaution.

- **Cellules poly cristallines :**

Les cellules polycristallines sont réalisées à partir d'un bloc multicristallin de silicium cristallisé. Ils sont moins coûteux à produire que les cellules monocristallines. Ces cellules ont l'avantage de produire moins de déchets de coupe et d'utiliser 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication que les cellules en silicium monocristallin. Leur potentiel de gain de productivité les a fait s'imposer sur le marché d'aujourd'hui.

- **Cellules amorphes (Couche mince) :**

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production considérablement réduit, mais également un rendement considérablement plus faible. Cette méthode permet l'application de films de silicium très minces sur du verre, du plastique souple ou du métal à l'aide d'un processus de vaporisation sous vide. Cependant, le silicium amorphe permet la production à faible coût d'énormes panneaux de surface avec un minimum de matière première [9].

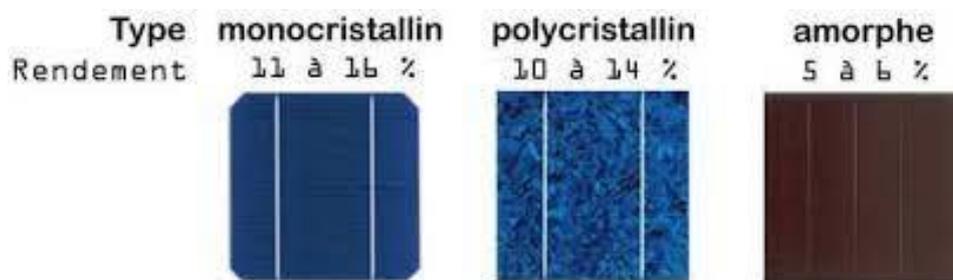


FIGURE 1.10 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE ET LEURS RENDEMENTS

Voici les fonctionnalités des modules photovoltaïques :

- Protection des cellules contre les contaminants environnementaux.
- Support mécanique et protection.
- Lien électrique entre les cellules et l'extérieur. [11]

1.5.7 Association des cellules photovoltaïque :

- **En Série :**

Les cellules d'un groupement en série sont traversées par le même courant, et la caractéristique du groupement en série est obtenue en sommant les tensions [16]. La caractéristique résultante acquise en associant en série n_s cellules identiques est illustrée ci-dessous :

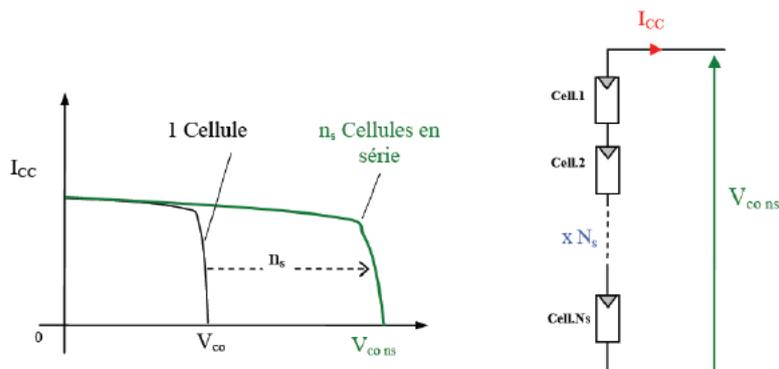


FIGURE 1.11 : RESULTANTE D'UN GROUPEMENT EN SERIE

- **En parallèle :**

Le groupement de cellules parallèles a les mêmes caractéristiques que le groupement de cellules en série. Les cellules d'un groupe de cellules parallèles sont donc toutes exposées à la même tension, et la caractéristique de groupe est déterminée en sommant les courants à une tension particulière. La caractéristique résultante acquise en associant en parallèle n_p cellules identiques [16] est représentée ci-dessous :

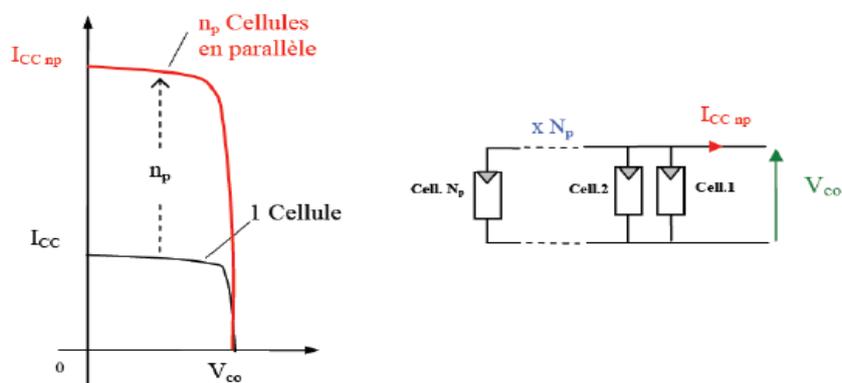


FIGURE 1.12 : RESULTANTE D'UN GROUPEMENT EN PARALLELE

- **En Parallèle/Série :**

Les valeurs globales du courant de court-circuit et de la tension totale à vide sont déterminées par l'association en série et/ou en parallèle de ces cellules, comme indiqué dans [16] :

$$- I_{tcc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (1.12)$$

$$- V_{toc} = N_p \cdot V_{cc} \quad (1.13)$$

N_s : Nombre de cellule en série.

N_p : Nombre de cellule en parallèle.

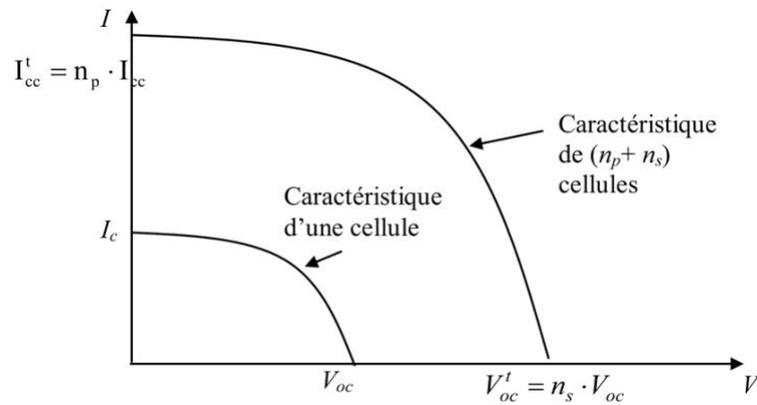


FIGURE 1.13 : RESULTANTE D'UNE ASSOCIATION PARALLELE/SERIE DE CELLULES IDENTIQUES

1.6 Panneaux solaire (photovoltaïque)

Pour générer l'électricité nécessaire, le panneau solaire ou (champ solaire) est composé de modules photovoltaïques reliés en série et/ou en parallèle. Ces modules sont fixés à un cadre métallique qui supporte le champ solaire selon un angle spécifié. [11]



FIGURE 1.14 : PANNEAUX SOLAIRE (PHOTOVOLTAÏQUE)

On peut avoir autant de sorties que de modules sur chaque panneau, ce qui signifie qu'on aura besoin d'une boîte de jonction (boîte de dérivation) pour toutes les connecter. Cette boîte, une fois fixée sur une structure de l'ensemble, a pour fonction de connecter les modules afin d'obtenir un rendement optimal en puissance. [14]

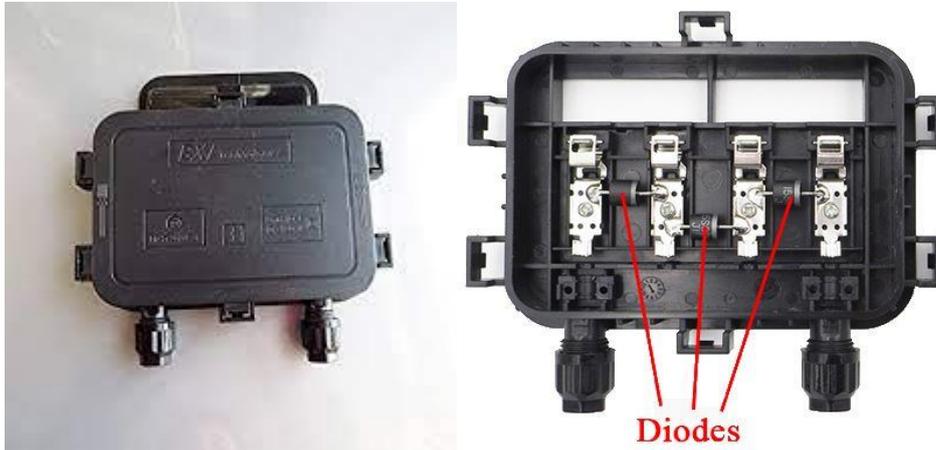


FIGURE 1.15 : BOITE DE DERIVATION (JONCTION)

Le câblage de ces boîtiers permet une sortie de 12,24 à 48 volts selon les modules, et ils ont de 2 à 12 entrées selon les tensions de sortie. La quantité de puissance dans tous les composants des panneaux photovoltaïques est déterminée par :

- La saison (été, hiver, printemps, automne).
- Les besoins en électricité.
- La taille des panneaux solaire utilisés.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.[15]

1.6.1 Protections des générateurs photovoltaïque :

Lors de la conception d'un système photovoltaïque, il faut garantir qu'il est électriquement protégé afin de prolonger sa durée de vie, notamment en évitant les défaillances néfastes liées à l'association des cellules et au fonctionnement en cas d'ombre. [22]

Sur les installations actuelles nous usons de deux types de protections classiques :

- Protection contre les courants négatifs dans les GPV en cas de mise en parallèle de modules PV (diode anti-retour).
- Protection lors de la connexion en série des modules PV pour éviter de perdre toute la chaîne (diode by-pass) et les points chauds.

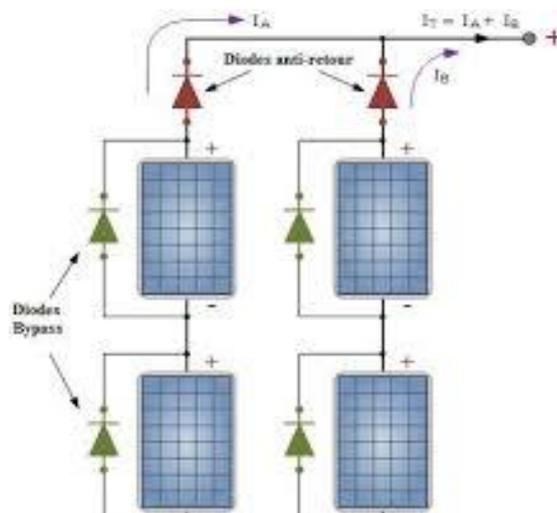


FIGURE 1.16 : SCHEMATISATION D'UNE PROTECTION GPV AVEC DIODES BY-PASS ET DIODE ANTI-RETOUR

1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Avantage :

- Fiabilité exceptionnelle. Le système ne comporte aucune pièce mobile, ce qui le rend idéal pour une utilisation dans des endroits isolés. Il est utilisé sur les vaisseaux spatiaux à cette fin.
- La conception modulaire des panneaux solaires permet une construction facile et une adaptabilité aux diverses demandes énergétiques. Les systèmes sont disponibles dans des tailles allant des milliwatts aux mégawatts.
- Compte tenu de l'entretien réduit, les coûts d'exploitation sont relativement minimes et ne nécessitent pas d'essence, de transport ou d'employés hautement qualifiés.
- La technologie photovoltaïque offre des avantages environnementaux puisque le rendement final est non polluant (énergie propre), silencieux et ne crée aucune perturbation environnementale à l'exception de la monopolisation d'espace pour les grands projets.
- Fonctionne de manière rentable dans des endroits éloignés et offre une variété d'applications (domestiques ou professionnelles).
- Flexible et extensible pour répondre aux besoins électriques à tout moment.
- Durée de vie minimale de 20ans (pouvant allée même jusqu'à 30 ou 40 ans selon les estimations les plus conservatrices selon **Engie**).

- Inconvénient :

- Leur fabrication est un processus de haute technologie qui nécessite des dépenses financières importantes.
- L'efficacité de conversion réelle d'un module est d'environ 10 à 15 %, avec une limite théorique de 28 % pour une cellule.
- Les générateurs solaires ne sont compétitifs avec les générateurs diesel que dans les régions éloignées avec des besoins énergétiques modestes.
- De nombreux produits sur le marché fonctionnent sur du courant alternatif de 220 à 230V. Cependant, l'électricité du générateur PV étant unidirectionnelle et basse tension (30V), un onduleur est donc nécessaire pour la convertir.
- L'énergie électrique est stockée dans des accumulateurs, qui sont souvent des batteries au plomb. Il est entendu que les batteries ne doivent pas être déchargées à plus de 60% (70% maximum) de leur pleine capacité. De plus, les batteries ont une courte durée de vie (3 à 5 ans), ce qui entraîne des dépenses d'exploitation plus élevées.
- Dépend énormément des conditions météorologiques.

1.8 L'énergie solaire en Algérie

Avec 3 000 heures d'obscurité par an, l'Algérie est l'un des pays les plus ensoleillés au monde, avec un potentiel d'environ 170 000 TWh par an, soit 5 000 fois la consommation électrique de l'Algérie et 60 fois les 3 000 TWh par an de l'Union européenne [4.2].

En 2020, de nombreux projets solaires d'une capacité combinée de 800 MWc devraient ont été achevés. SONELGAZ, en particulier, a mené plusieurs actions à petite échelle. Entre 1992 et 2005, les panneaux solaires ont fourni l'énergie de base à 18 communes du sud algérien, desservant environ 1 000 foyers (éclairage, réfrigération, télévision, ventilation).

1.9 Conclusion

Depuis quelques années, le domaine de la conversion photovoltaïque connaît un développement important en réponse à la demande croissante pour l'énergie solaire.

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différentes notions d'énergie photovoltaïque et les composants d'un système photovoltaïque, ainsi que les principes de fonctionnement de chaque composant du système, l'impact de leur association, et les différents types de systèmes PV.

Enfin, nous avons passé en revue les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque, nous avons aussi brièvement abordé cette dernière et son développement en Algérie.

Chapitre 2

Modélisation d'un module (cellule) PV

2.1 INTRODUCTION

Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse en électricité. C'est les chercheurs du Laboratoire Bell qui ont inventée la première cellule solaire en 1954 aux États-Unis, ils ont découvert que l'ajout d'« impuretés » au silicium améliorait sa photosensibilité. Il s'agit d'une méthode connue sous le nom du "dopage" et est utilisée dans tous les semi-conducteurs. Malgré la curiosité des scientifiques sur le sujet ces dernières années, il aura fallu attendre la course vers l'espace pour que les cellules quittent enfin les laboratoires. En réalité, ces dernières représentent l'alternative parfaite pour produire et fournir l'énergie nécessaire à bord des satellites ainsi que dans n'importe quel endroit éloigné ou isolé. Actuellement, l'objectif principal est de générer de l'énergie propre pour desservir les réseaux de distribution.

Ce chapitre va présenter le principe de fonctionnement d'un module photovoltaïque. Nous étudierons la modélisation de la cellule et du module photovoltaïque (composé de 54 cellules connectées en série panneau PV de type KC200GT) dans des conditions standard, l'effet de la température et de l'éclairement sur l'énergie du module photovoltaïque, et nous utiliserons l'outil MATLAB-SIMULINK pour simuler le comportement de la cellule et du module PV.

2.2 Modélisation du module photovoltaïque

2.2.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire :

- **Cellule idéale (modèle simplifié) :**

Dans le cas idéal, une cellule de jonction PN doté d'une illumination photovoltaïque reliée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode fournissant un courant comme le montre la figure ci-dessous, qui représente le circuit analogue d'une cellule solaire idéale :

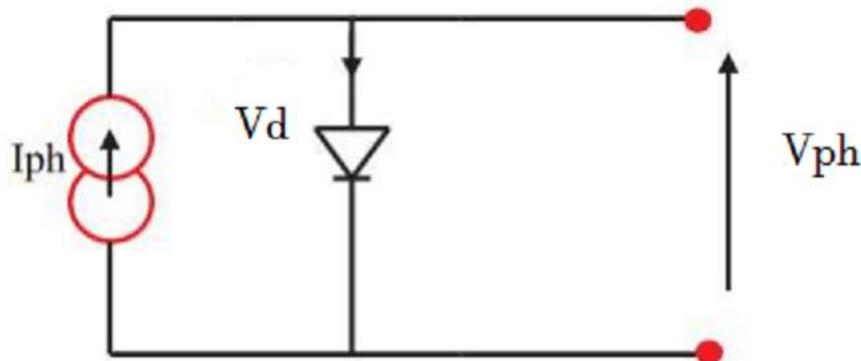


FIGURE 2.1 : SCHEMA EQUIVALENT DU MODELE SIMPLIFIE

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

Le courant I_{ph} est égal au courant I_{sc} lorsque $V_{ph} = 0$, qui est le courant de court-circuit acquis en court-circuitant la charge.

- **Cellule réelle (modèle à une diode) :**

Ce modèle possède une source de courant qui imite la conversion du flux lumineux en énergie électrique et une diode en parallèle avec une résistance en série, à l'exception de la résistance R_{sh} nommé Shunt. Physiquement, la résistance Shunt est utilisée pour imiter les courants de fuite dans les jonctions ; il a un impact important sur le courant généré par le modèle, qui est proche du courant d'une cellule [28].

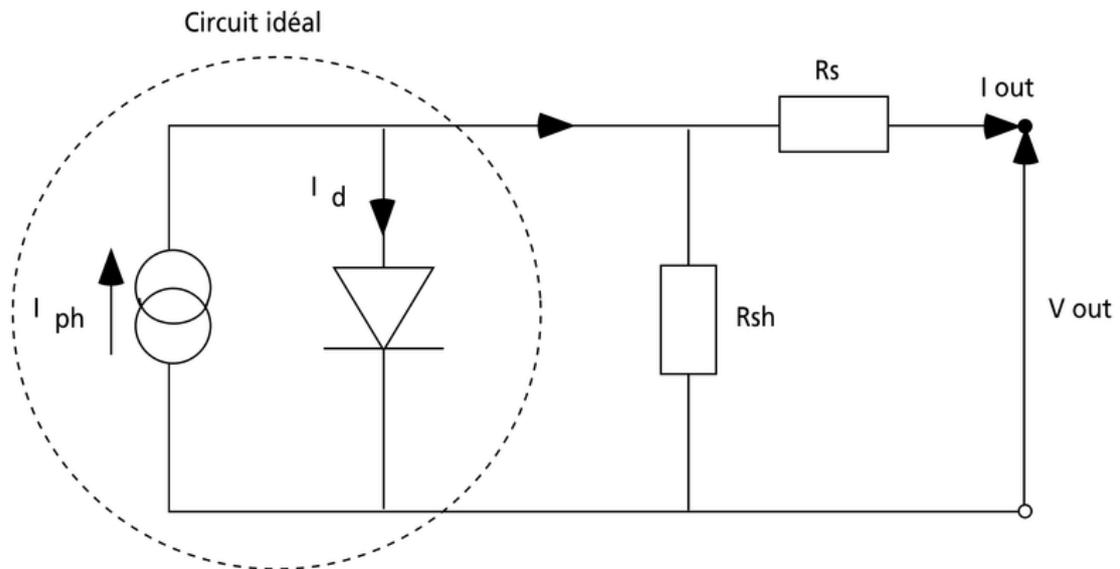


FIGURE 2.2 : SCHEMA EQUIVALENT D'UN MODELE REAL

Le modèle mathématique du module solaire exponentiel simple a été utilisé.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque s'exprime mathématiquement comme suit :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.2)$$

Le courant circulant dans la résistance Shent :

$$I_{sh} = \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

$$\bullet \quad I = I_{ph} - I_d \left[e^{\frac{q(V + IR_s)}{n \cdot K \cdot T \cdot N_s}} \right] - I_{sh} \quad (2.4)$$

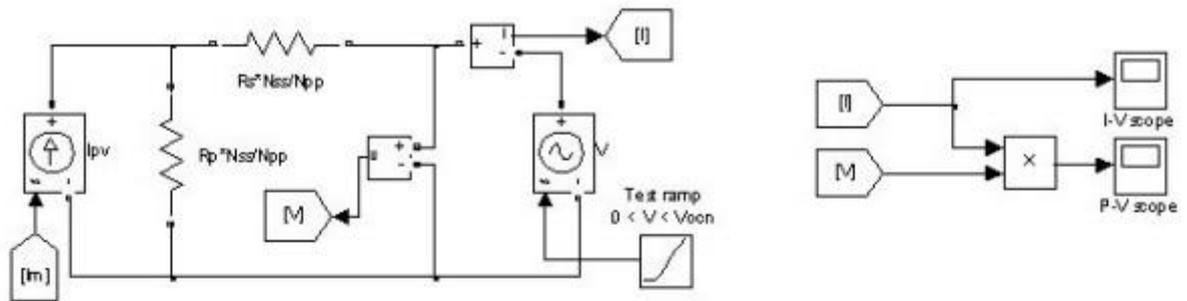
I_{ph} : Photo-courant créé par la cellule. [Ampère : A]

I_d : Courant de saturation de la diode, dépendant de la température. [Ampère : A]

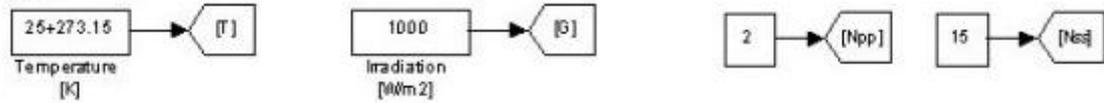
R_s : Résistance série [Ohm : Ω].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ohm : Ω].

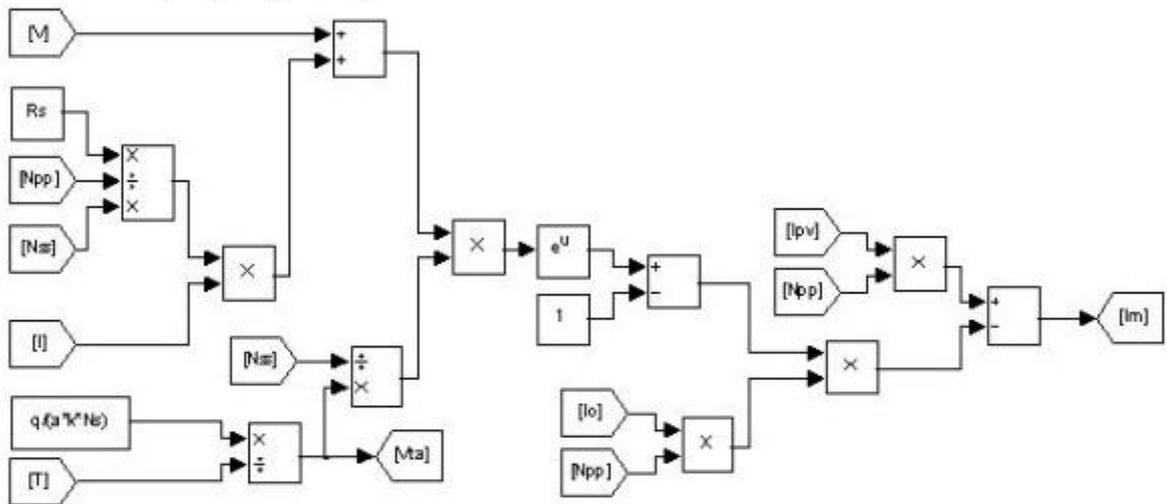
Les paramètres de circuit correspondants sont les suivants : I_d , I_{ph} , R_s et R_{sh} .



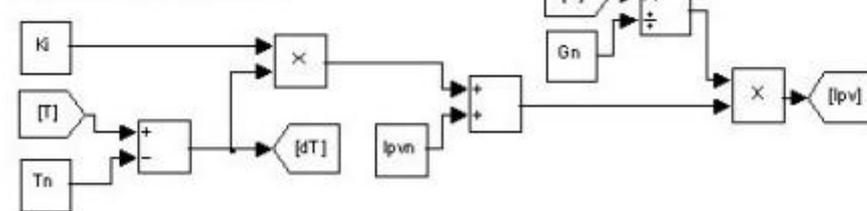
Inputs:



Calculation of $I_m = I_{pv} - I_d$ ($N_{ss} \times N_{pp}$ modules):



Calculation of I_{pv} (single module):



Calculation of I_0 (single module):

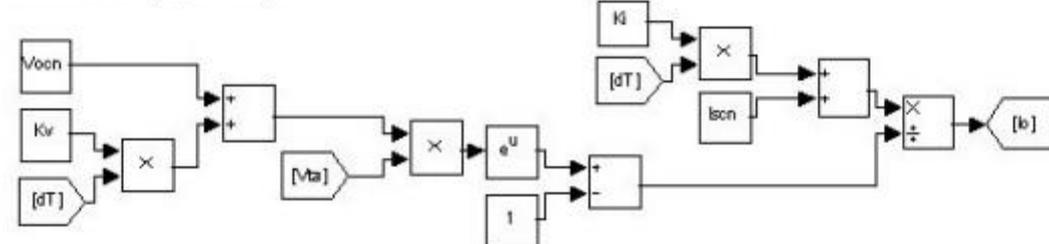


FIGURE 2.3 : SCHEMA DE SIMULATION D'UNE CELLULE REELLE

2.3 Présentation du module KYOCERA KC200GT

Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques électriques du module et ses différents paramètres :

PARAMETRES	VALEURS
Type	KC200GT
Nombre de cellule solaire en série (N_s)	54
Eclairement de référence (G)	1000 [W/m^2]
Energie de la bande interdite (E_g)	1.2 [eV]
Tension/ Coefficient de température K_V	-0.1230 [V/K]
Courant/Coefficient de température K_I	-0.1230 [A/K]

TABLEAU 2.1 : CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET PARAMETRES DU MODULE KC200GT

[W/m^2] : Watt/Mètre carré.

[eV] : électron-volt.

[V] : Volt.

[A] : Ampère.

2.3.1 Caractéristique électrique photovoltaïque du panneau KC200GT sous conditions standards :

- CONDITIONS STANDARDS :

$$G = 1000 \text{ W/m}^2 \quad (2.5)$$

$$T = 25^\circ \text{ C} \quad (2.6)$$

- VALEURS DES RESISTANCE :

$$R_s = 0.2273 \Omega \quad (2.7)$$

$$R_{sh} = 540.50 \Omega \quad (2.8)$$

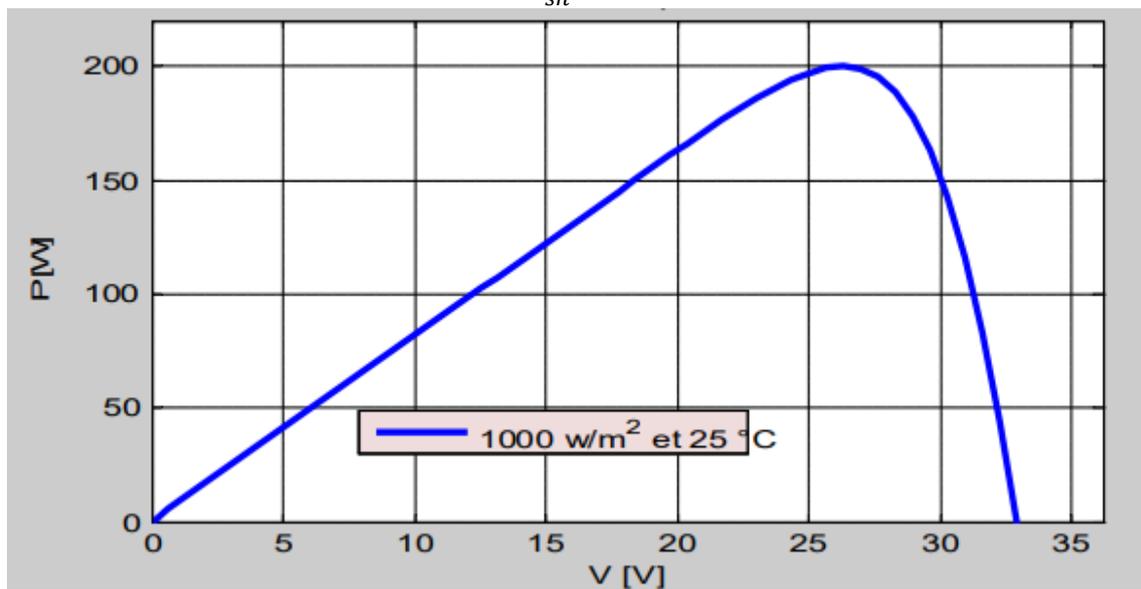


FIGURE 2.4 : SIMULATION DE LA CARACTERISTIQUE (P-V) [SOUS CONDITIONS STANDARDS]

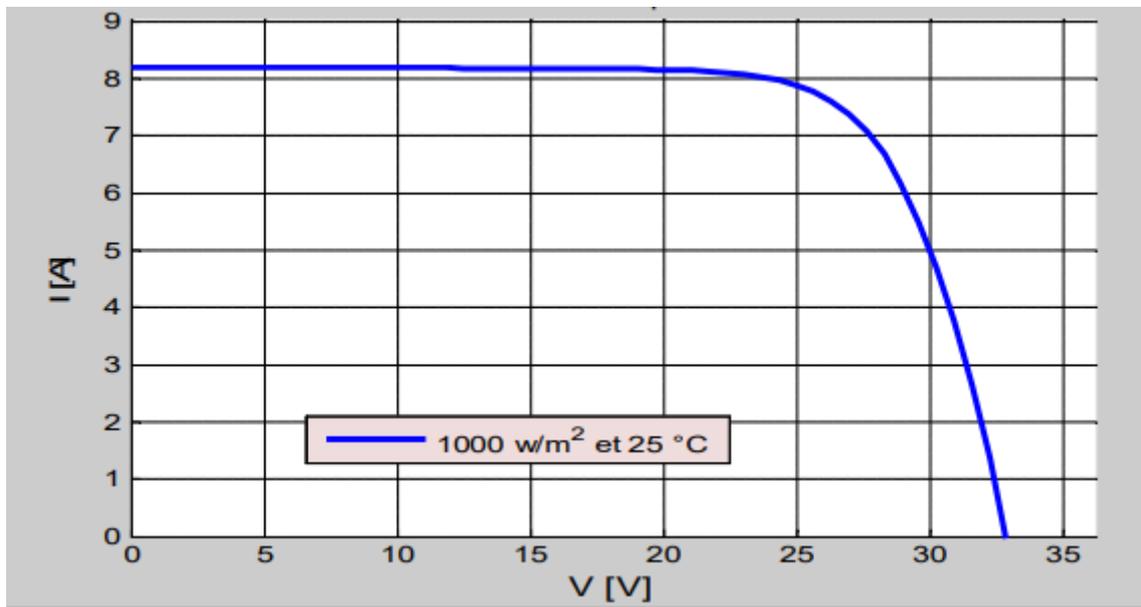


FIGURE 2.5 : SIMULATION DE LA CARACTERISTIQUE (I-V) [SOUS CONDITIONS STANDARDS]

Trois points critiques ressortent : les valeurs électriques du système en court-circuit :

($I = 8,21 \text{ A}$, $V = 0$), en circuit ouvert ($I = 0$, $V = 32,9 \text{ V}$) et le point de puissance maximale ($P_{max} = 200,1 \text{ w}$), qui est ($I_{mp} = 7,6 \text{ A}$, $V_{mp} = 26,3 \text{ V}$). Pour vérifier la validité du modèle suggéré, nous comparons les résultats aux grandeurs expérimentales du module photovoltaïque KC200GT, qui sont répertoriées dans le catalogue technique de « Kyocera ». On peut montrer que le modèle a les mêmes propriétés électriques que le vrai.

Modèle	KC200GT	Simulation
Puissance maximale (P_{max})	200 [W]	200.1 [W]
Tolérance	+ 10% / -5%	/
Tension V_{mp} correspondante à (P_{max})	26.3 [V]	26.3 [V]
Courant I_{mp} correspondant à (P_{max})	7.61 [A]	7.61 [A]
Tension circuit ouvert V_{co}	32.9 [V]	32.9 [V]
Courant circuit ouvert I_{co}	8.81 [A]	8.81 [A]

TABEAU 2.2 : PARAMETRES EXPERIMENTAUX DU MODULE KC200GT SOUS CONDITION STANDARDS

[W] : Watt.

[V] : Volt.

[A] : Ampère.

2.4 Influence de la température

Les figures ci-dessous montrent la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) lorsque la température varie de 25°C à 100°C. Il convient de noter que la valeur du courant de court-circuit n'est pas affectée par la température. Cependant, lorsque la température augmente, la tension dans un circuit ouvert chute considérablement, ce qui réduit la quantité d'énergie pouvant être extraite. Le changement de température du site doit donc être pris en compte lors du dimensionnement d'une installation.

- **Caractéristique I(V) :**

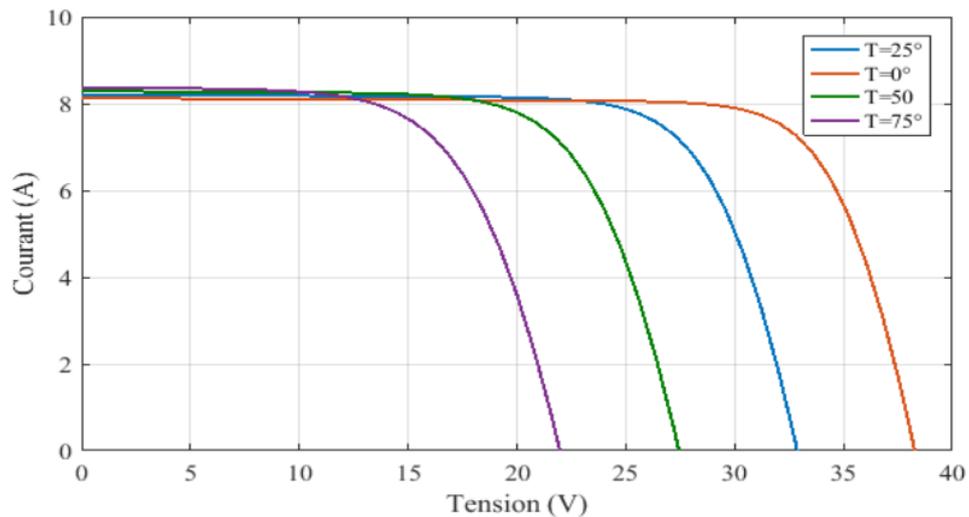


FIGURE 2.6 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION I(v)

- **Caractéristique P(V) :**

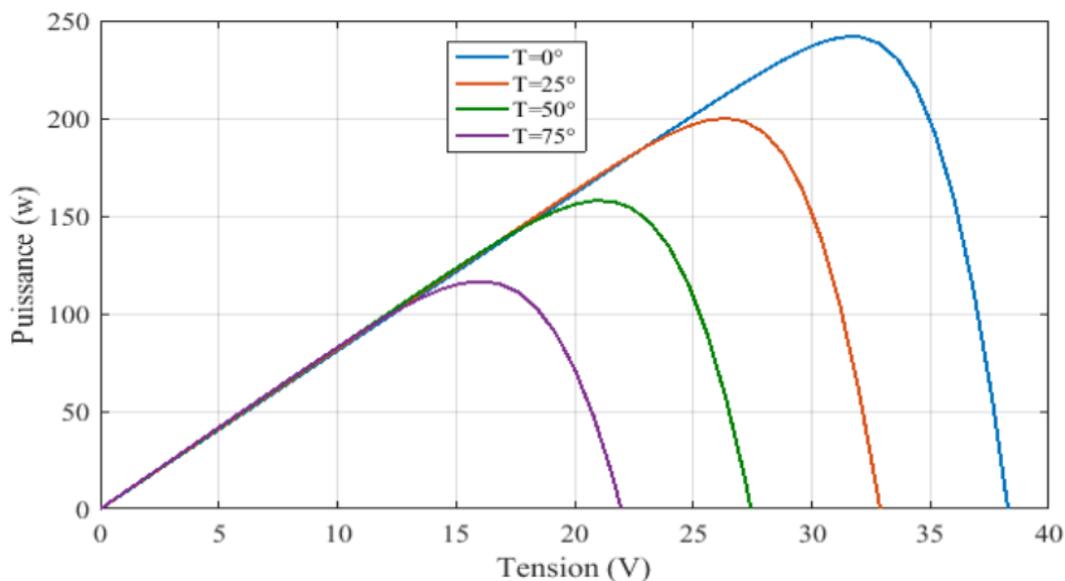


FIGURE 2.7 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES CARACTERISTIQUES PUISSANCE-TENSION P(v)

2.5 Influence de l'éclairement

Les figures ci-dessous montrent la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) obtenue en ajustant l'éclairement entre 400 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200. L'intensité du rayonnement est exactement proportionnelle à l'amplitude du courant de court-circuit, tandis que la tension en circuit ouvert ne fluctue pas dans les mêmes proportions et reste quasiment constante même en cas de faible luminosité.

- **Caractéristique I(V) :**

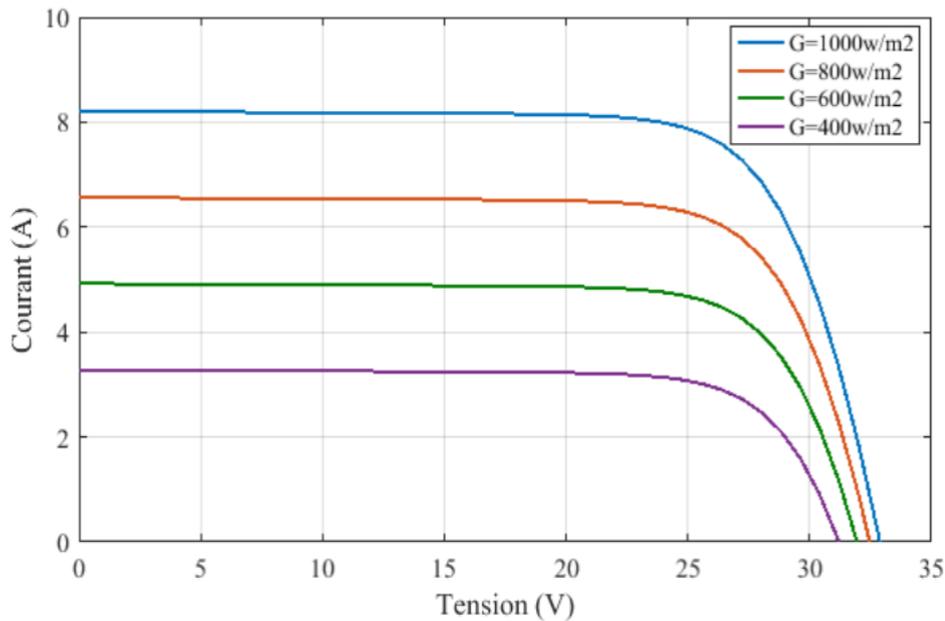


FIGURE 2.8 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION I(v).

- **Caractéristique P(V) :**

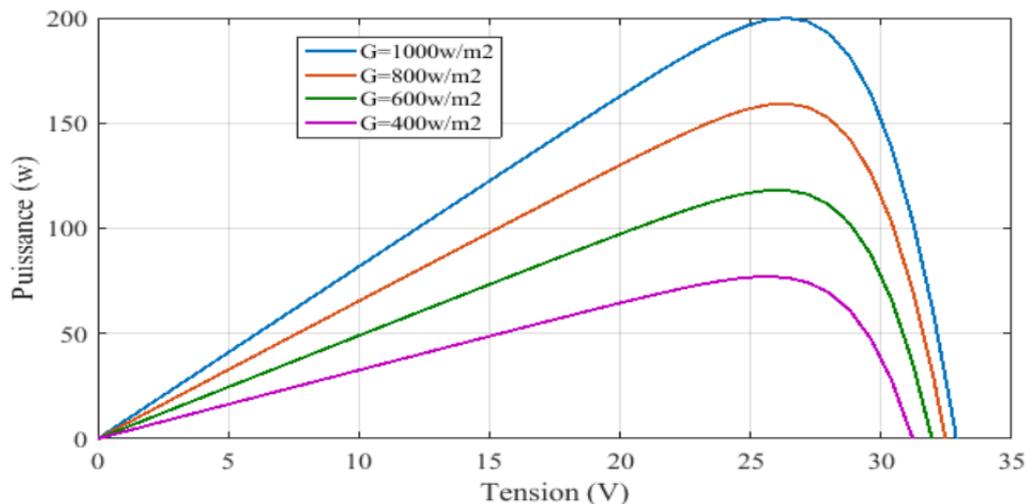


FIGURE 2.9 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LES CARACTERISTIQUES PUISSANCE-TENSION P(v).

2.6 Générateur photovoltaïque (GPV)

Un générateur solaire est créé en connectant de nombreuses cellules photovoltaïques en série ou en parallèle. Les tensions de chaque cellule s'additionnent lorsque les cellules sont connectées en série, augmentant la tension globale du générateur. Cependant, lorsque les cellules sont reliées en parallèle, c'est l'ampérage qui augmente.

2.6.1 Association en Parallèle :

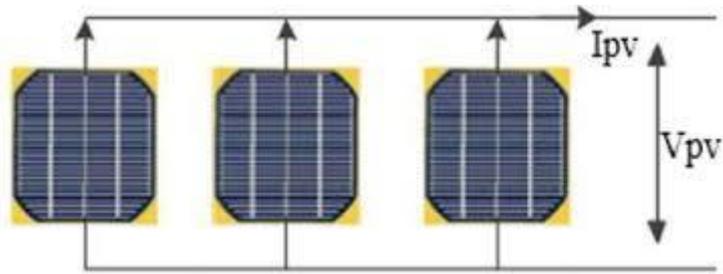


FIGURE 2.10 : GROUPEMENT DE CELLULE PV EN PARALLELE.

Le groupement de cellules parallèles a les mêmes caractéristiques que le groupement de cellules en série. Les cellules d'un groupe de cellules parallèles sont donc toutes exposées à la même tension, et la caractéristique du groupe est calculée en sommant les courants à une tension particulière.

$$I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \tag{2.9}$$

$$V_{pco} = V_{co} \tag{2.10}$$

I_{pcc} et V_{pco} : représente le courant et la tension lors de du groupement en parallèle.

N_p : représente le nombre de cellules associé en parallèle.

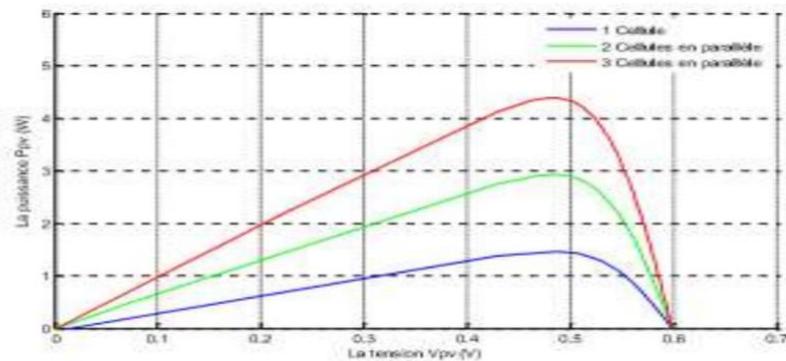
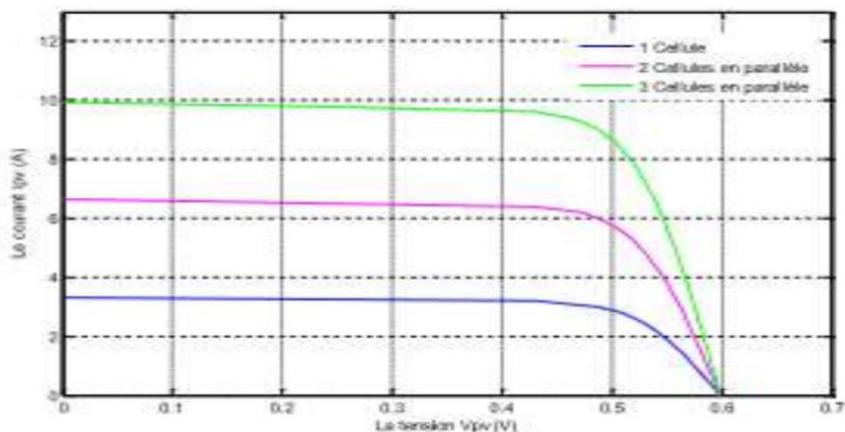


FIGURE 2.11 : CARACTERISTIQUE P(v) DE CELLULES PV ASSOCIE EN PARALLELE.



2FIGURE 2.12 : CARACTERISTIQUE I(v) DE CELLULES PV ASSOCIE EN PARALLELE.

2.6.2 Association en Série :

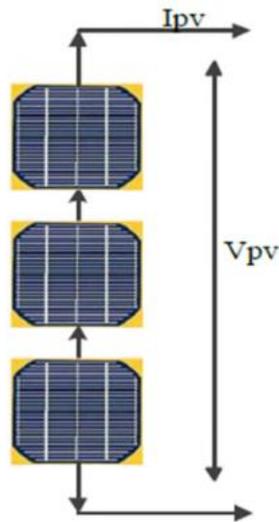


FIGURE 2.13 : GROUPEMENT DE CELLULES PV EN SERIE.

Le groupement en série est traversées par le même courant, et sa caractéristique est calculée en additionnant les tensions à un courant particulier.

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad (2.10)$$

$$V_{SCO} = N_s \cdot V_{CO} \quad (2.11)$$

I_{SCC} et V_{SCO} : représente le courant et la tension lors de du groupement en série.

N_s : représente le nombre de cellules associé en série.

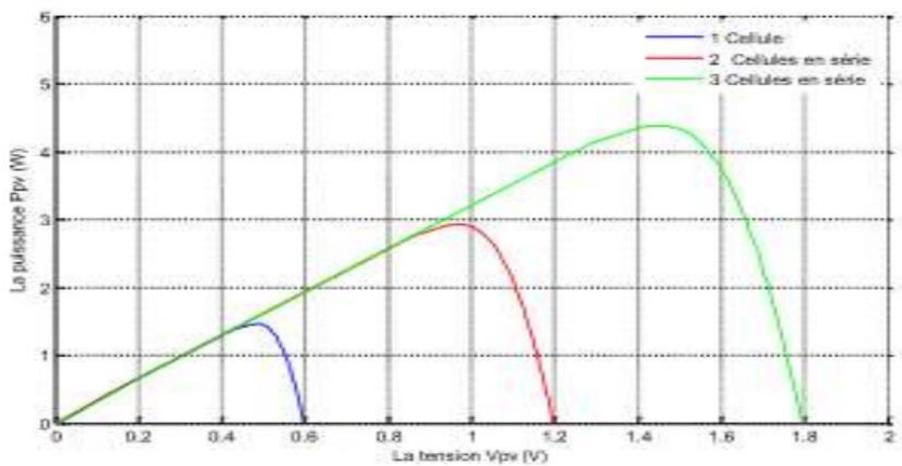


FIGURE 2.14 : CARACTERISTIQUE P(v) DE CELLULES PV ASSOCIE EN SERIE.

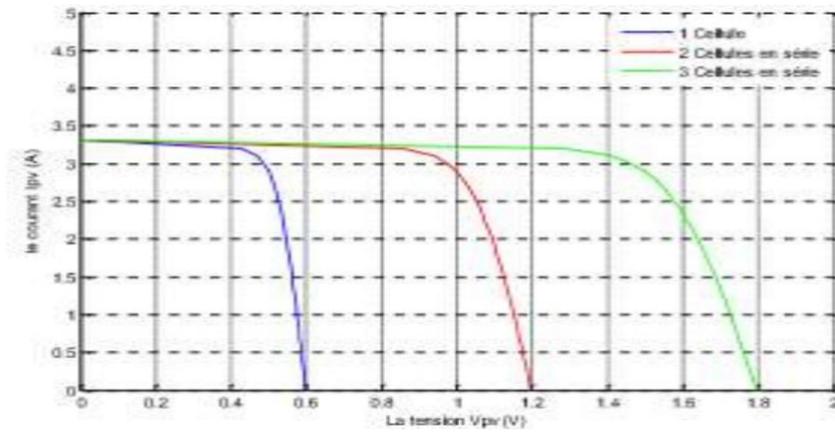


FIGURE 2.15 : : CARACTERISTIQUE I(V) DE CELLULES PV ASSOCIE EN SERIE.

La majorité des panneaux solaires commerciaux sont constitués de sous-réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est constitué d'une succession de cellules solaires elle aussi en série. Le nombre de cellules par sous-réseau est le résultat d'une analyse coût-bénéfice de la protection par rapport à la perte d'une partie importante du générateur solaire en cas de panne partielle.

$$I = I_{pv} \cdot N_p - I_0 \cdot N_p \left[\exp \left(\frac{V + R_s \cdot \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \cdot I}{V_t \cdot a \cdot N_s} \right) - 1 \right] - \left[\frac{V + R_s \cdot \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \cdot I}{R_p \cdot \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \cdot I} \right] \quad (2.12)$$

Paramètres de GPV	Valeurs paramètres
Nombre de cellules en série N_s	15
Nombre de cellules en parallèle N_p	2
Tension maximale V_m à PPM (V)	394.5
Courant maximale I_m à PPM (V)	15.22
Courant de court-circuit I_{cc} (A)	16.42
Tension circuit ouvert V_{co} (A)	445

TABLEAU 2.3 : VALEURS DES PARAMETRES DE SIMULATION

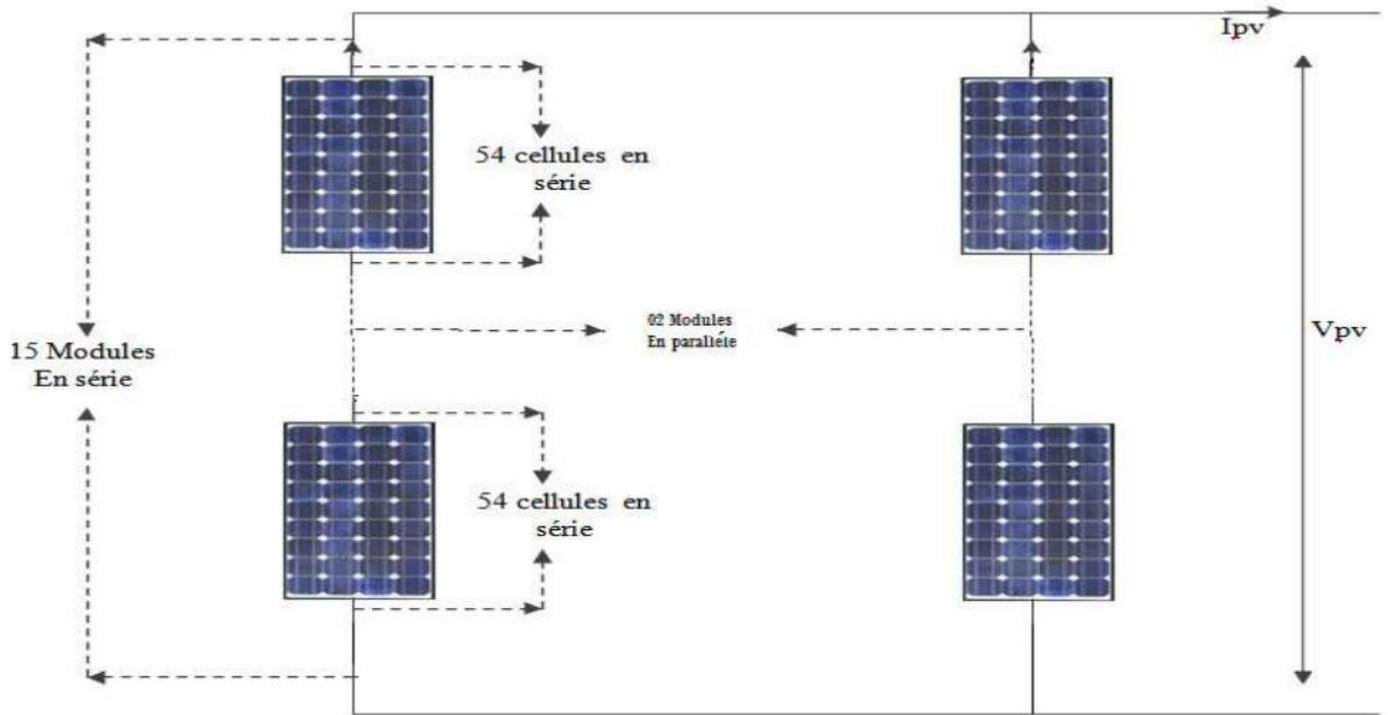


FIGURE 2.16 : GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.

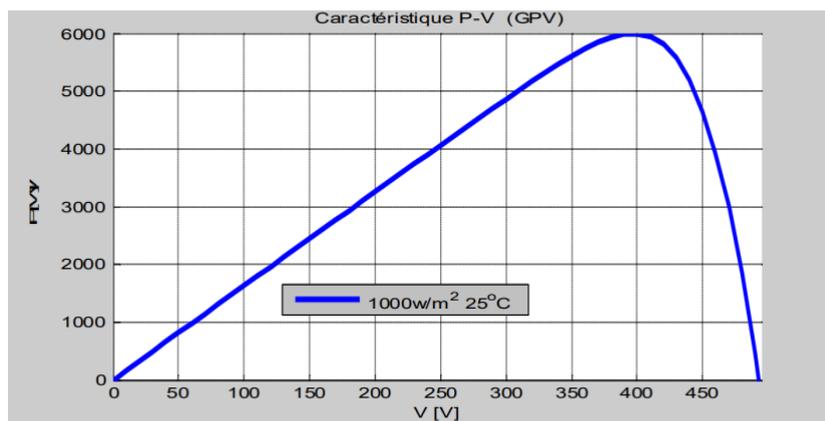


FIGURE 2.17 : CARACTERISTIQUE $P(v)$ D'UN GENERATEUR PV (SOUS CONDITIONS STANDARDS).

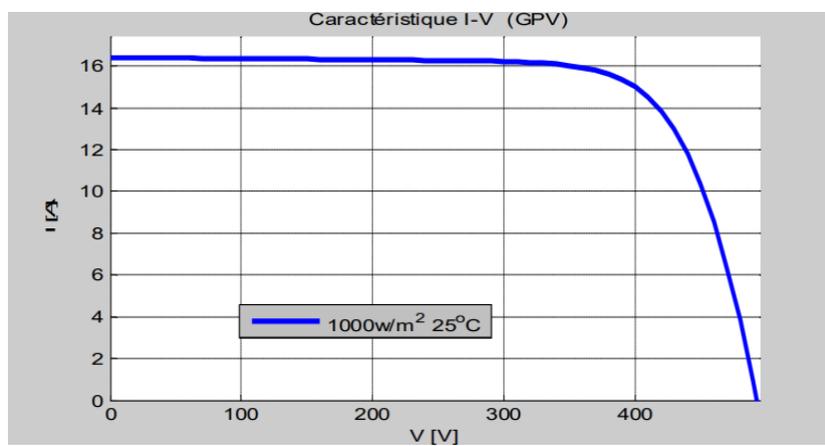


FIGURE 2.18 : CARACTERISTIQUE $I(v)$ D'UN GENERATEUR PV (SOUS CONDITIONS STANDARDS) .

1.7 CONCLUSION

La modélisation d'une cellule photovoltaïque et d'une centrale photovoltaïque, ainsi que les caractéristiques du module PV **KC200GT** et du générateur, ont été abordées dans ce chapitre. De ce fait, nous ont avons conclu que divers critères ont un impact sur ses caractéristiques. Nous avons aussi déduit qu'il était nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système pour un fonctionnement optimal du système, dont nous parlerons dans le chapitre 3.

Chapitre 3

Modélisation de MPPT Simulation D'un système PV

3.1 INTRODUCTION

La charge du générateur PV doit être réglée en permanence pour que le module produise sa puissance maximale possible. L'insertion d'un convertisseur (hacheur) DC-DC contrôlé par un mécanisme de suivi "Maximum Power Point Tracking" (MPPT) permet d'atteindre cette adaptabilité. Sous une température et un éclairement solaire, la technique MPPT identifie automatiquement la tension la plus élevée ou le courant maximal auquel le module PV fonctionnera pour obtenir une puissance maximale. Il est recommandé de mettre en œuvre de nombreuses stratégies dans le système PV pour obtenir de bonnes performances. Ces approches MPPT suggérées peuvent être classées en méthodes conventionnelles et intelligentes basées sur l'algorithme de contrôle.

L'objectif de ce chapitre est d'examiner différents types de convertisseurs (hacheur) DC-DC qui sont utilisés dans les systèmes PV, décrire la commande MPPT, et la simulation de l'algorithme de contrôle du MPPT.

3.2 Conversion de puissance

3.2.1 Electronique de puissance :

Avant d'entrer dans le vif du sujet il est nécessaire d'aborder la branche de l'électrotechnique qui a pour but l'étude de la structure, des composants, et de la conversion statique de l'énergie.

En effet l'électronique de puissance traite l'électricité par voie statique permettons ainsi :

- La discrétion par la diminution des masses et des volumes, ainsi que par l'utilisation d'ultrasons.
- Une utilisation de l'énergie électrique plus adaptable et polyvalente.
- Une meilleure gérance de l'énergie électrique, de son transport et de sa distribution.

3.2.2 Convertisseurs électriques :

La majorité de l'électricité est fournie sous forme de tensions alternatives sinusoïdales ou continues. L'électronique de puissance nous permet de modifier la manière dont l'énergie électrique est présentée pour répondre à nos demandes spécifiques. Les convertisseurs statiques sont utilisés en électronique de puissance. Et des commutateurs électroniques sont utilisés dans ces derniers. [20]

La conversion statique est effectuée via des convertisseurs statiques, qui sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique disponible en une forme pouvant être utilisée pour alimenter une charge. [19]

Les convertisseurs adaptent la tension électrique aux récepteurs qui fonctionnent sous une tension continue ou alternative différente. La recherche de convertisseurs est très intéressante, car ils sont employés dans la plupart des nouvelles formes de production d'énergie dispersées connectées au réseau (éolienne, PV, etc.). [21]

Pour modifier la tension fournie par les panneaux solaires (une tension de type DC).

Il existe deux types de convertisseurs différents (Convertisseurs (hacheurs) DC-DC, onduleurs DC-AC).

3.3 Les Convertisseurs (Hacheurs) (DC/DC)

3.3.1 Présentation du convertisseur (DC/DC) (hacheur) :

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques de type DC-DC (continu-continu) qui permettent de gérer la puissance électrique dans les circuits à courant continu avec une flexibilité et une efficacité remarquable [25].

Un hacheur optimise le flux efficace d'énergie d'une source continu vers la charge. Il peut être élévateur ou abaisseur, et dans des situations spécifiques, renvoyer de l'énergie à l'alimentation, selon la construction. Il est utilisé dans l'alimentation électrique ainsi que dans la commande de moteurs. [23]

Les condensateurs, les inductances et les interrupteurs constituent « le hacheur ». Dans un état idéal, tous ces appareils ne nécessiteraient aucune puissance active, c'est pourquoi les hacheurs ont des rendements élevés. L'approche du hachage, a résolu le problème des faibles performances et de l'encombrement des alimentations en série. Il est appelé hacheur car, dans une alimentation à découpage, la tension d'entrée est "hachée" à une certaine fréquence par un transistor qui s'allume et s'éteint alternativement. Cela produit une onde carrée de tension, qu'il suffit de lisser pour obtenir une tension continue [25].

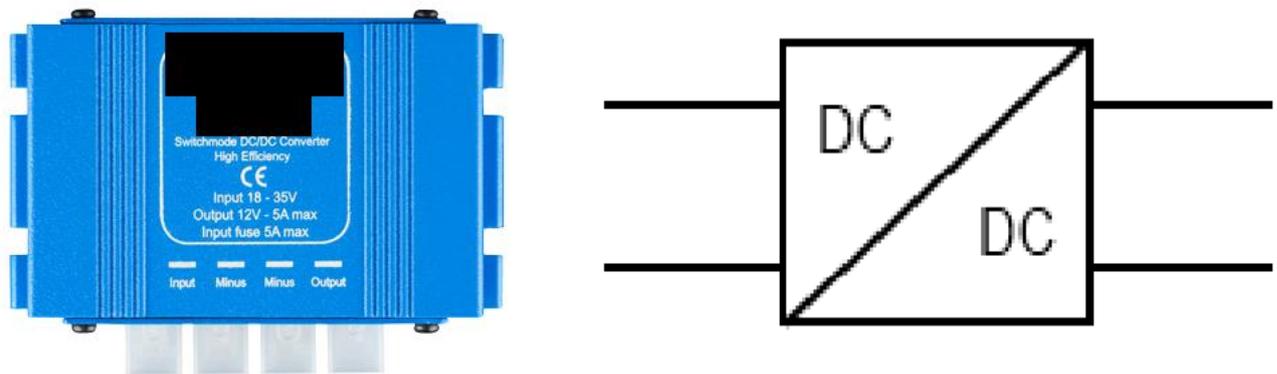


FIGURE 3.1 : CONVERTISSEUR (HACHEUR DC/DC) ET SON SYMBOLE.

3.3.2 Fonctionnalités du convertisseur (DC/DC) (hacheur) :

En effet un convertisseur doit assurer les fonctionnalités suivantes :

- Fournir une ou plusieurs tensions complètement continues, éventuellement réglables et constantes, quel que soit le courant souhaité.
- Faire preuve d'un haut niveau de sécurité, notamment en respectant les critères de séparation usager-réseau.
- Avoir une grande durabilité tout au long de la durée de vie de l'application, y compris la résistance aux contraintes environnementales (humidité, température, etc.).
- Avoir un taux de rendement élevé.
- Avoir une taille et masse négligeable, ainsi qu'un coût de production des plus faible.

3.3.3 Types de convertisseur (DC/DC) (hacheur) :

Les convertisseurs sont fréquemment utilisés comme interface adaptable pour fournir un suivi du point de puissance maximale en fonction de certaines tactiques de contrôle. Les panneaux solaires et la charge peuvent être capacitifs (source de tension) ou inductifs (source de courant). La charge peut également être de caractère résistif.

Les hacheurs sont divisés en deux types distincts :

- **Hacheurs isolés de la source :**

- Convertisseur « FLYBACK »
- Convertisseur « FORWARD »

- **Hacheurs isolés de la source :**

- Convertisseur élévateur « BOOST »
- Convertisseur abaisseur « BUCK »
- Convertisseur abaisseur-élévateur « BUCK-BOOST »
- Convertisseur abaisseur-élévateur à stockage capacitif « SEPIC »
- Convertisseur abaisseur-élévateur-inverseur à stockage capacitif « CUK »

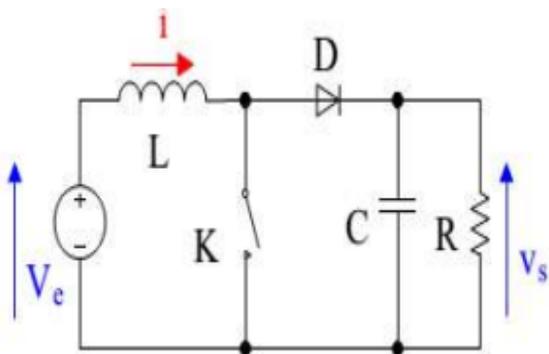


FIGURE 3.2 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR BOOST.

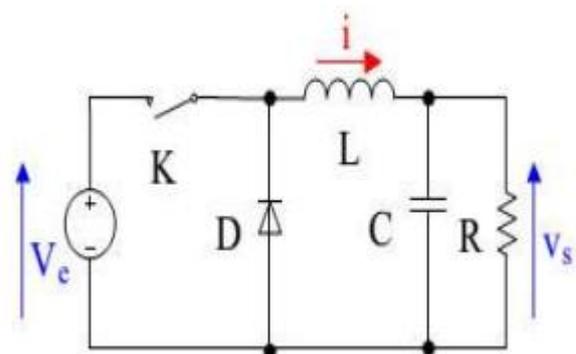


FIGURE 3.3 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR BUCK.

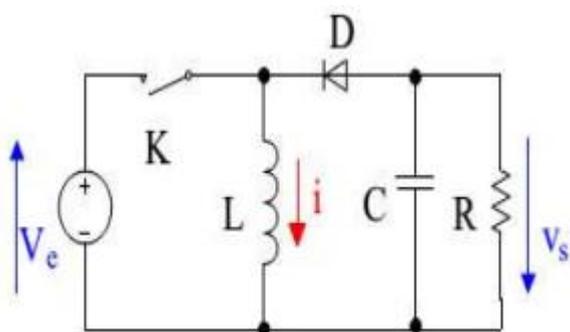


FIGURE 3.4 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR BUCK-BOOST.

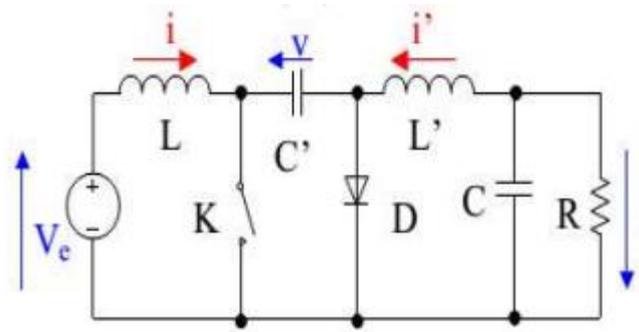


FIGURE 3.5 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR CUK.

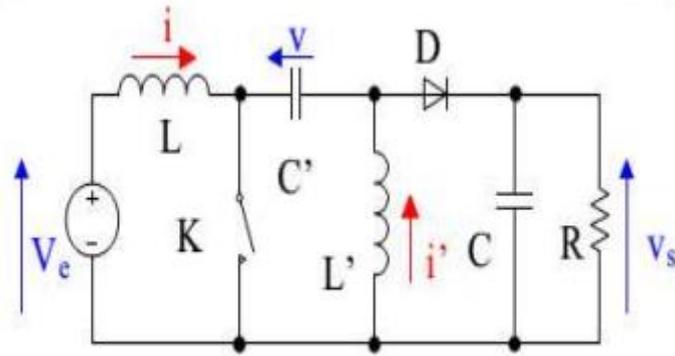


FIGURE 3.6 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR SEPIC.

Nous nous intéresserons au convertisseur de type BOOST, pour pouvoir utiliser l'ensemble du système solaire sur une maison qui fonctionne sur du 220 volts.

3.3.4 Convertisseur élévateur BOOST :

Le convertisseur élévateur BOOST, communément appelé (hacheur parallèle), est une alimentation à découpage qui transforme une tension continue d'entrée en tension continue de sortie supérieure d'où le nom « élévateur ».

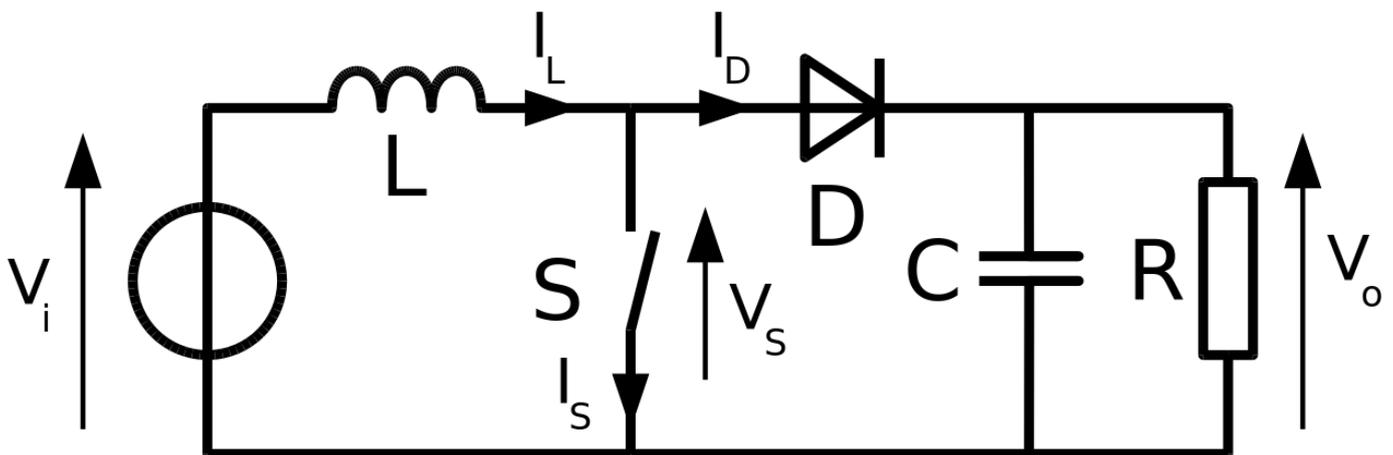


FIGURE 3.7 : CONVERTISSEUR ELEVATEUR.

- Lorsque l'interrupteur \$S\$ (voir figure 3.8) est fermé (état passant), cela provoque une élévation du courant dans l'inductance, ce qui se traduit par le stockage d'une quantité d'énergie sous forme magnétique. La charge est ensuite retirée de la source d'alimentation lorsque la diode \$D\$ est bloquée.

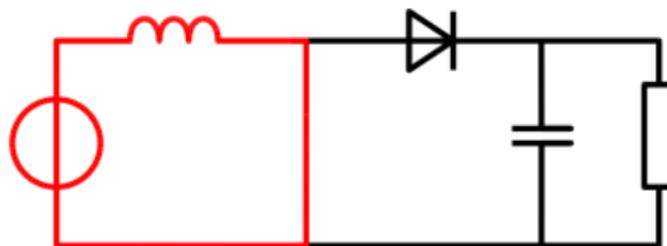


FIGURE 3.8 : HACHEUR BOOST EN ETAT FERME (PASSANT)

- Lorsque l'interrupteur S (voir figure 3.9) est ouvert, l'inductance est connectée au générateur en série, et sa force électromotrice. S'ajoute à celui du générateur (effet booster). Après avoir traversé l'inductance, le courant traverse la diode D, le condensateur C et la charge R. En conséquence, l'énergie stockée dans l'inductance est transférée au condensateur.

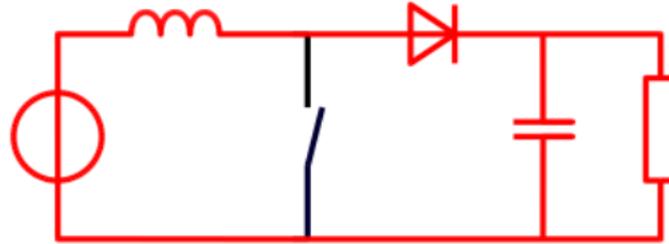


FIGURE 3.9 : HACHEUR BOOST EN ETAT OUVERT (BLOQUE)

La tension de sortie d'un convertisseur élévateur en mode de conduction continue est calculée comme suit (en supposant que les composants sont idéaux):

En état fermé (passant) l'augmentation du courant est donnée par la relation suivante :

$$V_i = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (3.1)$$

à la fin de l'état, la différence de courant ΔI_L est donnée par la relation suivante :

$$\Delta I_L = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_i \cdot dt}{L} = \frac{V_i \cdot \alpha T}{L} \quad (3.2)$$

α : représente le rapport cyclique, c'est-à-dire la fraction de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit.

(S ne conduit jamais) $0 < \alpha < 1$ (S conduit tout le temps)

En état ouvert (bloqué), Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante. L'évolution de I_L est donnée par la relation :

$$V_i - V_o = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (3.3)$$

On peut donc en conclure la variation de courant ΔI_L comme suit :

$$\Delta I_L = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{(V_i - V_o) \cdot dt}{L} = \frac{(V_i - V_o) \cdot (1-\alpha) \cdot T}{L} \quad (3.4)$$

(Si on considère le condensateur ayant atteint son régime permanent l'énergie stockée est la même au début et à la fin du cycle), on peut déduire l'énergie stockée dans l'inductance par la relation :

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \quad (3.5)$$

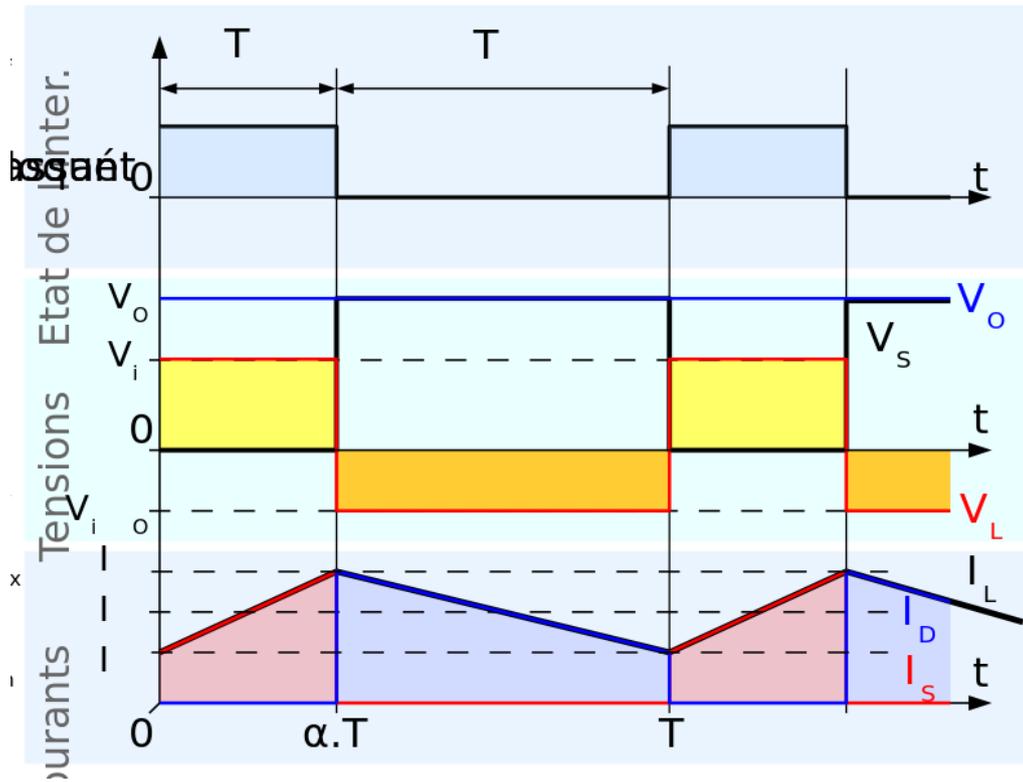


FIGURE 3.10 : FORMES D'ONDES COURANT/TENSION DANS UN CONVERTISSEUR BOOST.

3.4 Commande Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Etant l'organe fonctionnel d'un système PV permettant de chercher le point de puissance maximale du générateur PV, dépendant des conditions météorologiques stables et des fluctuations de charge. Son principe de contrôle est basé sur le changement automatisé du rapport cyclique α à la bonne valeur afin d'optimiser en permanence la puissance à la sortie du panneau PV [30].

3.4.1 Principe du MPPT :

À l'aide d'un signal électrique approprié, la commande MPPT modifie le rapport cyclique du convertisseur statique pour tirer la puissance maximale que le GPV peut fournir. Pour découvrir le MPP, la méthode MPPT peut être plus ou moins difficile. En général, Elle repose sur la modification du rapport cyclique du convertisseur statique en réponse à l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V , et donc la puissance du GPV) jusqu'à ce qu'il soit placé sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont présentés dans la littérature [29]. Le schéma fonctionnel d'un convertisseur MPPT traditionnel est illustré sur la figure ci-dessous :

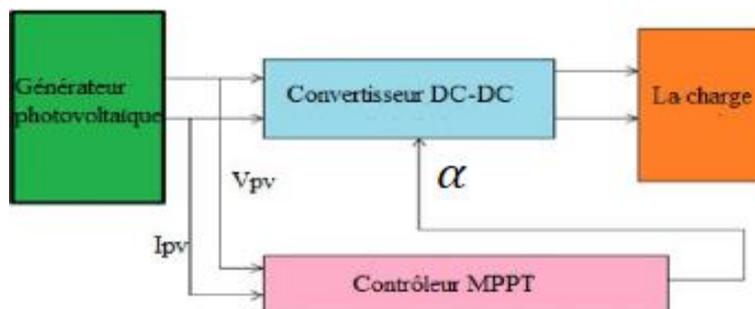


FIGURE 3.11 : CONCEPTION D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION D'ÉNERGIE SOLAIRE.

3.4.2 Méthode de poursuite du MPP :

Le plus point de puissance maximale peut être trouvé en utilisant une variété d'approches et d'algorithmes. Le suivi de la puissance devrait idéalement être effectué automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques changeantes. [28]

- **Méthodes a contre réaction de courant :**

Pour collecter des informations sur l'état opérationnel et actuel du système, cette approche utilise simplement une mesure de courant [30]. Permettant de déterminer le courant idéal auquel le panneau doit fonctionner afin de récolter le plus d'électricité [29] en compte parmi elles :

- Maximisation du courant.
- Courant de référence en fonction du courant de CC.

- **Méthodes a contre réaction de tension :**

La tension de fonctionnement des panneaux est contrôlée en la comparant à une tension de référence dans ce type de mécanisme. Pour annuler l'erreur, une tension dite « d'erreur » est générée, ce qui fait varier le rapport cyclique du PWM (Pulse-width modulation) de commande. Il existe trois sortes d'approches [29] selon la nature de la tension de référence (constante ou variable, interne ou externe) :

- Tension de référence en fonction du module.
- Tension de référence fixe.
- Tension de référence extrême.

- **Méthodes a contre réaction de puissance :**

Ces approches utilisent des algorithmes de recherche itératifs pour déterminer le point de fonctionnement du panneau, ce qui maximise la puissance produite sans perturber le fonctionnement du système. Ils sont basés sur l'optimisation continue de l'électricité fournie par les panneaux solaires, plutôt que sur des niveaux de référence fixes ou des paramètres de fonctionnement. Ainsi, à une position donnée, nous cherchons dans un sens ; si la puissance du panneau augmente, nous continuons à chercher dans cette direction ; sinon, nous cherchons dans la direction opposée. [29]

3.4.3 Algorithmes de recherche du point maximale de puissance (MPP) :

Il existe plusieurs algorithmes de recherche du MPP, les plus répandus étant : [29]

- Algorithme P&O (perturbation et observation).
- Algorithme de la méthode conductance incrémentale (InnCond).
- Algorithme de la technique Hill Climbing se basant sur les algorithmes P&O et InnCond).
- Algorithme à base de logique floue.
- Algorithme du CC (Courant Constant).
- Algorithme du CV (Constant Voltage, Tension Constante).

Nous nous intéresserons à l'algorithme P&O dans notre étude.

3.4.4 Algorithme P&O (perturbation et observation) :

Il consiste à perturber le système en augmentant ou en diminuant du voltage de référence V_{ref} . En agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (hacher) DC-DC et en observant la puissance de sortie du panneau, on peut garder le même sens de perturbation si la puissance actuelle P_k du panneau est supérieure à la valeur précédente P_{k-1} , sinon, la puissance du cycle précédent la perturbation est inversée, comme le montre la figure ci-dessous : [29].

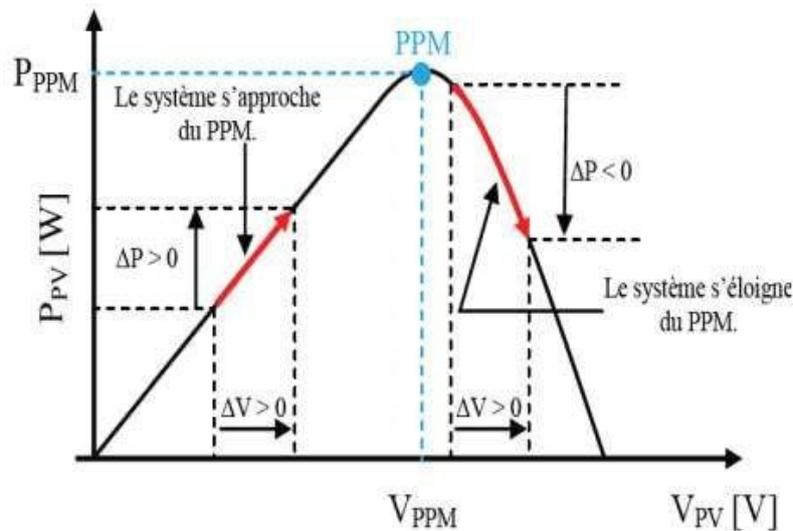


FIGURE3.12 : SCHEMA DU PRINCIPE DE LA METHODE P&O.

3.4.5 Fonctionnement de l'algorithme P&O :

L'algorithme utilisé dans les premiers MPPT était plutôt simple. La commande abordée dans cette thèse est basée sur une technique de contrôle adaptatif qui permet au système de conserver son point de puissance maximale (MPP).

Nous mesurons d'abord la tension V et le courant I , puis nous calculons la puissance P . Afin d'exécuter l'algorithme on se base sur le signe de la dérivée de la puissance dP .

- Si $\frac{dP}{dV} < 0$, le rapport cyclique α diminue, nous avons donc dépassé le MPP.
- Si $\frac{dP}{dV} > 0$, le rapport cyclique α augmente, nous nous rapprochons donc du MPP.
- Si $\frac{dP}{dV} = 0$, donc nous avons atteint le MPP.

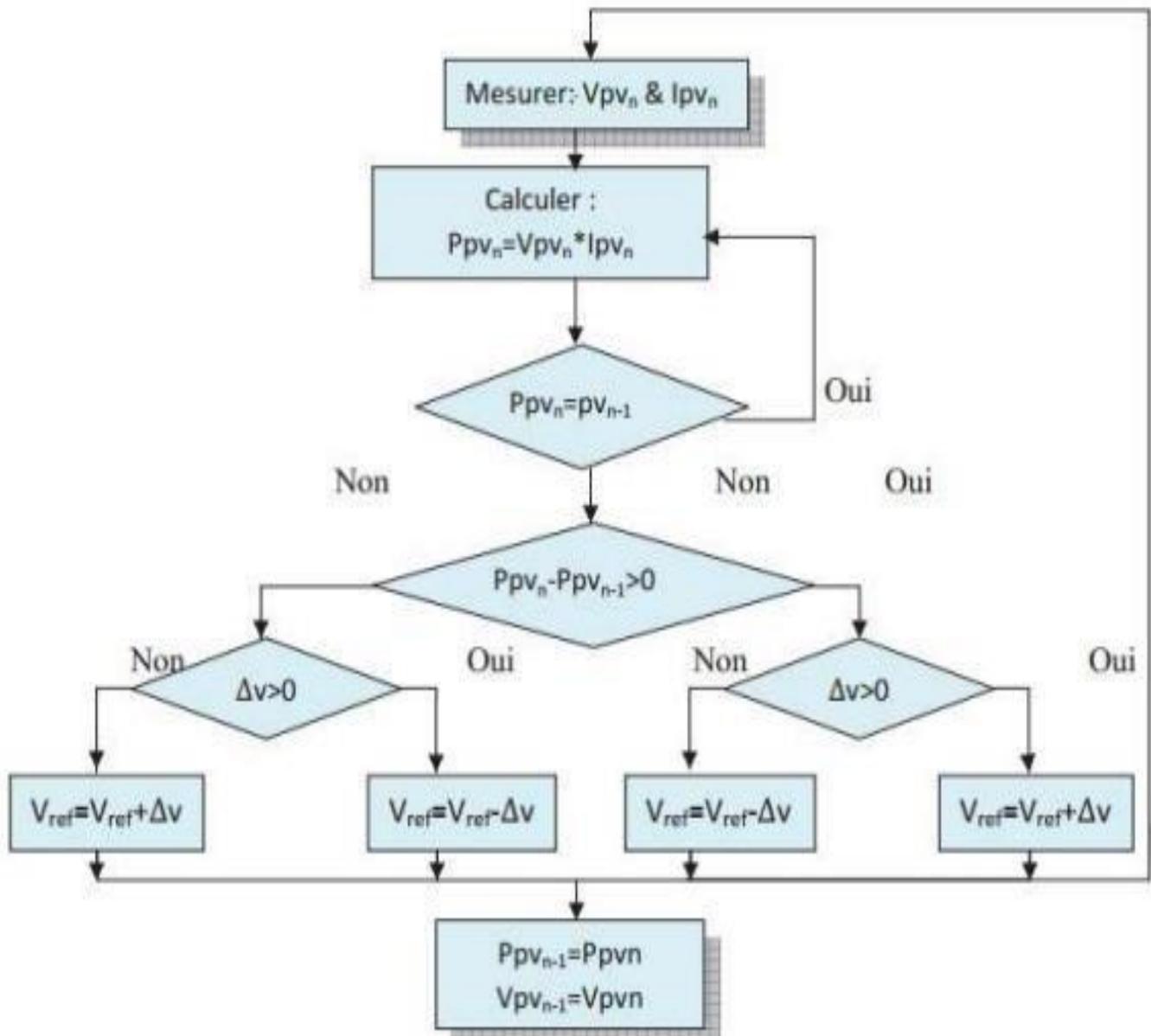


FIGURE 3.13 : SCHEMA DU MPPT EN UTILISANT L'ALGORITHME P&O.

Cependant la méthode de suivi du point de puissance maximale à l'aide de l'algorithme P&O présente un inconvénient, en effet si l'irradiation augmente de manière brutale il en suivra une augmentation de la puissance, l'algorithme considérera que cette augmentation a été produite par le par effet de la perturbation précédente, ceci causera un retard de réponse lors de changement soudain de conditions à cause de l'algorithme qui aura suivi une mauvaise direction, causant l'éloignement du véritable MPP, ce processus ne s'arrêtera que quand l'irradiation redeviendra stable.

3.5 Stockage de charge

3.5.1 Systeme de stockage :

Dans une installation photovoltaïque, le stockage de l'énergie produite est nécessaire, ces derniers doivent être capable d'alimenter en électricité quand le système n'en produit plus (la nuit, le mauvais temps, etc.), doivent aussi être capable d'augmenter la puissance fournie pour s'aligner à certaines demandes.[9]

3.5.2 Les Batteries :

Les batteries solaires stockent l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques pour garantir la disponibilité de l'électricité à tout moment (jour ou nuit, ciel clair ou couvert). Une batterie à décharge lente est une batterie qui est utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne (également appelée batterie solaire). Ces batteries sont spécialement conçues pour l'énergie solaire et éolienne. Ils ne se comportent pas comme une batterie de véhicule, par exemple ; ils se déchargent plus lentement et peuvent supporter des décharges peu profondes plus fréquentes.

Leurs montages se fait en série ou en parallèle selon les besoins. Le montage en parallèle permet d'augmenter la capacité de stockage tout en gardant la tension constante. Le montage en série quant à lui permet d'additionner les tensions des batteries, mais la capacité reste la même qu'une seule batterie.

3.5.3 Types de Batteries :

Ils existent deux types de batteries celles au plomb acide (qui sont les plus répandu notamment grâce à leur coût de production faible et leur large type d'utilisations), et celles au nickel-cadmium leur coût de production est assez élevé, mais sont d'une fiabilité quasi irréprochable.

- **Batteries solaires au plomb d'acide**

Plusieurs plaques de plomb sont immergées dans une solution d'acide sulfurique dans ces batteries. Une grille en alliage de plomb avec une pâte d'oxyde de plomb incrustée dessus constitue la plaque. On appelle électrolyte une solution d'acide sulfurique et d'eau.

- **Batteries solaires au nickel-cadmium**

La structure physique des batteries au nickel-cadmium est similaire à celle des batteries au plomb. Ils emploient de l'hydroxyde de nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de cadmium pour les plaques négatives à la place du plomb. L'hydroxyde de potassium est appelé électrolyte.

3.6 Réalisation d'un système PV avec Hacheur BOOST et MPPT P&O

Pour nos simulations nous utiliserons l'outil SIMULINK du logiciel MATLAB.

La figure ci-dessous représente un schéma simplifié du modèle que nous allons simuler, nous avons choisi un convertisseur élévateur de type BOOST commandé par l'algorithme de MPPT P&O avec un régulateur PI.

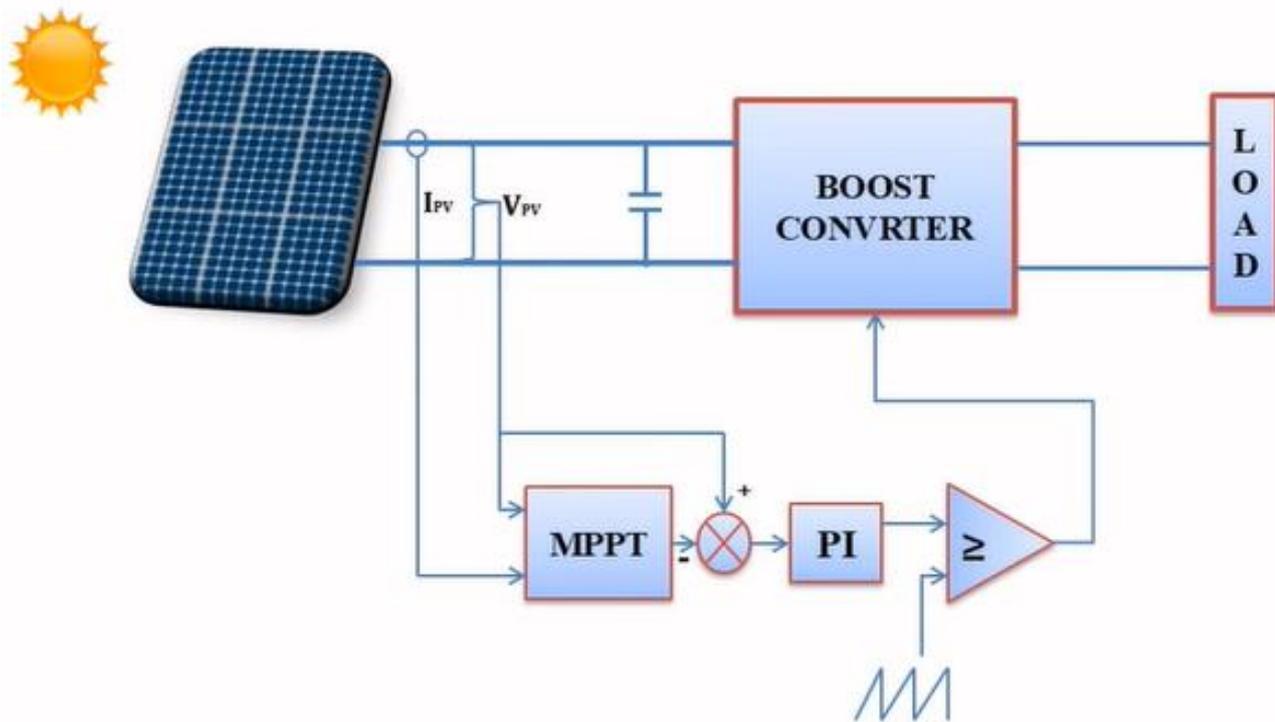
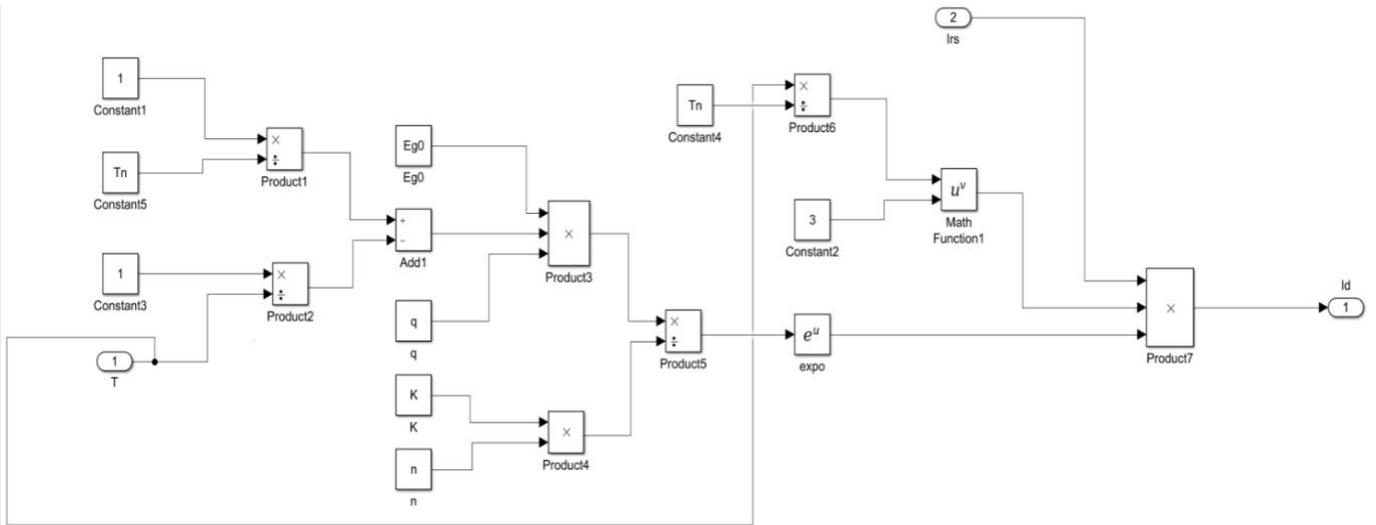


FIGURE 3.14 : SCHEMA D'UN SYSTEME PV AVEC HACHEUR BOOST COMMANDE PAR MPPT AVEC REGULATEUR

(Note : **LOAD** représente la charge qui est un équipement électrique qui peut être de type continue ou alternatif selon l'usage et la demande, il nécessite un onduleur, cette partie ne sera pas abordé dans notre thèse, et ne sera pas simulé par la suite non plus.)

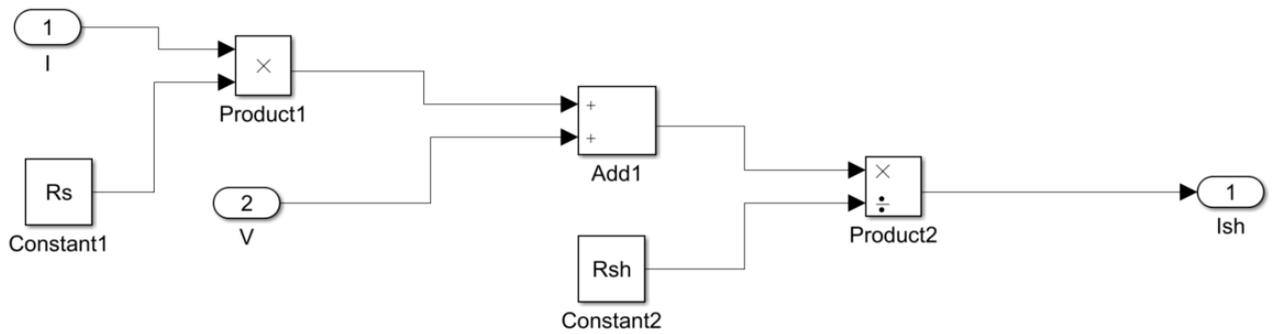
Nous allons réaliser le schéma ci-dessus sous SIMULINK.

Commençant par la cellule PV, tout d'abord exposons les équations et leur réalisation sous SIMULINK.



$$I_d = I_{rs} \cdot (T/T_n)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot (1/T_n - 1/T)}{n \cdot K}\right]$$

FIGURE 3.15 : REALISATION DU COURANT DE SATURATION DE LA DIODE Id SOUS SIMULINK.



$$I_{sh} = (V + I \cdot R_s) / R_{sh}$$

FIGURE 3.16 : REALISATION DU COURANT DE SHUNT ISH SOUS SIMULINK.

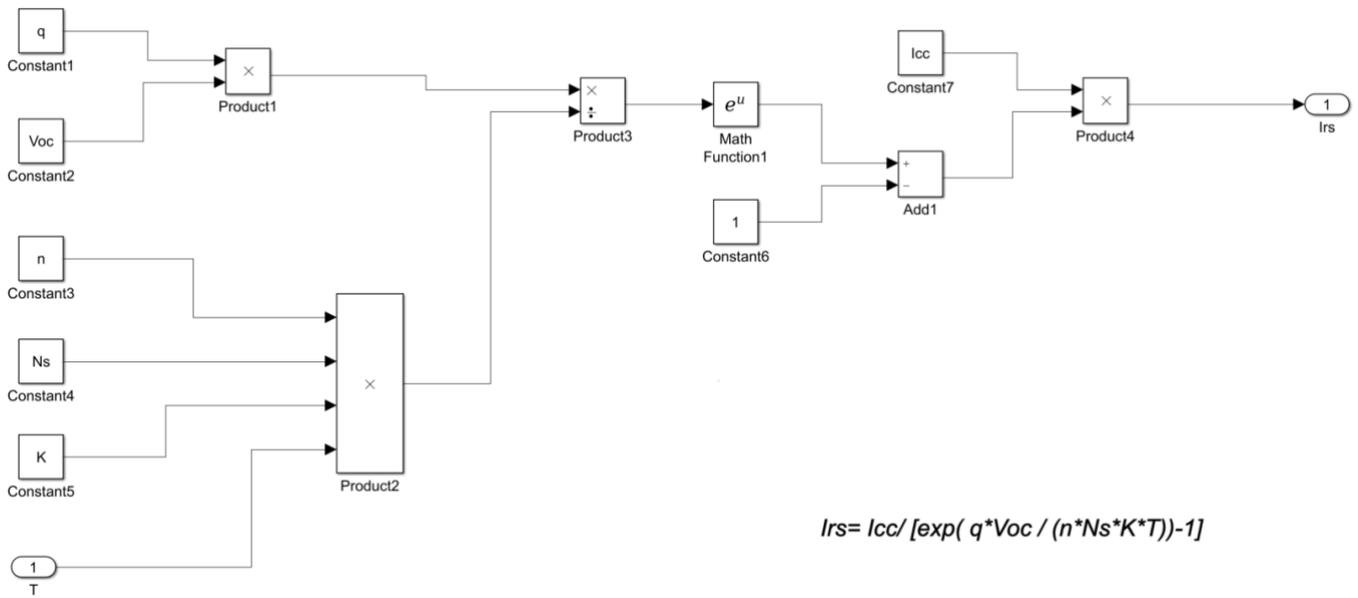


FIGURE 3.17 : REALISATION DU COURANT DE SATURATION INVERSE IRS SOUS SIMULINK.

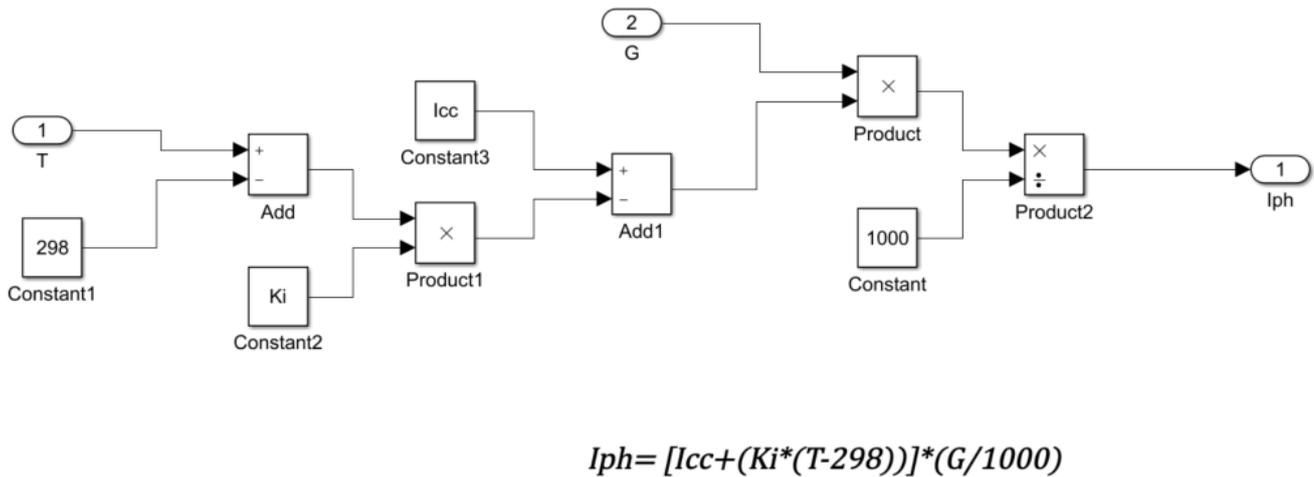
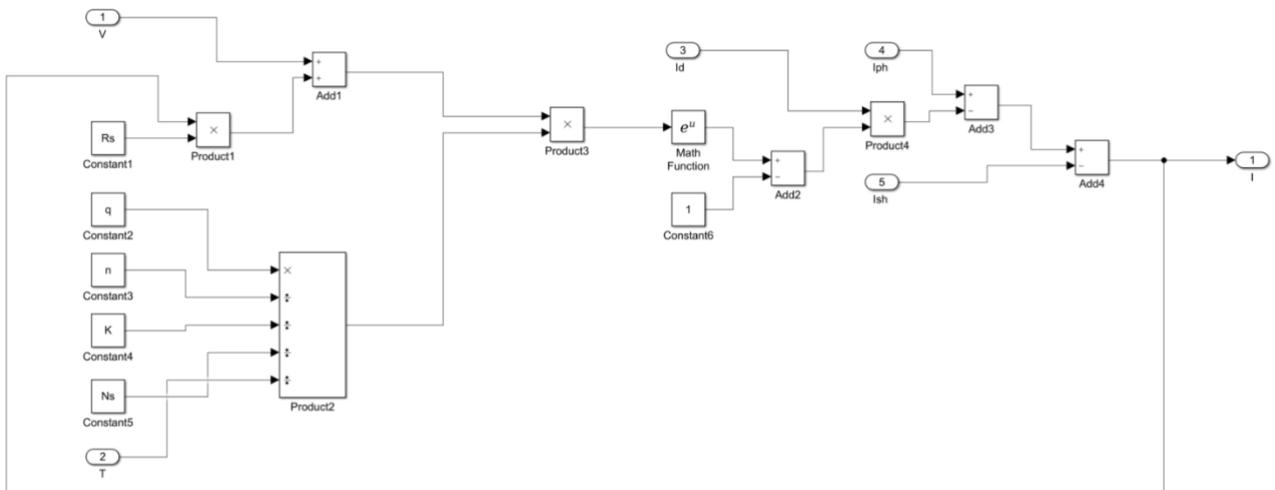


FIGURE 3.18 : REALISATION DU COURANT DE PHOTON IPH SOUS SIMULINK.



$$I = I_{ph} - I_d \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{sh}$$

FIGURE 3.19 : REALISATION DU COURANT PV, IPV SOUS SIMULINK.

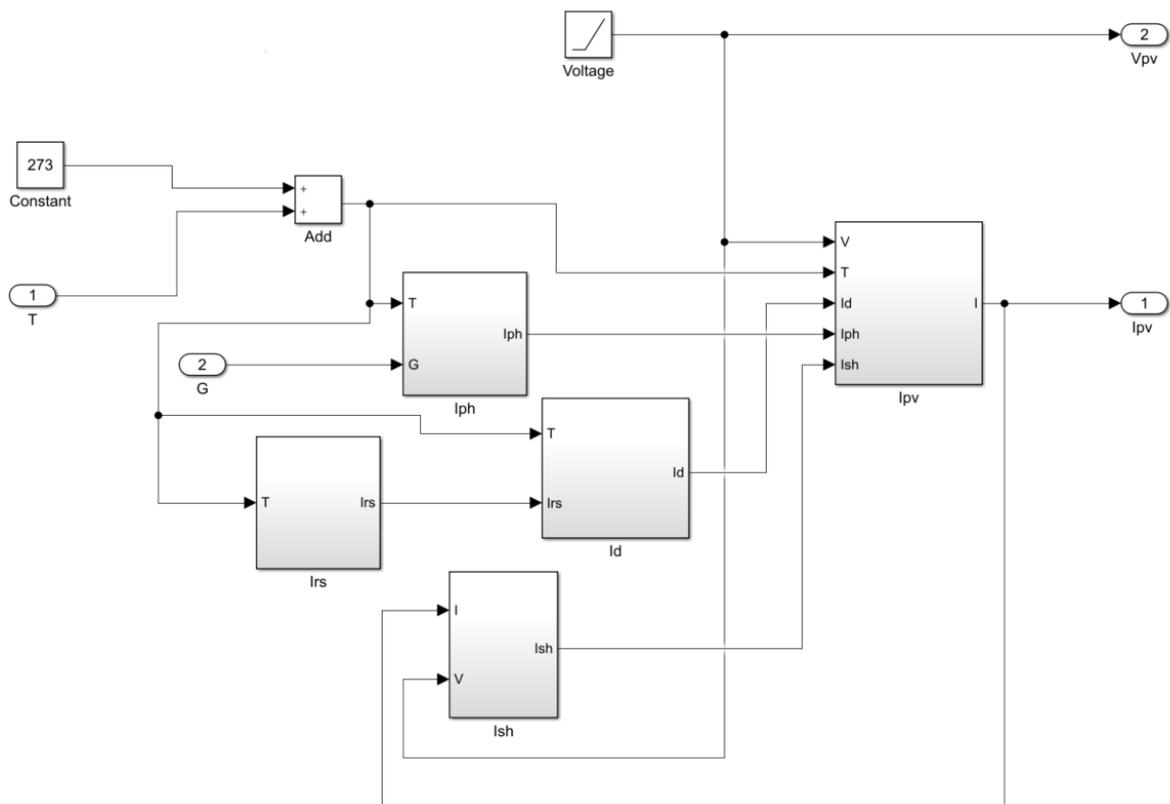


FIGURE 3.20 : SCHEMA D'UNE CELLULE PV, SOUS SIMULINK.

Passons maintenant à la réalisation du MPPT avec l'algorithme P&O.

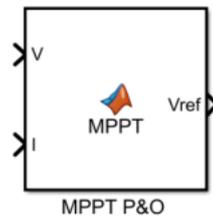


FIGURE 3.21 : COMMANDE MPPT SOUS SIMULINK.

```
MPPT P&O x +
1 function Vref = MPPT(V,I)
2     Vrefmax = 363;
3     Vrefmini = 0;
4     Vrefinit = 300;
5     deltaVref = 1;
6     persistent Vold Pold Vrefold;
7     dataType = 'double';
8     if isempty(Vold)
9         Vold = 0;
10        Pold = 0;
11        Vrefold = Vrefinit;
12    end
13    P = V*I;
14    dV = V - Vold;
15    dP = P - Pold;
16    if dP ~= 0
17        if dP < 0
18            if dV < 0
19                Vref = Vrefold + deltaVref;
20            else
21                Vref = Vrefold - deltaVref;
22            end
23        else
24            if dV < 0
25                Vref = Vrefold - deltaVref;
26            else
27                Vref = Vrefold + deltaVref;
28            end
29        end
30    else Vref = Vrefold;
31    end
32    if Vref >= Vrefmax || Vref <= Vrefmini
33        Vref = Vrefold;
34    end
35    Vrefold = Vref;
36    Vold = V;
37    Pold = P;
38
```

FIGURE 3.22 : ALGORITHME P&O POUR COMMANDE MPPT.

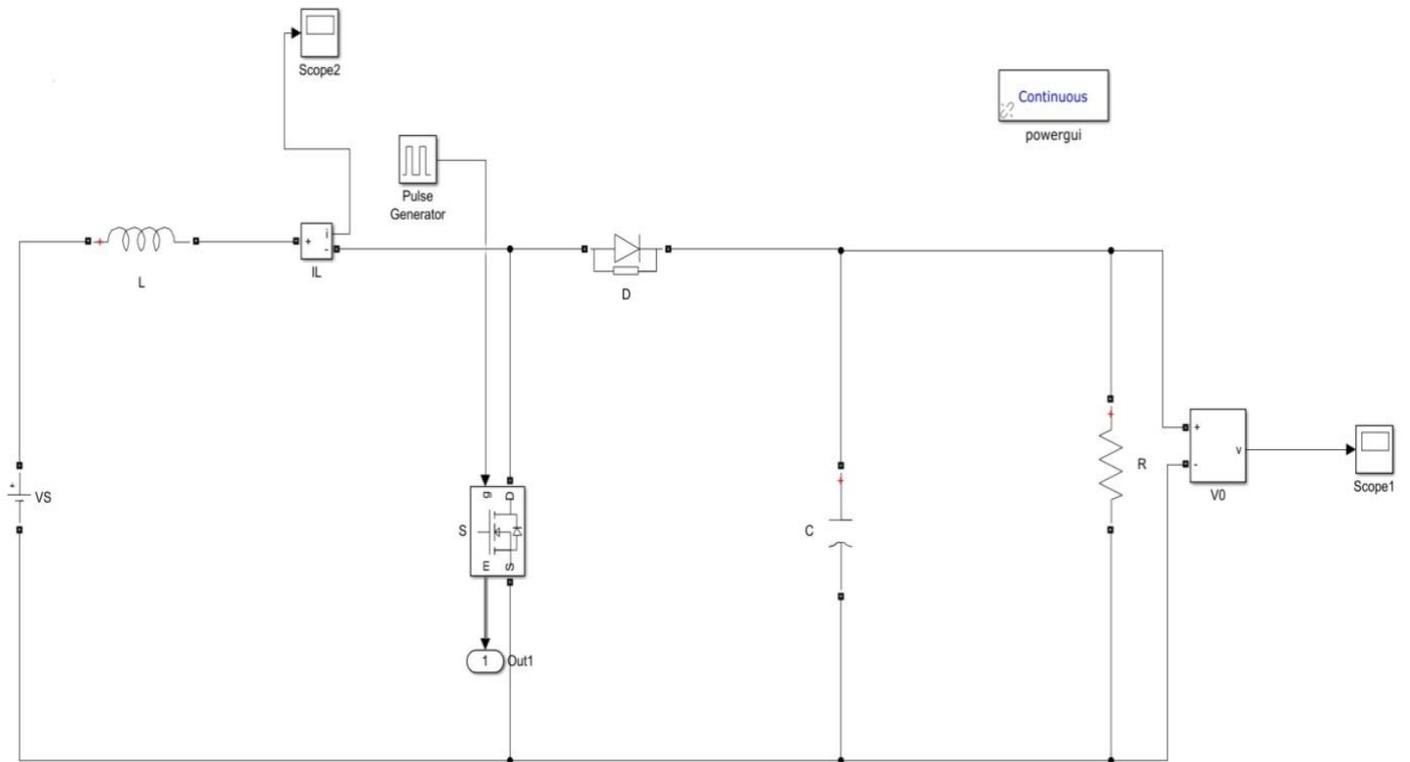


FIGURE 3.23 : SCHEMA D'UN CONVERTISSEUR BOOST, SOUS SIMULINK.

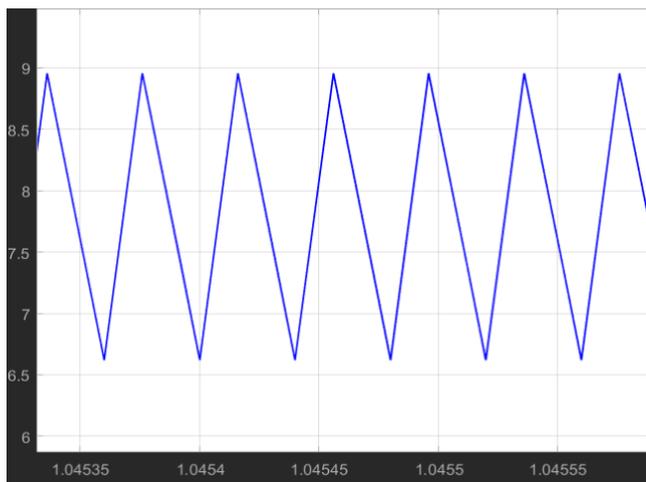


FIGURE 3.24 : SIMULATION DU COURANT I_L CONVERTISSEUR BOOST

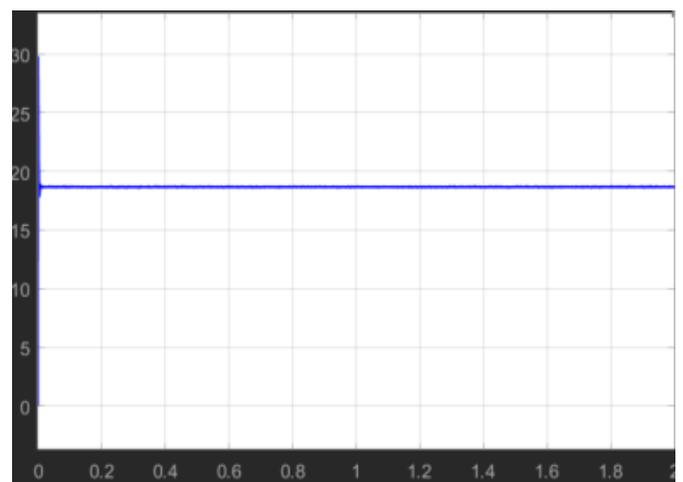


FIGURE 3.25 : SIMULATION DE LA TENSION V_0 DU CONVERTISSEUR BOOST

Maintenant nous avons établi nos composants nous allons passer à la réalisation de notre système photovoltaïque.

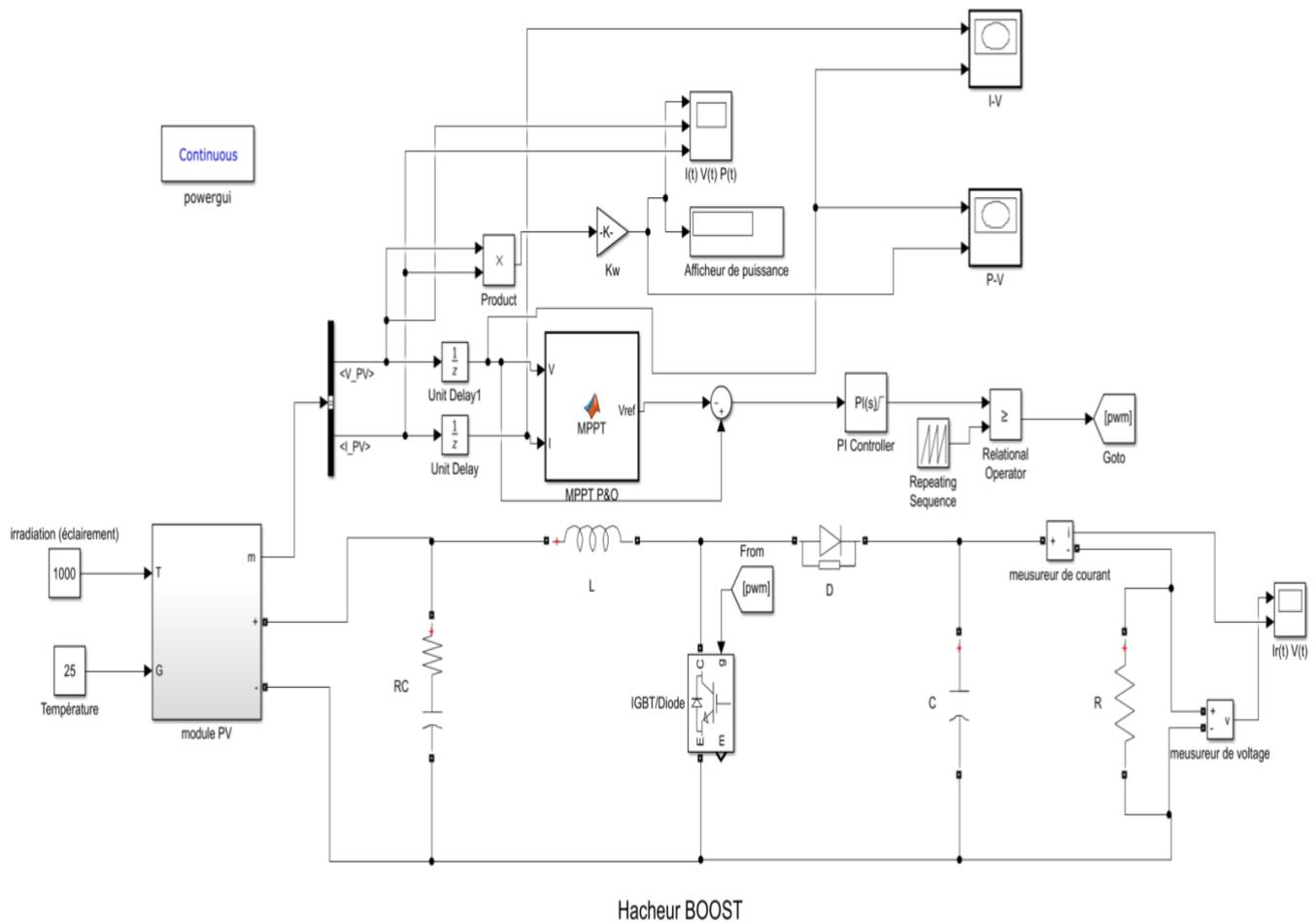


FIGURE 3.26 : SYSTEME PV AVEC CONVERTISSEUR BOOST COMMANDE PAR MPPT AVEC REGULATEUR.

3.7 Simulation du système Photovoltaïque

Par soucis de compilation nous remplacerons le module PV précédents par un autre (PV array) que nous programmerons pour reproduire le même état que notre module.

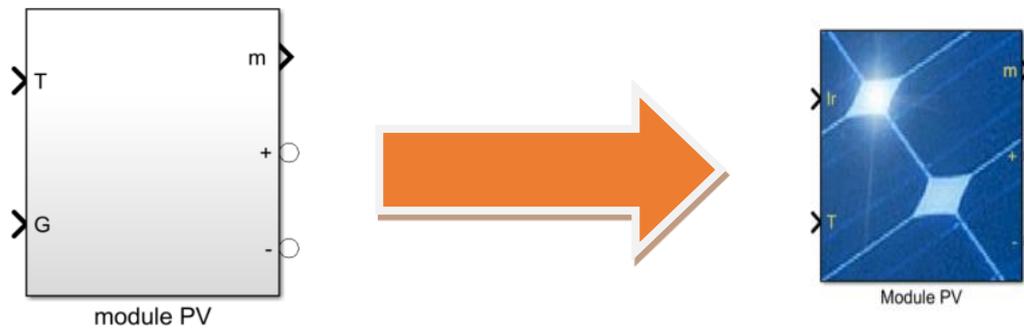


FIGURE 3.27 : REMPLACEMENT DU MODULE PV ($G=I_r$).

Le nouveau module PV à été configurer afin de reproduire les mêmes états que l'ancien. Après configuration on obtient :

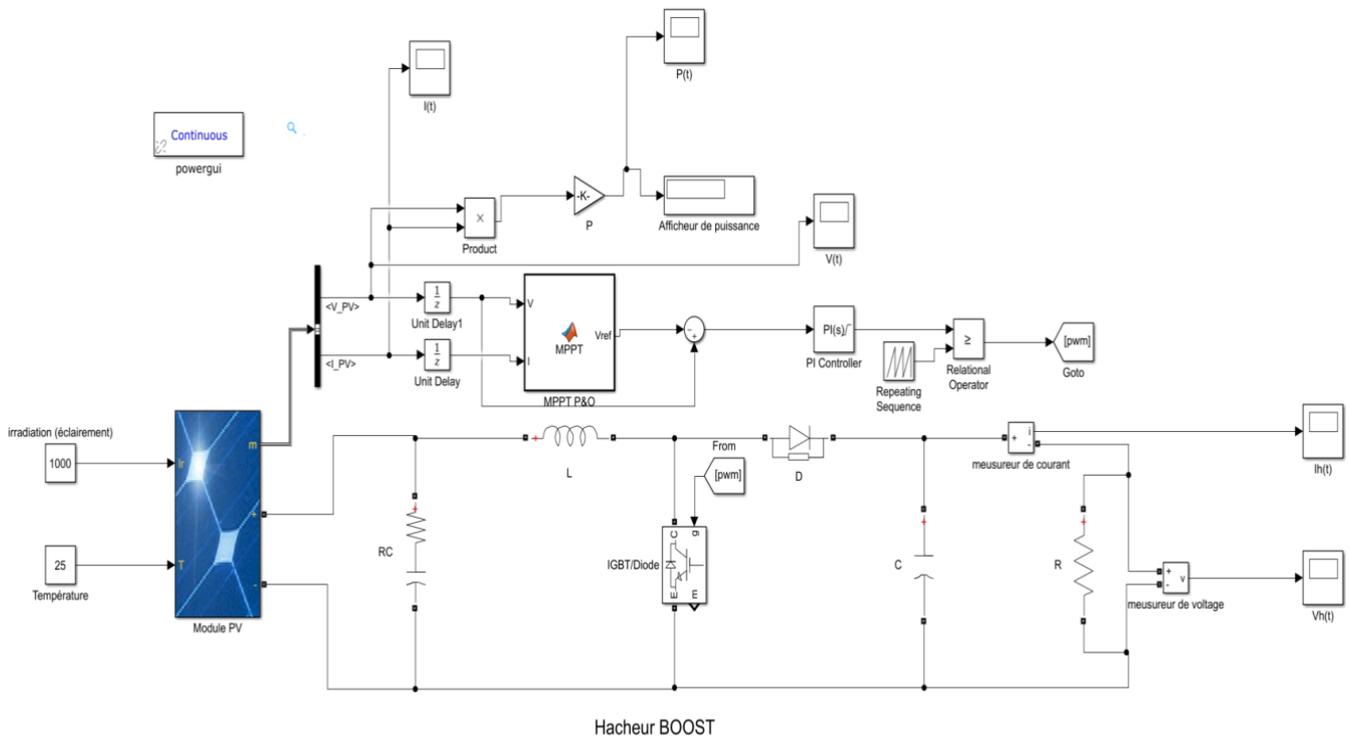


FIGURE 3.28 : SCHEMA FINAL DE NOTRE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE SOUS SIMULINK.

- **Simulation 1 :**

Pour notre première simulation nous l'effectuerons sous conditions standards c'est-à-dire, une irradiation (I_r) de 1000w/m^2 , avec une température de 25°C , les figures ci-dessous illustre les résultats obtenus :

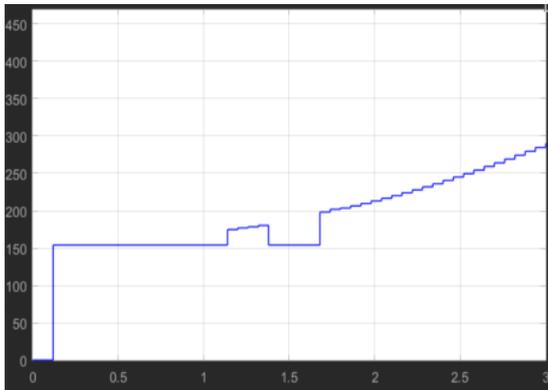


FIGURE 3.29 : COURANT GENERE PAR LE PV (Ax100/s).

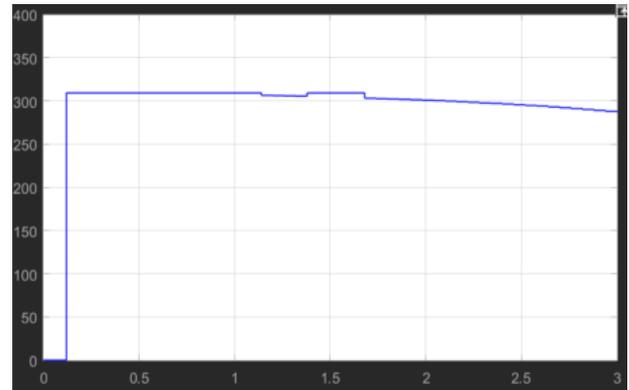


FIGURE 3.30 : TENSION DU PV (Vx10/s).

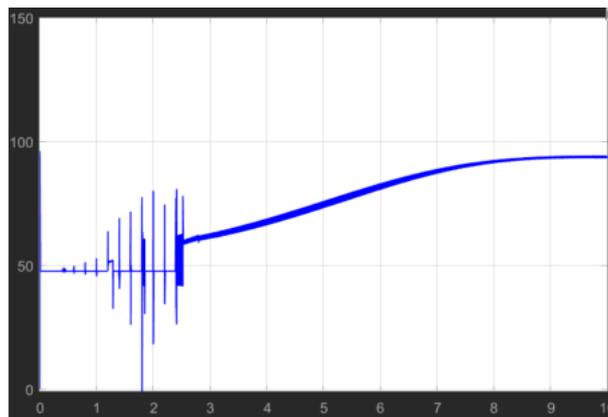


FIGURE 3.31 : PUISSANCE DELIVRE PAR LE PV (W/s).

Les figures montrent bien notre MPPT (sous algorithme P&O) nous permet de traquer le point de puissance maximale après quelques fluctuations au début il se stabilise rapidement vers sa puissance maximale, nous constatons aussi qu'il y a des micro-oscillations autour de MPP, le courant lui varie de manière conséquente, contrairement à la tension qui se stabilise peu à peu.

- **Simulation 2 :**

Dans notre deuxième simulation nous fixons la température à 40°C et l'irradiation à 1000W/m², les figure ci-dessus représente les résultats obtenus :

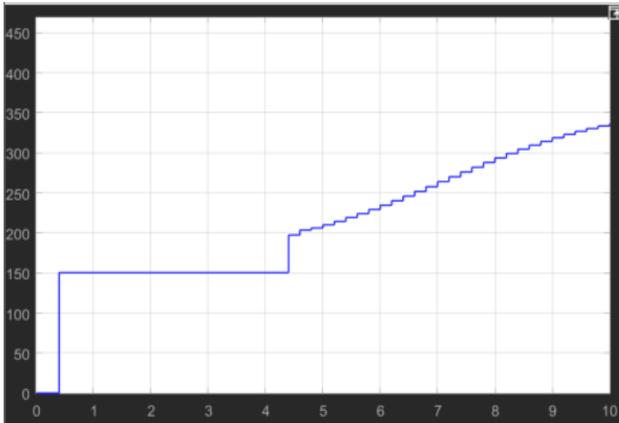


FIGURE 3.32 : COURANT GENERE PAR LE PV (Ax100/s).

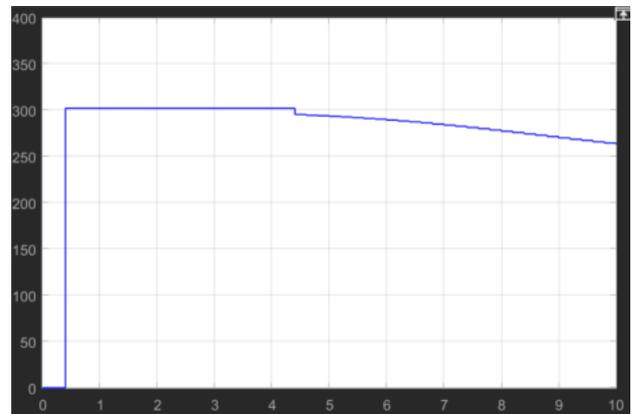


FIGURE 3.33 : TENSION DU PV (Vx10/s).

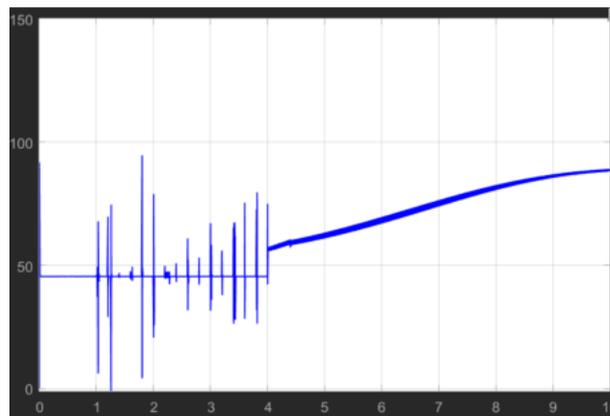


FIGURE 3.34 : PUISSANCE DELIVRE PAR LE PV (W/s).

Les figures montrent bien notre MPPT (sous algorithme P&O) nous permet de traquer le point de puissance maximale après quelques fluctuations au début il se stabilise vers sa puissance maximale, nous constatons qu'à température élevée les résultats sont étroitement proches de ceux sous conditions standards, cependant il y'a aussi des micro-oscillations autour de MPP, le courant et la tension sont plus stables au début que dans notre précédente simulation.

- **Simulation 3 :**

Dans notre troisième simulation nous mettons la température à 25°C et l'irradiation à 600 W/m², les figure ci-dessus représente les résultats obtenus :

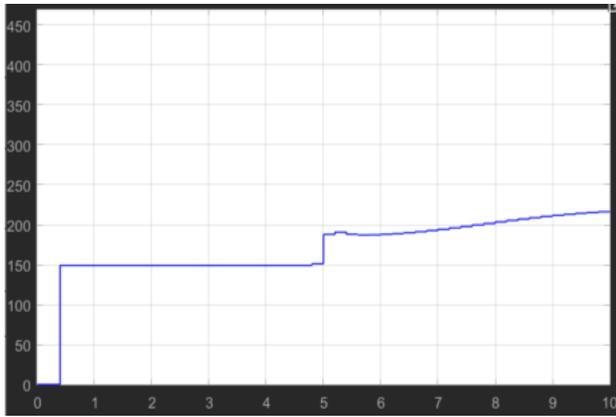


FIGURE 3.35 : COURANT GENERE PAR LE PV (Ax100/s).

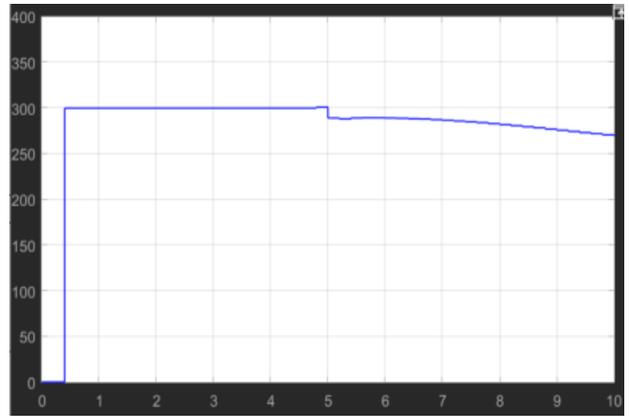


FIGURE 3.36 : TENSION DU PV (Vx10/s).

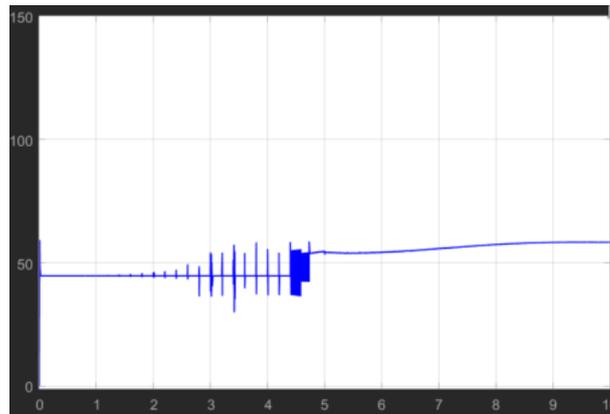


FIGURE 3.37 : PUISSANCE DELIVRE PAR LE PV (W/s).

Les figures montrent bien que notre MPPT (sous algorithme P&O) nous permet de traquer le point de puissance maximale après quelques fluctuations au début il se stabilise vers sa puissance maximale, cependant nous constatons que l'irradiation a bien plus d'influence que la température sur la puissance, en effet nous remarquons que le MPP est bien plus bas (inférieur) que le précédents, et qu'il a mis bien plus de temps à se stabiliser, quelque similitude son notable, notamment les micros-oscillations autour du MPP, quant à la tension elle est quasiment similaire.

3.8 Conclusion

Nous venons de traité dans ce dernier chapitre la modélisation d'un système PV en entier, nous avons étudié quelques convertisseurs, puis nous avons choisi le DC-DC BOOST pour notre thèse, que nous avons commandé à l'aide d'un algorithme MPPT de type Perturbation & Observation, nous avons aussi légèrement abordé les batteries solaires et leurs utilités dans le système nous avons par la suite modéliser notre propre système photovoltaïque et l'avons simulé sous différentes conditions.

Nous pouvons conclure que même sous différentes conditions météorologiques la puissance maximale sera toujours atteinte et le système photovoltaïque sera exploité à son maximum.

CONCLUSION GENERALE

Le déclin que subissent les sources d'énergie traditionnelles (pétrole, etc.) en raison de la consommation exponentielle montre à quel point la recherche sur les énergies renouvelables sera cruciale dans les années à venir.

La Terre reçoit une grande quantité d'énergie du soleil sous forme d'irradiation (luminosité) et température (chaleur). Cependant, la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas toujours celle sous laquelle elle peut être utilisée. Par conséquent, nous devons utiliser des méthodes de conversion et de traitement d'énergie, comme les cellules solaires photovoltaïques, qui transforment l'énergie solaire en énergie électrique, et qui a été le thème principal de ce mémoire.

En effet ce mémoire a porté sur la modélisation d'un système photovoltaïque en son intégralité, comme expliqué dans notre mémoire la modélisation système photovoltaïque nécessite certains composants, dont notamment les cellules photovoltaïques chargées de récolter les irradiations et la chaleur et la transformer en énergie électrique qui par la suite sera expédié vers un convertisseur commandé par un algorithme de recherche du point maximal de puissance cette technique est appelée MPPT (**MAXIMUM POWER POINT TRACKING**), qui lui se chargera de gérer la puissance générée par le module photovoltaïque.

Le premier chapitre traite plusieurs généralités sur les systèmes photovoltaïques, notamment les méthodes de calcul des rayonnements, les semi-conducteurs à travers les différentes techniques de dopage, le principe de fonctionnement d'une cellule solaire ainsi que ses différents types et leurs caractéristiques, les différentes manières d'associations des cellules, la constitution des panneaux solaires leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un module photovoltaïque où nous avons étudié la cellule de l'intérieure et ses différents composants, nous avons aussi fait la différence entre une cellule idéale et réelle, nous avons présenté par la suite le module KC200GT qui a été modélisé à la fin, nous avons aussi abordé l'aspect mathématique des différentes associations de cellules où nous avons établi et calculé les équations des différents courants qui composent la cellule, à la fin nous avons simulé un module photovoltaïque sous conditions standards.

Le troisième chapitre traite la modélisation d'un MPPT au début puis par la simulation d'un système photovoltaïque complet passant par l'étude de différents condensateurs communément appelés (Hacheur) et leurs différents schémas et utilités selon les conditions et l'usage demandé, ce dernier pouvant être

commandé par différents algorithmes MPPT que nous avons aussi présenté ainsi que leurs multiple usages avant de nous tourner vers l'algorithme Perturbations & observations qui a été utilisé par la suite pour notre modélisation.

La conclusion générale de ce mémoire c'est que l'énergie solaire est l'avenir des énergies renouvelables, et représente certainement la meilleure alternative aux combustibles fossiles et nucléaires, de par ses différents avantages, et préserve l'environnement qui constitue un point majeur en vue de la crise écologique que traverse notre monde moderne.

Bibliographie

- [1] Stéphane Vighetti. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion. Sciences de l'ingénieur. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.
- [2] Thomas Mambrini. "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie ".Thèse 5 ème année Université Paris Sud - Paris XI, 2014
- [3] Alain Ricaud "Systèmes photovoltaïques » Polytech' Savoie, 2011.
- [4] Adnan Jouni "Le photovoltaïque" meetMED training 2020, Tunis.
- [5] Belhadj Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008
- [6] Jordana Bratt, "grid connected pv inverters: modeling and simulation", Mémoire de Master, Université de San Diego State, 2011
- [7] Boukhalifa Saïda "Etude d'un système de pompage photovoltaïque" Mémoire Magister, USTHB,2011
- [8] Cécile Miquel" Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental" Synthèse,HESPUL,2011
- [9] M.Angel Cid Pastor, „"Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïque Electroniques"" , Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [10] Z.Ayache , "Commande MPPT et Contrôle d'un système Photovoltaïque par la logique floue ", Université Djilali Liabès sidi Bel Abbès, Algeria.
- [14] Gernigon Véronique, "Utilisation de copolymères à blocs dans les cellules solaires organiques morphologie, transport de charges et conversion photovoltaïque", thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2012
- [15] Merabet Kamel, " commande mu d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension trlphasée", Université du Québec, 2011
- [16] Sobaihi Khaled, " Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du Point de Puissance Maximale (MPPT) a contre réaction de tension", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003
- [17] J.Pireaux,"Physique et énergie Travail sur les panneaux photovoltaïques", Université de Namur, 2007
- [18] Belkacem Mourad, Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Mémoire de master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID DE TLEMCEN, 2015.
- [19] Céline Bernard, Carolina Sebrao- Olivera, Bernard Laval, Clément Vaudouer, "panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue"2009
- [20] Cuong Hung Tran "Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement" thèse doctorat, Université de reims champagne-ardenne , 2019.

- [21] Xuan-Linh Dang. "Contribution à l'étude des système Photovoltaïque/Stockage distribués. Impact de leur intégration à un réseau fragile. Sciences de l'ingénieur". Ecole Doctorale Sciences Pratiques de Cachan, 2014.
- [22] Mohamed Redha Rezoug "Etude et Réalisation d'un système d'orientation et de conversion destiné à optimiser le rendement d'un système photovoltaïque", Thèse Doctorat, Université des frères Mentouri de Constantine, 2018.
- [23] Guellal Amar, Mokhtari Abderrahmane, Kherchi Mohamed , La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa ,2016.
- [24] Haroubia Mohamed, mémoire fin d'étude « Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque» UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA 2019.
- [25] Khenfer Riad "Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques" UNIVERSITE FERHAT ABBES - SETIF 1, 2015.
- [26] Maifi Lyes "Etude et modélisation d'un panneau solaire thermique photovoltaïque", thèse doctorat, Université des frères Mentouri de Constantine, 2018
- [27] Mohamed Ghebbache "STRATÉGIES DE COMMANDE D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉ AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DANS LE BUT D'OPTIMISER LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE", mémoire maitrise, L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, 2019
- [28] Bencherif Mohammed," Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension", thèse doctorat, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID TLEMCEN FACULTE DES SCIENCES DEPARTEMENT DE PHYSIQUE.
- [29] Issam Houssamo, "Contribution à l'étude théorique, à la modélisation et à la mise en œuvre d'un système multisource appartenant à un micro-réseau électrique. Considérations sur la qualité de l'énergie", thèse doctorat, UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE,2012.
- [30] Daoud Amine," Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire", thèse doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf,2013.