

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université de Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Électronique

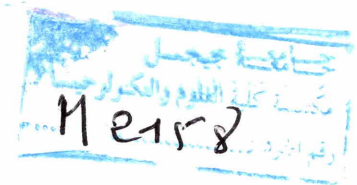


جامعة
جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Mémoire de fin d'études
en vue de l'obtention du diplôme
Master en Electronique
Option : Energies Renouvelables



Thème



**Modélisation et simulation d'un système
photovoltaïque pour le stockage d'énergie électrique**

Réalisé par :

M^{lle} *Fates Amira*
M^{lle} *Mouada Aldjia*

Encadré par :

Mr. *Toufik Benkendidah*

Promotion : 2014/2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله رب العالمين

"ربنا لا علم لنا إلا ما علمتنا إنك أنت العليم الحكيم"

سورة البقرة الآية '32'

"و ما اوتيتم من العلم إلا قليلا"

سورة الإسراء الآية '85'

صدق الله العظيم

Remerciement

Nos profonds remerciements vont à nos parents pour leur amour inestimable,

Leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su nous inculquer. A nos sœurs ainsi qu'à nos frères pour leur tendresse,

leurs complicité et leur présence.

Nos remerciements les plus chaleureux vont a notre encadreur Mr Toufik benkedidah , pour nous avoir offert ce thème, à la fois très intéressant et ambitieux.

Nous tenons à le remercier pour avoir dirigé nos travaux,

Sa connaissance et ses idées qui ont apporté des améliorations

importantes à ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement les membres du jury

qui nous font le grand honneur

d'évaluer ce travail.

Nos remerciements tous nos amis(es) et nos camarades pour leurs encouragements

et pour l'ambiance agréable tout au long

de ces années.

Nos remerciements vont enfin à toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à

l'élaboration de ce travail.

Sommaire

La liste des figures.....	i
La liste des tableaux.....	ii
Introduction générale.....	iii

Chapitre I : L'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction.....	1
I.2 L'effet photovoltaïque.....	1
I.3 Les cellules photovoltaïques.....	2
I.4 Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs.....	3
I.4.1 Dopage du silicium.....	4
I.4.2 Jonction P-N.....	4
I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule.....	5
I.5.1 Types de cellules photovoltaïques.....	6
I.5.2 Avantages et Inconvénients.....	10
I.6 Description Théorique et Modélisation de la Cellule PV.....	12
I.6.1 Cellule PV idéale - Modèle simple.....	12
I.6.2 Modèle réel d'une cellule PV.....	14
I.6.2.1 Modèle à exponentielle simple.....	15
I.6.2.2 Modèle à exponentielles doubles.....	15
I.7 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	16
I.8 Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	17
I.8.1 Courant de court-circuit (I_{sc}).....	17
I.8.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	17
I.8.3 Rendement énergétique.....	18
I.8.4 Facteur de forme.....	18
I.9 Le module photovoltaïque.....	19
I.9.1 Caractéristiques d'un module.....	19
I.9.2 Mise en parallèle/série.....	20
I.9.3 Conception d'un module.....	22
I.10 Conclusion.....	24

Chapitre II : Les systèmes photovoltaïques

II	Introduction	25
II.1	Les systèmes photovoltaïques	25
II.1.1	Le système autonome	25
II.1.2	Principe d'un système PV autonome.....	25
II.1.3	Composants d'un système PV Autonome	26
II.2	Générateur photovoltaïque et ses performances	27
II.2.1	Caractéristique Courant-Tension.....	28
II.2.2	L'Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I(V) et P(V).	29
II.3	Système de conversion	31
II.3.1	Le convertisseur continu-continu	31
II.3.2	Le convertisseur continu- alternatif.....	31
II.4	Système de stockage	32
II.4.1	Stockage de l'énergie	32
II.4.2	Autonomie (sans apport solaire)	32
II.4.3	Principe du couplage photo-générateur/batterie.....	33
II.4.4	Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système.....	33
II.4.5	Principales caractéristiques des accumulateurs.....	34
II.5	Conclusion	35

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque autonome

III.1	Introduction.....	37
III.2	Simulation à l'aide de Simulink.....	37
III.2.1	Création des schémas blocs.....	38
III.3	Cellule solaire	40
III.4	Module photovoltaïque	41
III.4.1	Les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module à l'état standard.....	43
III.5	Comportement du module sous l'influence de la température et de l'éclairement.....	44
III.5.1	Flux lumineux	44
III.5.2	Influence de la température.....	46
III.6	Groupement des modules PV.....	47
III.6.1	Groupement série des modules PV	47
III.6.2	Groupement parallèle des modules PV	48
III.6.3	Association mixte (série /parallèle).....	49
III.6.3.1	Association mixte de 6 modules (3 séries-2parallèles)	49
III.6.3.2	Association mixte de six modules (2 séries-3 parallèles).....	51
III.7	Simulation de la Cellule Photovoltaïque.....	52
III.8	L'influence de la résistance série RS	53
III.9	L'influence de la résistance parallèle RP	54
III.10	Conclusion.....	55

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 L'influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques	56
IV.1.1 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ et $p(V)$ pour un groupement série de six modules PV	56
IV.1.2 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ et $p(V)$ pour un groupement parallèle de six modules PV	57
IV.2 L'influence de la température sur $I(V)$ pour un groupement série de six modules.....	58
IV.2.2 L'influence de la température sur $I(V)$ pour un groupement parallèle.....	59
IV.3 L'influence de la résistance RS	60
IV.4 L'influence de la résistance RP	61
IV.5 Discussions	62
IV.6 Conclusion.....	63

Liste des figures

Figure I.1: L'effet photovoltaïque.....	2
Figure I.2: Représentation schématique d'une cellule PV.....	3
Figure I.3: Jonction P-N.....	5
Figure I.4: Collision entre un photon et un atome.....	6
Figure I.5: Cellule en silicium monocristallin.....	7
Figure I.6: Cellule en silicium polycristallin.....	7
Figure I.7: Cellule en silicium amorphe.....	8
Figure I.8: Cellule triple-jonction.....	9
Figure I.9: Cellule PV organique (CEA).....	9
Figure I.10: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge.....	12
Figure I.12: Schéma électrique d'une cellule solaire idéal.....	14
Figure I.13: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (modèle exponentielle simple).....	15
Figure I.14: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (exponentielle double).....	15
Figure I.15: Schéma équivalent électrique de la cellule PV.....	16
Figure I.16: Module du photovoltaïque.....	19
Figure I.17: Caractéristique d'un groupement série de ns cellules identiques.....	20
Figure I.18: Caractéristique d'un groupement constitué de np cellules identiques en parallèle.....	21
Figure I.19: Schéma d'un module photovoltaïque.....	22
Figure I.20: caractéristique I-V d'une cellule PV.....	23
Figure II.1: Exemple de la structure d'un système PV autonome.....	26
Figure II.2: Composants d'un système PV Autonome.....	27
Figure II.3: Caractéristique I (V) d'un module photovoltaïque.....	28
Figure II.4: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V).....	29
Figure II.5: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).....	29
Figure II.6: L'influence de la température sur la caractéristique I(V).....	30
Figure II.7: L'influence de la température sur la caractéristique P(V).....	30
Figure II.9: Connexion des batteries.....	34

Figure III.1: Liste de Simulink.....	38
Figure III.2: Caractéristique I(V) de la cellule.....	40
Figure III.3: Caractéristique P(V) d'une cellule PV.....	41
Figure III.5: Module ECEN 2060.....	42
Figure III.6: Paramètres des fonctions.	42
Figure III.7: Schéma bloc d'un module PV.	43
Figure III.8: Caractéristique I(V) du module ECEN2060.....	43
Figure III.9: Caractéristique P(V) du module ECEN2060.....	44
Figure III.10: Groupement série de six modules pour des différentes valeurs de l'éclairement.....	45
Figure III.11: Groupement parallèle de six modules pour de différentes valeurs de l'éclairement.....	46
Figure III.12: Groupement série de six modules PV.....	47
Figure III.13: Caractéristique I(V) du groupement de six modules.....	47
Figure III.14: Caractéristique P(V) du groupement de six modules.....	48
Figure III.15: Groupement parallèle de six modules PV.....	48
Figure III.16: Caractéristique I(V).....	49
Figure III.17: Association mixte de six modules PV.....	49
Figure III.18: Caractéristique I(V) de l'association mixte de 6 modules.....	50
Figure III.19: Caractéristique P(V) d'une association mixte de six modules.....	50
Figure III.20: Association mixte de six modules PV (2 séries-3 parallèles).....	51
Figure III.21: Caractéristique I(V) d'une association mixte de six modules (2séries-3parallèles).....	51
Figure III.22: Caractéristique P(V) d'une association mixte de six modules (2séries-3parallèles).....	52
Figure III.23: Groupement du module pour différente valeur de R_S	53
Figure III.24: La variation de R_s	54
Figure III.25: Groupement des modules pour différente valeur de R_p	54
Figure III.26: Variation de R_p	55
Figure IV.1: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V).....	56
Figure IV.2: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).....	57

Figure IV.3: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ pour un groupement parallèle.....	57
Figure IV.4: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ pour un groupement parallèle.....	58
Figure IV.5: Caractéristique $I(V)$ à température variable pour un groupement série.....	58
Figure IV.6: Caractéristique $P(V)$ à température variable pour un groupement série.....	59
Figure IV.7: Caractéristique $I(V)$ à température variable pour le groupement parallèle.....	59
Figure IV.8: Caractéristique $I(V)$ à température variable pour le groupement parallèle.....	60
Figure IV.9: L'influence de RS sur la caractéristique $I(V)$	60
Figure IV.10: L'influence de RS sur la caractéristique $P(V)$	61
Figure IV.11: Influence de RP sur la caractéristique $I(V)$	61
Figure IV.12: L'influence de RP sur la caractéristique $P(V)$	62

Liste des tableaux

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des différentes cellules	11
Tableau III.4: Caractéristiques électriques du module ECEN 2060.....	42
Tableau IV.1: L'influence de la température sur les caractéristiques du générateur à un ensoleillement donné.....	63
Tableau IV.2: L'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du générateur à une température donnée.....	64

Nomenclature

- I_{ph} : Photo-courant (A).
- V_D : Tension aux bornes de la cellule.
- E : L'éclairement (W/m^2).
- R_p : Résistance parallèle Shunt (Ω).
- R_s : Résistance série(Ω)
- I_D : Courant à travers la diode (A).
- I_{cell} : Courant délivré par la cellule(A)
- I_{load} : Courant à travers la charge (A).
- V_{load} : Tension aux bornes de la charge (V).
- P_m : Puissance maximale produite (W).
- I_m : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
- V_m : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
- P_c : Puissance crête (W).
- FF : Facteur de forme.
- P_{max} : Puissance maximale (W).
- I_{cell} : Courant fourni par la cellule (A).
- V_{cell} : Tension aux bornes de la cellule (V).
- I_{cc} : Courant de court-circuit (A).
- V_{co} : Tension de circuit-ouvert (V).
- I_{opt} : Courant optimal (A).
- V_{opt} : Tension optimale (V).
- V_{th} : Tension thermique (V).
- q : Charge électrique élémentaire ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

- k : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$).
- T : Température absolue de la cellule (K).
- I_s : Courant de saturation de la jonction non éclairée (A).
- e : Charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$)
- V : Tension à la borne de la diode
- I_{sat} : Le courant de saturation.
- I_{pv} : Le courant fourni par la cellule, lorsqu'elle fonctionne en générateur
- V_{pv} : La tension aux bornes de cette même cellule.
- I_{ph} : Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit).
- R_{shu} : La résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction(Ω).
- R_{ser} : La résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions (Ω).
- \square : Rendement énergétique.

Abréviation

- **PV** : Panneau Photovoltaïque.
- **GPV** : Générateur Photovoltaïque.
- **MPPT** : Maximum Power Point Tracking.
- **DC** : Courant continu (Direct Current).
- **AC** : Courant alternatif (Alternative Current).

Dans la plupart des pays africains, rendre l'électricité disponible dans le milieu rural a toujours été un enjeu socio-économique important. Ce problème d'accès à l'électricité est incompatible avec un développement équilibré de ces pays et constitue un des facteurs favorisant l'exode rural. C'est donc un défi de mettre à la disposition des populations rurales une source d'énergie capable de stimuler l'activité économique et de conduire à une amélioration de leurs conditions de vie.

Toutefois, la satisfaction de la demande d'électricité des populations rurales par la liaison au réseau national se heurte à plusieurs difficultés: la faible densité et la dispersion de la population, la faiblesse des revenus, l'inexistence ou la faiblesse de structures collectives au niveau villageois. Aussi, il est nécessaire d'explorer de nouvelles solutions possibles pour assurer une électrification rationnelle du monde rural, par exemple l'exploitation du potentiel solaire abondant dont disposent ces pays.

L'énergie solaire photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible.

La performance d'un système photovoltaïque dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système photovoltaïque doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. L'énergie produite par un module PV n'est pas constante durant toute la journée, elle dépend de plusieurs facteurs tels que l'ensoleillement et la température qui sont très fluctuants d'une saison à l'autre où même d'un instant à l'autre. Pour chaque ensoleillement et température donnés, la caractéristique puissance-tension passe par un maximum. Pour l'extraire, il faut faire une poursuite en temps réel.

L'objectif principal de cette étude est de simuler les performances d'une seule composante du système photovoltaïque, à savoir le générateur photovoltaïque. C'est l'élément le plus onéreux et le plus sensible aux conditions climatiques sur le site. Les méthodes d'optimisation du générateur photovoltaïque sont d'une grande utilité pour les fabricants n'ayant pas des informations détaillées sur les futurs sites d'implémentation de leurs produits.

Le manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre expose d'une manière générale toutes les notions définissant un système photovoltaïque est tout ses éléments constituant en commençant par la cellule (élément de base), le module pour terminer avec le panneau solaire. Nous décrivons aussi les lois mathématiques régissant le fonctionnement de la cellule, par la suite la modélisation des deux cas idéal et réel à fait l'objet d'étude afin de choisir le modèle le plus adéquat pour notre travail.

Lors du deuxième chapitre nous avons mené une étude exposant le fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome ainsi que tous les éléments permettant la simulation d'un générateur photovoltaïque, suivit par le bloc convertisseur et la manière de stocker l'énergie produite par le biais des accumulateurs.

L'essentiel du travail effectué le long du troisième chapitre touche principalement la modélisation et la simulation du comportement d'un générateur photovoltaïque sous l'environnement MATLAB/Simulink. Par conséquent, l'ensemble des configurations possibles des différents groupements ainsi que l'influence des résistances série et parallèle ont fait l'objet de la suite de ce chapitre.

Durant le quatrième chapitre, nous exposerons tous les résultats obtenus que se soit à partir des différentes configurations modélisées sous MATLAB/Simulink où bien ceux déduis directement des programmes MATLAB. Nous avons commencé tout d'abord par l'influence de l'éclairement, puis celle de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du générateur modélisé. Ensuite, nous avons illustré l'impact des deux résistances montées en série et en parallèle dans le cas d'un modèle réel sur la puissance de sortie du générateur. Finalement, nous avons terminé notre travail avec une conclusion générale suivie de quelques perspectives qui peuvent être l'objet de futurs travaux complémentaires.

Chapitre I

I.1 Introduction	1
I.2 L'effet photovoltaïque	1
I.3 Les cellules photovoltaïques.....	2
I.4 Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs	3
I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule	5
I.6 Description Théorique et Modélisation de la Cellule PV	12
I.7 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	16
I.8 Paramètres d'une cellule photovoltaïque	17
I.9 Le module photovoltaïque.....	19
I.10 Conclusion	24

L'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée qui pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, les scientifiques cherchent depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante dont elle est diffusée sur l'ensemble de la planète à travers l'effet photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité transmise est encore assez importante quand elle atteint le sol. On peut ainsi compter jusqu'à 10 000 W/m² crête dans les zones tempérées et 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée. [1-3].

Par la suite, nous rappelons l'ensemble des définitions relatives à tous les éléments constituant d'un système photovoltaïque en passant par le plus petit de ces éléments qui est la cellule photovoltaïque jusqu'au générateur.

I.2 L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : photos équivalent à la lumière et du nom de famille du physicien italien Alessandro Volta qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt [3].

Ce phénomène fut observé la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toute fois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [1-3].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce phénomène, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être arrachés, si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau donc l'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons arrachés créent une tension électrique continue et faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique d'où l'effet photovoltaïque.

Ce dernier constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [5-3].

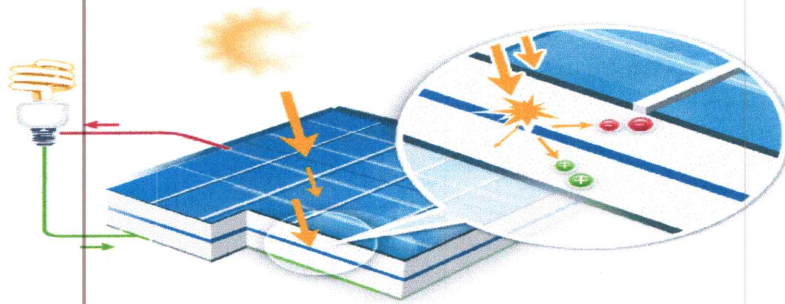


Figure I.1: L'effet photovoltaïque.

I.3 Les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, une fois exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque à l'origine du phénomène. Le courant ainsi obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente, et la cellule photovoltaïque délivre une tension continue. Tout comme l'œil humain qui n'est sensible qu'à une partie du spectre électromagnétique, la cellule n'absorbe qu'une partie du rayonnement solaire, avec différents rendements suivant les technologies utilisées.

La fabrication des cellules s'effectue à partir d'un ensemble de lingots en silicium découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore.

Le dispositif de transformation est basé sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif [2-3].

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant; d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/trous sera donc nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N.

Une cellule solaire est alors obtenue par la mise en place d'une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille appelés contact avant et contact arrière, sont déposés (Figure (I.1)) [2-3].

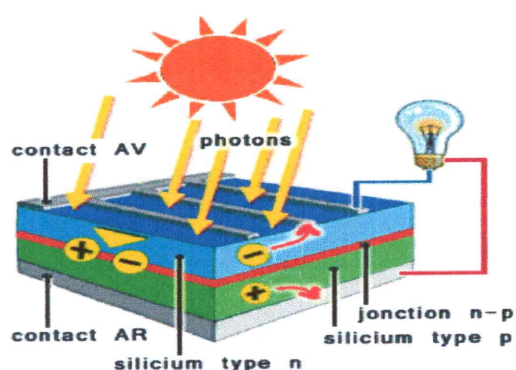


Figure I.2: Représentation schématique d'une cellule PV.

I.4 Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. Les semi-conducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser que la direction que peut prendre ce courant [5-6]. Dans un semi-conducteur, un courant électrique est favorisé par deux types de porteurs : les électrons et les trous.

La propagation par l'intermédiaire d'électrons est similaire à celle d'un conducteur classique : des atomes fortement ionisés passent leurs électrons en excès le long du conducteur d'un atome à un autre, depuis une zone ionisée négativement à une autre moins ionisée.

- La propagation par l'intermédiaire de trous est différente : dans ce cas, les charges électriques voyagent d'une zone ionisée positivement à une autre moins ionisée par le

mouvement d'un trou créé par l'absence d'un électron dans une structure électrique quasi pleine.

Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant avec des impuretés. Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P.

I.4.1 Dopage du silicium

Les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome de Si voisin à travers le dopage de Si s'effectue de deux manières :

Dopage de type N : Si un atome ayant cinq électrons de valence comme le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb) est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron faiblement lié à l'atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse le nombre de trous.

Dopage de type P : Si un atome trivalent (bore (Br) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents et l'atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons [5].

I.4.2 Jonction P-N

La jonction P-N est à la base de la plupart des applications des semi-conducteurs. Elle est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N. Dans la zone de contact, les électrons libres du segment N pénètrent dans le segment P et se recombinent avec les trous. De même, les trous des segments P pénètrent dans le segment N et se recombinent avec les électrons.

Ce phénomène est appelé diffusion. Il en résulte, au niveau de la transition des segments, l'apparition d'une zone exempte de charges mobiles appelée Zone de transition (aussi nommée Zone de Charge d'Espace ou Zone d'épuisement), où seuls demeurent les atomes d'impuretés fixes (ions accepteurs dans le segment P, ions donneurs dans le segment N) et les atomes de semi-conducteur neutres.

Les charges constituées par les ions fixes sont à l'origine d'un champ électrique E dans la zone de transition, et par la même d'une différence de potentiel V_0 (appelée barrière de potentiel) aux bornes de cette zone. Cette dernière possède une grande impédance. Le champ électrique E tend à maintenir les porteurs majoritaires dans leurs régions respectives et s'oppose ainsi à la cause qui lui donne naissance, ce qui conduit à un état d'équilibre [6].

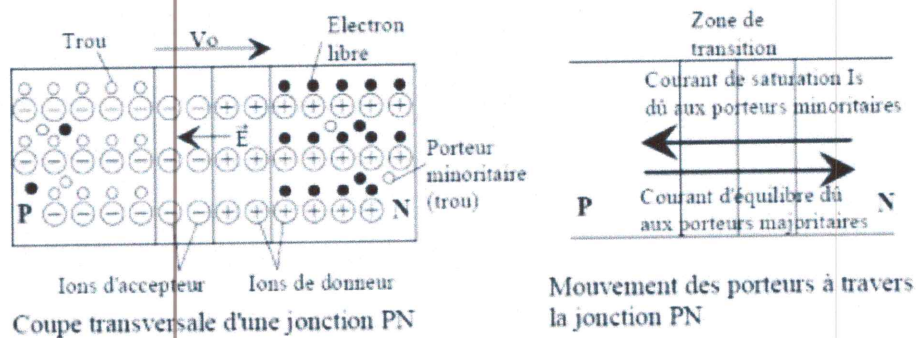


Figure I.3: Jonction P-N.

Cependant, le champ électrique E n'interdit pas le passage des porteurs minoritaires présents dans les segments de type P et N. Ce mouvement est toutefois équilibré par les porteurs majoritaires qui possèdent l'énergie nécessaire au franchissement de la barrière de potentiel [6].

I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule

Une cellule photovoltaïque, aussi appelée photopile, est la juxtaposition de deux semi-conducteurs, l'un dopé P et l'autre dopé N. À la jonction des deux couches se forme un champ électrique résultant du phénomène décrit précédemment. Ce champ électrique existe même si la cellule est dans l'obscurité. Sous un ensoleillement plus ou moins important, les photons ou grains de lumière, venant avec une énergie suffisante entrent en collision avec les atomes du Cristal (figure I.4). Ils parviennent à faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur, créant ainsi des paires électrons-trous. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N [7-8].

Ainsi, une différence de potentiel entre les deux faces de la cellule est créée. Les grilles métalliques à l'avant et à l'arrière de la cellule PV collectent les électrons et les trous qui vont donc fournir à un circuit extérieur le courant électrique produit [9]. Si le photon est

très énergétique, il ne peut tout de même extraire qu'un seul électron et l'énergie excédentaire est perdue en chaleur.

La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du millimètre [6].

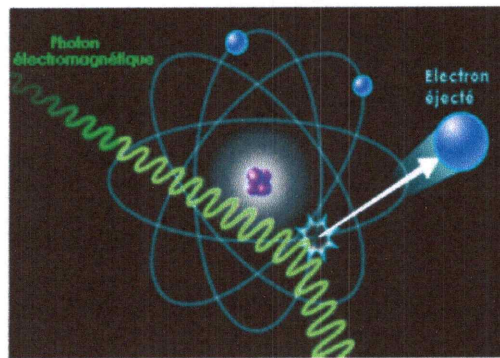


Figure I.4: Collision entre un photon et un atome.

I.5.1 Types de cellules photovoltaïques

Il existe trois types de cellules photovoltaïques:

☀ 1ère génération: cellules cristallines

- **la cellule monocristalline** : Ce sont des photopiles de la première génération, c'est-à-dire des dispositifs permettant de convertir de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Elle a un rendement d'environ 145 Wc/m^2 et elle pèse 12 kg/m^2 . Le watt crête est une unité représentant la puissance électrique maximale qu'une cellule photovoltaïque peut fournir dans des conditions standards, à température ambiante de 25° . Pour donner un ordre d'idée, 1 kWc représente la puissance de 10 m^2 de modules solaires avec une technologie courante, cela correspond chez nous à 1100 kWh .



Figure I.5: Cellule en silicium monocristallin.

- **la cellule polycristalline** : Le wafer (correspond à un matériau semi-conducteur utilisé ici pour désigner le silicium) est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Elle produit peu de déchets de coupe et nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie pour sa fabrication. Son rendement est d'environ 130 Wc/m² et pèse 12 kg/m².

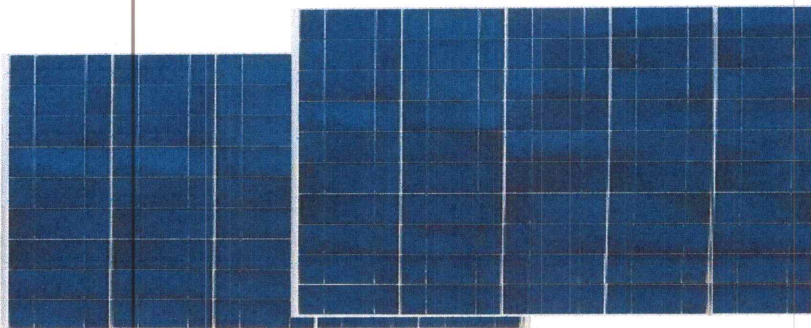


Figure I.6: Cellule en silicium poly-cristallin.

🚩 2ème génération: couches minces

Appelées aussi cellules silicium amorphe en couche mince. Ce sont des modules encapsulés pour résister aux intempéries, montés sur un film d'acier inoxydable, laminés et intégrés à une membrane étanche. Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule a une couleur grise très foncée ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites solaires.

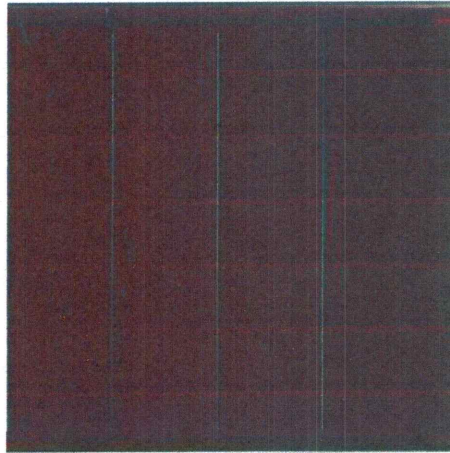


Figure I.7: Cellule en silicium amorphe.

Il existe d'autres types de cellules couches minces : tellure de cadmium (**CdTe**) et le cuivre-indium-sélénium (**CIS**). Le type **CdTe** présente de bonnes performances mais la toxicité du cadmium reste problématique pour sa production.

Tandis que les cellules **CIS** représentent la nouvelle génération des cellules solaires sous forme de films minces. Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules **CIS** sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

✚ 3ème génération: multi-jonction à concentration

Pour améliorer les rendements des cellules, la recherche se tourne actuellement vers plusieurs pistes dont notamment :

- Cellules multicouches : superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire). Ce type de cellules est déjà commercialisé, mais principalement pour des applications spatiales. Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (de l'ordre de 30 %).

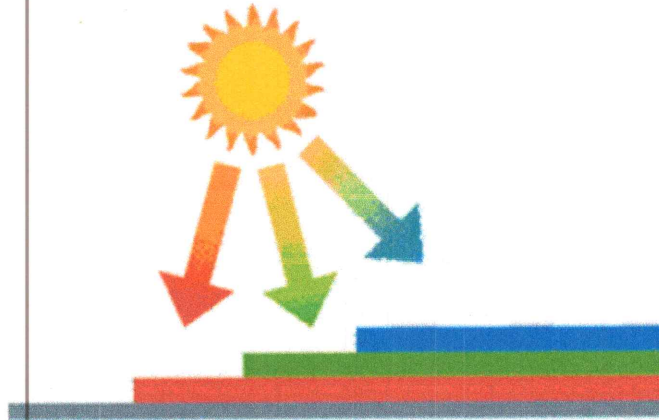


Figure I.8: Cellule triple-jonction.



- Cellules à concentration (permet d'utiliser des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule).
- Cellules organiques: font aujourd'hui l'objet d'étude active et restent actuellement un sujet de recherche. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules humide et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules plastiques. Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).

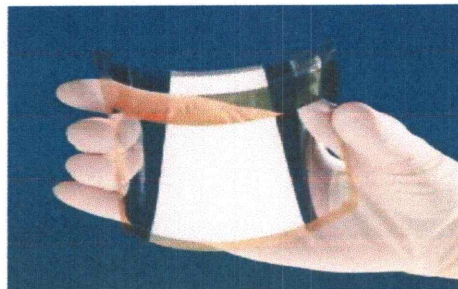


Figure I.9: Cellule PV organique (CEA).

Les nanosciences ouvrent cependant de nouvelles voies à leurs améliorations. Leur avenir industriel n'est pas encore établi mais ces technologies ouvriraient la voie à des modules à très bas coût, biodégradable et pouvant être intégrés à toutes formes de surface. Par exemple des encres photovoltaïques sont actuellement étudiées. Ces encres pourraient être intégrées à un très large éventail de matériaux [1].

Il existe principalement trois types de cellules photovoltaïques :

- organiques moléculaires.
- organiques à base de polymères.
- hybrides.

I.5.2 Avantages et Inconvénients

Toutes ces cellules présentent des avantages et des inconvénients, parmi celles qui produisent un rendement fort sous ensoleillement faible, on cite le cas des cellules amorphes. Par contre les cellules monocristallines sont caractérisées par un rendement élevé en plein soleil.

Le tableau I.1 résume la majorité des avantages et inconvénients pour chaque type cité précédemment.

Type de cellules	Avantages	Inconvénients
Monocristallines	-Très bon rendement (environ 150 WC/m ²) -Durée de vie importante (+/- 30 ans)	-Coût élevé -Rendement faible sous un faible éclairement.
Poly-cristallines	-Bon rendement (environ 100 WC/m ²) -Durée de vie importante (+/- 30 ans) -Meilleur marché que le monocristallin	-Rendement faible sous un faible éclairement.
En couche minces : CIS	-Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince. -Permet de s'affranchir du silicium.	-Les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.

I.6 Description Théorique et Modélisation de la Cellule PV

I.6.1 Cellule PV idéale - Modèle simple

Comme il a déjà été mentionné, dans une cellule solaire illuminée, il se crée des porteurs de charges libres. Le nombre de ces porteurs de charge est proportionnel à l'intensité du rayonnement incident. Il en est de même pour le photo-courant à l'intérieur de la cellule. Par conséquent, une cellule PV idéale peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure I.10. Ce circuit est constitué d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement [10]. Une résistance ajustable est connectée à la cellule en guise de charge. L'utilisation du circuit électrique équivalent permet de modéliser les caractéristiques ou le comportement de la cellule PV [7-13].

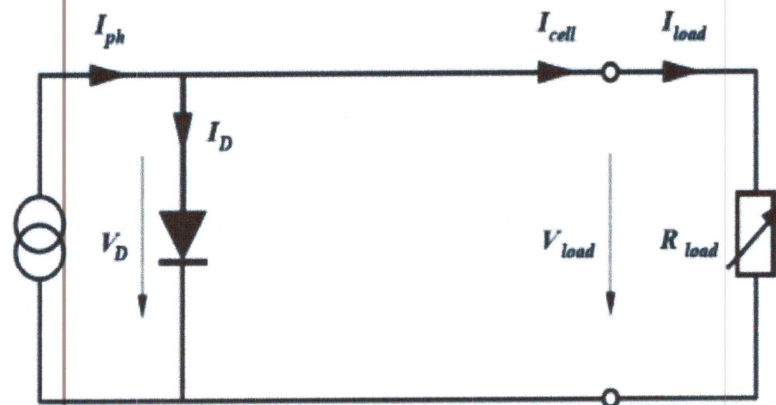


Figure I.10: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge.

Avec :

- I_{ph} :Photo-courant (A).
- V_D :Tension aux bornes de la cellule (V).
- I_D :Courant à travers la diode (A).
- I_{cell} :Courant délivré par la cellule (A).
- I_{load} :Courant à travers la charge (A).
- V_{load} :Tension aux bornes de la charge (V).

Le modèle mathématique d'une cellule PV idéale illuminée est donné par la Loi de Kirchoff :

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{ph}} - I_{\text{D}} = I_{\text{ph}} - I_{\text{S}} \left(e^{\frac{q \cdot V_{\text{cell}}}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (\text{I.1})$$

Avec :

I_{cell} : Courant fourni par la cellule [A].

V_{cell} : Tension aux bornes de la cellule [V].

q : Charge électrique élémentaire ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

k : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

T : Température absolue de la cellule [K].

I_{S} : Courant de saturation de la jonction non éclairée [A].

n : Facteur d'idéalité de la jonction.

Le courant de saturation I_{S} caractérise le phénomène de diffusion des porteurs minoritaires dans la zone de déplétion.

Lorsque les bornes du circuit sont court-circuitées ($R_{\text{load}} = 0$), la tension de sortie est nulle et, d'après l'équation (I.1), le courant fournit par la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé courant de court-circuit I_{sc} (short-circuit-current).

$$I_{\text{sc}} = I_{\text{ph}}$$

Pour une charge infiniment grande (circuit ouvert), le courant de sortie est nul et la tension aux bornes de la cellule est maximale. Cette tension est appelée tension de circuit ouvert V_{oc} (open-circuit-voltage). A partir de l'équation (I.1), on peut écrire :

$$V_{\text{oc}} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{\text{ph}}}{I_{\text{S}}} - 1 \right) = V_{\text{th}} \ln \left(\frac{I_{\text{ph}}}{I_{\text{S}}} - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

$V_{\text{th}} = \frac{nkT}{q}$: est appelée tension thermique.

V_{oc} : est déterminé à partir des propriétés du semi-conducteur, car il dépend de du courant de saturation I_{S} qui lui-même dépend de la densité de courant de saturation du matériau utilisé.

Lorsque la cellule est éclairée, le courant circulant dans celle-ci devient :

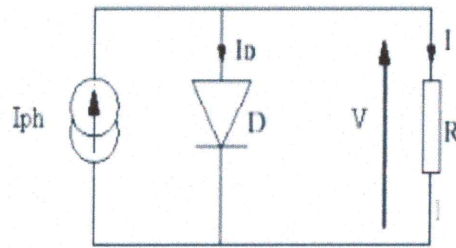


Figure I.12: Schéma électrique d'une cellule solaire idéal.

$$I = I_{ph} - I_D \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (I.3)$$

Avec :

I_{ph} : Photo-courant.

I_D : Courant traversant la diode.

q : Charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

k : Constante de Boltzmann.

I_S : Courant de saturation.

V : Tension aux bornes de la diode.

T : Température absolue.

I.6.2 Modèle réel d'une cellule PV

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres doivent être pris en considération. Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent constitué par un générateur de courant, et une diode deux résistances.

I.6.2.1 Modèle à exponentielle simple

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le schéma électrique équivalent se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt, une résistance série, et une diode en parallèle qui modélise jonction P-N.

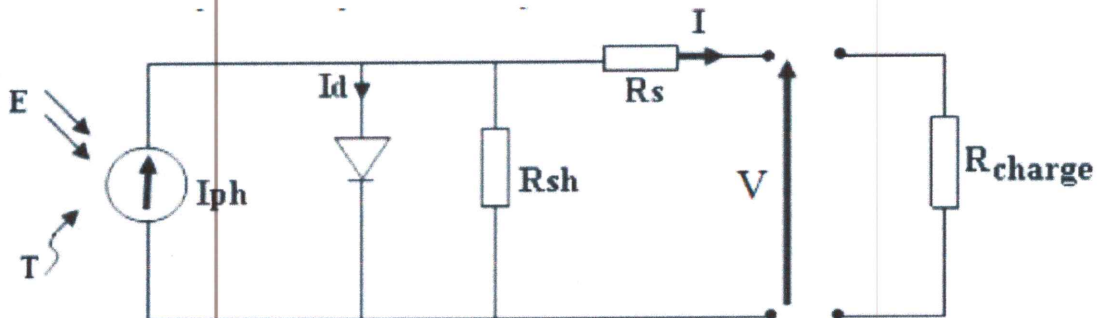


Figure I.13: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (modèle exponentielle simple).

I.6.2.2 Modèle à exponentielles doubles

Le module photovoltaïque à deux diodes se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux. Les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt R_{sh} , et une autre résistance série R_s , deux diodes modélisent la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires.

Le terme traduit la recombinaison de porteurs au sein de la zone de charge d'espace et n_1 est le facteur d'idéalité de cette diode, de même correspond le courant de diffusion dans la base de l'émetteur, le paramètre est appelée facteur d'idéalité de la diode.

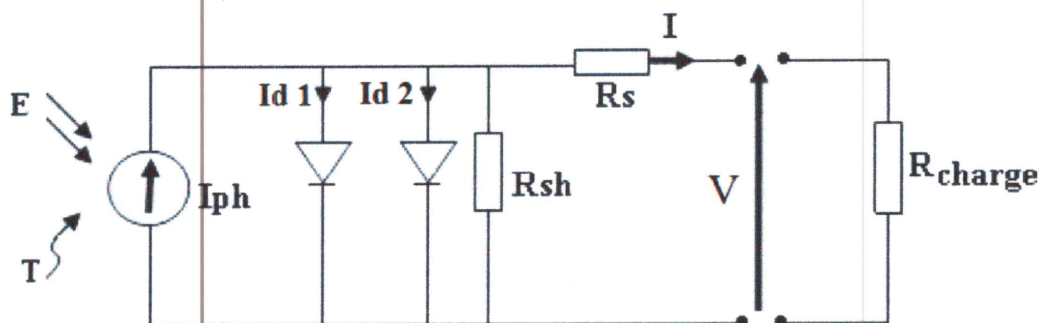


Figure I.14: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (exponentielle double).

I.7 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure I.15 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule [1]:

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

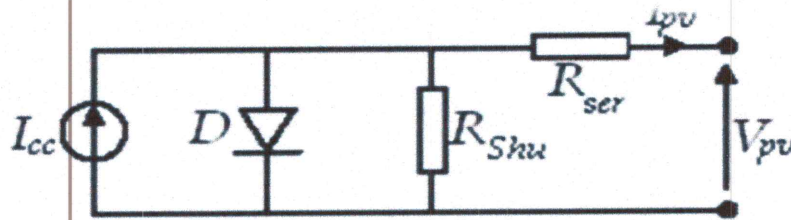


Figure I.15: Schéma équivalent électrique de la cellule PV.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par [1-3]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv} R_{shu}))}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} R_{shu})}{R_p} \quad (I.4)$$

Avec :

I_s : Courant de saturation.

K : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

T : Température effective des cellules en Kelvin(K).

e : La charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C).

n : Le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$).

I_{pv} : Le courant fourni par la cellule, lorsqu'elle fonctionne en générateur.

V_{pv} : La tension aux bornes de cette même cellule.

I_{ph} : Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit).

R_{shu} : La résistance parallèle caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R_s : La résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

I.8 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels seront décrits par la suite :

I.8.1 Courant de court-circuit (I_{sc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (nulle et infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} .

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{e(I_{sc}R_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{(I_{sc}R_s)}{R_{shu}} \quad (I.5)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible, on peut négliger le terme

$$I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{sc}R_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \text{ devant } I_{ph}.$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors donnée par :

$$I_{sc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{shu}}\right)}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement

$$I_{sc} = I_{ph}).$$

I.8.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{eV_{pv}}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} = 0 \quad (I.6)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{oc} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.7)$$



I.8.3 Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_m V_m}{P_{inc}} \quad (I.8)$$

Avec η est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

I.8.4 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule, et le produit du courant de court-circuit par la tension de circuit-ouvert (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes, et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites et Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.9)$$

I.9 Le module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit I_{cc} ou la tension en circuit ouvert V_{co} . Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les technologies. Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable.

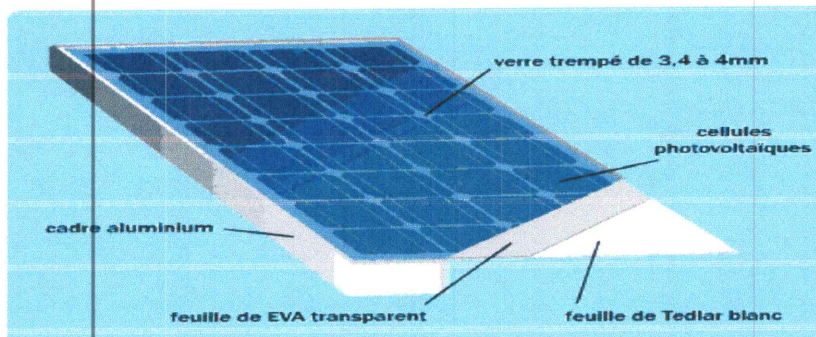


Figure I.16: Module du photovoltaïque.

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de Conversion définit comme étant l'énergie électrique produite / énergie solaire incidente de l'ordre de 15 à 18%), poly cristallin (28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15 %) ou silicium amorphe (13% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %) délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100 Wc [23].

I.9.1 Caractéristiques d'un module

Voici la description des paramètres d'un module:

- **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de (1000 W/m²).
- **La caractéristique I(V)**: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit I_{sc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairage " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimal (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

I.9.2 Mise en parallèle/série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La caractéristique d'un groupement de n_s cellules PV identiques est présentée sur la Figure I.17 [1].

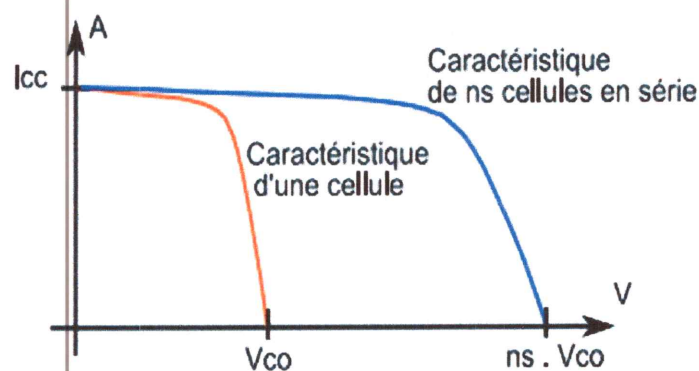


Figure I.17: Caractéristique d'un groupement série de n_s cellules identiques.

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La caractéristique résultant d'une mise en parallèle de np cellule PV identiques en série est présentée sur la Figure I-1 [2-3].

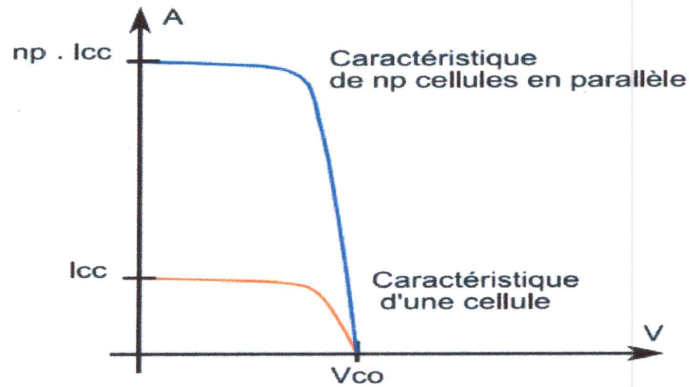


Figure I.18: Caractéristique d'un groupement constitué de np cellules identiques en parallèle.

En résumé, pour tracer la caractéristique équivalente d'un groupement de cellules PV :

- En parallèle, il faut se placer à tension donnée et sommer les courants de chaque cellule. Il faut renouveler cette opération pour toutes les tensions entre 0V et V_{co}
- En série, il faut cette fois-ci se placer à courant donné et sommer les tensions des différentes cellules à ce courant [2-3].

I.9.3 Conception d'un module

Au sein d'un module PV les cellules interconnectées sont rassemblées en bloc de x cellules : donc un module PV est constitué de la mise en série de a blocs et de b blocs en parallèle.

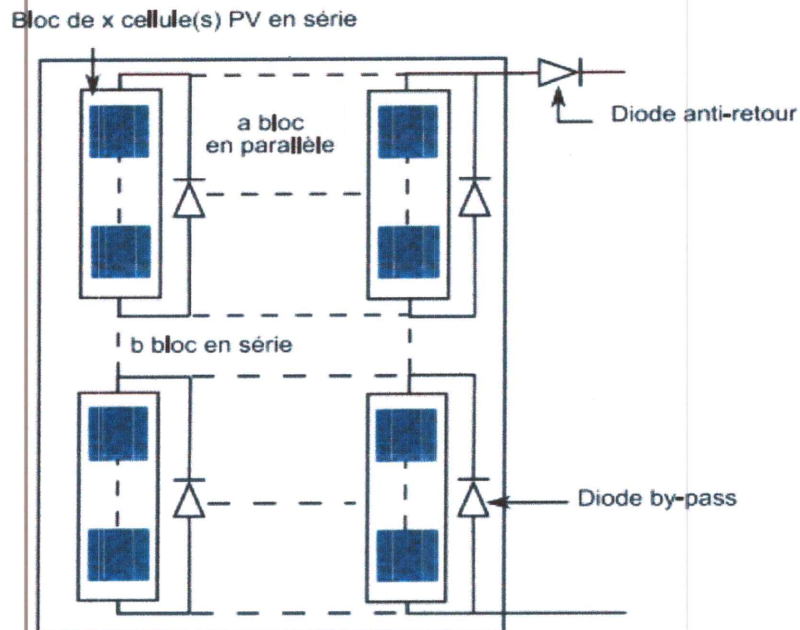


Figure I.19: Schéma d'un module photovoltaïque.

A l'origine, l'énergie solaire était réservée aux applications en sites isolés. La tension de fonctionnement de ces installations était donc imposée par la tension des batteries utilisées pour stocker l'énergie. Ces systèmes fonctionnant avec des batteries au plomb, leurs tensions étaient de 12, 24V ou 48V. Cette raison explique que la quasi-totalité des modules existants aujourd'hui aient encore une tension de sortie de 12V ou 24V.

Les modules étant conçus pour pouvoir fonctionner sur ces systèmes, ils ne sont en réalité qu'une mise en série de cellules pour obtenir la tension désirée, 36 cellules pour 12V ($b=2$) et 72 cellules pour 24V ($b=4$). Aujourd'hui, très peu d'études remettent ou ont remis en cause cette conception qui se retrouve non optimisée pour le fonctionnement connecté au réseau.

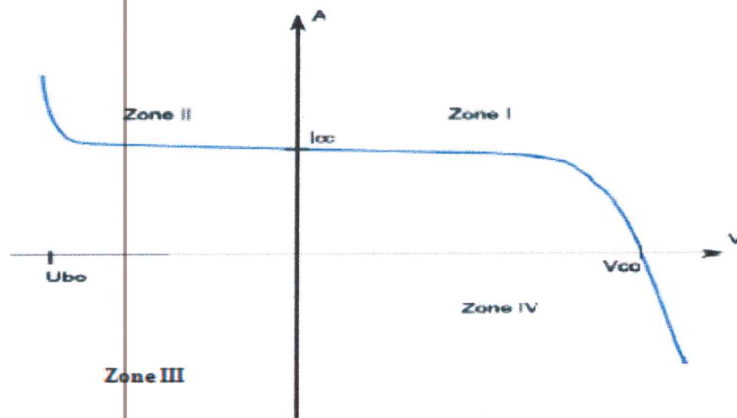


Figure I.20: caractéristique I-V d'une cellule PV.

La conception d'un module photovoltaïque impose de s'assurer que les composants de ce dernier ne risquent pas d'être détruits au cours d'un fonctionnement dans les quadrants 2 et 4. Dans ces zones les cellules PV fonctionnent en récepteurs et des risques de destruction existent. Pour se protéger de ces risques deux types de protection sont mis en place dans les installations photovoltaïques : la diode by-pass et la sécurité contre courant. De nouvelles architectures de modules sont présentées pour limiter les impacts des ombrages, mais ces solutions ne sont pas développées industriellement [3].

I.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions d'effet photoélectrique des semi-conducteurs, ainsi que le fonctionnement de la cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque. Nous avons vu que la cellule photovoltaïque peut être modélisée par un circuit simple. Ce dernier peut être schématisé de deux manières différentes à savoir le modèle idéal et celui réel qui traduit toutes les pertes dues soit aux résistances de matériaux soit aux pertes de fuites.

L'interconnexion des cellules photovoltaïques mise en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement.

2

Chapitre II

II Introduction.....	25
II.1 Les systèmes photovoltaïques.....	25
II.2 Générateur photovoltaïque et ses performances.....	27
II.3 Système de conversion	31
II.4 Système de stockage.....	32
II.5 Conclusion.....	35

Les systèmes photovoltaïques

II Introduction

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes de génération d'électricité autonomes qui utilisent des sources d'énergie renouvelables et locales. On y trouve parmi ces sources des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité provenant des sources d'énergie renouvelables est intermittente, dépendante des conditions climatiques.

Ces générateurs renouvelables sont couplés à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie (systèmes non autonomes).

II.1 Les systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée:

- Systèmes isolés et autonomes.
- Systèmes raccordés au réseau.

II.1.1 Le système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs qui se situent dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure II.1 qui représente l'exemple d'un système photovoltaïque autonome, un système de stockage est associé aux générateurs photovoltaïques pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production d'énergie.

II.1.2 Principe d'un système PV autonome

Une installation photovoltaïque désignée PV est dite autonome ou isolée lorsqu'elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système photovoltaïque autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Il se révèle particulièrement adapté pour des applications comme une pompe dans le jardin, l'éclairage en zone isolée, l'alimentation de bornes téléphoniques le long de l'autoroute, ... etc. Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause des contraintes techniques, soit pour des raisons économiques.

Le système autonome doit être capable de fournir du courant aux consommateurs pendant la période de l'année de moindre irradiation lumineuse. Si on aura besoin du courant toute l'année, la période de moindre irradiation est généralement l'hiver sur toute la planète.

Pendant cette période, il faudra plus de panneaux pour couvrir les mêmes besoins qu'en été. Les batteries donnent une autonomie au système pour des applications nocturnes ou quand les panneaux ne fournissent pas assez de courant [5].

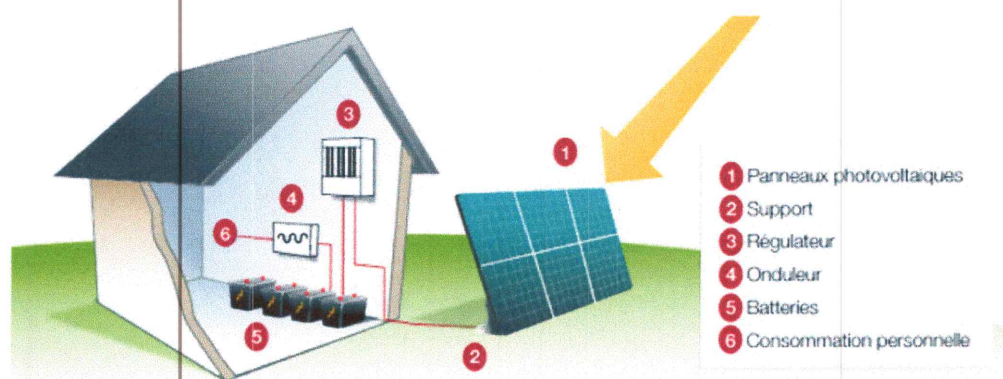


Figure II.1: Exemple de la structure d'un système PV autonome.

II.1.3 Composants d'un système PV Autonome

Tout système Photovoltaïque est composé essentiellement de :

- **Modules (ou panneaux) solaires :** Source d'énergie du système, les modules photovoltaïques produisent de l'énergie électrique à partir de la lumière solaire.
- **Régulateur :** stabilise l'énergie délivrée par le module solaire de manière à ce que celle-ci puisse être stockée dans des batteries et soit utilisable pour des applications en courant continu.
- **Batteries :** constituent le moyen de stockage pour entreposer l'énergie produite par les modules.
- **Onduleur :** transforme l'énergie DC disponible dans les batteries en énergie alternative 230V (AC = Alternative Current).
- **Consommateurs DC et AC :** En fonction des applications DC (12/24V) où AC (230V) peuvent être relié au système autonome comme charges.

Les modules solaires chargent un groupe de batteries. Ces dernières libèrent l'énergie au moment où celle-ci est demandée. Le régulateur règle le processus de chargement des batteries électroniquement. Ce groupement de batteries est prévu pour donner une meilleure autonomie au système. Cette autonomie doit être établie en fonction de l'énergie nécessaire (en nombre de Wh / jour) et du nombre de jours d'autonomie désiré.

D'une manière générale, un tel montage peut se schématiser comme suit:

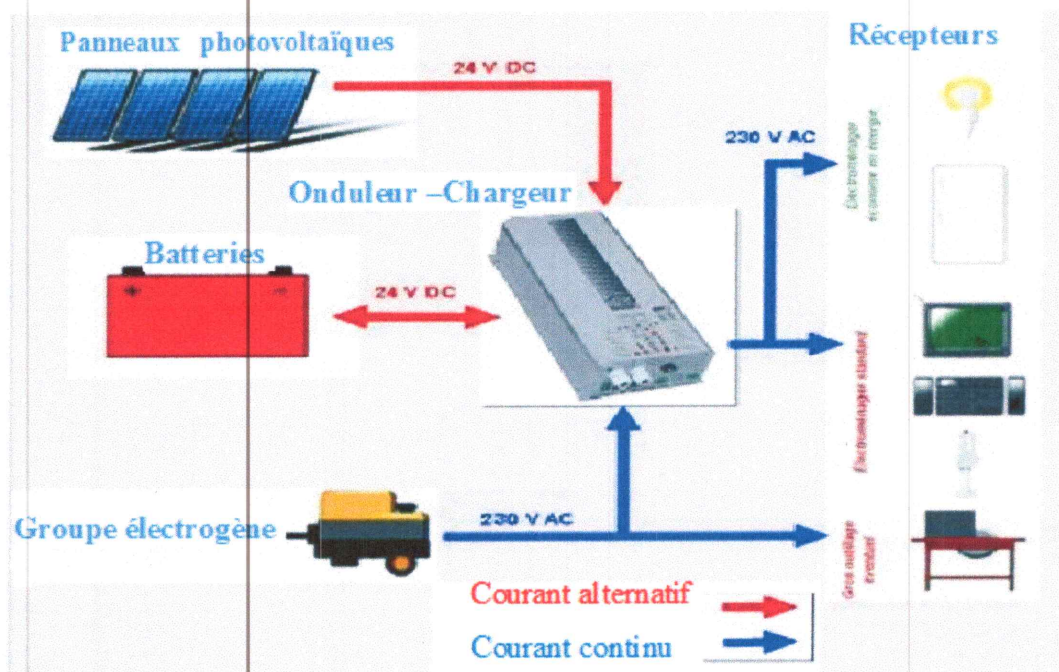


Figure II.2: Composants d'un système PV Autonome.

II.2 Générateur photovoltaïque et ses performances

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un champ photovoltaïque. Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne au fil du soleil, c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction directe de la puissance d'ensoleillement.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu ainsi produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Le module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit I_{cc} ou encore la tension de circuit ouvert désignée V_{co} .

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules Photovoltaïques raccordés en série et/ou en parallèle pour obtenir une puissance, un courant I_{cc} et une tension V_{co} désirés.

II.2.1 Caractéristique Courant-Tension

La figure (II.3) représente la courbe $I(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 à une température de 25°C .

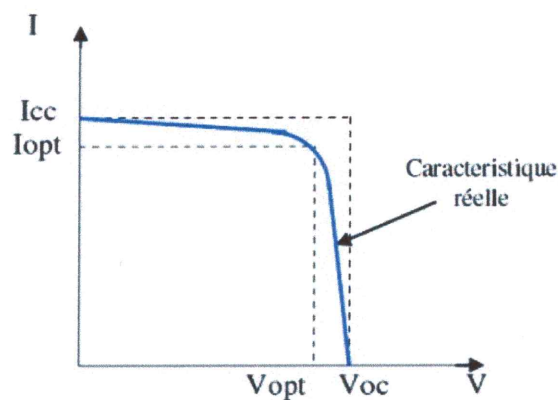


Figure II.3: Caractéristique $I(V)$ d'un module photovoltaïque.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m pour lequel cette dernière est supposée être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Et là, on tient à signaler l'importance de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_m .

II.2.2 L'Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I(V) et P(V).

Selon la figure (II.4) et à une température constante, on peut constater que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [3].

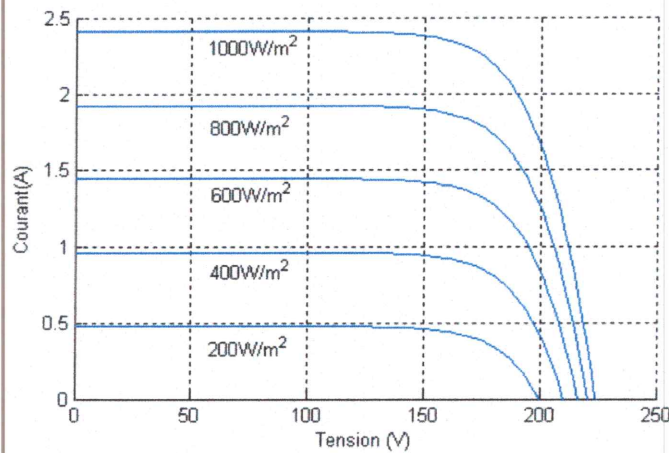


Figure II.4: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V).

La figure II.5 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) [3].

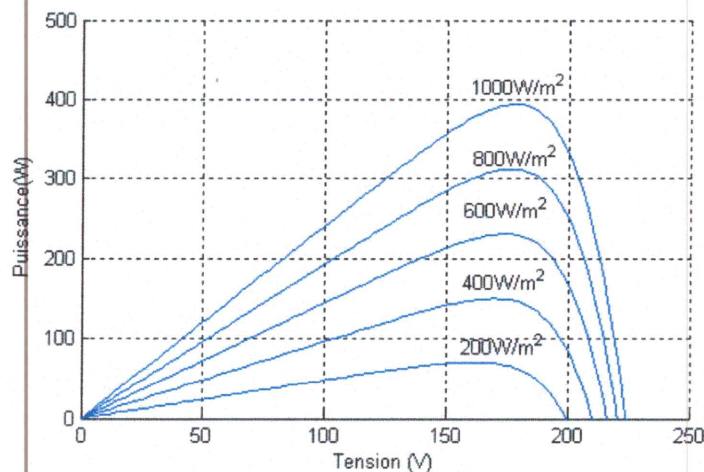


Figure II.5: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

La figure (II.6) montre l'influence de la température sur la caractéristique I(V). Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I(V).

Le courant dépend de la température puisqu'il augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit-ouvert. La croissance de la température engendre la diminution de la tension de circuit ouvert. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit lui aussi une diminution [3].

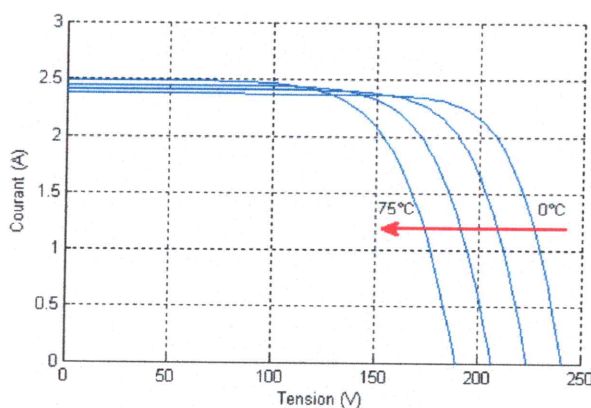


Figure II.6: L'influence de la température sur la caractéristique I(V).

La figure (II.7) illustre la variation de la puissance délivrée par un générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique P(V).

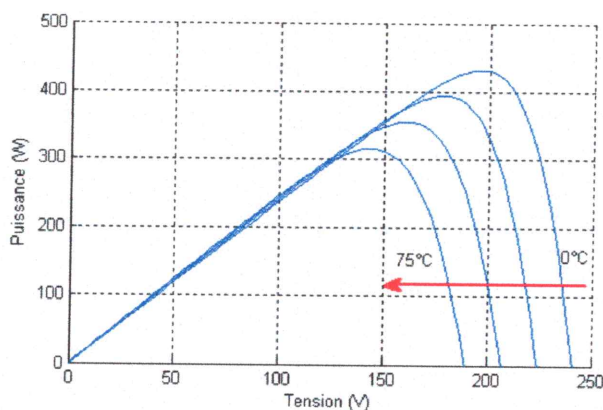


Figure II.7: L'influence de la température sur la caractéristique P(V).

II.3 Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ Photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de Convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter en continu le circuit de l'installation en cas de longue période sans ensoleillement.

II.3.1 Le convertisseur continu-continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ Photovoltaïque correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking), dont son rendement se situe entre 90% et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance à savoir:

- Coût élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe n'est pas important.

II.3.2 Le convertisseur continu- alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Dispositif rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Parmi ses avantages nous citons la simplicité, l'onde sinusoïdale et la bonne fiabilité. Son majeur inconvénient est expliqué par sa cherté et son faible rendement surtout pour les faibles puissances.
- **Dispositif statique** : On le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour les faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (Impulsions avec modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient alors un rendement élevé sur une plage du taux de charge avec de faibles pertes à vide.

II.4 Système de stockage

II.4.1 Stockage de l'énergie

Les photo-générateurs, comme on l'a vu, ne produisent de l'énergie que s'ils sont exposés à la lumière et le courant produit dépend de la valeur de l'éclairement.

- S'il y a concordance entre la présence de la lumière et le besoin d'énergie, il n'est pas nécessaire de la stocker (exemples : une calculatrice, un ventilateur...).
- Si l'on stocke l'énergie sous une autre forme, on peut également se passer de stockage électrique (exemple: une pompe alimentée par énergie solaire stocke l'eau dans un réservoir: la pompe fonctionnera à débit variable, en fonction de l'ensoleillement et sur une journée, ou une autre base de temps, elle aura stocké suffisamment d'eau pour les usagers) [3].

III.4.2 Autonomie (sans apport solaire)

C'est la durée pendant laquelle le stockage assure le fonctionnement du récepteur sans recevoir aucune charge de la part du photo-générateur. Elle dépend de la capacité de l'accumulateur et de l'énergie requise par le récepteur, indépendamment du photo-générateur. Le besoin en autonomie, dépend du type de récepteur et de son usage.

Pour une montre solaire, on peut décider de garantir un fonctionnement d'un mois dans l'obscurité (au-delà, il faudra la remettre à l'heure). L'autonomie sans apport solaire sera donc de 30 jours.

Pour une alimentation de haute sécurité en extérieur, on choisira de maintenir 15 jours de fonctionnement dans la batterie pour pallier une succession de journées mal ensoleillées (ce n'est qu'un exemple, cela dépend bien sûr du climat). L'autonomie sans apport solaire sera donc de 15 jours.

Pour un usage domestique de week-end, on se contentera de 3 jours si c'est la durée maximale de séjour des occupants. L'autonomie sans apport solaire sera alors de 3 jours.

Pour une calculatrice, même si elle fonctionne au fil du soleil, il faut fournir un pic de courant au démarrage des circuits, on pourra alors mettre un condensateur qui se chargera hors des périodes d'utilisation et fournira ce courant plus élevé sur une très courte durée. Dans ce cas, l'autonomie sans apport solaire sera de quelques microsecondes. En général, pour un usage extérieur, la batterie doit faire fonctionner le système en cas de successions de journées mal ensoleillées [3].

II.4.3 Principe du couplage photo-générateur/batterie

Certains pensent qu'il faut utiliser l'énergie issue directement du photo-générateur quand la lumière est présente, et basculer sur le stockage dans l'obscurité ; chose qui est inutile.

Le plus rationnel est de monter le photo-générateur, la batterie, et le récepteur en parallèle avec des composants de régulation. Ainsi, la batterie sera le réservoir d'énergie, que l'on remplira d'un côté par le photo-générateur et videra d'un autre par le récepteur appelé aussi charge. Ces deux événements peuvent être simultanés ou non, peu importe, pourvu que la batterie ne soit jamais déchargée.

La batterie jouera le rôle de régulateur de tension pour alimenter le récepteur ; car le photo-générateur, n'est en fait qu'un générateur de courant qui peut travailler sur une large plage de tension (de 0 V à sa tension de circuit ouvert). La batterie impose donc la tension du montage parallèle et stabilisera ainsi la tension fournie au récepteur, ce qui est un avantage évident pour certains d'entre eux. Un tube fluorescent en 12 V continu, par exemple, se détériore assez vite s'il reçoit une tension trop faible (<10V) [3].

II.4.4 Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système

Les règles des montages série et parallèle s'appliquent également aux accumulateurs. Deux batteries de 100 Ah de 12 V en série donneront 100 Ah-24 V, et les mêmes en parallèle donneront 200 Ah-12 V. Mais pour ce dernier type, il est impératif que les deux batteries soient identiques (même capacité), sinon on risque de voir la plus faible dépérir au profit de l'autre. C'est-à-dire sa résistance interne augmentera et la batterie en meilleure santé prendra la plus grande part du courant de charge, ce qui ne fait qu'accentuer le déséquilibre. On préférera donc les montages en série (addition de tensions), plutôt que les montages en parallèle (addition des intensités) [3].

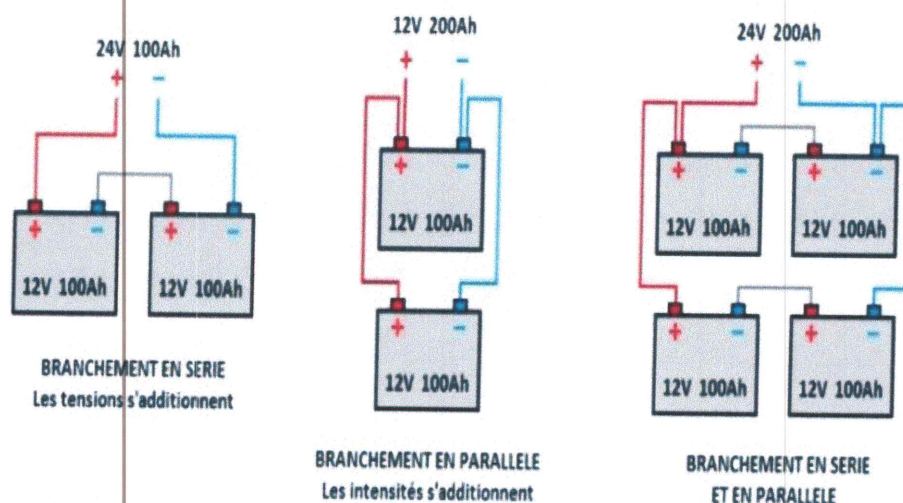


Figure II.9: Connexion des batteries

II.4.5 Principales caractéristiques des accumulateurs

a) Capacité en Ampère/heure

Les Ampères-heures d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de **200 Ah** peut fournir **200 A** pendant une heure, où **50 A** pendant **4 heures**, où **4 A** pendant **50 heures**.

Ils existent des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que le rapport de chargement et de déchargement, la température, la profondeur de décharge, la durée de vie, le rendement, la tension d'utilisation et la profondeur de décharge.

b) Rapports de chargement et déchargement

Si la batterie est chargée où est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

c) Température

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Par contre, des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

d) La durée de vie

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).

e) Profondeur de décharge

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

f) La tension d'utilisation

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

g) Le rendement

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

h) Le taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les systèmes photovoltaïques autonomes accompagnés de leurs performances et tous les éléments constitutants. Ensuite nous avons démontré l'influence de deux paramètres météorologiques (température et ensoleillement) sur l'évolution de la caractéristique $I(V)$.

Enfin la conversion et le stockage d'énergie ainsi générés à de tels systèmes photovoltaïques ont été abordés en tant qu'éléments constitutants de ces systèmes.

Chapitre III

III.1 Introduction	37
III.2 Simulation à l'aide de Simulink	37
III.3 Cellule solaire	40
III.4 Module photovoltaïque.....	41
III.5 Comportement du module sous l'influence de la température et de l'éclairement	44
III.6 Groupement des modules PV	47
III.7 Simulation de la Cellule Photovoltaïque.....	52
III.8 L'influence de la résistance série RS	53
III.9 L'influence de la résistance parallèle RP.....	54
III.10 Conclusion	55

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque autonome


III.1 Introduction

Rappelons que dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté les bases nécessaires à la simulation et la modélisation du générateur sous l'environnement logiciel de programmation MATLAB. Ce dernier permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement et la caractérisation des différents éléments constituant le système photovoltaïque.

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, il peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. Ses instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne, et son fonctionnement suit l'un des deux modes suivants:



- 1. Mode interactif:** MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.
- 2. Mode exécutif:** MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage MATLAB).

III.2 Simulation à l'aide de Simulink

Simulink est un outil de MATLAB qui permet de remplacer les équations mathématiques entre certaines variables par des blocs organisés en un seul schéma. Pour ouvrir Simulink, cliquer sur l'icône  présente dans la fenêtre principale de MATLAB. Une boîte de dialogue contenant la liste des bibliothèques (semblable à celle de la figure III.1) apparaît à l'écran.

La partie gauche de la boîte de dialogue montre les bibliothèques, tandis que la portion droite présente les blocs disponibles dans la bibliothèque sélectionnée. Une courte description du bloc sélectionné est affichée dans le haut de la fenêtre. Ce sont ces blocs qui servent à la création des diagrammes, ou schémas-blocs.

III.2.1 Création des schémas blocs

Les schémas blocs doivent être créés dans un fichier Simulink distinct, de type « .mdl ». Pour créer un nouveau fichier de travail Simulink : faire **File, new, Model** ou cliquer sur l'icône : . Pour ouvrir un ancien fichier : **File, Open** ou cliquer sur l'icône : .

Pour insérer un bloc dans un fichier, il faut cliquer sur le bloc désiré puis le faire glisser jusqu'à l'endroit approprié dans le fichier de travail, en maintenant le bouton gauche de la souris enfoncé. Relâchez le bouton de la souris lorsque le bloc est placé à l'endroit voulu. On peut rechercher un bloc de la liste en tapant une partie de son nom dans la case blanche apparaissent en haut de la librairie, puis en appuyant sur **Retour**

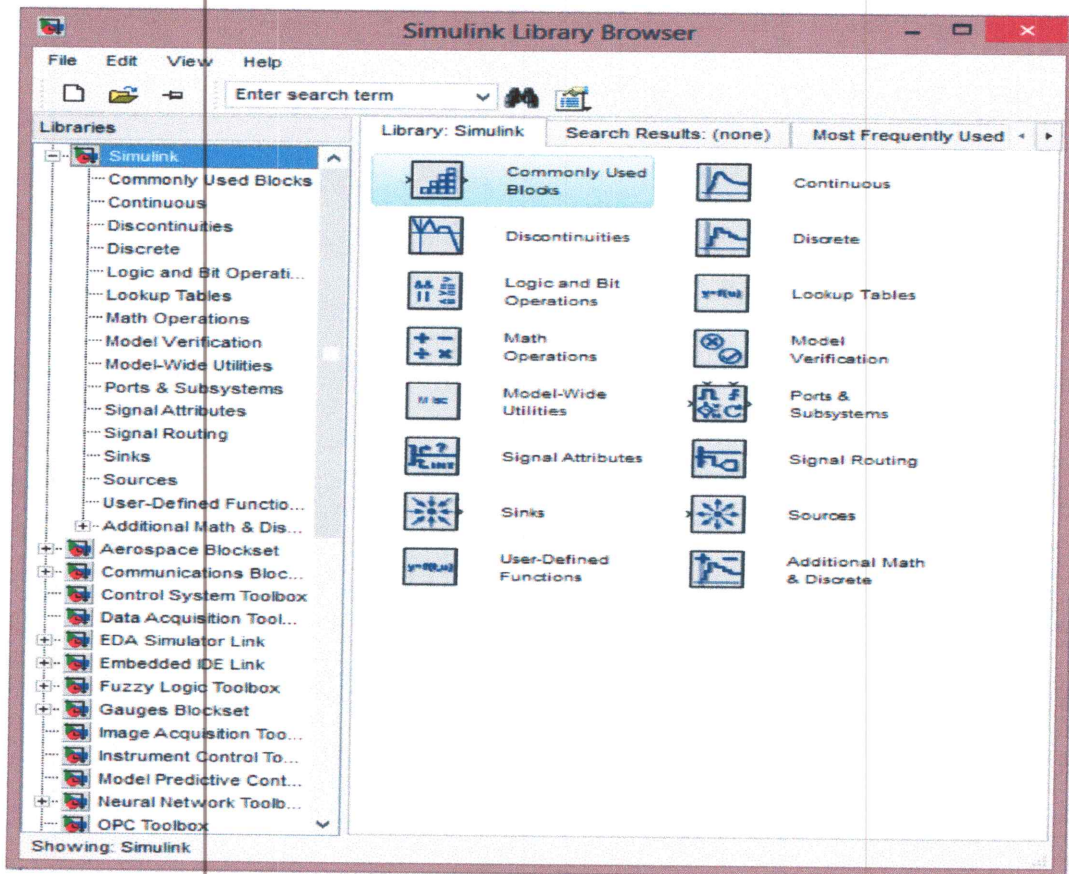


Figure III.1: Liste de Simulink.




Une fois les blocs insérés dans le fichier, il faut les relier. Pour relier des blocs entre eux, cliquer sur le « triangle » apparaissant sur le premier bloc, maintenez le bouton gauche de la souris enfoncé et faites glisser le curseur jusqu'au « triangle » du second bloc. Si le lien est réalisé adéquatement, une flèche pleine devrait apparaître. Si le trait symbolisant le lien n'est pas un trait plein ou s'il comporte une double flèche en son centre, c'est que le lien n'a pas été réalisé correctement. Il faut donc supprimer le trait et recommencer.

Certaines versions de Simulink offrent un raccourci pour relier deux blocs, il s'agit de :

- Cliquer sur le premier bloc.
- Maintenir la touche CTRL enfoncée.
- Cliquer sur le second bloc à raccorder

Cette méthode crée automatiquement le lien. Le sens du lien ainsi créé dépend de l'ordre dans lequel les blocs ont été sélectionnés.

Dans ce chapitre, on utilise le programme MATLAB 7.9.0 pour simuler les composants suivants:

-  Cellule solaire.
-  Module PV.
-  Panneau PV.

III.3 Cellule solaire

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension à température et éclairement nominales sont illustrées dans la figure (III .2)

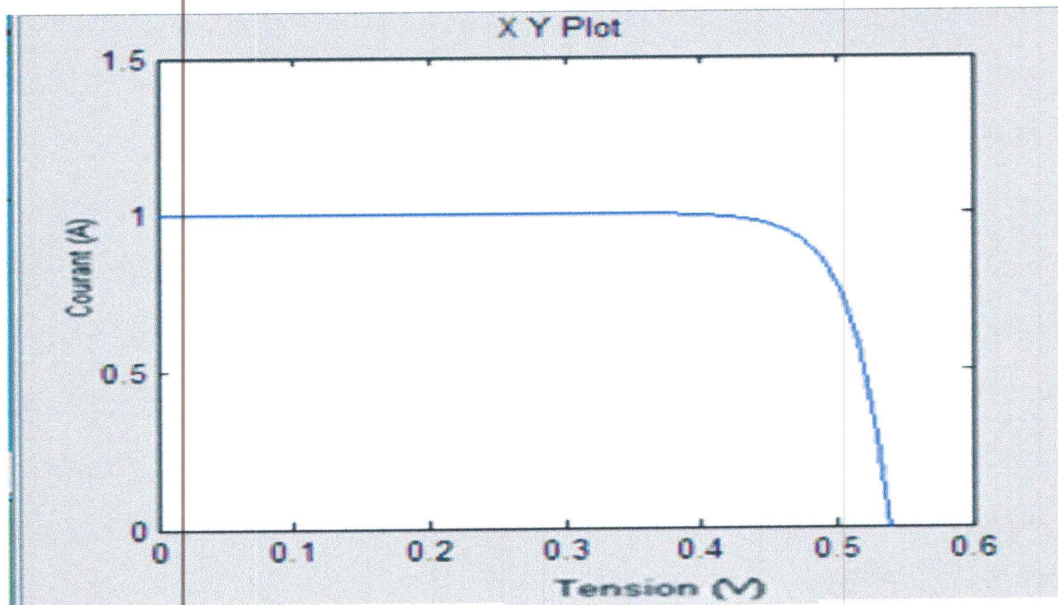


Figure III.2: Caractéristique I(V) de la cellule.

A partir de la figure (III.2), on remarque que le courant reste quasi-constant, son évolution en fonction de la tension suit une exponentielle décroissante. Dans ce cas, la cellule se comporte comme un générateur de courant du à la circulation des paires électron-trou générés par le rayonnement solaire.

Ensuite le courant diminue et et la tension reste pratiquement constante, dans ce cas le dispositif se comporte comme un générateur de tension.

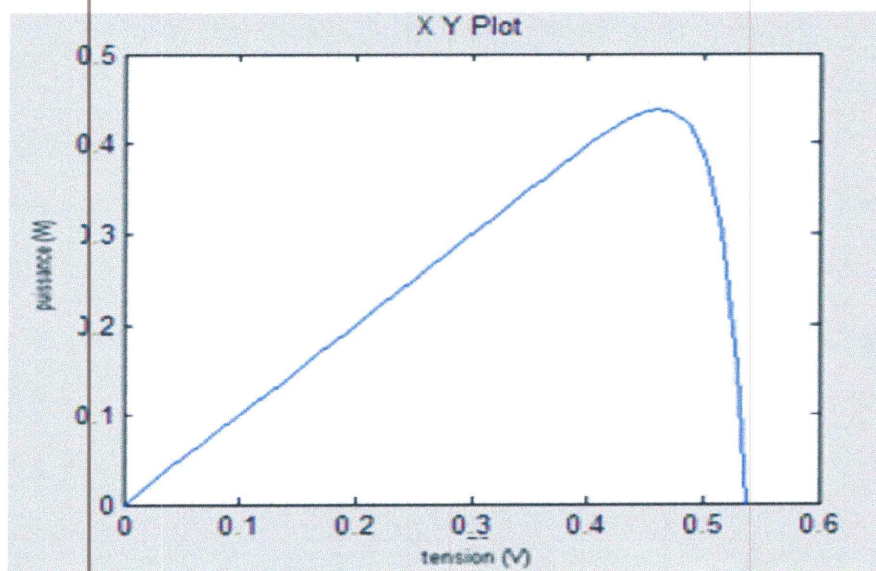


Figure III.3: Caractéristique P(V) d'une cellule PV.

La figure(III.3) montre que la puissance devient nulle en deux points. Le premier point correspond la tension de circuit-ouvert, et le deuxième au courant de court-circuit ainsi que la cellule photovoltaïque présente un point de puissance maximal de la caractéristique P(V).

III.4 Module photovoltaïque

Pour notre travail on a choisi un module photovoltaïque de type ECEN 2060 pour qu'il soit le modèle de simulation sous l'environnement MATLAB. Ce module est composé de 36 cellules solaires montées en série et fournit 85 W de puissance nominale maximale.

Le tableau III.4 décrit ses caractéristiques électriques.

Caractéristiques électriques	Valeurs
Courant de court-circuit I_{sc}	5.45A
Tension de circuit-ouvert V_{C0}	22.2V
Courant correspondant à P_{max}	4.95A
Tension correspondant à P_{max}	17.2V

Tableau III.4: Caractéristiques électriques du module ECEN 2060.

Le module ainsi choisi doit être inséré dans un schéma bloc sous MATLAB/Simulink de la manière suivante figure III.5 :

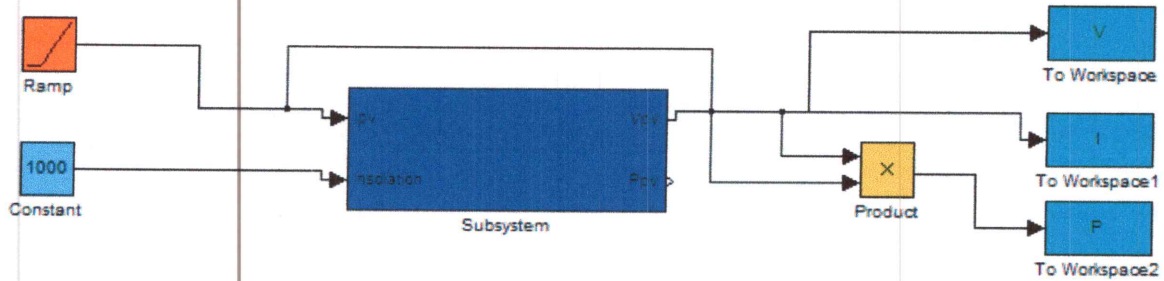


Figure III.5: Module ECEN 2060.

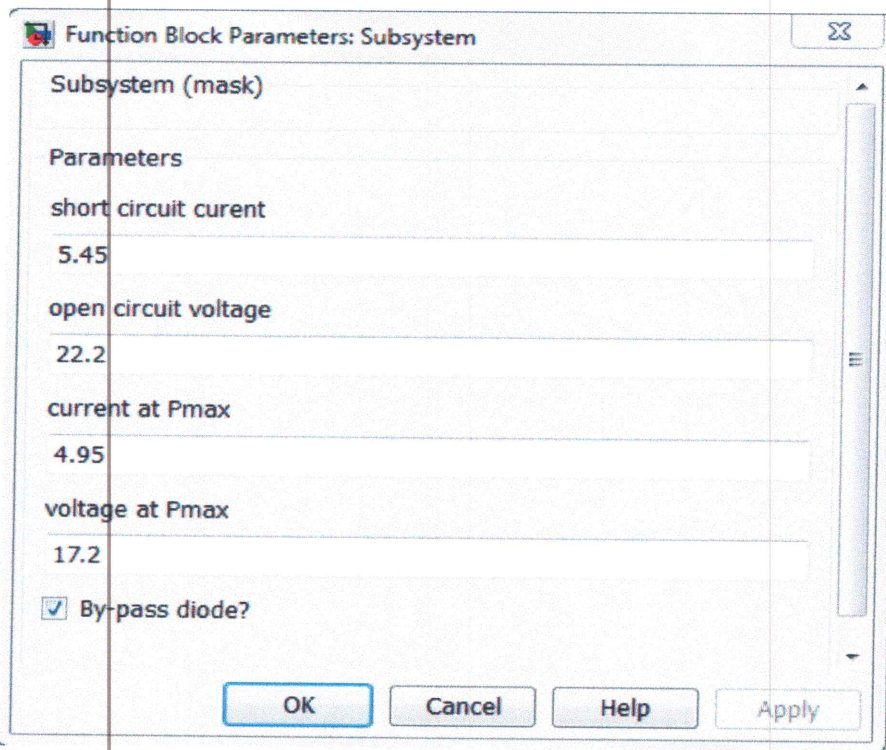


Figure III.6: Paramètres des fonctions.

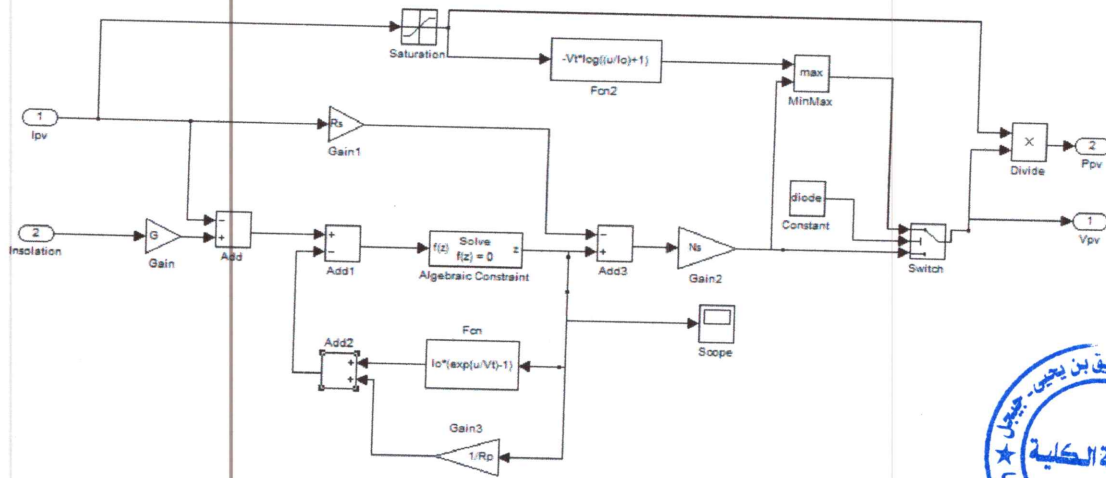


Figure III.7: Schéma bloc d'un module PV.

III.4.1 Les caractéristiques I(V) et P(V) du module à l'état standard

Une fois simulé sous MATLAB/Simulink le schéma bloc décrit précédemment génère les deux courbes I(V) et P(V) qui correspondent successivement à l'évolution du courant et de la puissance en fonction de la tension.

Donc les résultats obtenus lors de la simulation peuvent être représentés comme suit :

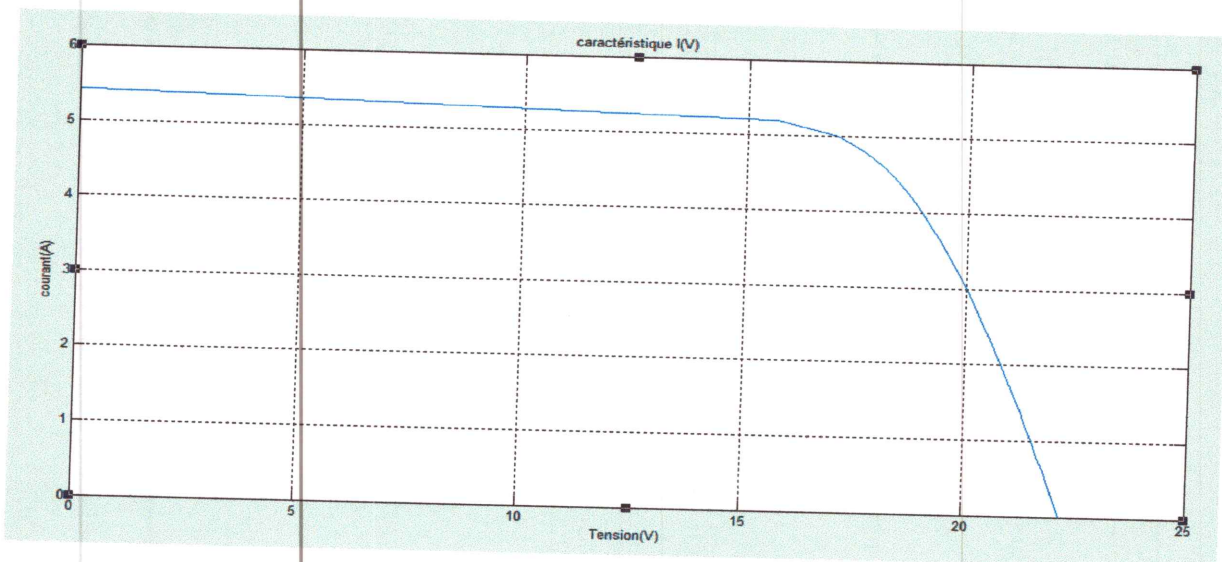


Figure III.8: Caractéristique I(V) du module ECEN2060.

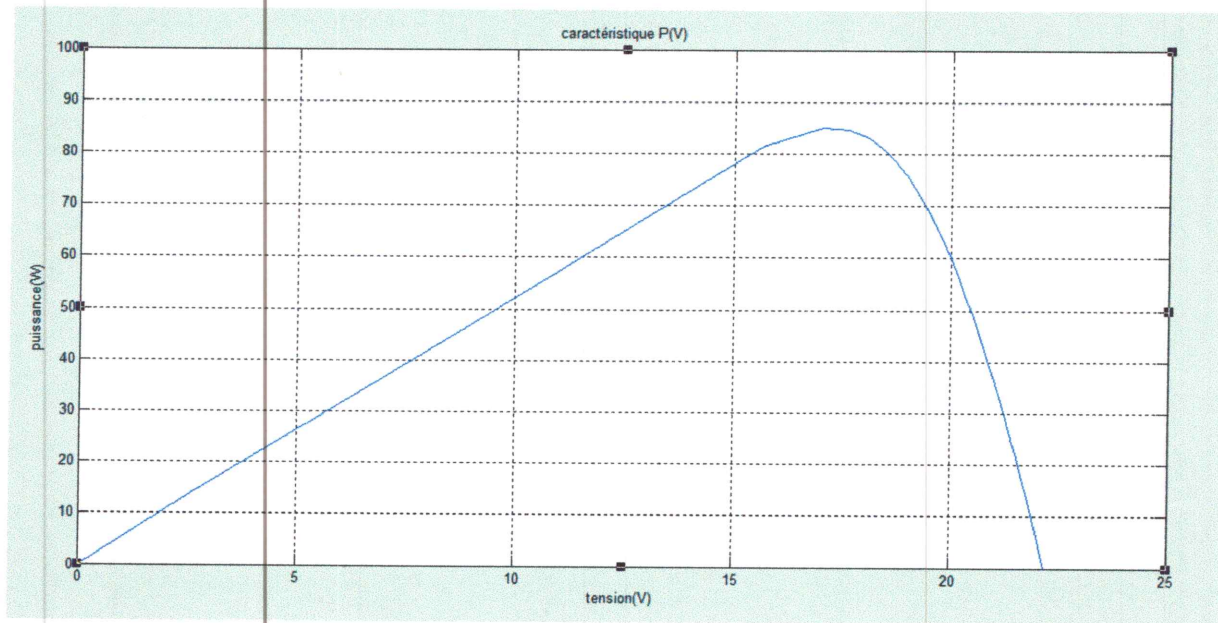


Figure III.9: Caractéristique P(V) du module ECEN2060.

III.5 Comportement du module sous l'influence de la température et de l'éclairement

Pour comprendre le comportement du module photovoltaïque dû à l'influence de la température et de l'éclairement, on procède à la simulation du système plusieurs fois en variant la température puis l'éclairement avec un pas bien déterminé. Ainsi la température augmente de 10°C pour chaque simulation en partant de 25°C comme température ambiante. Par contre l'ensoleillement varie entre 166 W/m^2 et 1000 W/m^2 à un pas de 166 W/m^2 .

III.5.1 Flux lumineux

Le photo-courant est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou au flux lumineux désigné G . Le courant de la diode $I_d(v)$, étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement.

Le photo-courant crée dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la section S de la jonction soumise au rayonnement solaire, par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la nature du matériau et de sa jonction considérée.

A chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à une chute du flux lumineux.

Les paramètres de simulation suivant: ($G = 1000W/m^2, 830W/m^2, 664W/m, 498W/m^2, 332 W/m^2, 166 W/m^2$).

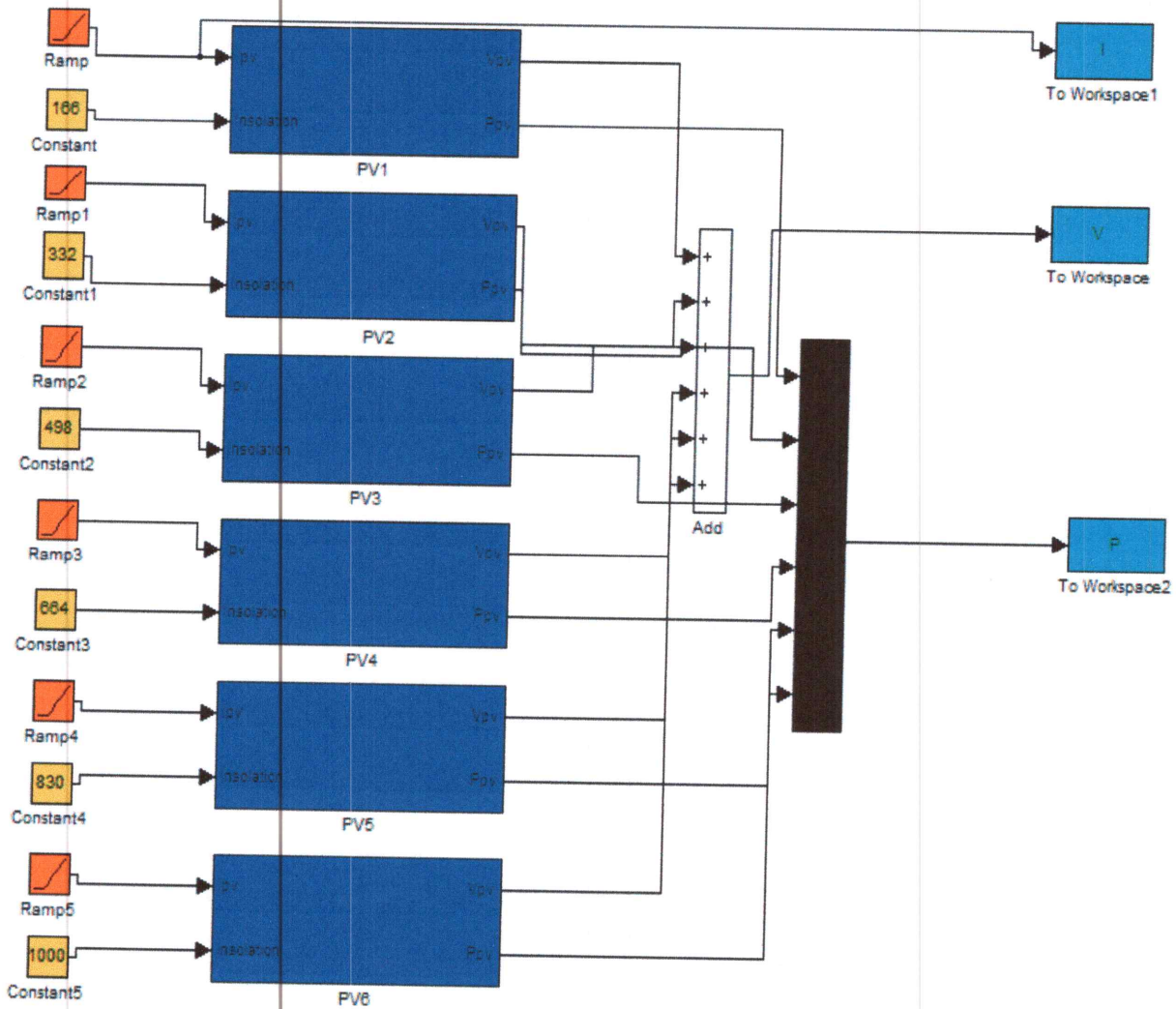


Figure III.10: Groupement série de six modules pour des différentes valeurs de l'éclairement.

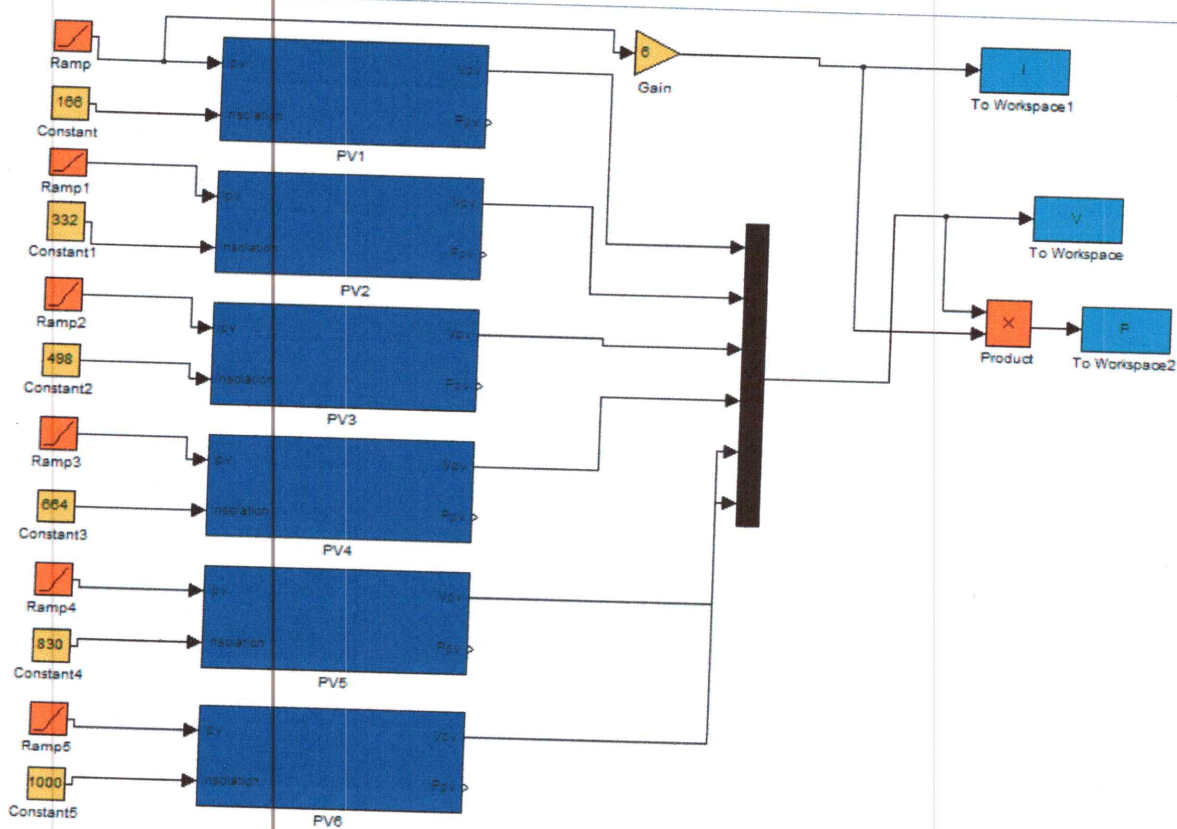


Figure III.11: Groupement parallèle de six modules pour de différentes valeurs de l'éclairement

III.5.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Son augmentation entraîne d'une part, une augmentation du courant photonique, en raison, principalement, de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau et d'autre part, une diminution de la tension du circuit ouvert V_{CO} . L'augmentation de la température entraînerait :

- Une diminution de la puissance maximale disponible et de la tension (0.06 % par °C).
- Une augmentation du courant (0.4 % par °C).
- Une diminution du rendement et de facteur de forme FF.

III.6 Groupement des modules PV

III.6.1 Groupement série des modules PV

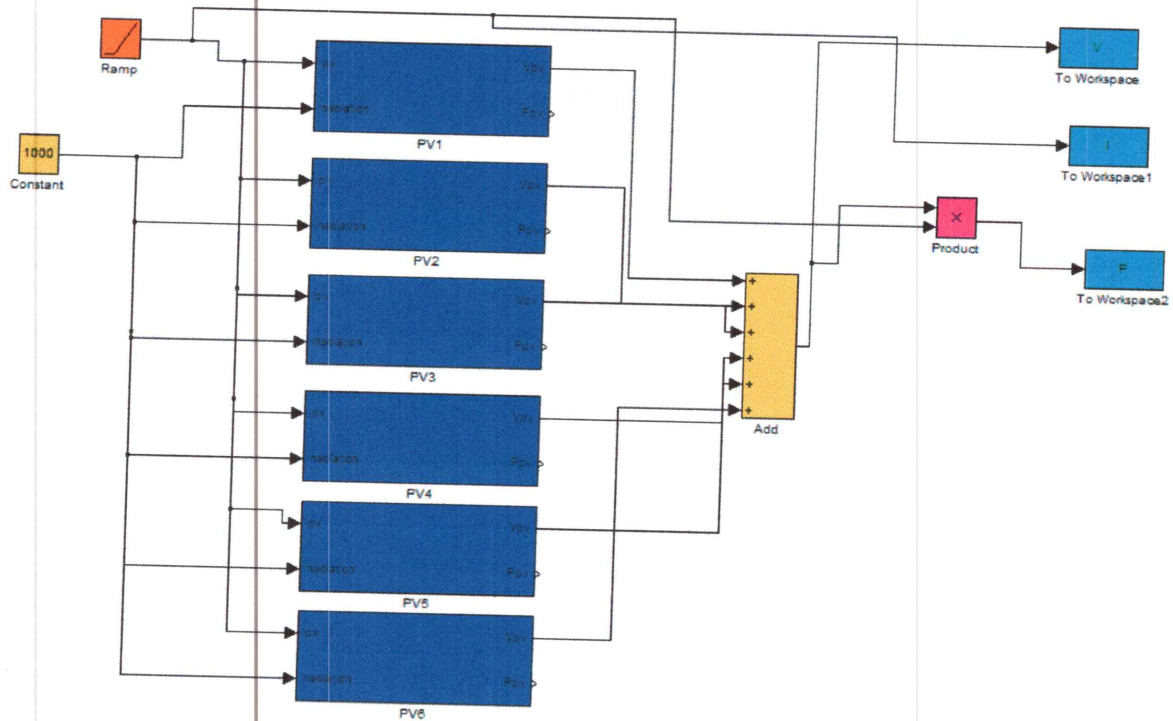


Figure III.12: Groupement série de six modules PV.

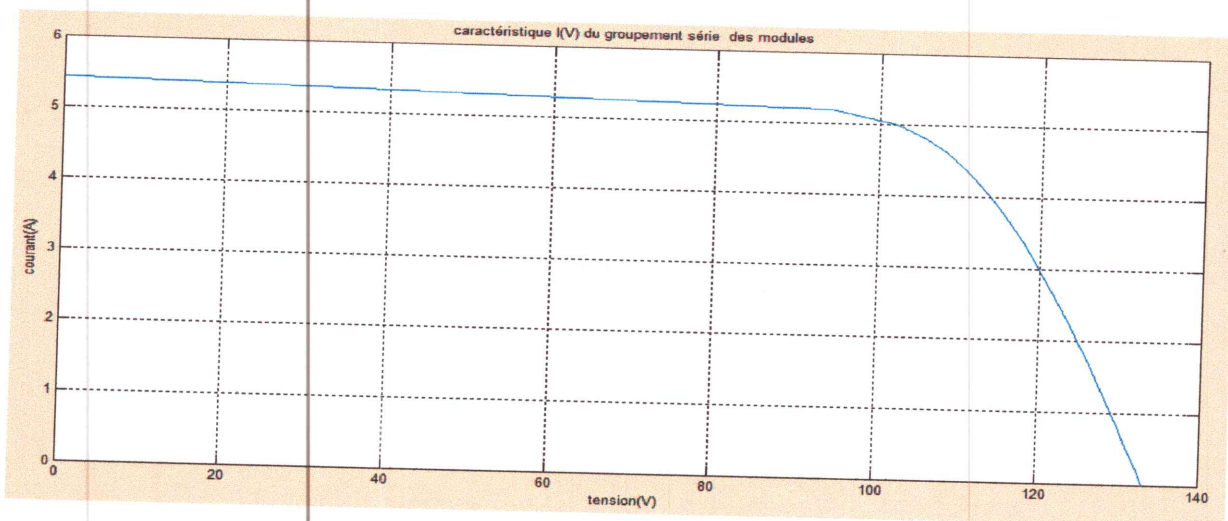


Figure III.13: Caractéristique I(V) du groupement de six modules.

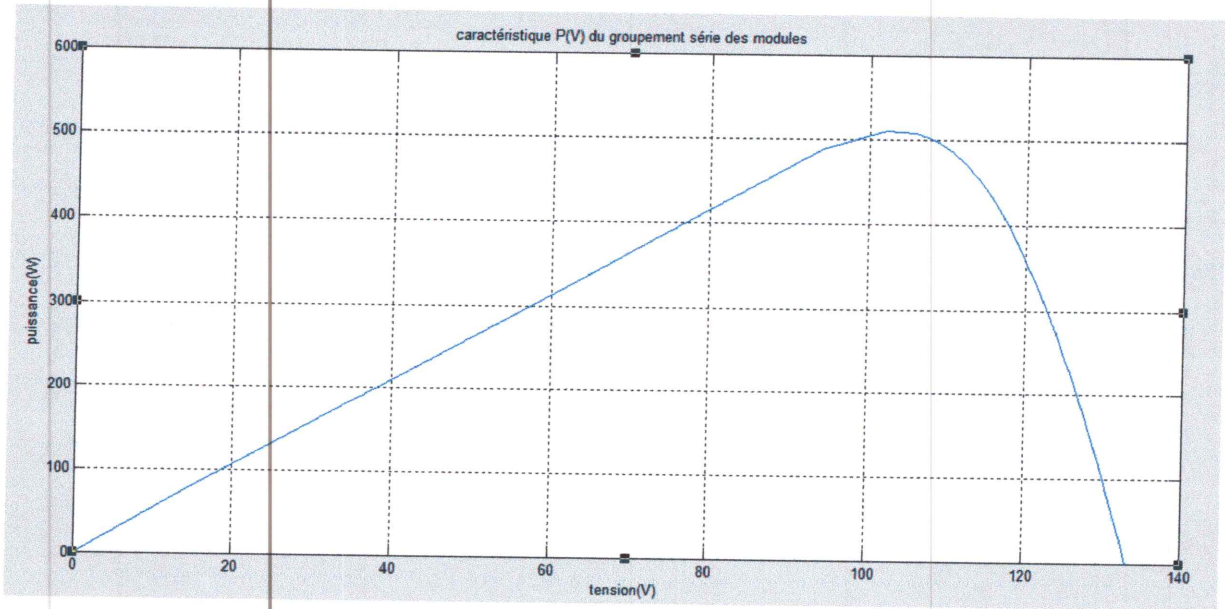


Figure III.14: Caractéristique P(V) du groupement de six modules.

III.6.2 Groupement parallèle des modules PV

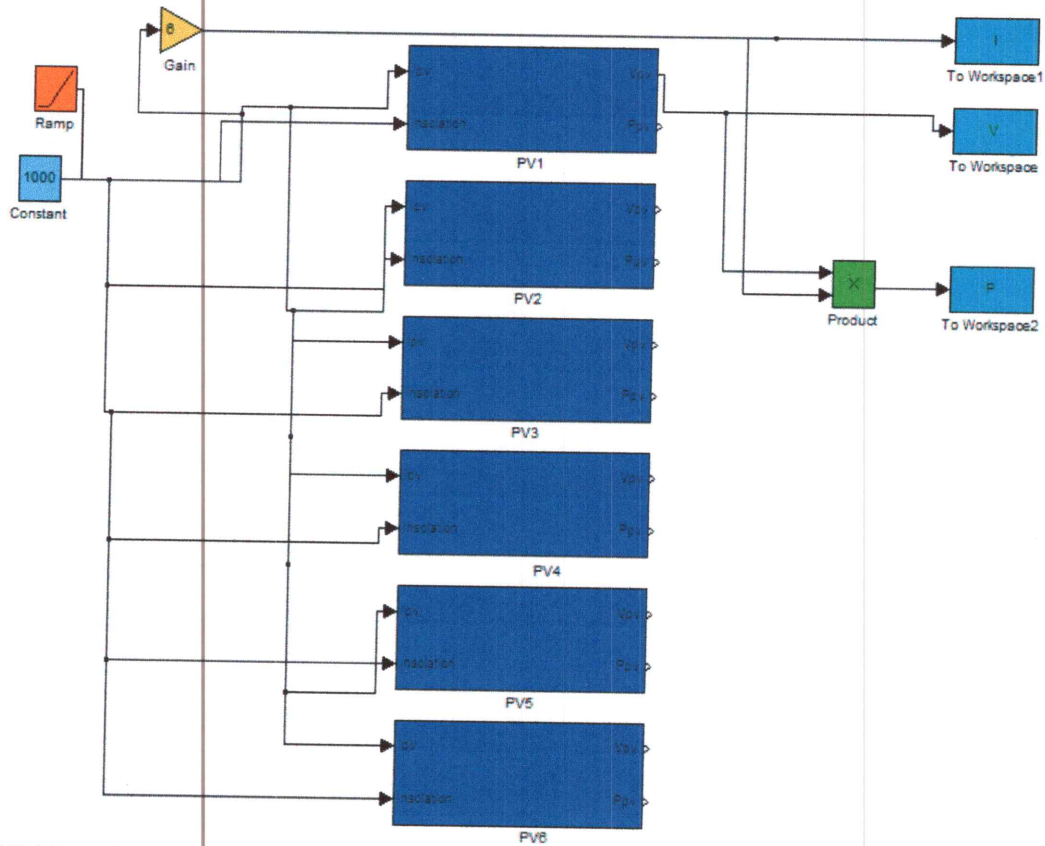


Figure III.15: Groupement parallèle de six modules PV.

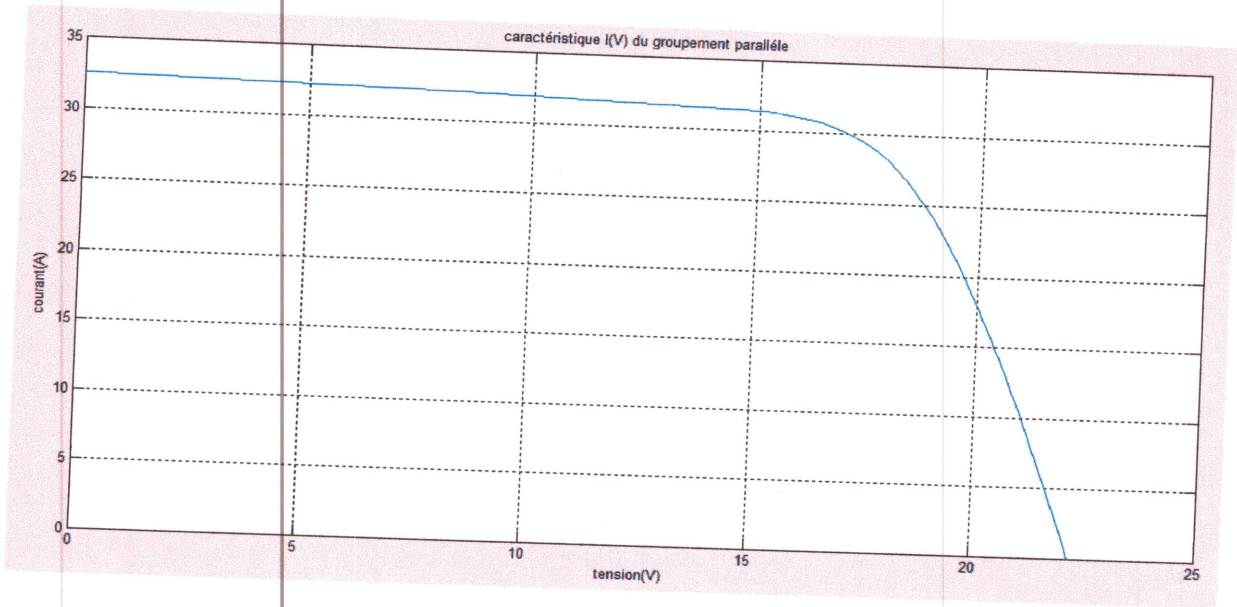


Figure III.16: Caractéristique I(V).

Dans un groupement de modules identiques en série le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de modules en série, Contrairement pour le groupement de modules en parallèle ou le courant qui augmente.

III.6.3 Association mixte (série /parallèle)

III.6.3.1 Association mixte de 6 modules (3 séries-2parallèles)

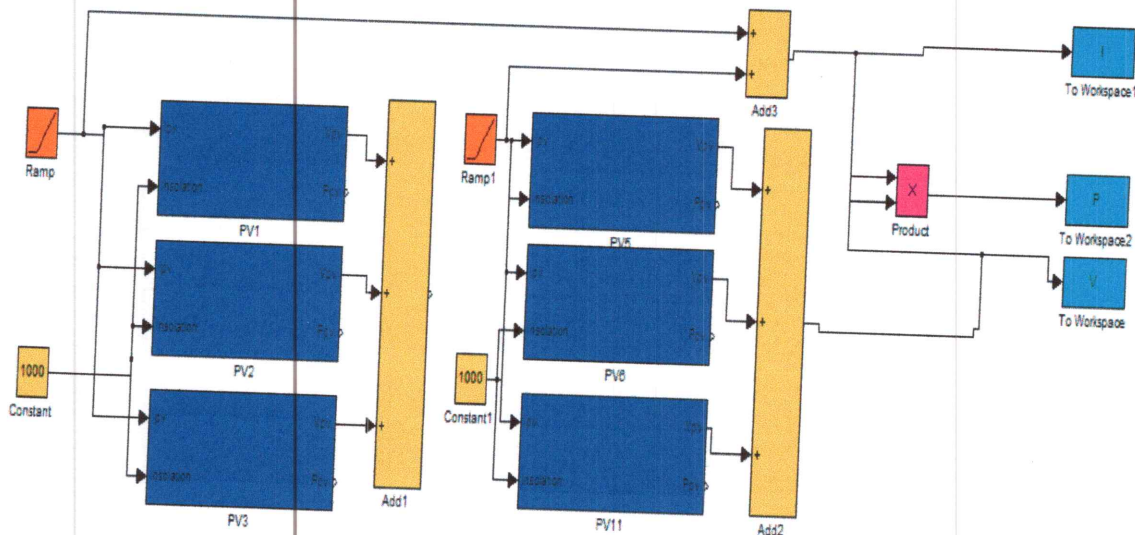


Figure III.17: Association mixte de six modules PV.

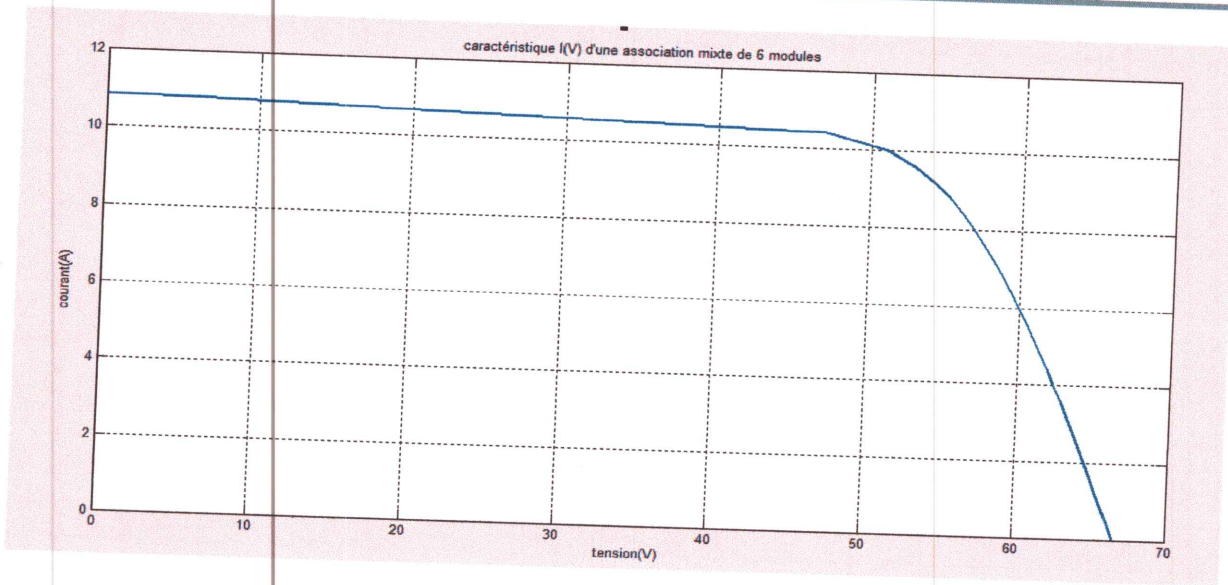


Figure III.18: Caractéristique I(V) de l'association mixte de 6 modules.

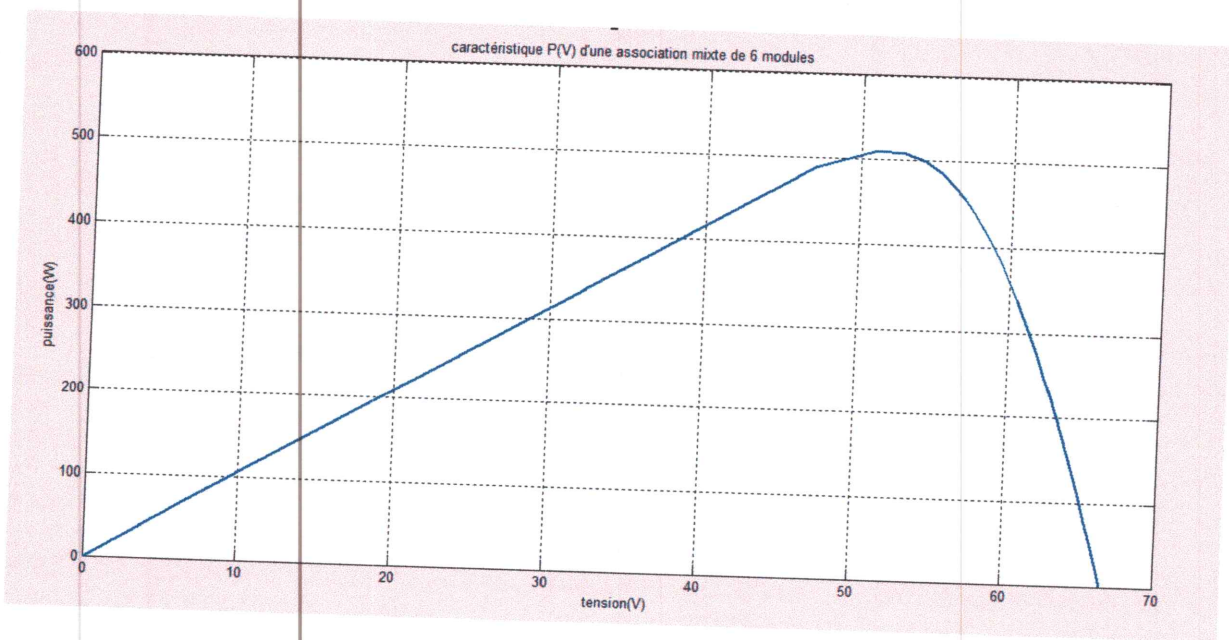


Figure III.19: Caractéristique P(V) d'une association mixte de six modules.

III.6.3.2 Association mixte de six modules (2 séries-3 parallèles)

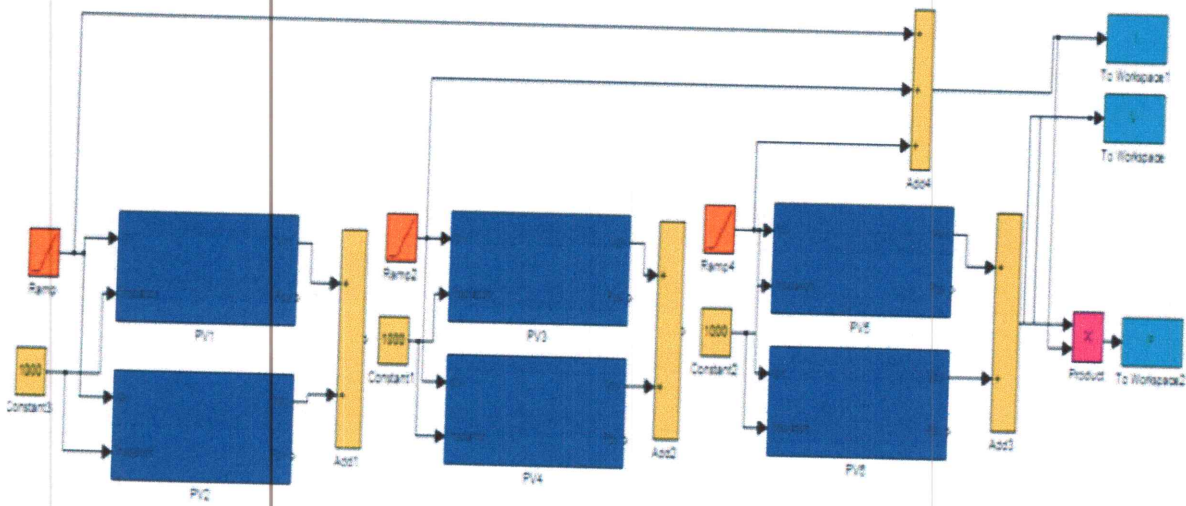


Figure III.20: Association mixte de six modules PV (2 séries-3 parallèles).

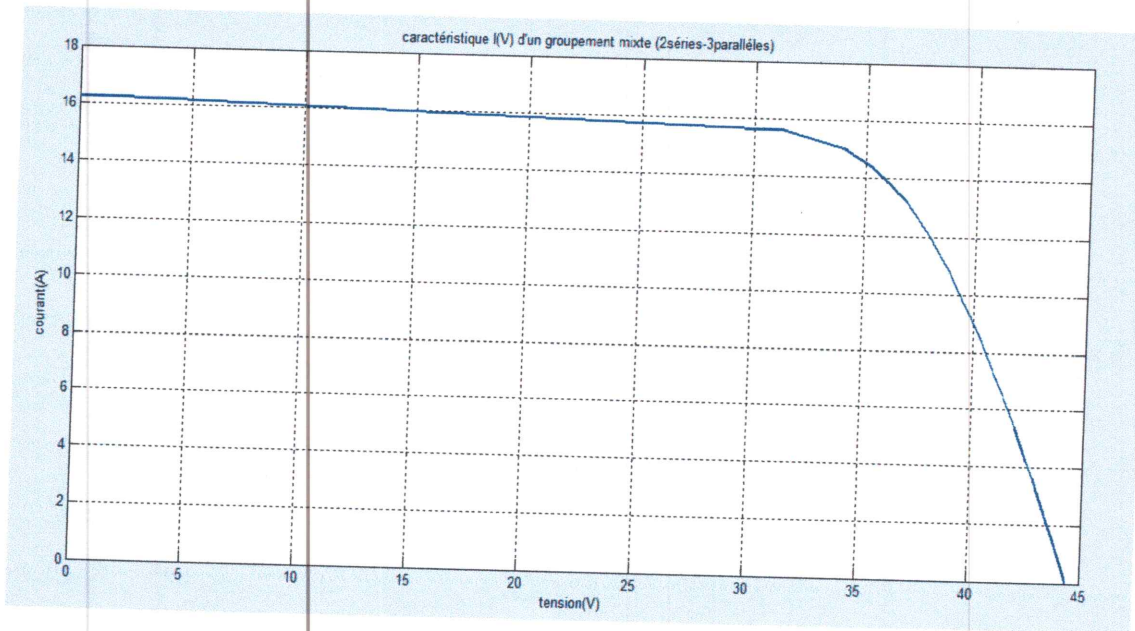


Figure III.21: Caractéristique I(V) d'une association mixte de six modules (2séries-3parallèles).

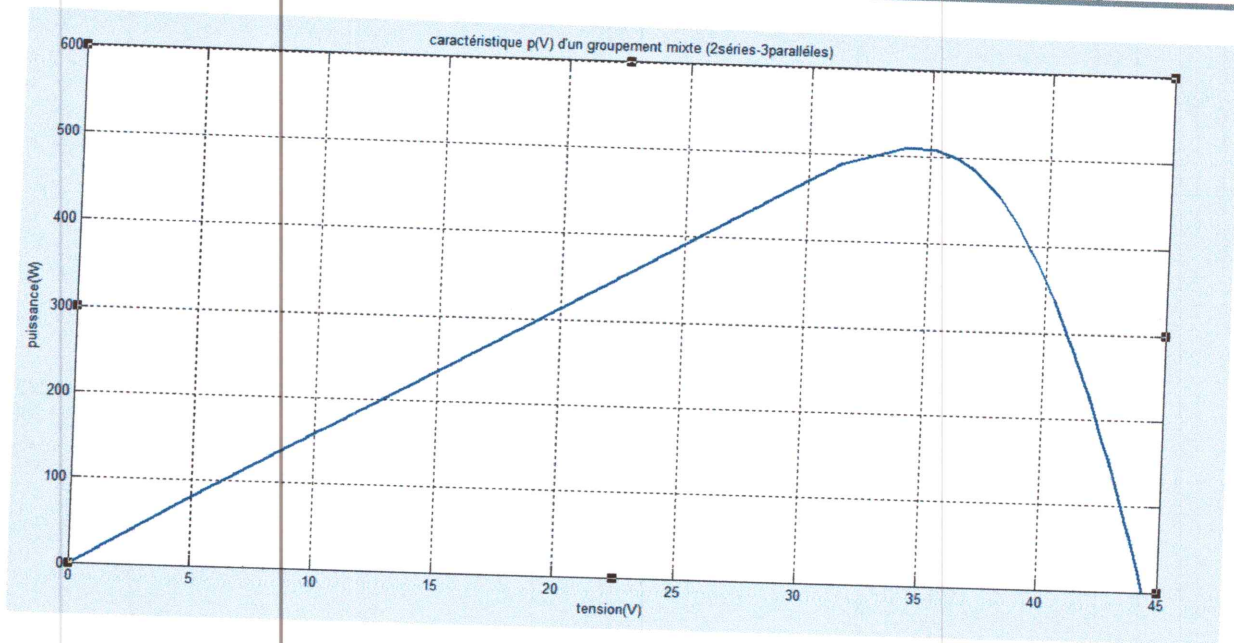


Figure III.22: Caractéristique P(V) d'une association mixte de six modules (2séries-3parallèles).

III.7 Simulation de la Cellule Photovoltaïque

L'utilisation du circuit électrique équivalente permet de modéliser les caractéristiques de la cellule PV. Pour simuler le comportement de la cellule PV, nous avons utilisé le logiciel MATLAB.

Le modèle que nous avons utilisé pour simuler le comportement de la cellule PV est basé sur le modèle électrique équivalent simplifié dont l'expression du courant délivré I_{cell} est donnée par :

$$I = I_{\text{ph}} - I_s \left(e^{(V+R_s I)/V_{\text{th}}} - 1 \right) \quad (\text{III.1})$$

Cette équation est complexe, car sa solution en courant est récursive. Pour la résoudre, nous avons utilisé la méthode de Newton pour sa rapidité de convergence vers la solution. La méthode de **Newton** est décrite ci-dessous :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{III.2})$$

Avec $f'(x)$ est la dérivée de la fonction, x_n valeur actuelle et x_{n+1} valeur suivante.

En posant

$$f(I) = I_{ph} - I - I_s (e^{(V+R_s I)/V_{th}} - 1) = 0 \tag{III.3}$$

L'expression (III.2) peut s'écrire

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I - I_s (e^{(V+R_s I)/V_{th}} - 1)}{-1 - \frac{I_s R_s}{V_{th}} e^{(V+R_s I)/V_{th}}}$$

La fonction que nous avons utilisée sous MATLAB effectue le calcul pour 5 itérations pour assurer la convergence de la solution.

III.8 L'influence de la résistance série R_s

La résistance série est gouvernée par les résistivités des matériaux, par les résistances de contact, des électrodes et par la grille collectrice. Elle agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas V_{CO} mais elle peut diminuer notablement la valeur de courant de court circuit.

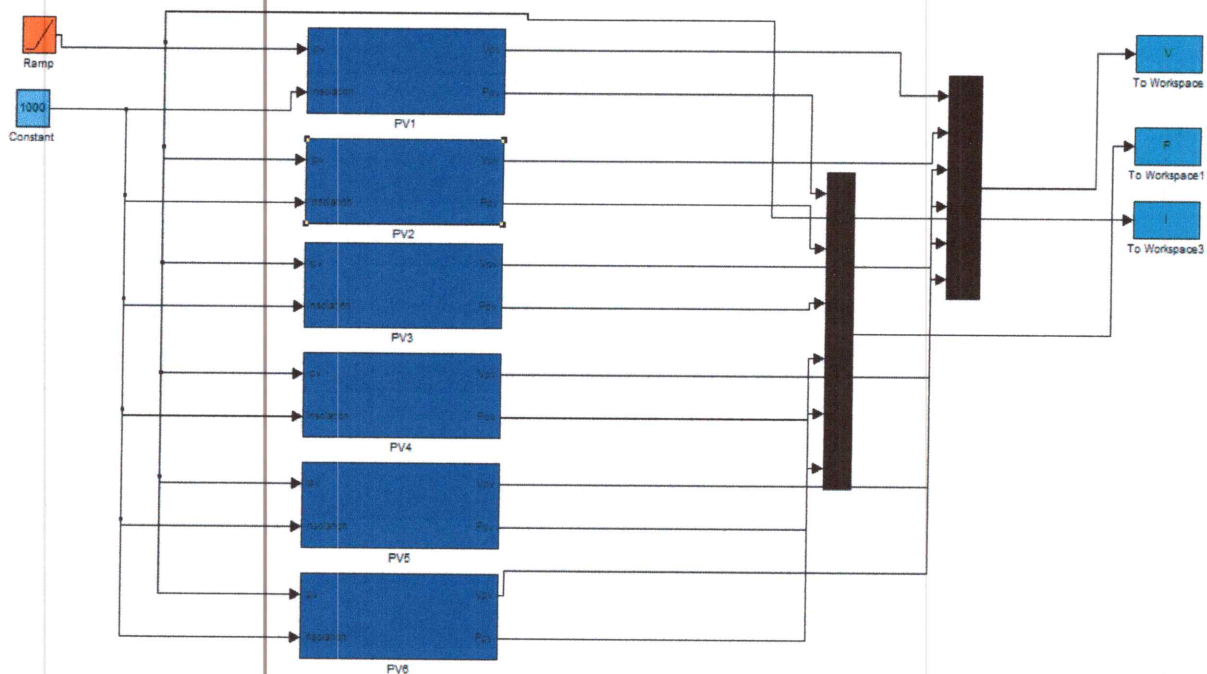


Figure III.23: Groupement du module pour différente valeur de R_s

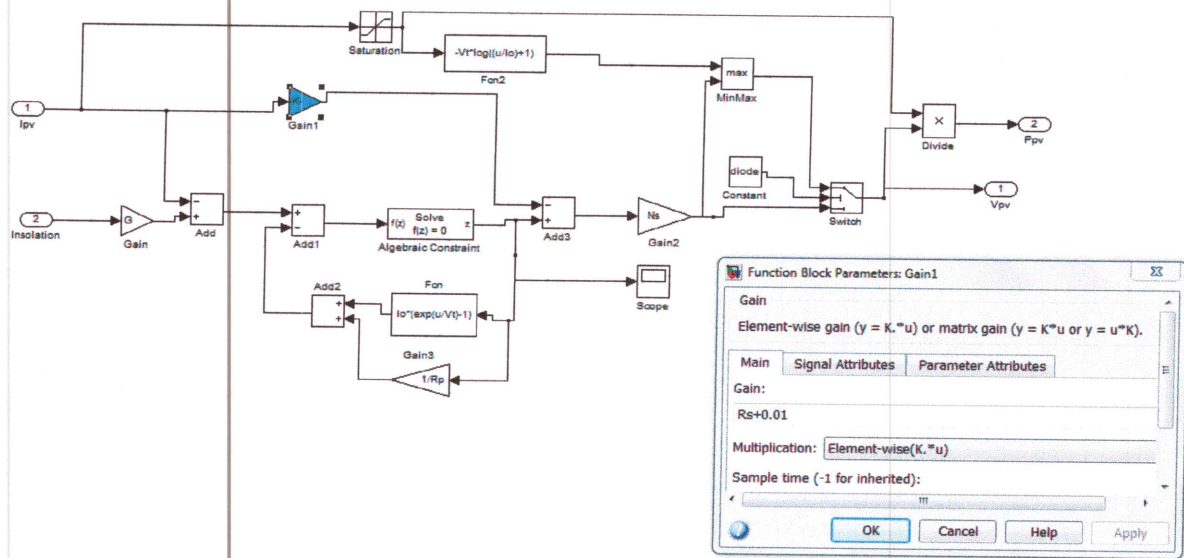


Figure III.24 : La variation de Rs.

III.9 L'influence de la résistance parallèle Rp

Elle est considérée comme une conductance de fuite. Son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant, elle agit comme s'il on devait soustraire à la photo courant utile, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée. Elle est généralement très élevée et elle est constatée sur la caractéristique I(V) par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court circuit.

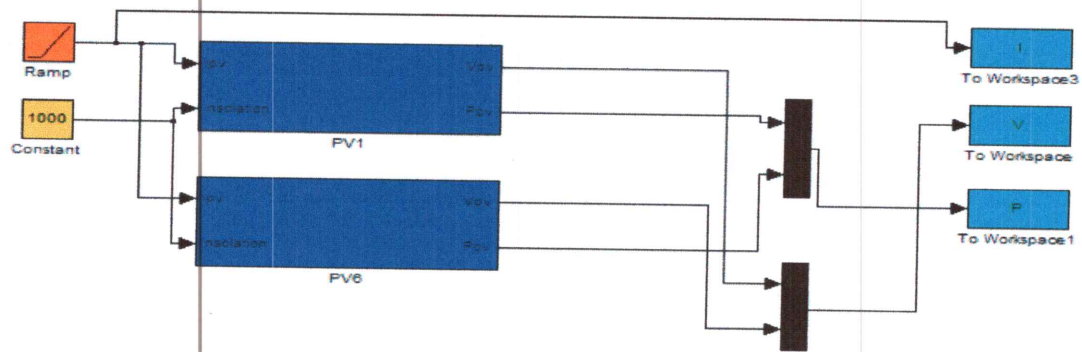


Figure III.25: Groupement des modules pour différente valeur de Rp.

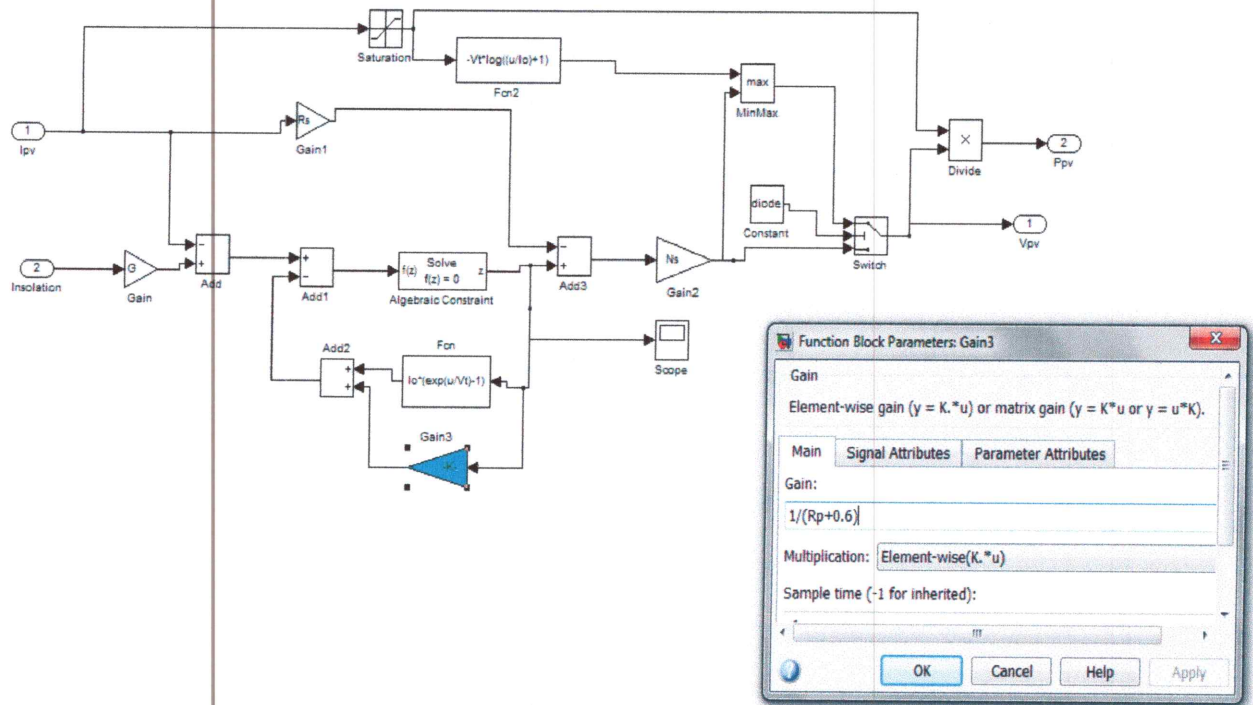


Figure III.26: Variation de Rp.

III.10 Conclusion

Le long de ce chapitre, plusieurs points relatifs à l'exploitation de MATLAB/Simulink ont été abordés, en commençant par un rappel sur l'environnement Simulink, puis nous avons exposé la manière avec laquelle un module Photovoltaïque se comporte lorsqu'il sera exposé aux variations de la température et de l'ensoleillement simultanément.

Ensuite, nous avons décrit toutes les configurations possibles des groupements de modules qui permettent de mettre en place un meilleur modèle générant l'énergie ainsi désirée. Pour cela, trois cas ont été étudiés à savoir les groupements série, parallèle et enfin mixte.

Enfin, on termine le chapitre par l'impact important des deux résistances installées successivement en série et en parallèle. L'une influe directement sur le courant de la cellule, par contre la deuxième se comporte en général comme générateur de tension.

Chapitre IV

IV L'influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques.....	56
IV.1 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et p(V) pour un groupement série de 6 modules PV.....	56
IV.2 L'influence de la température sur I(V) pour un groupement série de 6 modules..	58
IV.3 L'influence de la résistance RS.....	61
IV.4L'influence de la résistance RP	62

Résultats et discussions

IV.1 L'influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques

IV.1.1 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) pour un groupement série de six modules PV

Dans tout ce qui suit, nous constatons qu'à une température donnée et pour un ensoleillement cadencé à un pas de 166W/m^2 la puissance maximale du module PV est nettement proportionnel à la valeur de l'éclairement G.

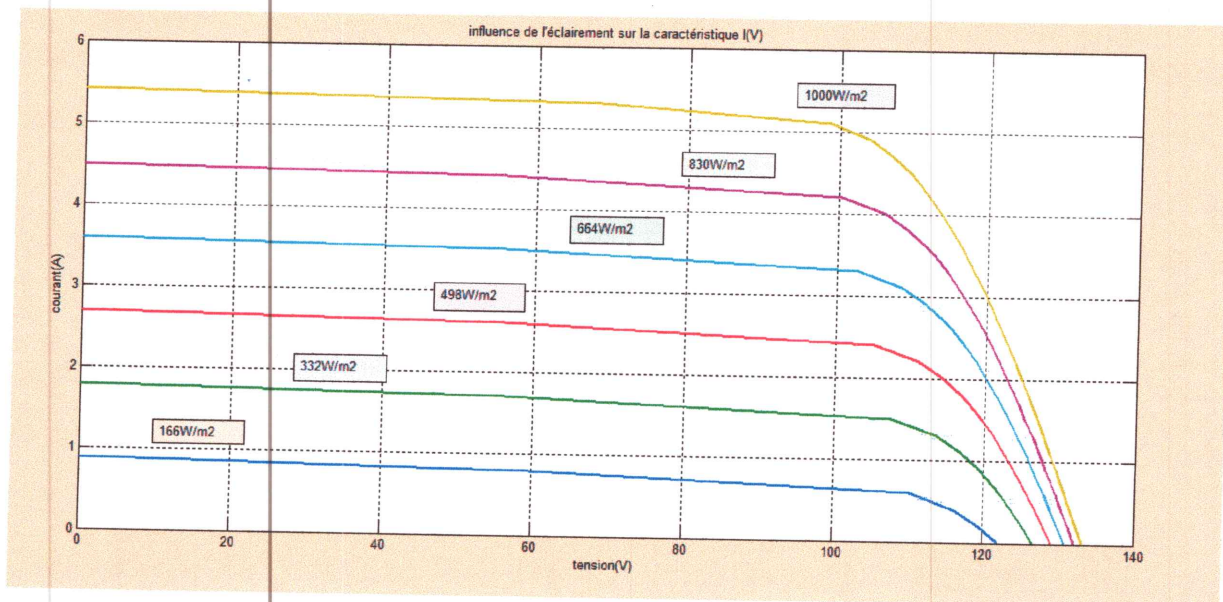


Figure IV.1: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V).

Nous constatons à partir de la fig. (IV - 1) que le courant passe de zéro pour un éclairement nul jusqu'à 5.45A qui correspond à un ensoleillement de 1000W/m^2 .

Contrairement au premier cas et pour un ensoleillement donné (fixe) la puissance crête et inversement proportionnelle à la température. C à d lorsque la température augmente la puissance subit une décroissance remarquable. Mais la tension du panneau s'additionne pour atteindre la valeur de six fois celle du module. La puissance dans ce cas atteint son maximum (85.4W) lorsque l'éclairement est de 1000W/m^2 . Elle subit une diminution de 14W pour chaque décroissance de l'ensoleillement d'un pas de 166W/m^2 .

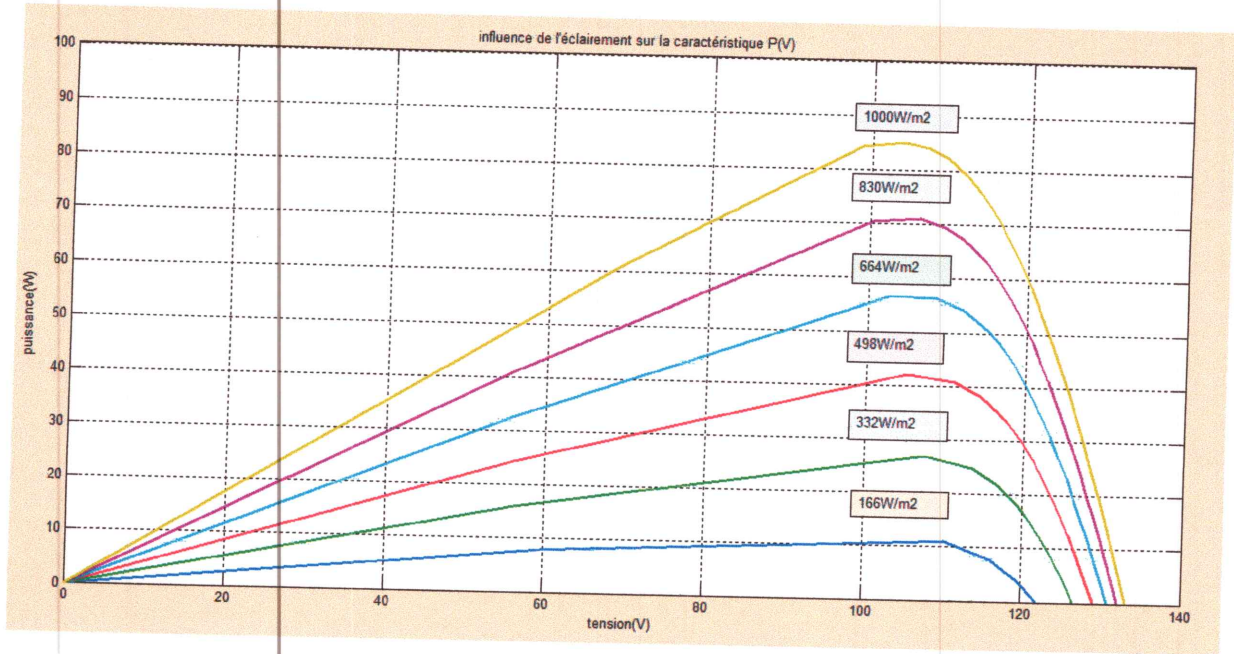


Figure IV.2: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

IV.1.2 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) pour un groupement parallèle de six modules PV

Cette fois-ci c'est au tour du courant qui s'additionne pour arriver à une valeur équivalent à six celle du courant de court-circuit pour un seul module.

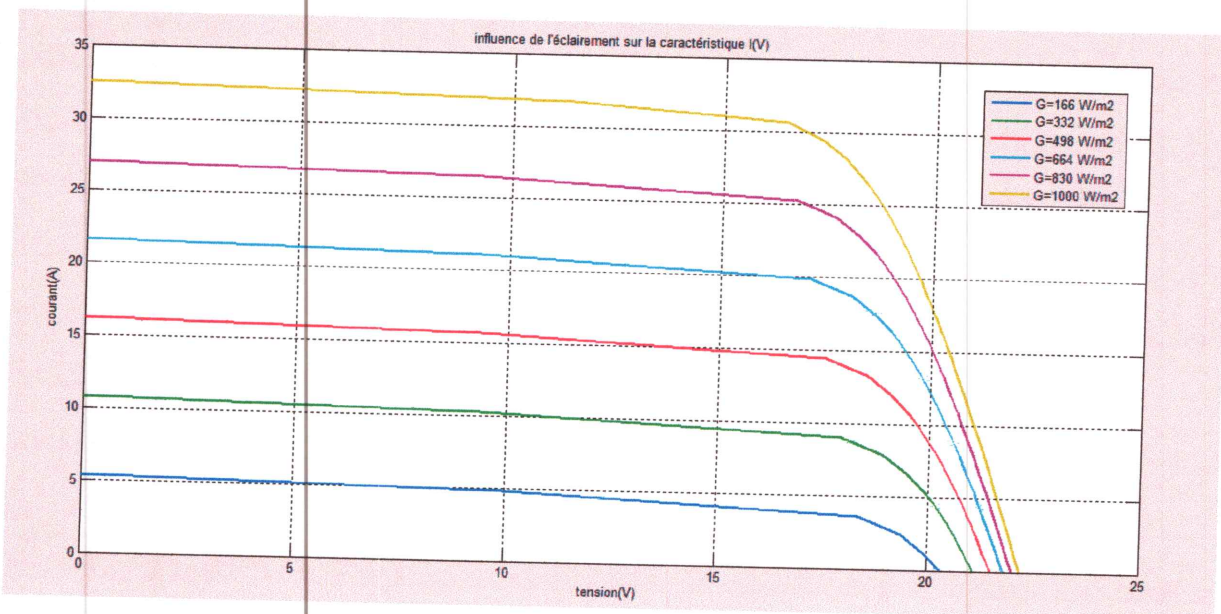


Figure IV.3: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) pour un groupement parallèle.

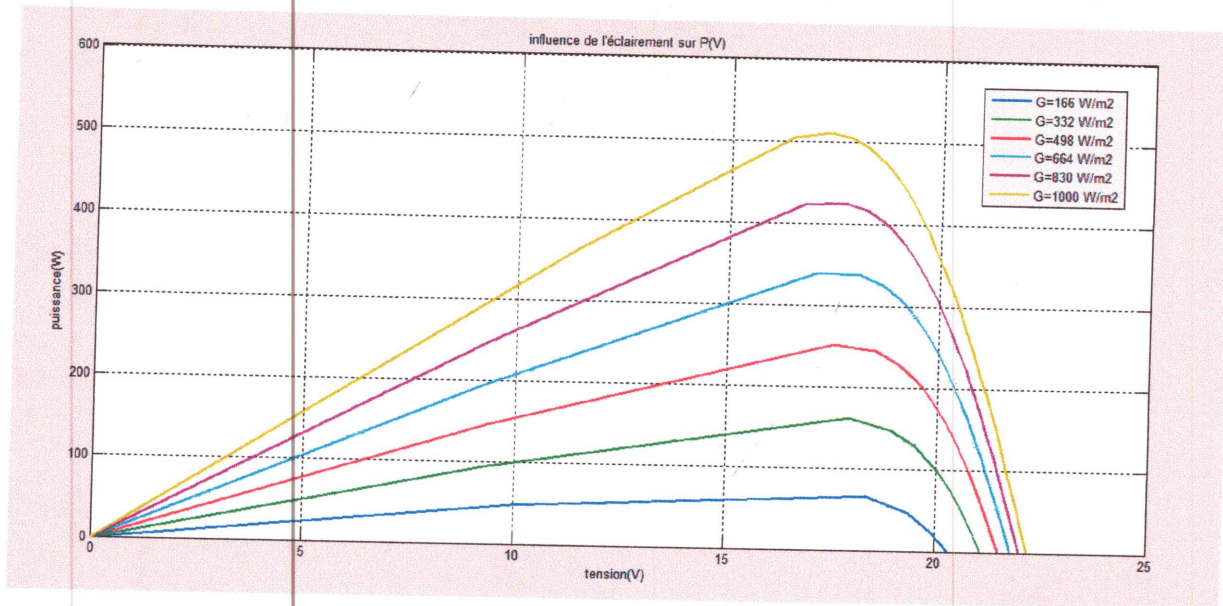


Figure IV.4: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) pour un groupement parallèle

IV.2 L'influence de la température sur I(V) pour un groupement série de six modules

De la même manière, la tension et la puissance subissent le même sort lorsqu'il s'agit d'un groupement de modules en série.

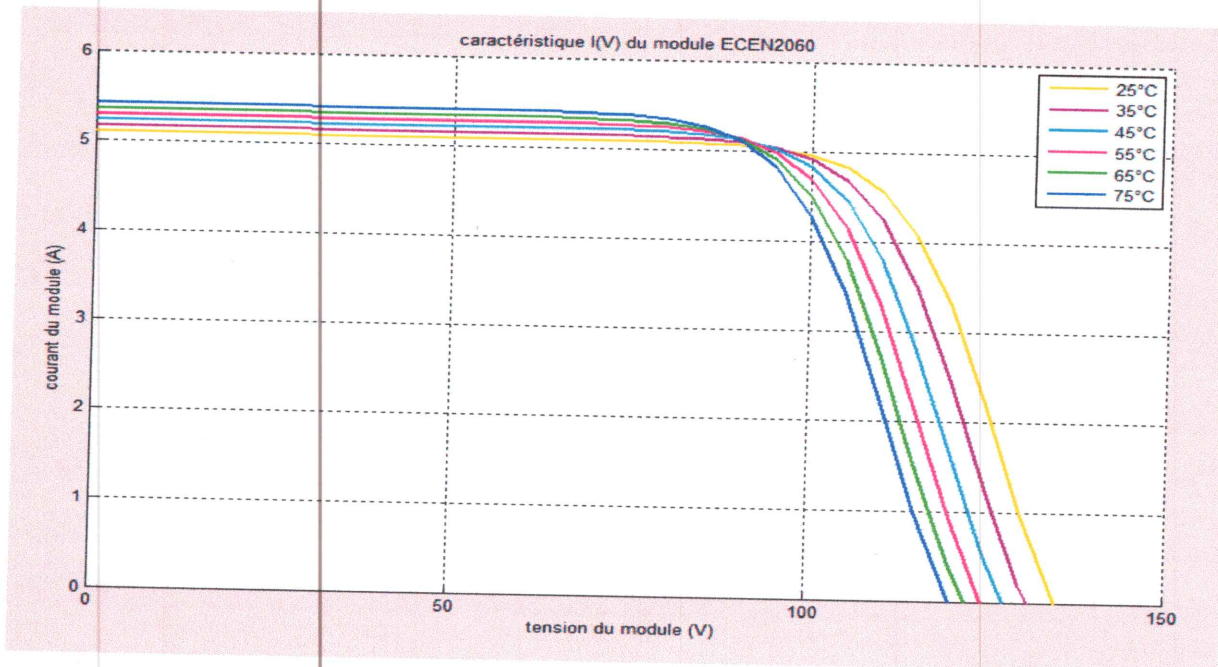


Figure IV.5: Caractéristique I(V) à température variable pour un groupement série.

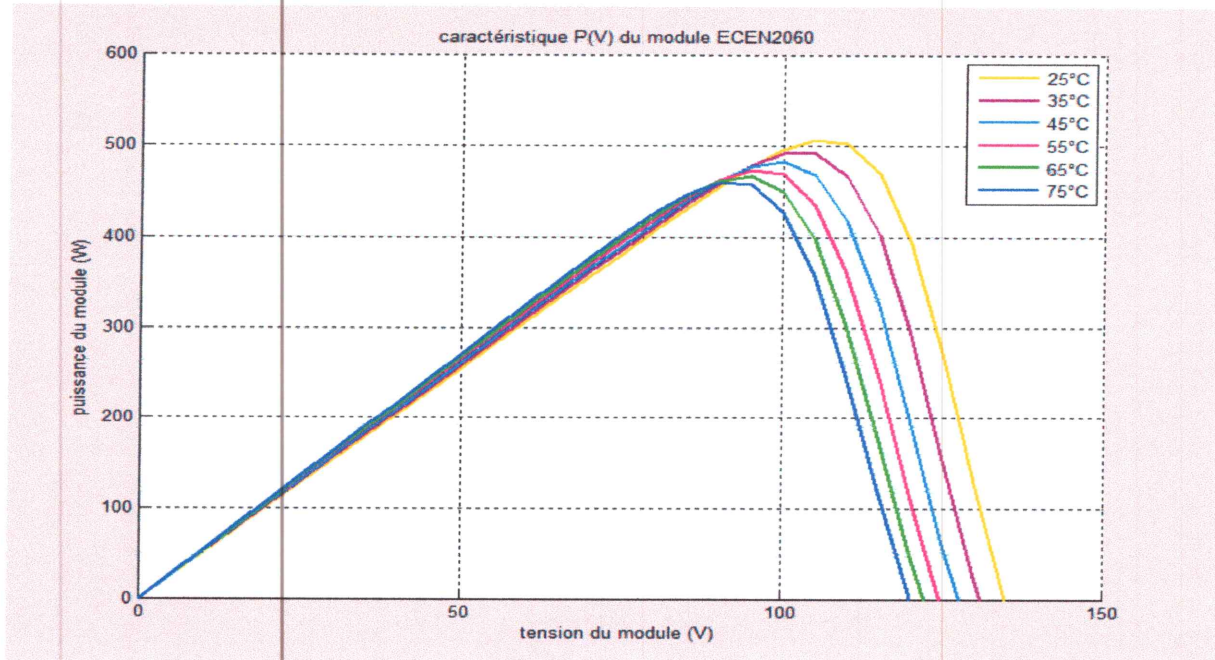


Figure IV.6: Caractéristique P(V) à température variable pour un groupement série.

IV.2.2 L'influence de la température sur I(V) pour un groupement parallèle

Cette fois-ci c'est le courant et la puissance qui connaissent une accentuation. Leurs évolutions pour différentes valeurs de température connaît une multiplication équivalente au nombre de modules (six dans notre cas).

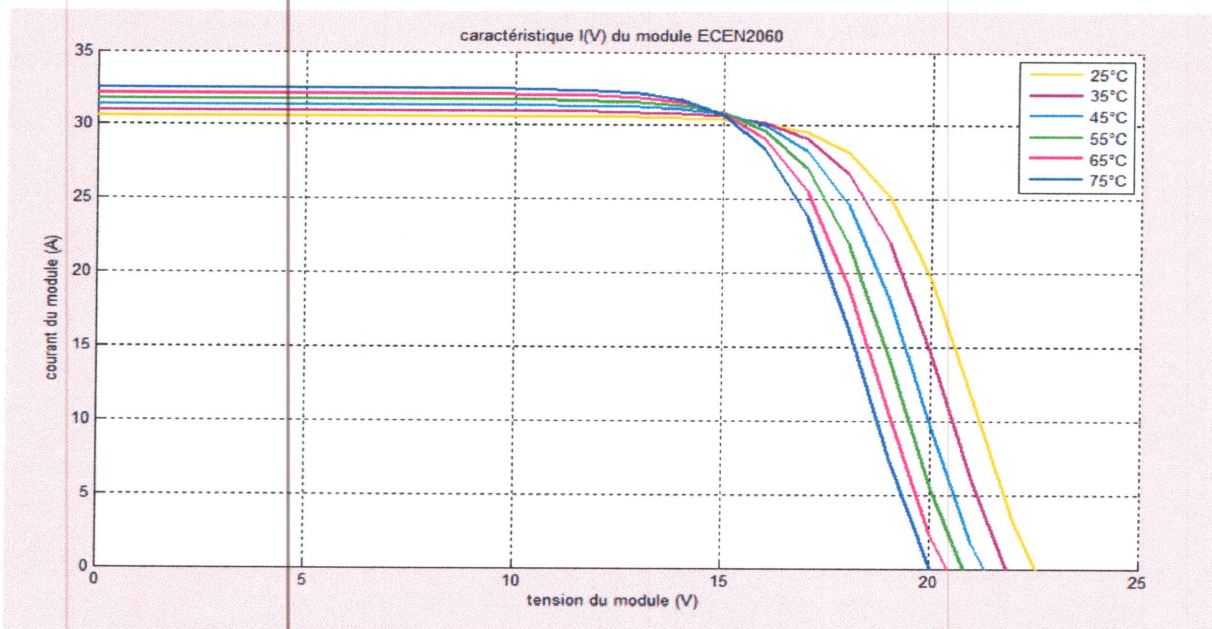


Figure IV.7: Caractéristique I(V) à température variable pour le groupement parallèle.

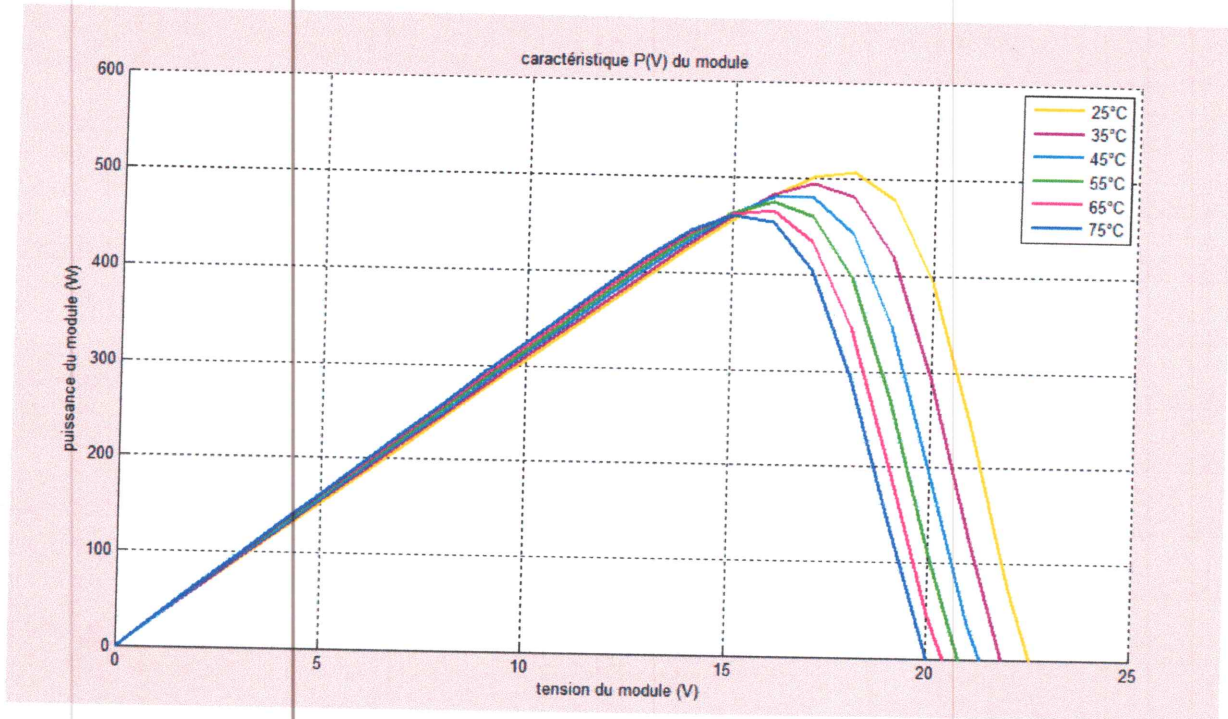


Figure IV.8: Caractéristique I(V) à température variable pour le groupement parallèle.

On remarque que les influences de l'éclairement et de la température sur la puissance délivrée par un panneau photovoltaïque sont importantes.

IV.3 L'influence de la résistance R_s

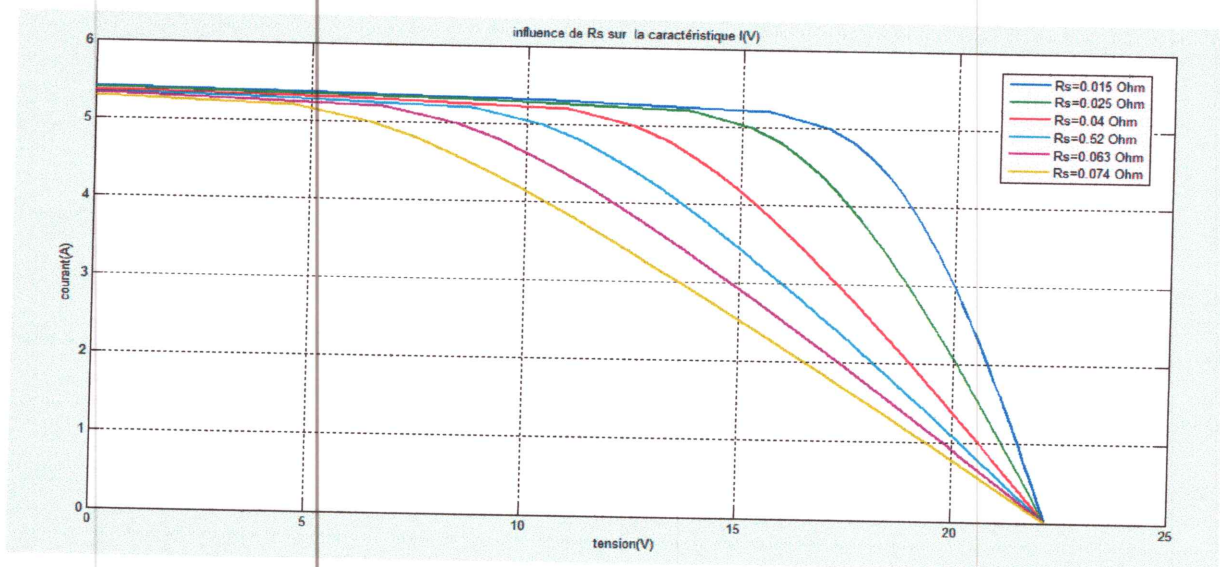


Figure IV.9: L'influence de R_s sur la caractéristique I(V).

Les caractéristiques $I(V)$ pour différents éclairagements s'obtiennent par simple translation de l'ordonnée lorsque la résistance série est nulle. En d'autres termes la forme de la courbe est invariante lorsqu'on change l'intensité lumineuse. Il n'en va pas de même si l'on tient compte d'une résistance série non nulle.

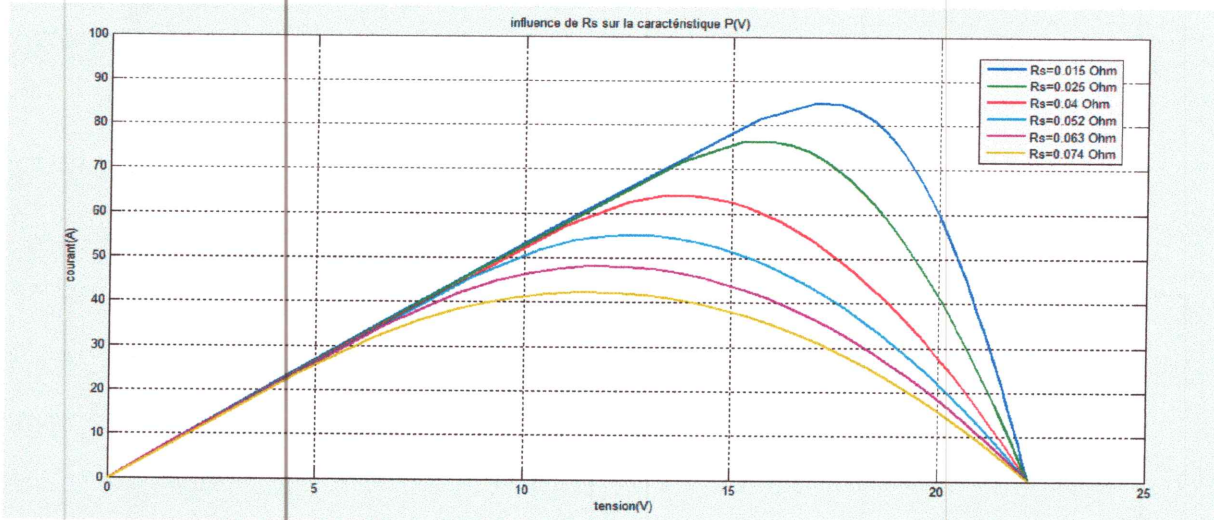


Figure IV.10: L'influence de R_S sur la caractéristique $P(V)$.

IV.4 L'influence de la résistance R_P

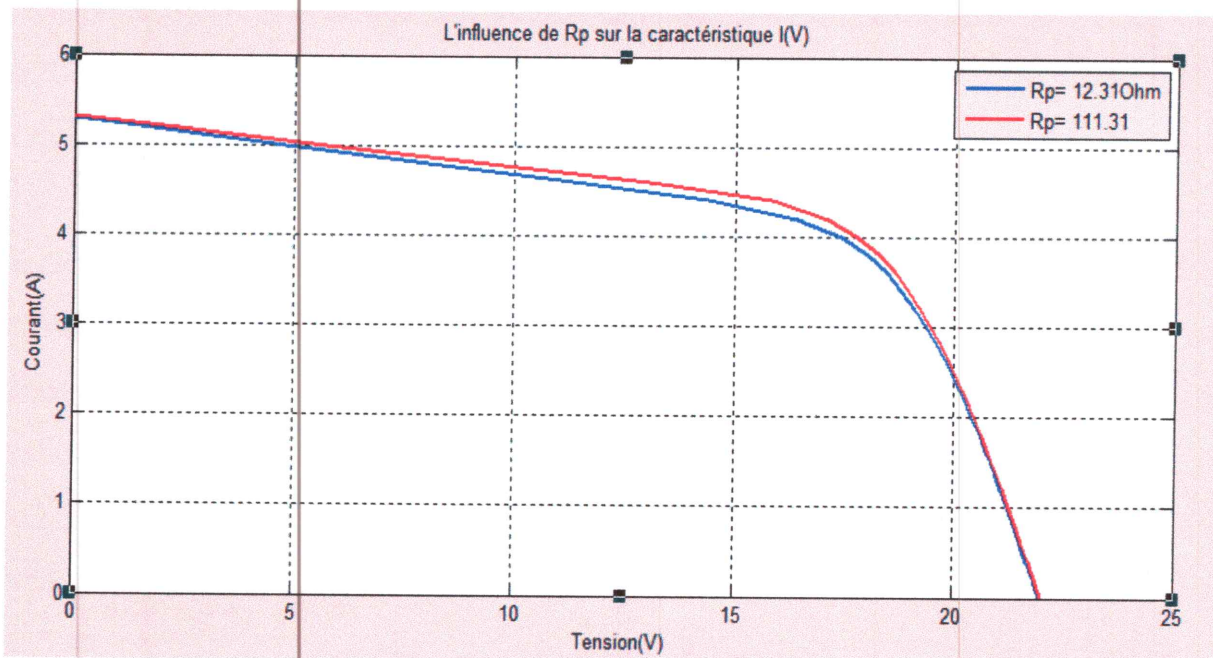


Figure IV.11: Influence de R_P sur la caractéristique $I(V)$.

On peut percevoir une anomalie à la lecture de la caractéristique par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit. Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile; à cause de cela une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement.

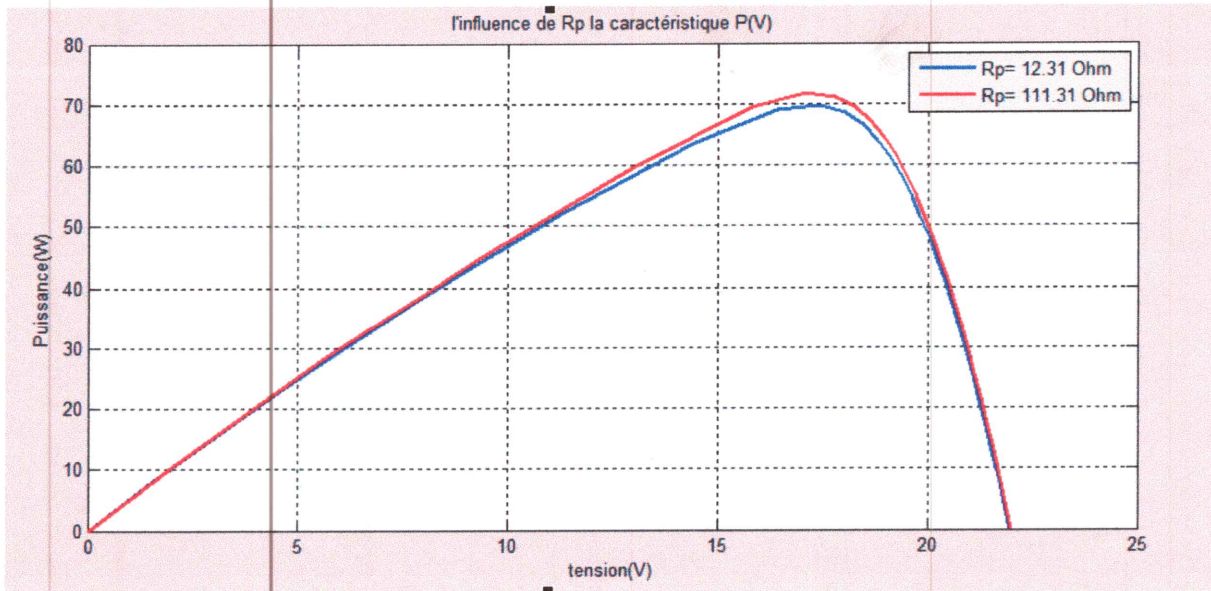


Figure IV.12: L'influence de R_p sur la caractéristique $P(V)$.

IV .5 Discussions

Les deux tableaux suivants feront la synthèse de tout ce qui a précédé. Sur la première ligne du tableau IV.1, on constate que la puissance atteint son niveau maximal lorsque la température est à 25°C et son minimum est estimé à 463.5W correspondant à une température de 75°C. Donc, la tension de circuit ouvert V_{oc} baisse avec la hausse de température.

Pour $G= 1000W/m^2$:

T °C	$V_{oc}(V)$	$I_{sc}(A)$	$V_m(V)$	$I_m(A)$	$P_m(W)$
25	135	5.45	100	4.9	506
35	132	5.20	106	4.75	503.5
45	129	5.28	100	4.86	486
55	126	5.34	97	4.98	483.06
65	123	5.42	93	5.12	476.16
75	120	5.45	90	5.15	463.5

Tableau IV.1: L'influence de la température sur les caractéristiques du générateur à un ensoleillement donné.

Contrairement au premier tableau, le second indique que la puissance du panneau solaire est à son maximum pour une température donnée (25°C) lorsque l'éclairement atteint son niveau max de 1000W/m².

Pour T= 25°C :

G W/m²	V_{oc}(V)	I_{sc}(A)	V_m(V)	I_m(A)	P_m(W)
166	121	0.9	114	0.6	68.4
332	127	1.8	112	1.5	168
498	130	2.7	110	2.3	253
664	133	3.6	107	3	321
830	134	4.5	105	4	420
1000	135	5.45	100	4.9	506

Tableau IV.2 : L'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du générateur à une température donnée.

IV.6 Conclusion

Après illustration des résultats obtenus, nous avons constatés que pour les grandes valeurs de la résistance série **R_s** réduisent énormément le courant de court-circuit **I_{sc}**, tandis que les petites valeurs de la résistance parallèle **R_p** réduisent la tension de circuit-ouvert **V_{oc}**. Généralement, l'effet de la résistance parallèle du circuit électrique équivalent au cas d'une cellule réelle est négligé, car son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas. La variation de ces résistance s'affecte donc le facteur de forme FF et aussi la puissance de sortie du générateur.

La variation de l'ensoleillement entraîne une variation du courant proportionnel à cette dernière et une variation de la tension relativement faible. Ce phénomène physique est intéressant lors de la recharge de batteries.

Conclusion générale

L'objectif de ce modeste travail est d'assurer la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque fonctionnant sans convertisseur permettant ainsi de démontrer l'impact des changements climatiques sur la caractéristique $I(V)$ d'une part et la puissance disponible à la sortie du panneau solaire d'autre part.

Initialement, l'étude bibliographique menée sur les générateurs photovoltaïques nous a permis de bien comprendre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et l'application des modules dans la production de l'électricité.

En se basant sur la fiche technique du panneau solaire ECEN2060 dans les conditions idéales, nous avons procédé à la modélisation afin d'extraire les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du panneau, chose qui a permis de développer un modèle Simulink représentant ces caractéristiques.

La simulation du générateur photovoltaïque a été effectuée en détails et en plusieurs étapes afin d'illustrer le fonctionnement du générateur et son comportement vis-à-vis des changements climatiques. L'évolution des courbes déduites à partir de la simulation ont montrés que la puissance maximale du panneau simulé est inversement proportionnelle à la variation de la température avec un ensoleillement donné. Contrairement à cette hypothèse et à une température donnée, cette puissance croit et diminue directement avec l'ensoleillement.

Perspectives

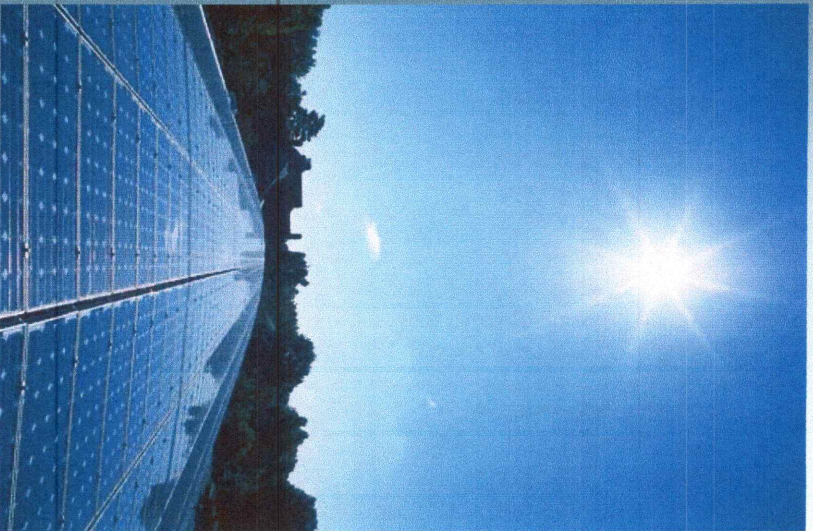
Parmi les perspectives qui peuvent faire l'objet de futurs travaux complémentaires à cette étude nous pouvons citer :

- Le couplage du panneau solaire à un convertisseur DC/DC.
- L'intérêt de faire appel à un dispositif de recherche de la puissance maximale.
- Le besoin de la régulation de puissance (régulateur PID par exemple) afin d'assurer la stabilité du système et l'implémentation des méthodes de contrôle avancées.



Annexe

PV Module Simulink models



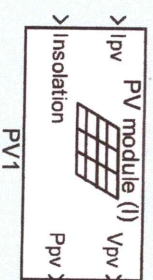
ECEN 2060

Spring 2008



Simulink models of PV modules

Current-input PV module



Inputs:

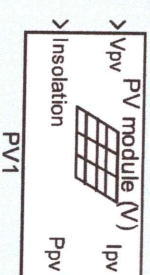
- PV current I_{pv} [A]
- Insolation [W/m^2]

Outputs:

- PV voltage V_{pv} [V]
- PV output power P_{pv} [W]

This model is well suited for the case when modules are connected in series and share the same current

Voltage input PV module



Inputs:

- PV voltage V_{pv} [V]
- Insolation [W/m^2]

Outputs:

- PV current I_{pv} [A]
- PV output power P_{pv} [W]

This model is well suited for the case when modules are connected in parallel and share the same voltage

Model parameters, in both cases, are the standard PV module data-sheet parameters:

- short-circuit current I_{sc}
- open-circuit voltage V_{oc}
- rated current I_R at maximum power point (MPP)
- rated voltage V_R at MPP

under standard test conditions (1kW/m², 1.5 AM, 25°C). A bypass diode (a single diode across the entire module) can be included. Temperature effects are not modeled.

Parameters

Short-circuit current
5.45

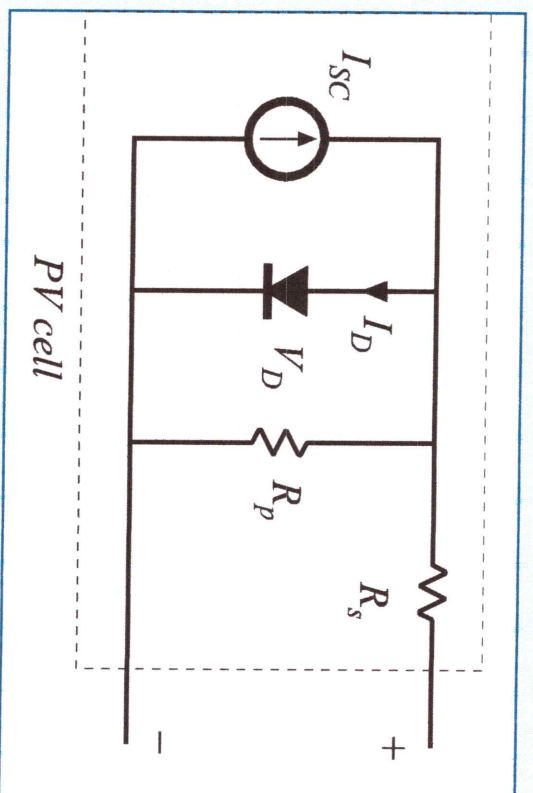
Open-circuit voltage
22.2

Current at Pmax
4.95

Voltage at Pmax
17.2

Bypass diode?

PV cell circuit model and equations



KCL:

$$I_{SC} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} = 0$$

Diode characteristic:

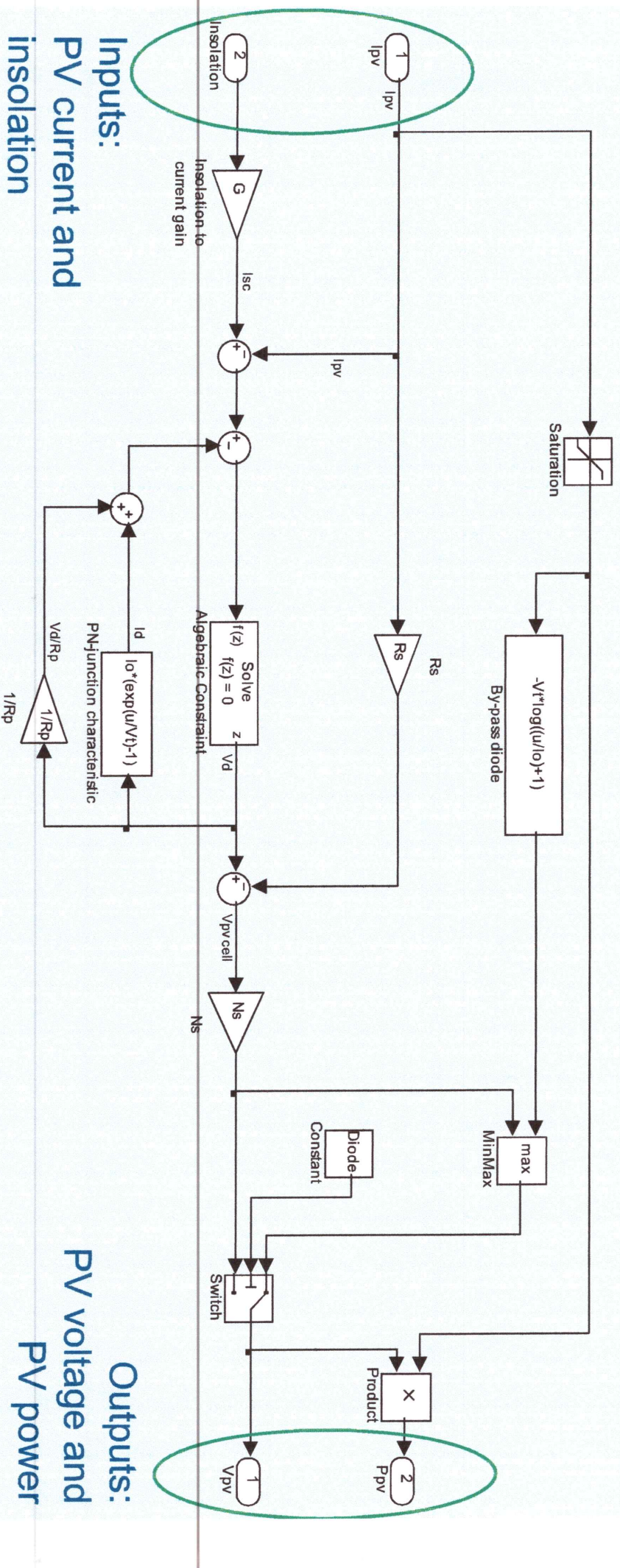
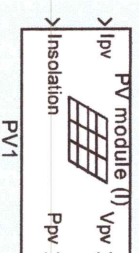
$$I_D = I_o \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$

KVL:

$$V_{PVcell} = V_D - R_s I_{PV}$$

Simulink Implementation

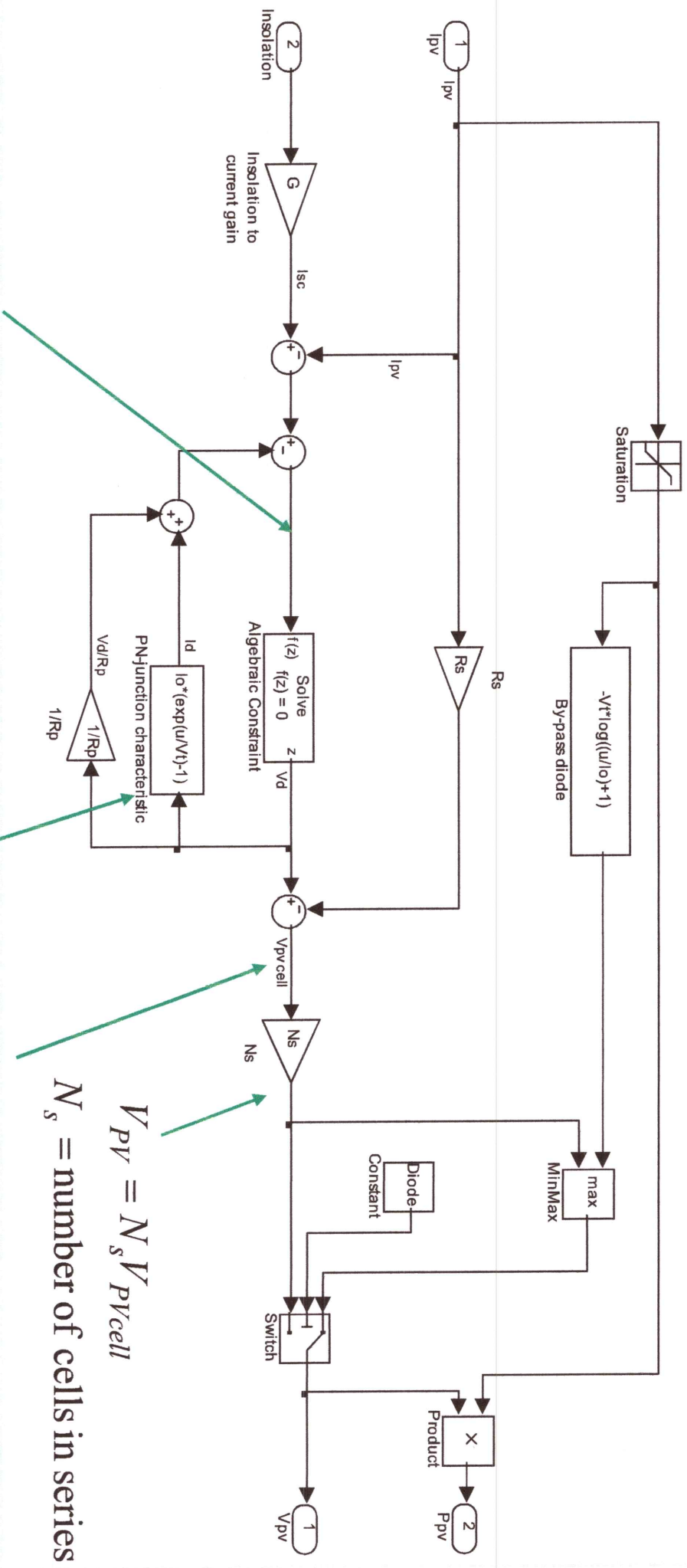
- Both PV module models are implemented as masked subsystems in Simulink
- Look Under Mask (right-click or Edit menu) reveals details of the model implementation
- Details of the current-input PV module model:



Inputs:
PV current and
insolation

Outputs:
PV voltage and
PV power

Inside the current-input PV module model



$$V_{PV} = N_s V_{PVcell}$$

N_s = number of cells in series

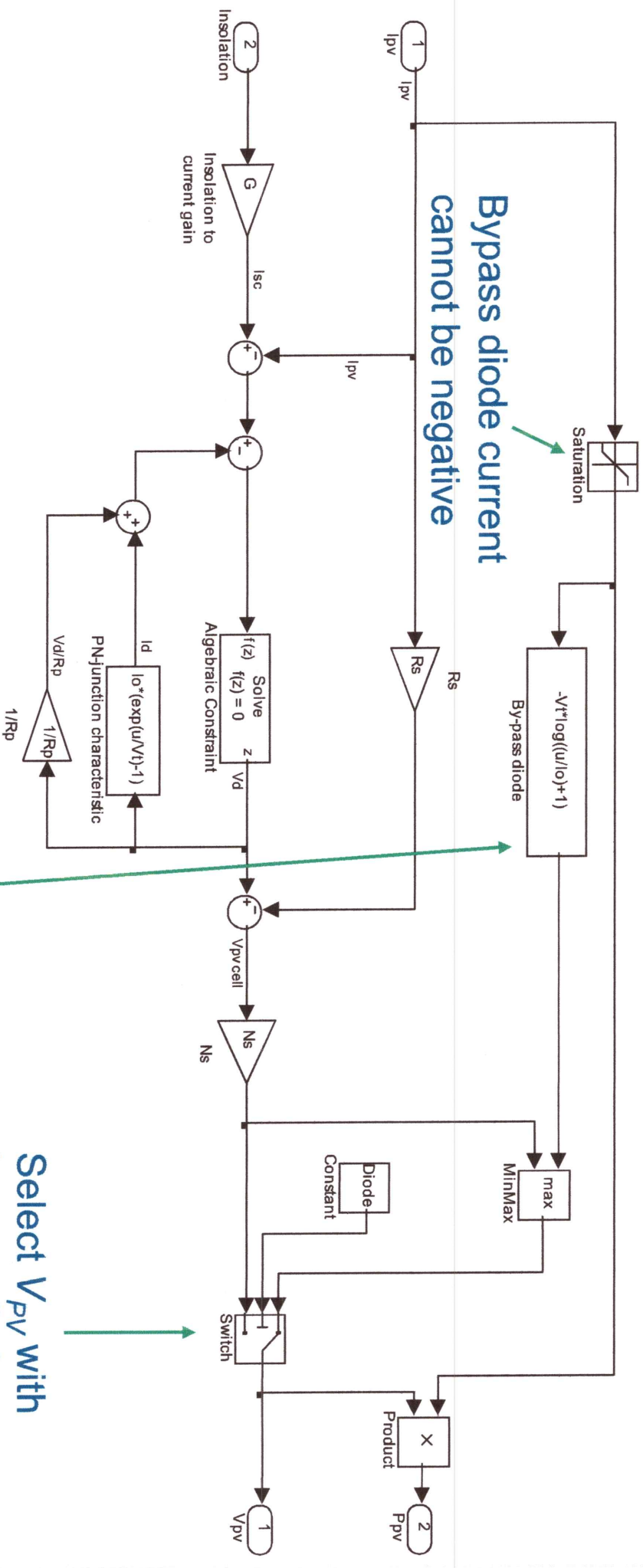
$$V_{PVcell} = V_D - R_S I_{PV}$$

$$I_{SC} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} = 0$$

KCL solved for V_D
using Algebraic
Constraint block

$$I_D = I_o (e^{V_D/V_T} - 1)$$

Inside the current-input PV module model



Bypass diode current cannot be negative

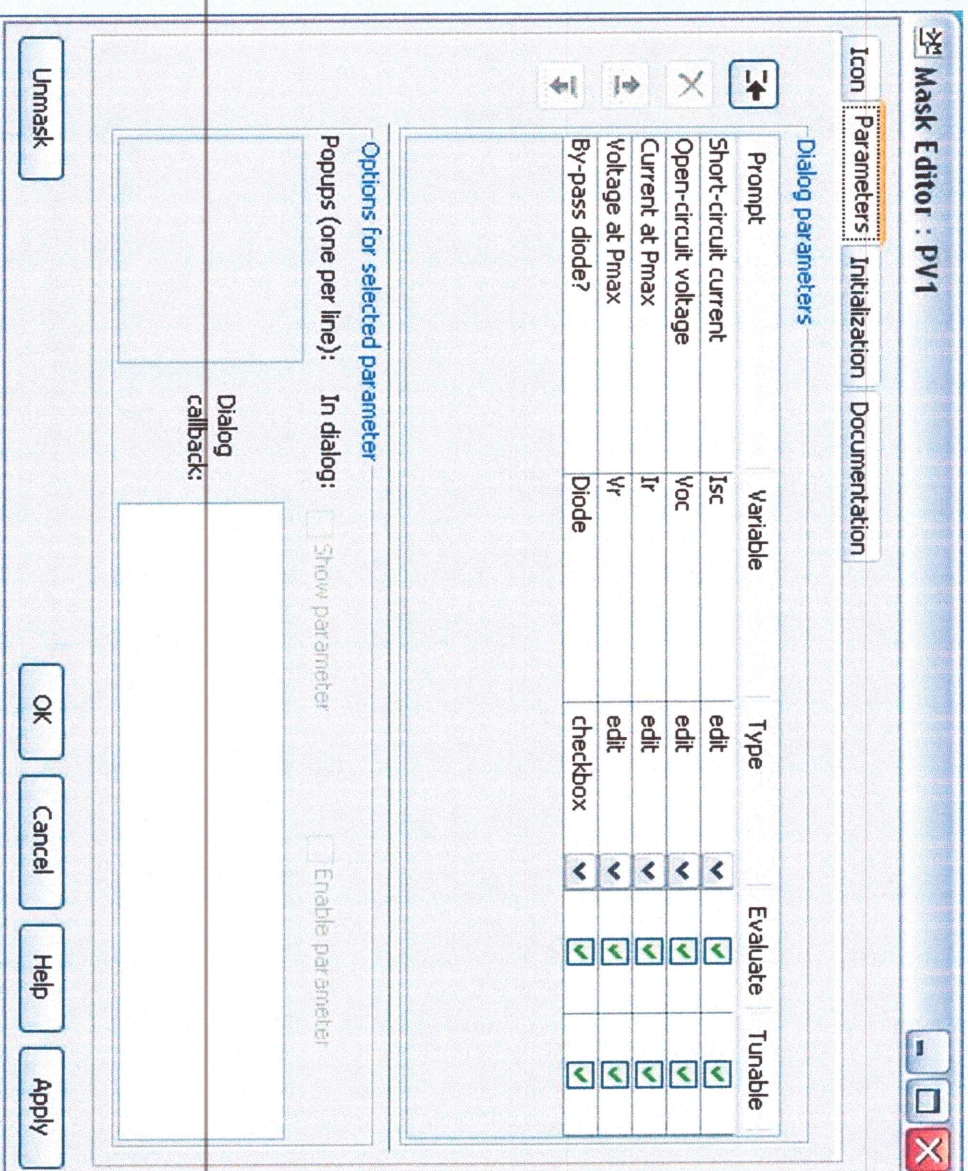
$$V_{D_{bypass}} = V_t \ln \left(\frac{I_{bypass}}{I_0} + 1 \right)$$

Bypass diode voltage
(if forward biased)

Select V_{pV} with
bypass diode
("Diode" = 1) or
without bypass diode
("Diode" = 0)

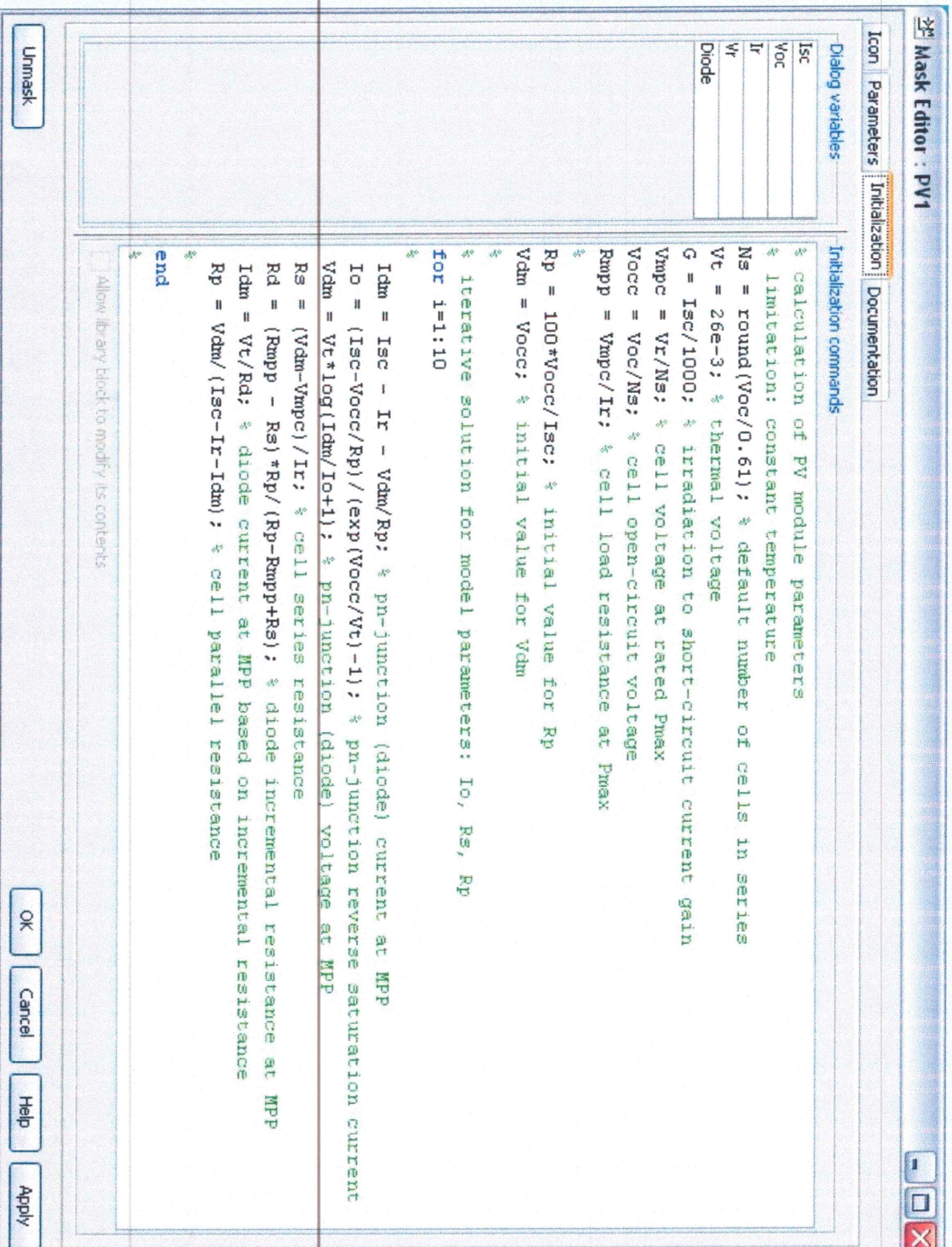
Model Mask: Parameters

- Edit Mask (right-click or Edit menu), click on Parameters
- This is where the masked subsystem model parameters are defined



Model Mask: Initialization

- Edit Mask (right-click or Edit menu), click on Initialization
- The MATLAB code computes model parameters I_o , R_s , R_p based on the model parameters (short-circuit current I_{sc} , circuit voltage V_{oc} , rated voltage V_r , and rated current I_r)



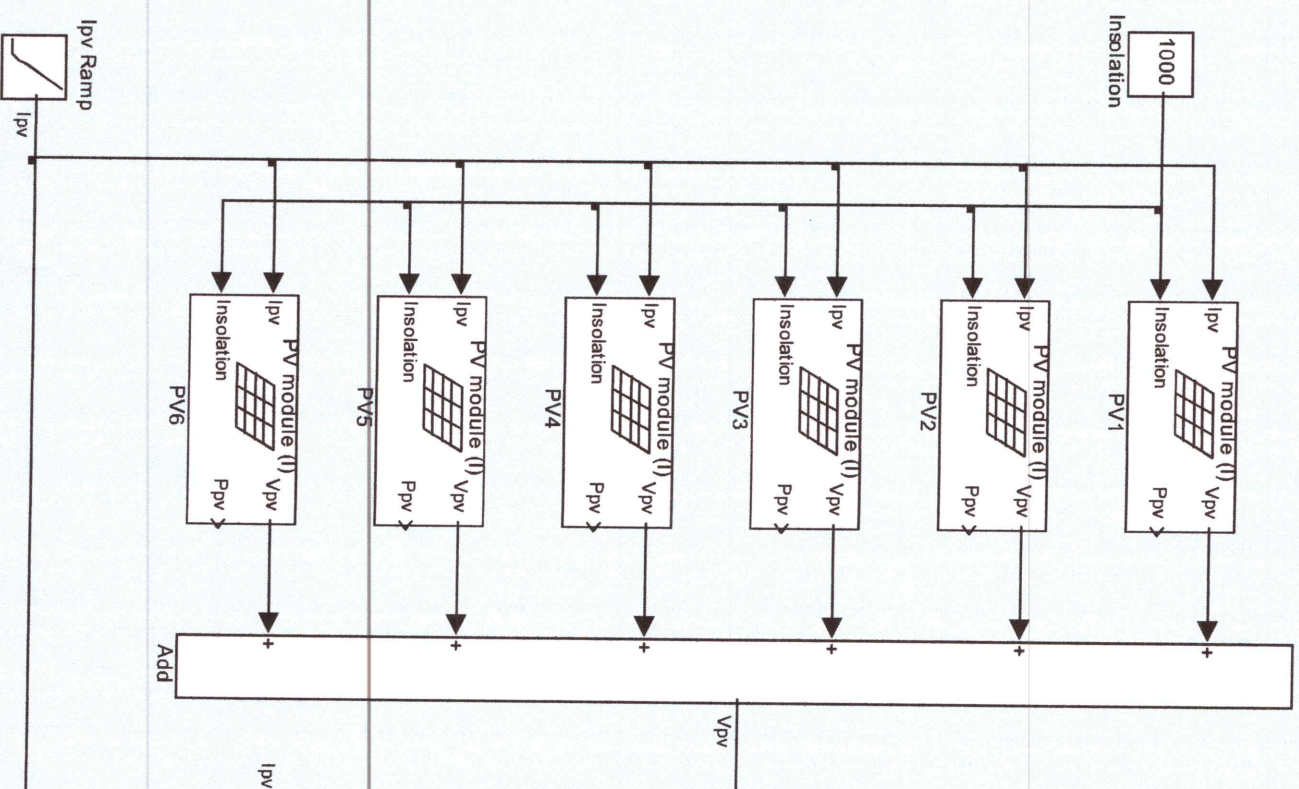
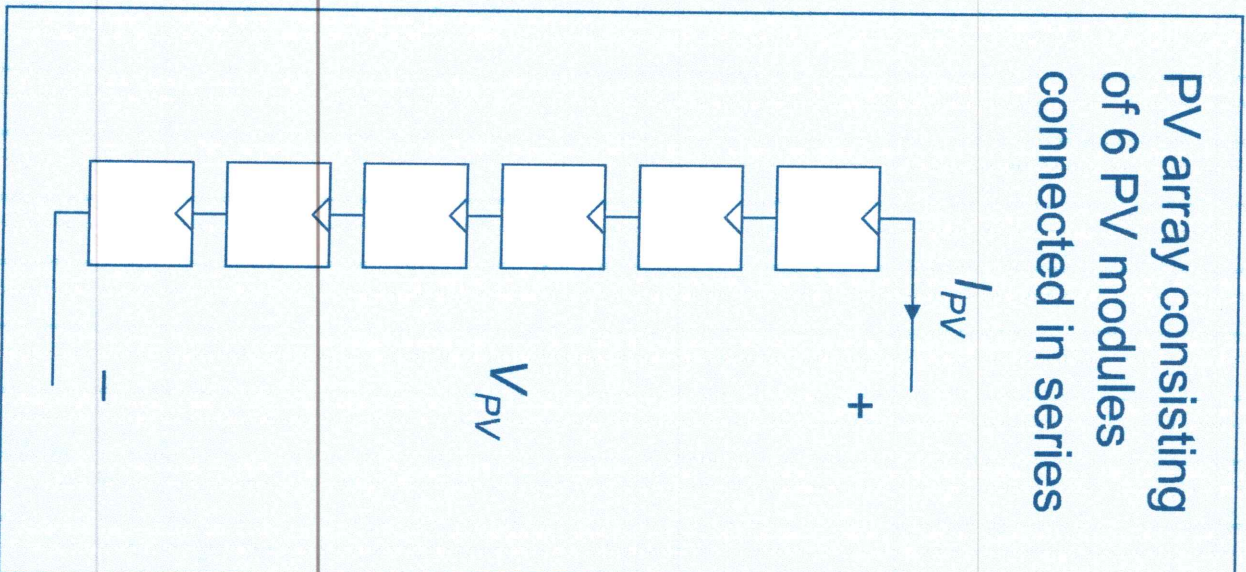
The screenshot shows the 'Mask Editor : PV1' window with the 'Initialization' tab selected. The window contains a 'Dialog variables' table and a large text area with MATLAB code. The code calculates parameters I_o , R_s , and R_p based on input variables I_{sc} , V_{oc} , V_r , and I_r . It includes comments in Spanish explaining each step, such as calculating PV module parameters, limiting constant temperature, and finding the MPP (Maximum Power Point) through an iterative process.

Dialog variables
Isc
Voc
Ir
Vr
Diode

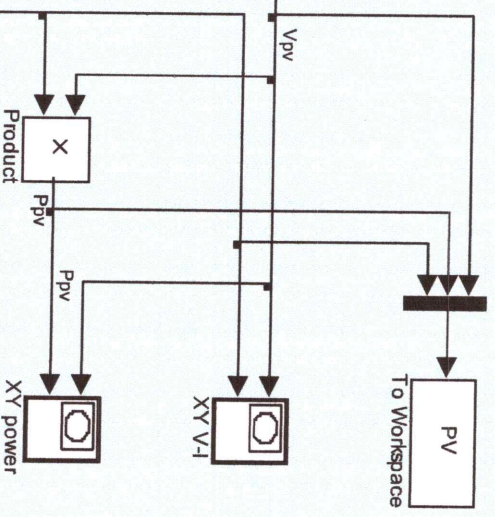
```
% Initialization commands
% calculation of PV module parameters
% limitation: constant temperature
Ns = round(Voc/0.61); % default number of cells in series
Vt = 26e-3; % thermal voltage
G = Isc/1000; % irradiation to short-circuit current gain
Vmpc = Vr/Ns; % cell voltage at rated Pmax
Voccc = Voc/Ns; % cell open-circuit voltage
Rmpc = Vmpc/Ir; % cell load resistance at Pmax
%
Rp = 100*Voccc/Isc; % initial value for Rp
Vdm = Voccc; % initial value for Vdm
%
% iterative solution for model parameters: Io, Rs, Rp
for i=1:10
%
Idm = Isc - Ir - Vdm/Rp; % pn-junction (diode) current at MPP
Io = (Isc-Voccc/Rp)/(exp(Voccc/Vt)-1); % pn-junction reverse saturation current
Vdm = Vt*log(Idm/Io+1); % pn-junction (diode) voltage at MPP
Rs = (Vdm-Vmpc)/Ir; % cell series resistance
Rd = (Rmpc - Rs)*Rp/(Rp-Rmpc+Rs); % diode incremental resistance at MPP
Idm = Vt/Rd; % diode current at MPP based on incremental resistance
Rp = Vdm/(Isc-Ir-Idm); % cell parallel resistance
%
end
```

Application Example: PV Array

PV array consisting of 6 PV modules connected in series

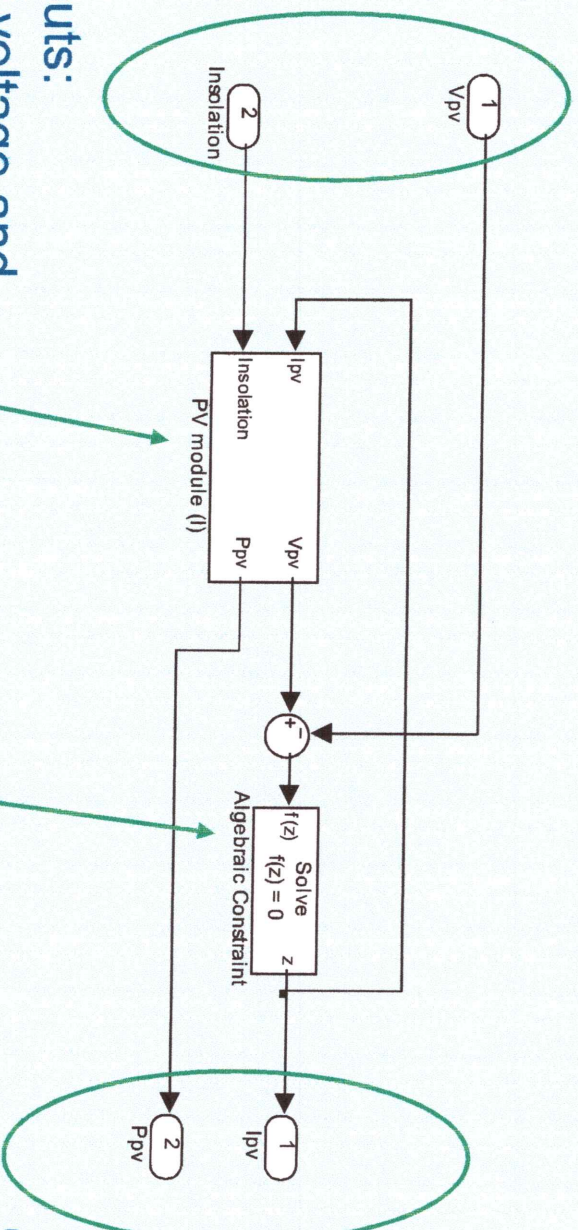
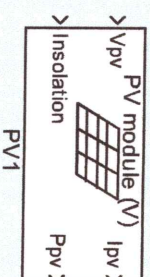


ECEN2060
6-module PV Array



Simulink model
pv_array.mdl

Inside the voltage-input PV module



Inputs:
PV voltage and
insolation

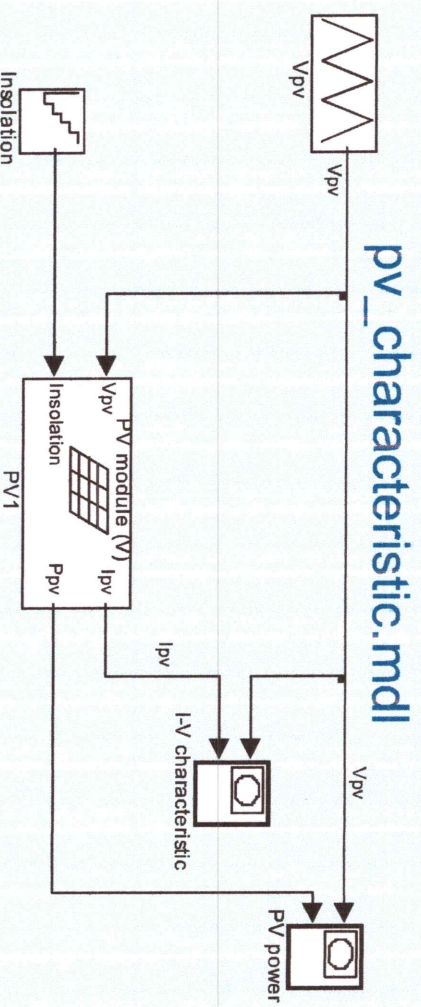
Current-input
PV model

Algebraic
Constraint block
solves for I_{pv} that
results in V_{pv}

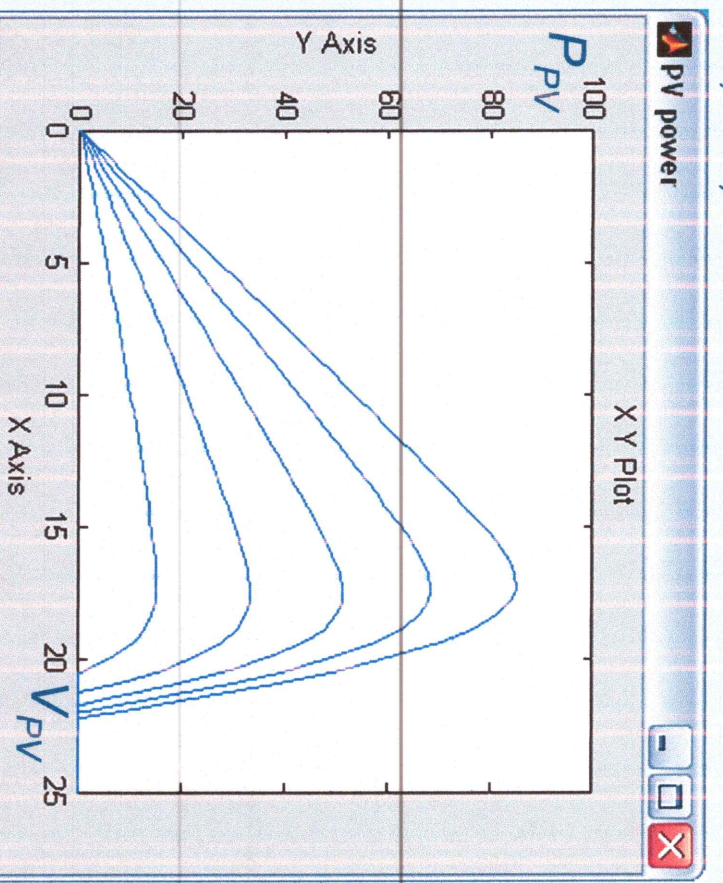
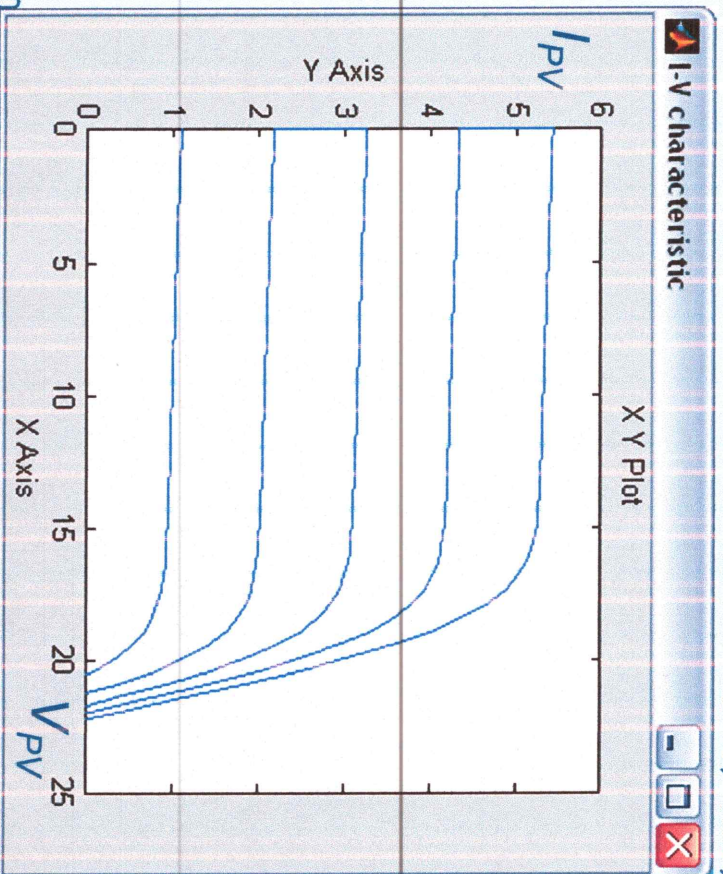
Outputs:
PV voltage and
PV power

Application Example: PV Module Characteristics

Simulink model:



Insolation = 200, 400, 600, 800, 1000 W/m²



Références bibliographiques

- [1] M. Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [2] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [3] W. Bensaci « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT .projet de fin d'études Université KASDI MERBAH-Ouargla » a en 2011-2012.
- [4] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [5] http://fr.wikipedia.org/wiki/Semi_conducteur
- [6] H. BOUKLI « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique » thèse de magister Université ABOU-BAKR BELKAID_TLEMCEM
- [7] A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering" John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [8] W.Xiao, "A Modified Adaptive Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method For Photovoltaic Power Systems", The University of British Columbia, 2003.

- [9] Akihiro Oi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", Faculty of California Polytechnic State University, 2005.
- [10] T.DenHerder, "Design and Simulation of Photovoltaic Super System Using Simulink", California Polytechnic State University, 2006.
- [11] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003.
- [12] H. Knopf, "Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicule", Portland State University, 1999.
- [13] L.Vechiu, "Modélisation et Analyse de l'Intégration des Énergies Renouvelables dans un Réseau Autonome", Université du Havre, 2005.