

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail - Patrie

\*\*\*\*\*

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

\*\*\*\*\*

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE

YAOUNDE

\*\*\*\*\*

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace - Work - fatherland

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDÉ I

\*\*\*\*\*

HIGHER TEACHER'S TRAINING COLLEGE

YAOUNDE

\*\*\*\*\*

DEPARTMENT OF PHYSICS

## ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES MONO ET POLY-CRISTALLINS

Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention  
du Diplôme de Professeur d'Enseignement Secondaire  
Deuxième Grade (Di.P.E.S.II)

Par :

**TIOKANG LIBAWO Husserl**

*MATRICULE : 10W0853*

Master of sciences

Sous la direction de :

**Pr. BODO Bertrand**

*Maître de conférences*

Université de Yaoundé 1

Soutenu publiquement le 17 Juin 2019 devant le jury composé de :

Pr. SAÏDOU

Pr. BODO Bertrand

Pr. FEWO Serge

Maître de Conférences, Université de Yaoundé I

Maître de Conférences, Université de Yaoundé I

Maître de Conférences, Université de Yaoundé I

Président

Rapporteur

Examineur

Année académique 2018-2019

# Étude des caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques mono et poly-cristallins

Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention  
du Diplôme de Professeur d'Enseignement Secondaire  
Deuxième Grade (Di.P.E.S.II)

Département des Sciences Physiques

Présenté par :

**TIOKANG LIBAWO Husserl**

*Master of Sciences*

Matricule : 10W0853

Sous la direction de :

**Pr. BODO Bertrand**

*Maître de conférences, Université de Yaoundé I*

Année Académique 2018-2019

---

## DÉDICACE

---

*À mes parents*

---

## REMERCIEMENTS

---

Ce travail de recherche est le résultat du soutien et des encouragements de plusieurs personnes auxquelles j'aimerais exprimer ma profonde gratitude :

*En premier lieu à mon directeur de mémoire, le **Pr. BODO Bertrand**, Maître de conférences et responsable du Laboratoire d'électronique de L'Université de Yaoundé I, qui m'a accueilli dans son équipe de recherche et a bien voulu diriger pas à pas ce travail. Sa patience, ses conseils, sa disponibilité, sa rigueur au travail qui ont largement contribué à la réalisation de ce travail.*

*le **Dr. ALOYEM KAZE Claude Vidal**, enseignant à l'Université de Bamenda pour ses conseils avisés et la motivation qu'il a su m'insuffler tout au long de ce travail.*

*Tous les enseignants du Département des Sciences physiques de l'École Normale supérieure de Yaoundé I, pour les enseignements, l'encadrement reçus au cours de ma formation.*

*Toute l'équipe des enseignants et ingénieurs chercheurs du Laboratoire d'électronique de L'Université de Yaoundé I pour leur franche collaboration.*

*Les membres du jury ; président de jury, rapporteur et examinateur pour le temps consacré et pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Ma tendre famille qui m'a été d'un grand soutien spirituel, moral et financier, en particulier mon papa **LIBAWO Bernard**, ma maman **MANITI Marie-Claire** et mes adorables frères et sœurs : **Beatrice, Michealle, Éliane, Sandrine, Christelle, Gwladys, Luther et Marcelle**.*

*La famille **NODEM** pour m'avoir apporter le soutien qu'il faut au moment ou il le fallait.*

*À mon Tonton **Éric NDE** pour avoir toujours sus me dire mes mots qu'il faut pour me motiver et pour son soutien multiforme.*

*À toute l'équipe de **PIA** pour leur amitié, leur solidarité et leur soutien.*

*Mes ami(s)(es) et mes camarades de promotion qui m'ont soutenu et assisté dans mon dur labeur.*

---

## Table des matières

---

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	vi
Abstract.....	vii
Liste des abréviations.....	viii
Liste des figures.....	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
<b>CHAPITRE 1 : REVUE DE L'ART SUR LA FILIÈRE SOLAIRE</b> ..	<b>3</b>
1.1 Contexte énergétique .....	3
1.1.1 Énergie photovoltaïque en Afrique .....	4
1.1.2 Électricité photovoltaïque au Cameroun .....	4
1.1.3 Domaines d'application et Intérêt du photovoltaïque .....	6
1.2 Rayonnement solaire à la surface de la terre .....	8
1.2.1 Le rayonnement électromagnétique du soleil .....	9
1.2.2 Les rayonnements direct, diffus et global .....	9
1.2.3 Étude des principaux facteurs de variation du spectre solaire .....	10
1.2.4 Durée d'insolation .....	10
1.3 Le principe de la conversion photovoltaïque .....	11
1.3.1 L'absorption de la lumière dans le matériau .....	11
1.3.2 Le transfert de l'énergie des photons aux charges électriques .....	13
1.3.3 La collecte des charges .....	14
1.3.4 La diffusion et les recombinaisons des porteurs. ....	16
1.4 Les technologies de captation du rayonnement solaire : les cellules <i>PV</i> .....	16
1.4.1 Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin .....	17
1.4.1.1 Les matériaux solides cristallisés (c-Si, p-Si, $\mu$ c-Si) .....	17
1.4.1.2 La structure des cellules cristallines .....	19

1.4.1.3	Quelques propriétés des cellules cristallines . . . . .	19
1.4.2	Les cellules photovoltaïques en couches minces . . . . .	19
1.4.2.1	Les couches minces au silicium . . . . .	20
1.4.2.2	Quelques propriétés des couches minces au silicium . . . . .	20
1.4.2.3	Le tellurure de cadmium . . . . .	21
1.4.2.4	Le diséléniure de cuivre et d'indium . . . . .	22
1.4.3	Les cellules photovoltaïques de troisième génération . . . . .	22
<b>CHAPITRE 2 : MODÉLISATION DES PANNEAUX PHOTO-</b>		
<b>VOLTAÏQUES</b> .....		24
2.1	Modélisation des cellules . . . . .	24
2.1.1	Modèles à une diode . . . . .	24
2.1.1.1	Modèle à trois paramètres $1D3$ . . . . .	24
2.1.1.2	Modèle à quatre paramètres $1D4P$ . . . . .	25
2.1.1.3	Modèle à cinq paramètres $1D5$ . . . . .	26
2.1.2	Modèles à deux diodes . . . . .	26
2.1.2.1	Modèle à cinq paramètres $2D5P$ . . . . .	27
2.1.2.2	Modèle à six paramètres $2D6P$ . . . . .	27
2.1.2.3	Modèle à sept paramètres $2D7P$ . . . . .	28
2.2	Détermination des paramètres . . . . .	29
2.2.1	Détermination du photo-courant $I_{ph}$ . . . . .	29
2.2.2	Détermination du courant de saturation inverse de $I_{sat}$ . . . . .	29
2.2.3	Détermination des résistances $R_s$ et $R_{sh}$ . . . . .	30
2.3	Le rendement . . . . .	30
2.4	Méthode de modélisation numérique d'un module photovoltaïque . . . . .	33
2.4.1	Modélisation par un Code Matlab . . . . .	33
2.4.2	Modélisation sous MatLab Simulink . . . . .	34
2.4.2.1	Première approche . . . . .	34
2.4.2.2	Deuxième approche . . . . .	35
2.4.2.3	Troisième approche . . . . .	35
<b>CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS</b> .....		37
3.1	Conception du module photovoltaïque . . . . .	37
3.1.1	Calcul des différents paramètres . . . . .	37
3.1.2	Module photovoltaïque . . . . .	41
3.2	Évaluation des différentes influences sur un module photovoltaïque . . . . .	42
3.2.1	Influence de la température sur le module photovoltaïque . . . . .	42
3.2.2	Influence de l'irradiation sur le module photovoltaïque . . . . .	43
3.2.3	Influence de la résistance série sur le module photovoltaïque . . . . .	43
3.2.4	Influence de la résistance shunt sur le module photovoltaïque . . . . .	44
3.3	Association des modules . . . . .	44
3.3.1	Association en série . . . . .	44
3.3.2	Association en parallèle . . . . .	45
3.3.3	Association en Série/Parallèle . . . . .	46
3.4	Influence due à l'ombrage . . . . .	47
3.5	Évaluation du rendement du module . . . . .	49
3.5.1	Influence de la masse d'air relative . . . . .	50

3.5.2	Influence de la température . . . . .	50
3.5.3	Influence de l'irradiation . . . . .	51
<b>CHAPITRE 4 : IMPLICATION DU SUJET SUR LE SYSTÈME ÉDUCATIF</b> . . . . .		54
4.1	Présentation du système éducatif en vigueur au Cameroun . . . . .	54
4.2	Intérêt didactique . . . . .	54
4.3	Intérêt didactique de la leçon . . . . .	55
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES . . . . .		63
BIBLIOGRAPHIE . . . . .		67
ANNEXES . . . . .		68

La nécessité d'avoir un secteur énergétique fiable et viable n'est plus à démontrer pour un Cameroun qui se veut émergent à l'horizon 2035. Il devient important de diversifier le secteur énergétique en y intégrant de nouvelles sources d'énergie. Un accent est mis sur les énergies renouvelables pour des questions environnementales. L'énergie solaire se présente alors comme un excellent candidat. Mais sa valorisation nécessite une certaine maîtrise de la technologie. Le but de ce travail est d'étudier les caractéristiques électriques (courant-tension-puissance) des panneaux photovoltaïques mono et poly cristallins. Nous avons commencé par une modélisation des panneaux à partir des blocs des calculs contenus dans l'environnement Matlab Simulink en utilisant pour cela les équations données par le modèle à sept paramètres ( $2D7P$ ). Après validation des panneaux nous avons étudié ces caractéristiques en faisant varier certains paramètres tels que la température et l'irradiation qu'ils reçoivent, la résistance série et la résistance shunt. Nous avons également étudié l'influence de l'association des modules (série, parallèle et série-parallèle) et l'influence due à l'ombrage sur ces caractéristiques. L'interprétation faite des résultats obtenus nous a permis de montrer la forte dépendance de ces caractéristiques aux paramètres que nous avons fait varier. L'évaluation des rendements vient confirmer que les performances des panneaux photovoltaïques restent largement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température qui sont les deux paramètres essentiels dans le choix des technologies à utiliser pour un lieu donné.

**Mots clés :** Caractéristique électrique, photovoltaïque, monocristallin, polycristallin, modélisation, Matlab Simulink

The need to have a reliable and viable energy sector is no longer to be demonstrated for a Cameroon that wants to emerge by 2035. It becomes important to diversify the energy sector by integrating new sources of energy. An emphasis is placed on renewable energies for environmental issues. Solar energy is an excellent candidate. But its valuation requires a certain mastery of technology. The purpose of this work was to study the electrical characteristics (current-voltage-power) of mono and poly crystalline photovoltaic panels. We started by modeling the panels from the blocks of the calculations contained in the Matlab Simulink environment by using the equations given by the seven-parameter model (*2D7P*). After validation of the panels we studied these characteristics by varying certain parameters such as the temperature and the irradiation they receive, the series resistance and the shunt resistance. We also studied the influence of the association of modules (series, parallel and series-parallel) and the influence due to shading on these characteristics. The interpretation of the results obtained allowed us to show the strong dependence of these characteristics on the parameters that we have varied. The evaluation of the yields confirms that the performances of the photovoltaic panels remain largely influenced by the climatic conditions, particularly the solar irradiation and the temperature which are the two essential parameters in the choice of the technologies to be used for a given place.

**Key words :** Electrical characteristic, Photovoltaic, monocrystalline, polycrystalline, modeling, Matlab Simulink

---

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

---

<i>AIE</i>	: Agence Internationale de l’Energie
<i>AM</i>	: Masse d’Air
<i>AM<sub>0</sub></i>	: Masse d’Air de référence = 1.5
<i>GIEC</i>	: Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat
<i>GES</i>	: Gaz à Effet de Serre
<i>PV</i>	: Photovoltaïque
<i>CdTe</i>	: Tellurure de Cadmium
<i>CIGS</i>	: Cuivre Indium Silicium Gallium
<i>CIS</i>	: Cuivre Indium Silicium
<i>IDE</i>	: Environnement de Développement Intégré
<i>Matlab</i>	: <b>Matrix laboratory.</b>
$\alpha$	: Coefficient d’absorption ( $cm^{-1}$ )
$\lambda$	: Longueur d’onde du photon ( $m$ )
$\mu_{n,p}$	: Mobilité des porteurs, électrons ou trous, ( $cm^2V^{-1}s^{-1}$ ).
$E_{inc}$	: Intensité lumineuse incidente ( $W.m^{-2}$ ).
$G_{STS}, G_0$	: Rayonnement solaire de référence de $1000W/m^2$ .
$T_{STS}, T_0$	: Température de référence = $25^\circ$ .
$c$	: Célérité de la lumière ( $ms^{-1}$ ).
$d$	: Épaisseur (cm).
$D_{n,p}$	: Coefficient de diffusion des porteurs, électrons ou trous .
$h$	: Constante de Plank ( $kgm^2s^{-1} = Js$ ).
$k$	: Constante de Boltzmann $JK^{-1}$ .
$L_d$	: Longueur de diffusion des porteurs(cm).
$q$	: Charge électronique ( $C$ ).
$T$	: Température ( $K$ ).
$\gamma$	: Coefficient de rayonnement solaire des valeurs d’environ $0,004K^{-1}$ .
$\tau$	: Durée de vie des porteurs, électrons ou trous, dans le matériau ( $s$ ).
$\beta_{STC}$	: Coefficient de température.
$\eta_{STC}$	: Rendement électrique du module à la température de référence.

$\eta_c$	: Rendement électrique du module <i>PV</i> ,
$E_g$	: Énergie de la bande interdite des matériaux ( <i>eV</i> ),.
$D$	: Facteur de diffusion de la diode
$D_1, D_2$	: Diode 1 et 2.
$I_{ph}$	: Photo-courant .
$I_{sat}$	: Courant de saturation inverse de la diode.
$(I_{sc})$	: Courant du court-circuit
$n, n_1, n_2$	: Facteur d'idéalité .
$p, q, m, r, s$ et $u$	: Paramètres sont spécifiques à chaque type de module .
$R_{sh}$	: Résistance shunt.
$R_s$	: Résistance série.
<i>STC</i>	: standard test conditions .
$T_{TNOCT}$	: Température nominale de la cellule en fonctionnement.
$T_a$	: Température ambiante.
$T_c$	: Température de la cellule <i>PV</i> .
FF	: Facteur de Forme.
$G$	: Irradiation solaire .
$I_m$	: Courant max.
$P_m$	: Puissance max .
$V_{oc}$	: Tension de circuit ouvert.
$V_m$	: Tension max.

---

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1.1 : Évolution de la consommation d'énergie primaire au monde (BP, 2017).....	4
Figure 1.2 : Irradiation horizontal global a la surface de la terre : zoum sur le Cameroun.....	6
Figure 1.3 : Développement de l'efficacité des cellules solaires de laboratoire.....	7
Figure 1.4 : Schématisation de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire.	8
Figure 1.5 : Schématisation du comportement rayonnement solaire dans l'atmosphère.....	9
Figure 1.6 : Les différentes composantes de rayonnement solaire .....	10
Figure 1.7 : Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde.....	12
Figure 1.8 : Schématisation de gap direct (a) et du gap indirect (b).....	12
Figure 1.9 : Schématique des diagrammes de bandes d'un isolant, semi-conducteur et conducteur. 13	
Figure 1.10 : Fraction du spectre solaire convertie en électricité par une cellule photovoltaïque en silicium cristallin (a) et matériaux optimum pour la conversion photovoltaïque(b).....	14
Figure 1.11 : Schéma de descriptif de la Conversion photovoltaïque.....	15
Figure 1.12 : Répartition des technologies des cellules <i>PV</i> sur le marché .....	17
Figure 1.13 : Texture des trois cellules au silicium c-Si(a), p-Si(b), $\mu$ c-Si(c) .....	18
Figure 1.14 : Structure d'une cellule photovoltaïque cristalline classique (a) et d'une cellule <i>HIT</i> .....	19
Figure 1.15 : Structure cellule au silicium amorphe .....	21
Figure 1.16 : Structure CpTe.....	22
Figure 1.17 : Structure CIGS.....	22

Figure 2.1 : Schéma électrique équivalent pour un modèle 1D3.....	25
Figure 2.2 : Schéma électrique équivalent pour un modèle 1D4.....	25
Figure 2.3 : Schéma électrique équivalent pour un modèle 1D5.....	26
Figure 2.4 : Schéma électrique équivalent pour un modèle 2D5.....	27
Figure 2.5 : Schéma électrique équivalent pour un modèle 2D6.....	28
Figure 2.6 : Schéma électrique équivalent pour un modèle 2D7.....	28
Figure 2.7 : Organigramme de calcul des composantes.....	31
Figure 2.8 : Modélisation cellule avec les blocs mathématique de simulink.....	34
Figure 2.9 : Modélisation avec les composantes SimElectronics.....	35
Figure 2.10 : Modélisation utilisant le composant "solar cells".....	35
Figure 3.1 : Calcul du photo courant.....	38
Figure 3.2 : Calcul du courant de saturation inverse des diodes dans les STC.....	38
Figure 3.3 : Calcul du courant de saturation inverse des diodes.....	39
Figure 3.4 : Calcul du courant de la diode.....	39
Figure 3.5 : Calcul du courant traversant la résistance shunt.....	39
Figure 3.6 : Calcul d'intensité du courant de module photovoltaïque.....	40
Figure 3.7 : Module photovoltaïque Conçu avec la seconde approche.....	41
Figure 3.8 : Schéma de comparaison utilisé.....	41
Figure 3.9 : Comparaison des modules photovoltaïques.....	42
Figure 3.10 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque pour différentes températures.....	42
Figure 3.11 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV pour différentes Irradiations. ...	43
Figure 3.12 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de la $R_s$ .....	43
Figure 3.13 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque pour différents valeur de la $R_{sh}$ .....	44
Figure 3.14 : Association de 3 modules photovoltaïques en série.....	45
Figure 3.15 : Caractéristiques I(V) et P(V) en fonction du nombre de module photovoltaïque en série.....	45
Figure 3.16 : Association de 3 modules photovoltaïques en parallèle.....	46

Figure 3.17 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonction du nombre de module photovoltaïque en parallèle .....	46
Figure 3.18 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonction du nombre de module photovoltaïque en série/parallèle .....	47
Figure 3.19 : Montage Série / parallèle .....	47
Figure 3.20 : Montage de 4 modules photovoltaïques donc 2 sont soumis à un ombrage de $600W/m^2$ . .....	48
Figure 3.21 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module photovoltaïque pour différents valeur de la $R_s$ . .....	49
Figure 3.22 : Rendement des modules $PV$ en fonction de la masse d'air relative $AM$ .....	50
Figure 3.23 : Rendement des modules photovoltaïques en fonction de la Température $T$ .....	51
Figure 3.24 : Rendement des modules photovoltaïques en fonction de l'irradiation $G$ .....	52
Figure 3.25 : Courbe de niveau du Rendement du module photovoltaïque mono-cristallin en fonction de la $T$ et $G$ avec $AM = 1.5$ .....	52
Figure 3.26 : Courbe de niveau du Rendement du module photovoltaïque poly-cristallin en fonction de la $T$ et $G$ avec $AM = 1.5$ . .....	53

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

L'Homme dans sa recherche du confort et du bien-être, a rendu de plus en plus croissante la demande en énergie pour son industrialisation et son développement. Cette demande est satisfaite à plus de 85.2% en 2017 par les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) (BP, 2017). Or la combustion de ces derniers tend à modifier la composition atmosphérique en injectant de grandes quantités de Gaz à Effet de Serre (*GES*) responsables du changement climatique : le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), le méthane ( $CH_4$ ), l'oxyde de diazote ( $N_2O$ ). Leurs conséquences à l'échelle mondiale sont lourdes (ouragans, cyclones, inondations, fontes des glaciers polaires etc...). En octobre 2018, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du climat (*GIEC*) a publié son rapport spécial qui a été approuvé lors de la 48<sup>e</sup> réunion du *GIEC* à Incheon en Corée du Sud. Ce rapport fait état d'un réchauffement planétaire de  $1.5^\circ C$  par rapport aux niveaux pré-industriels et de la responsabilité de l'homme dans l'augmentation d'au moins  $1^\circ C$  dans le contexte du renforcement de la réponse énergétique mondiale (IPCC, 2018). Conscient de l'impact lié à cette hausse de température il devient très important de modifier notre attitude de consommation.

Ainsi l'accès à un approvisionnement d'énergie de qualité, en quantité suffisante, sûre et souple d'utilisation, est nécessaire pour une meilleure qualité de vie et pour un développement durable. Les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, biomasse) représentent aujourd'hui le meilleur moyen de lutter efficacement contre les changements climatiques observés et sont également un réel enjeu dans le cadre des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) pour un développement durable en Afrique. Il sera capital de travailler à faciliter leur intégration car elles représentent un énorme potentiel en Afrique en général et au Cameroun en particulier (Afrique a miniature).

Parmi ces énergies renouvelables, la gratuité et la disponibilité de l'énergie solaire fait d'elle une excellente candidate pour l'électrification des sites isolés (isolés du réseau électrique) qui constitue un réel enjeu pour le Cameroun avec un taux d'électrification de 53.2 % (GEAPI, 2017) . Cette énergie peut être valorisée directement sous forme thermique (solaire thermique) en captant la chaleur du soleil ou par conversion du rayonnement solaire en électricité appelée effet photovoltaïque (découvert par E. Becquerel en 1839). Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (*PV*). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau.

En effet, le développement des systèmes de conversion photovoltaïque rentables et économiquement viables, passe nécessairement par la compréhension et la maîtrise des différents composants du système. Les modules *PV* (constitués eux même plusieurs cellules solaires) sont les composantes à la base de la filière énergie solaire et nécessitent donc une attention particulière. Il est question dans ce mémoire d'étudier les caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques Mono et Poly-cristallins en particulier des caractéristiques *courant – tension* et *puissance–tension* et leur comportement. Pour atteindre ces objectifs nous avons réparti ce travail en quatre chapitres.

Au premier chapitre, nous présentons le contexte énergétique actuel et une revue de l'art sur le photovoltaïque.

Une modélisation électrique des cellules *PV*, une étude du rendement et une présentation des méthodes de modélisation numérique d'un module photovoltaïque font l'objet du second chapitre.

Nous présentons au troisième chapitre les résultats en commençant par une modélisation sous Matlab Simulink du module *PV* qui sera validé par la suite. Ensuite, l'accent sera mis sur l'étude des caractéristiques des modules, les influences auxquelles elles sont soumises et leurs impacts sur le rendement de ceux ci.

Le chapitre quatre nous permet de voir quelles sont les implications de la recherche menée sur le système éducatif.

Nous allons terminer ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

### Introduction

L'accès à une énergie électrique de qualité, en quantité suffisante et à moindre coût (devient un impératif majeur pour tout citoyen) est nécessaire pour une meilleure qualité de vie et pour un développement durable. Cela ne se fera que par une intégration et une vulgarisation des énergies renouvelables (solaire, éolienne, biomasse, hydroélectrique, géothermique) dans le mix énergétique mondiale. Hors mis l'hydroélectrique, La filiale du solaire est la plus prometteuse pour bien accomplir cette tâche qui est celle de satisfaire la demande en énergie et particulièrement en énergie électrique.

Dans ce chapitre nous présentons tout d'abord le contexte énergétique actuel et ce qu'il en est de la filière photovoltaïque (*PV*) en Afrique et au Cameroun en particulier. Par la suite nous parlons du rayonnement solaire et de rayonnement solaire à la surface de la terre et du principe de la conversion photovoltaïque. Et enfin nous allons présenter les technologies de conversion du rayonnement solaire en électricité et nous intéresser aux filières les plus commercialisées pour des applications terrestres.

### 1.1 Contexte énergétique

Le rapport de 2017 publié en mars 2018 de l'Agence Internationale de l'Énergie (*AIE*), avait déjà fait état d'une hausse de la consommation mondiale d'énergie de 2.1% en 2017 (IEA, 2018). BP Statistical Review of World Energy partage ce constat (+ 2.2% dans son rapport) (BP, 2017) et confirme que toutes les sources d'énergie ont davantage été consommées l'an dernier dans le monde, y compris le charbon (+ 1%, sous l'effet de la hausse de la demande en Inde) pour la première fois depuis 2013. Ces deux rapports soutiennent également que de façon générale, les énergies fossiles auraient encore compté pour 85,2% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2017.

BP Statistical Review of World Energy note également une croissance des énergies renouvelables qui est plus rapide que celle des énergies fossiles. En effet le développement des énergies renouvelables hors hydroélectricité a été particulièrement important (+ 16,6%) mais celles-ci ne

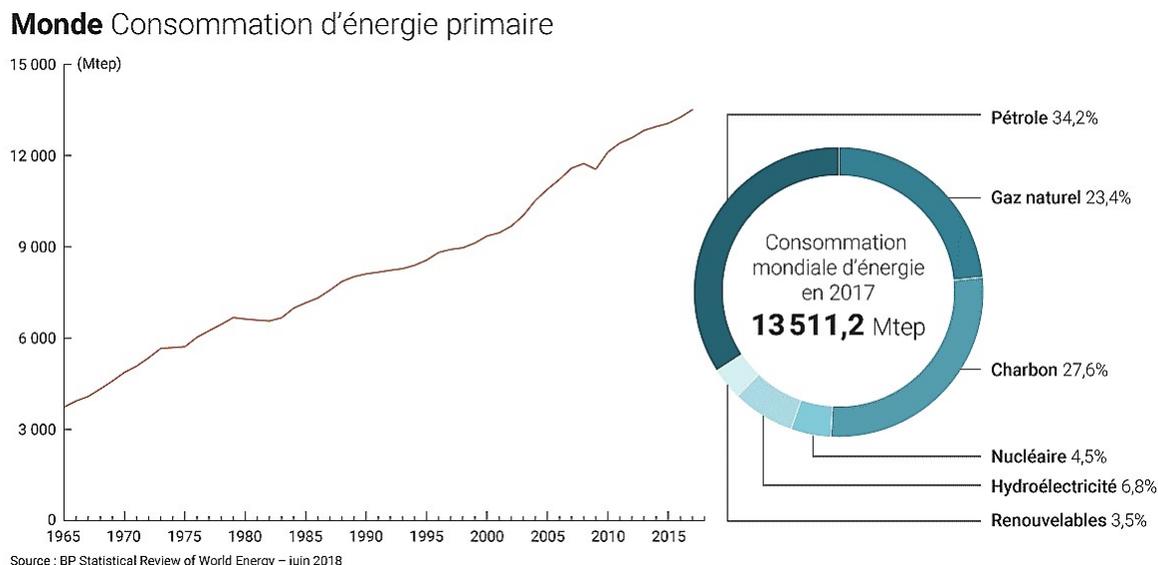


Figure 1.1 – Évolution de la consommation d'énergie primaire au monde (BP, 2017)

comptaient encore que pour 3,5% de la consommation d'énergie primaire dans le monde en 2017. La part de l'énergie nucléaire reste pour sa part relativement stable (4,4% en 2017) (BP, 2017).

### 1.1.1 Énergie photovoltaïque en Afrique

Fin 2015, l'Afrique disposait de 2 100 MW d'installations solaires photovoltaïques installées. Depuis, le continent a presque quadruplé la puissance installée de son parc photovoltaïque, même si ce dernier reste encore modeste au regard du potentiel africain (BP, 2018). Les projets se développent avec une rapidité spectaculaire. Si cette dynamique se poursuit, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prévoit que d'ici à 2030, le solaire pourrait représenter 14% de la puissance installée en Afrique (BP, 2017).

La révolution solaire est donc en marche dans de nombreux pays du continent, qui accueillent désormais les plus grandes centrales solaires, à l'instar du Maroc qui a inauguré « Noor », la septième centrale solaire thermodynamique la plus grande du monde en février 2016. Avec plus d'un demi-million de panneaux solaires répartis sur plus de 480 hectares, ce mastodonte de l'énergie renouvelable devrait pouvoir couvrir les besoins en énergie de plus d'un million de foyers marocains d'ici cinq ans.

Seulement huit mois plus tard, en octobre 2016, le Sénégal inaugurait « Senergy 2 », la plus grande centrale solaire d'Afrique de l'Ouest avec 75 000 panneaux photovoltaïques et une puissance de 20 mégawatts (MW), permettant de couvrir les besoins de 200 000 foyers sénégalais (Pacha).

Dernière en date, la centrale de Zagtouli au Burkina Faso, dotée d'une capacité de production maximale de 33 mégawatts (MW) est devenue à son tour la plus grande ferme solaire d'Afrique de l'ouest.

### 1.1.2 Électricité photovoltaïque au Cameroun

La société d'énergie électrique du Cameroun est entrée dans l'ère du solaire. Depuis la mise en service il y a quelques mois de la centrale thermique-solaire de Djoum (avec 600 panneaux solaires

disposés sur environ 3500 mètres carrés de superficie)(Enerray, 2018), Eneo a fini par rejoindre le coin des grandes affaires proposées par cette énergie propre.

Car outre l'objectif de réduire la quantité de polluants produits pendant le processus de transformation en électricité prête à l'emploi, le Cameroun aspire également à se rapprocher de son indépendance énergétique, pour mettre fin à l'utilisation et à l'importation de combustibles, mais surtout pour ne plus être tributaire des fluctuations des marchés internationaux. Or, avec l'énergie solaire, la production d'électricité est directement réalisée dans le pays, sans aucune importation de combustible.

L'intérêt du concept de centrale hybride solaire-thermique réside dans la possibilité de moduler les puissances et dans le stockage de l'électricité à toute heure de la journée, indépendamment des conditions d'ensoleillement du site. Ainsi, le parc photovoltaïque de Djoum est actuellement le plus important du Cameroun. Sa capacité solaire de 186 KW sera associée à la capacité thermique installée de 1115 KW de la centrale : une contribution non des moindres au réseau électrique, auquel seront injectées depuis cette centrale à la fois de l'énergie thermique et de l'énergie solaire pour une capacité extensible de 372KW<sub>c</sub> (kilowatts-crête).

La centrale de Djoum s'inscrit dans le plus vaste « Programme solaire » annoncé par Eneo, désireux d'installer des parcs photovoltaïques chargés de prendre le relais aux heures diurnes de centrales diesel déjà existantes. Aussi six sites sont-ils déjà à l'étude pour la poursuite du projet, il s'agit de : Lagdo, Garoua, Lomié, Bertoua, Yokadouma et Ngaoundal. Car en dépit de l'immense potentiel de l'énergie hydroélectrique du pays (grâce au fleuve Sanaga), les pouvoirs publics ont entrepris de mieux répartir le mix énergétique national en valorisant les autres sources renouvelables disponibles, et notamment le solaire. Et l'on comprend aisément pourquoi le concessionnaire du service public de l'électricité au Cameroun s'affaire autant dans le solaire au regard du taux moyen d'irradiation du pays, qui oscille entre 6 kWh/m<sup>2</sup> par jour dans la région septentrionale, et 4 kWh/m<sup>2</sup> par jour dans le Sud comme nous pouvons le voir à la figure 1.2 . Comparaison faite avec le reste du monde nous constatons que le Cameroun possède un potentiel non négligeable. Et ce, d'autant plus que le Cameroun doit poursuivre ses efforts et consolider ses acquis sur la voie de l'électrification, au vu de la position (11<sup>e</sup>) qu'il occupe – avec un taux d'électrification de 53,70%(GEAPI, 2017) – sur les 24 pays africains étudiés par l'indice mondial de la performance de l'architecture énergétique Global Energy Architecture Performance Index Report 2017, produit par le Forum économique mondial et le cabinet de conseil Accenture Strategy.

Rappelons à ce propos que la construction du parc photovoltaïque de Garoua, capitale de la région du Nord du Cameroun, a été confiée à la compagnie italienne Enerray, qui envisage de raccorder sa future centrale au réseau local et d'y produire 30 MW d'électricité. À travers EB Solaire, société créée dans le cadre d'un partenariat avec une importante entreprise camerounaise, Enerray développera son site sur 70 hectares de terrain, non loin de l'aéroport international de Garoua. La centrale remédiera non seulement à une absence totale d'électricité dans certaines aires de la région mais suppléera aussi, ailleurs, aux fréquentes coupures de courant.

Par ailleurs, Eneo s'apprête à installer 35 MW d'énergie solaire d'ici 2019 dans le Nord du pays, à savoir dans les trois villes de Ngaoundéré (pour une capacité de 10 MW), Maroua (15 MW) et Guider (10 MW). Ces trois centrales solaires, pour lesquelles les procédures de passation des marchés ont déjà été entreprises, devraient être opérationnelles dès le premier semestre de l'an prochain.

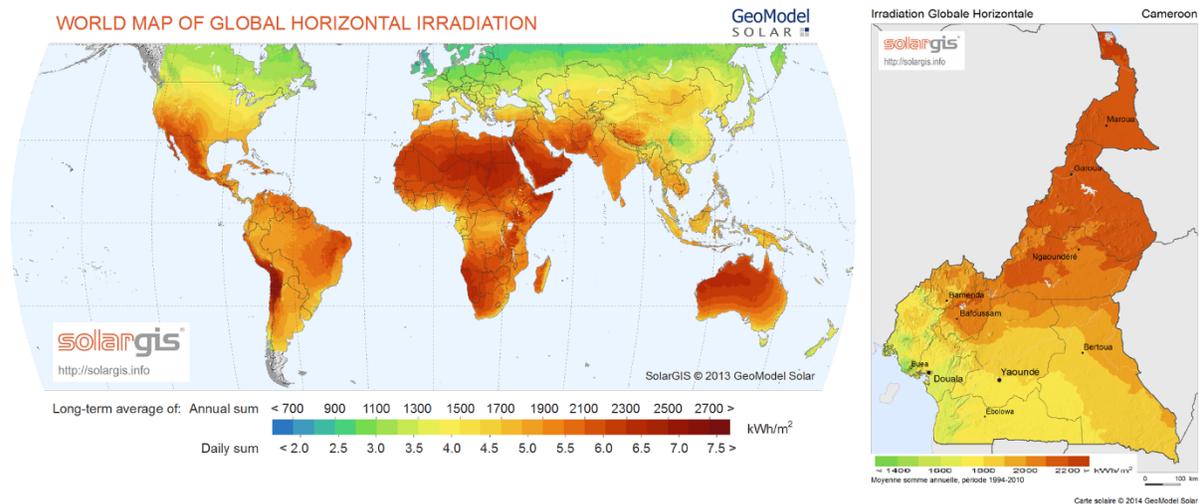


Figure 1.2 – Irradiation horizontale globale a la surface de la terre : zoom sur le Cameroun

### 1.1.3 Domaines d'application et Intérêt du photovoltaïque

La cellule PV est une découverte assez récente. En 1939, l'ingénieur Russel Ohl découvre la jonction P-N. En 1954, les chercheurs Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller mettent au point une cellule PV en silicium pour les laboratoires Bell. En 1958, le satellite américain Vanguard est le premier satellite spatial à être équipé de photopiles solaires. Le PV restera longtemps restreint au spatial à cause de son coût de fabrication élevé et de ses rendements faibles. Ce qui faisait aussi que le PV n'était pas concurrentiel vis-à-vis des autres sources d'énergies électriques. Le spatial reste aujourd'hui encore un domaine d'application privilégié du PV. Néanmoins la liste des applications du photovoltaïque est longue et peut être divisée en deux grandes catégories :

**Les applications autonomes**, c'est-à-dire non-raccordées à un réseau électrique, apparues les premières, comportent quatre domaines distincts :

- ☞ Les satellites artificiels pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui répond à toutes les contraintes
- ☞ Les appareils portables, aujourd'hui calculettes et montres, demain téléphones et micro-ordinateurs
- ☞ Les applications « professionnelles », relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement, etc.)
- ☞ L'électrification rurale des sites isolés, habitats dispersés, refuges, dispensaires et écoles dans les pays en voie de développement, ...

**les applications raccordées** au réseau public de distribution d'électricité que l'on peut subdiviser en trois grands domaines :

- ☞ Les systèmes attachés à un bâtiment consommateur d'électricité, qu'il soit à usage résidentiel (maisons individuelles, habitat collectif social ou privé) ou professionnel (bureaux, commerces, équipements publics, industrie, agriculture,...). Les modules peuvent être « sur-imposés » à la toiture (toit en pente ou toiture-terrasse) sans assurer le clos ni le couvert ou bien « intégrés au bâti » dans une logique de double fonction (clos et couvert, bardage, verrière, garde-corps, ...). Leur surface active va de quelques dizaines

à quelques milliers de mètres carrés, soit des puissances de quelques kilowatts-crêtes à quelques mégawatts-crêtes

- ☞ Les systèmes posés sur ou intégrés à des structures non-consommatrices d'électricité par elles-mêmes mais pour lesquelles les panneaux remplissent une fonction bien identifiée en plus de la production d'électricité (ombrière de parking, couverture de passage public ou de quai de gare, mur antibruit,...). Leur surface active va en général de quelques centaines à quelques milliers de mètres carrés, soit des puissances de quelques dizaines à quelques centaines de kilowatts-crêtes.
- ☞ les parcs photovoltaïques au sol, constitués de quantités importantes de modules posés sur des structures porteuses, dont la production est exclusivement destinée à l'alimentation directe du réseau électrique. Leur surface active va de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés (puissance de quelques centaines de kilowatts à plusieurs dizaines de mégawatts).

Des travaux récents, ont le but principal d'améliorer l'efficacité de conversion des cellules PV afin de diversifier leur champ d'application. La figure 1.3 nous présente pour différentes technologies de PV l'évolution des performances photovoltaïques entre 1975 et 2018, on peut constater une nette avancée de la filière. On peut remarquer que le rendement de conversion record atteint plus de 45% pour les filières multijonctions basées sur le GaAs, et entre 20 et 25% pour les filières à simple jonction (Si cristallin, CIS), tandis que les filières émergentes organiques atteignent 7-8 % actuellement.

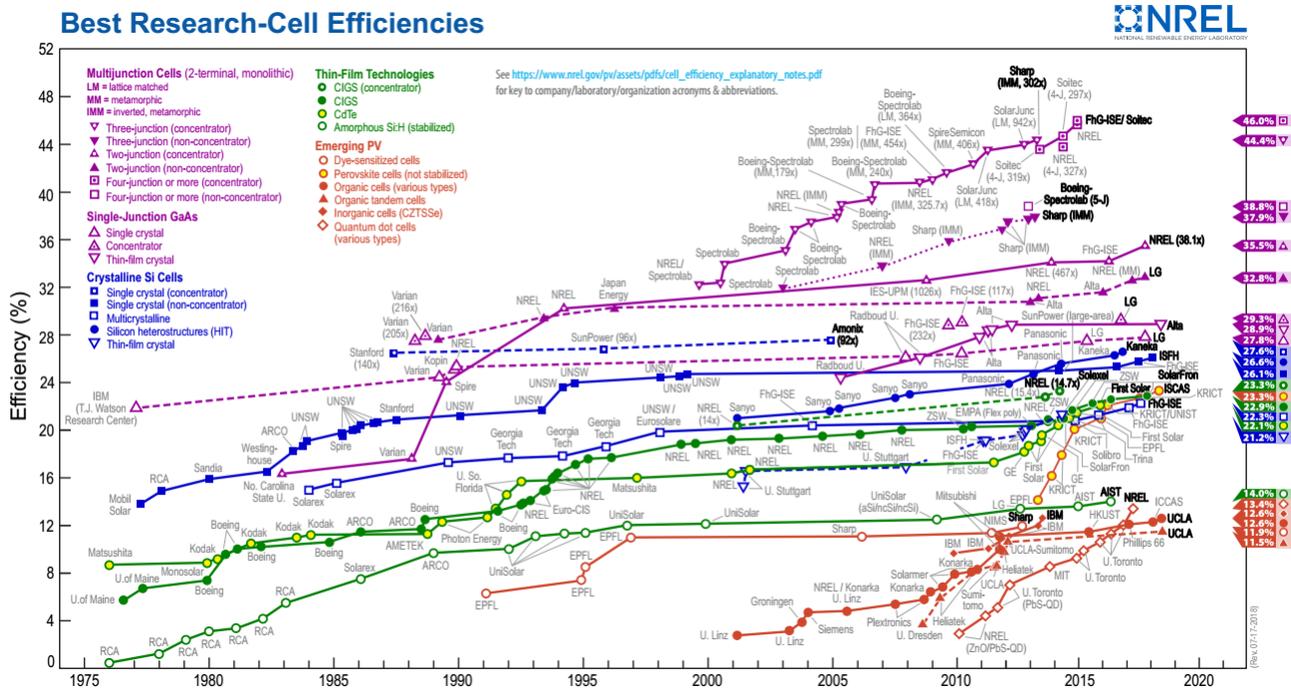


Figure 1.3 – Développement de l'efficacité des cellules solaires de laboratoire. (Goodrich et al., 2012).

## 1.2 Rayonnement solaire à la surface de la terre

L'énergie lumineuse provenant du soleil ne nous parvient pas intégralement car en traversant l'atmosphère terrestre, elle subit des transformations. En effet, son intensité lumineuse ainsi que son spectre dépendent de la composition en particules et en gaz mais aussi des nuages de l'atmosphère. La trajectoire des rayons sera plus ou moins longue lors de sa traverser dans l'atmosphère en fonction de la position du soleil. Pour tenir compte de ce phénomène, on introduit la notion de " Air mass ",  $AM$ , qui est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu, comme illustré sur la figure 1.4.

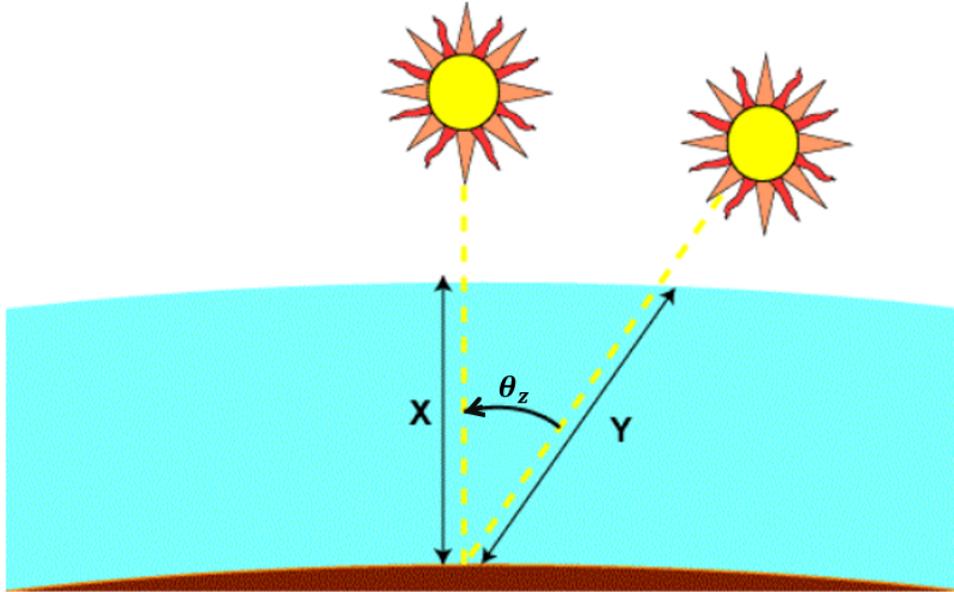


Figure 1.4 – Schématisation de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire

$$AM = \frac{Y}{X} = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (1.1)$$

Où  $\theta_z$  est l'angle zénithal.

En réalité, en raison de la courbure de l'atmosphère, le calcul de la masse d'air traversée par la lumière lorsque le soleil est proche de l'horizon n'est pas juste. En effet, avec l'équation ci-dessus,  $AM$  est infini lorsque l'angle zénithal est égal à 90.

$$\begin{aligned} \theta_z = 90^\circ \\ \cos \theta_z = 0 \quad \Rightarrow \quad AM = \frac{1}{\cos \theta_z} = \frac{1}{0} \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (1.2)$$

Ce n'est évidemment pas le cas dans la réalité et pour tenir compte de cette courbure et ainsi éviter la divergence de  $AM$  au coucher du soleil on utilise la formule suivante (Kasten and Young, 1989)

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.50572 \times (96.07998 - \theta_z)^{-1.6364}} \quad (1.3)$$

### 1.2.1 Le rayonnement électromagnétique du soleil

Comme dit précédemment le rayonnement solaire est atténué par différents éléments atmosphériques comme les molécules, les aérosols, les gaz, les gouttelettes nuageuses ou les cristaux de glace. Les particules d'aérosols diffusent et absorbent le rayonnement solaire à travers l'atmosphère. Les propriétés de diffusion et d'absorption dépendent de leur composition chimique et de l'humidité de leur environnement. La vapeur d'eau, l'ozone, le dioxyde de carbone et l'oxygène sont les principaux gaz absorbants du spectre solaire. L'absorption de l'ozone se produit dans les domaines du visible et de l'ultraviolet du spectre solaire, alors que la majeure partie de la bande d'absorption de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone se trouve dans les domaines spectraux du proche infrarouge au rouge. Par ailleurs, l'oxygène présente de petites bandes d'absorption dans le spectre visible. L'influence de ces éléments atmosphériques se retrouve sur la distribution spectrale du rayonnement spectral solaire direct et diffus, comme on peut le voir sur la figure 1.5 Les aérosols sont des particules solides ou liquides de diamètre allant de  $10^{-4}$  à  $10 \mu m$ . Ces minuscules particules en suspension dans l'air peuvent avoir toutes les tailles y compris si elles sont formées à partir de la même substance. Par exemple, il peut y avoir de minuscules particules solides en suspension dans l'air et chaque cristal aura sa propre taille.

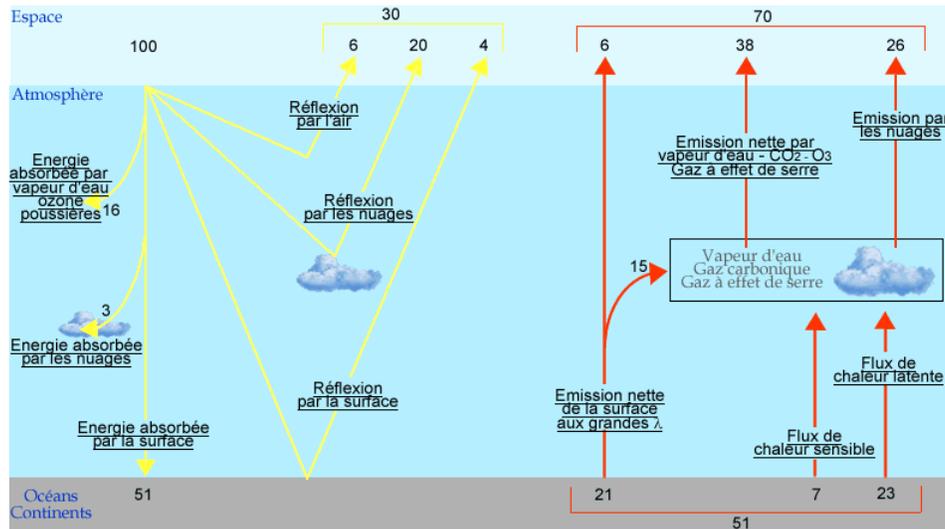


Figure 1.5 – Schématisation du comportement rayonnement solaire dans l'atmosphère

### 1.2.2 Les rayonnements direct, diffus et global

Suite à ces phénomènes de diffusion, on divise la lumière reçue à la surface de la terre en différentes composantes, comme le montre la figure 1.6 :

- ☞ Le rayonnement direct arrive du Soleil en ligne droite et n'est, à aucun moment, diffusé. Il forme les ombres.
- ☞ Le rayonnement diffus correspond à la lumière qui a été diffusée soit par l'atmosphère, soit par les nuages. Par temps couvert ou par temps très clair, celle-ci est considérée comme isotrope. Par temps légèrement voilé, il se peut qu'une couronne (appelée circumsolar) plus brillante autour du soleil se forme et accentue la puissance lumineuse en provenance du soleil. Dans ce cas, la lumière n'est pas isotrope. Il faut préciser que suivant la nature des nuages,

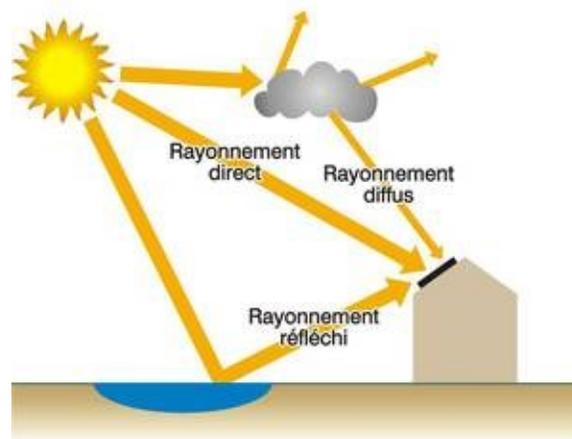


Figure 1.6 – Les différentes composantes de rayonnement solaire(ONR, 2016)

leur épaisseur, leur position dans le ciel, leur influence sur le rayonnement ne sera pas la même.

- ☞ L'albedo est la partie du rayonnement réfléchi par le sol et dépend donc directement du site d'observation.
- ☞ Le rayonnement global est la somme des trois composantes énumérées ci-dessus. C'est ce dernier qui est systématiquement mesuré par les stations météorologiques.

### 1.2.3 Étude des principaux facteurs de variation du spectre solaire

Les principaux facteurs impactant le spectre solaire, dans la gamme de longueurs d'ondes intéressantes pour le *PV*, à savoir de 300 à 1 100 *nm* sont :

- ☞ la couche d'atmosphère traversée par les rayons lumineux (AM),
- ☞ la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère (w),
- ☞ le volume et la taille des aérosols (AOD),
- ☞ le niveau de pollution

### 1.2.4 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell-Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui elle-même dépend de la période de l'année considérée.

## 1.3 Le principe de la conversion photovoltaïque

Nous rappelons dans cette partie brièvement le principe de la conversion photovoltaïque sans entrer dans les détails car la partie matériau n'est pas d'une importance capitale dans le cadre de ce mémoire orienté sur la caractérisation électrique de modules. Tout rayonnement électromagnétique, y compris le rayonnement solaire, est composé de particules énergétiques appelées photons. Un photon, caractérisé par sa longueur d'onde et donc son énergie grâce à la relation 1.4, peut-être, soit transmis, soit réfléchi, soit absorbé, lorsqu'il rencontre un matériau.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.4)$$

Où  $h$  est la constante de Plank ( $kgm^2s^{-1} = Js$ ),  $c$  la célérité de la lumière ( $ms^{-1}$ ) et  $\lambda$  la longueur d'onde du photon ( $m$ ).

Le rayonnement lumineux composé de plusieurs couleurs (photons d'énergies différentes) aura donc une plage de longueurs d'onde. Par conséquent, une partie du spectre lumineux sera transmise, une partie réfléchi et une autre partie absorbée lorsque la lumière rencontrera le matériau :

- ☞ La partie réfléchi dépend de l'indice de réfraction ( $n$ ) des matériaux traversés. Cet indice dépend lui-même de la longueur d'onde du rayonnement mais aussi des caractéristiques du milieu. Il en découle un coefficient de Fresnel pour la réflexion. Le coefficient de réflexion à l'interface entre deux matériaux d'indice  $n_1$  et  $n_2$  respectivement, s'écrit comme suit :

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (1.5)$$

Le silicium a, par exemple, un indice entre 3 et 4, ce qui correspond à un coefficient de réflexion compris entre 0.25 et 0.36, s'il était en contact direct avec l'air ( $n = 1$ ). Plusieurs couches, d'indices intermédiaires, sont placées entre l'air et le silicium pour diminuer la partie réfléchi du rayonnement incident.

- ☞ La partie absorbée est celle qui permettra la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. La lumière est absorbée par le matériau suivant la loi de Beer-Lambert :

$$E = E_{inc} \times \exp(-\alpha d) \quad (1.6)$$

Où  $E_{inc}$  représente l'intensité lumineuse incidente ( $W.m^{-2}$ ),  $\alpha$  le coefficient d'absorption ( $cm^{-1}$ ) et  $d$  l'épaisseur traversée (cm). Le coefficient d'absorption dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente, comme représenté sur la figure 1.7.

- ☞ La partie transmise correspond aux photons qui traversent le matériau sans interaction, leur énergie étant trop faible, le matériau est transparent pour ces photons.

Nous nous intéresserons tout particulièrement au phénomène d'absorption car c'est grâce à lui qu'une partie du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité.

### 1.3.1 L'absorption de la lumière dans le matériau

Pour l'absorption de la lumière, une caractéristique importante du matériau est son gap. C'est l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction d'un matériau. La bande de valence est présumée être entièrement occupée par des électrons et la bande de conduction entièrement vide. Il existe deux types de gap : le gap direct et le gap indirect.

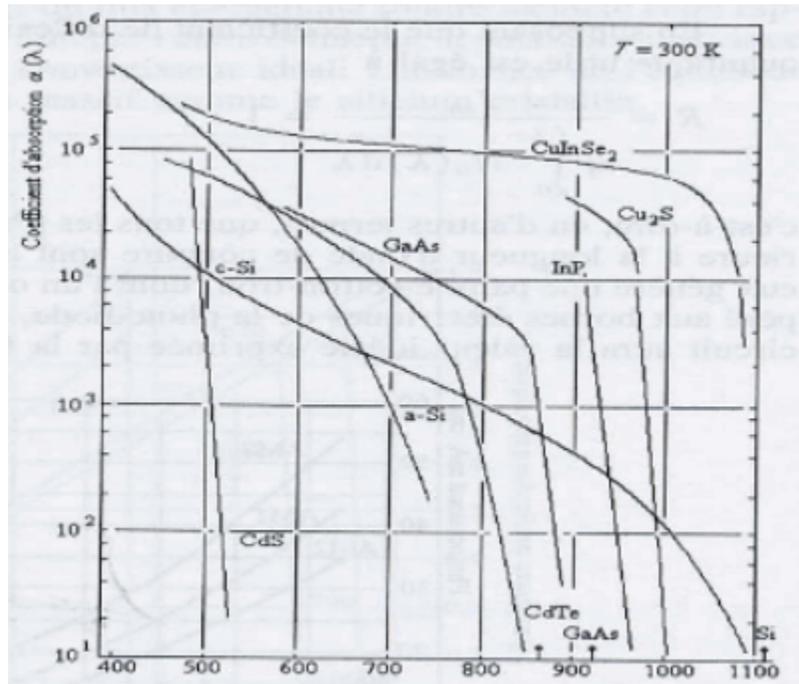


Figure 1.7 – Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde

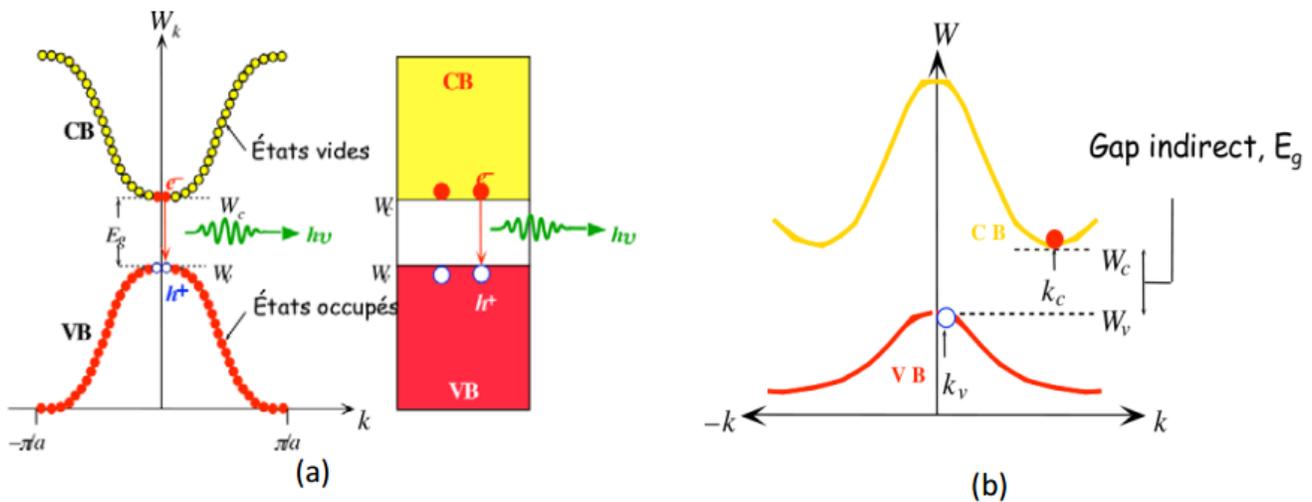


Figure 1.8 – Schématisation de gap direct (a) et du gap indirect (b)

**Le gap direct** : Lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence correspondent à la même valeur du vecteur d'onde ( $k$ ), le gap est direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives. Le GaAs, le CdTe sont des exemples de matériaux à gap direct.

**Le gap indirect** : on remarque cette fois-ci sur la figure 1.8 (b) que la transition des extrema des bandes ne se fait pas verticalement mais de façon oblique : les transitions électroniques sont non radiatives. A énergie égale ou un peu supérieure à celle du gap, il n'est possible d'absorber le photon que grâce à l'intervention d'un phonon. Ce qui ajoute une nouvelle condition à l'absorption et diminue ainsi grandement ses probabilités. Le silicium cristallin

est un exemple de semi-conducteur à gap indirect.

Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap du matériau, la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé. L'interaction photon/semi-conducteur, dans le cas d'un photon suffisamment énergétique ( $h\nu \geq Eg$ ), se traduit par la génération d'une paire électron-trou qui modifie localement la conductivité du matériau.

### 1.3.2 Le transfert de l'énergie des photons aux charges électriques

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes. Ces électrons seront alors libérés de l'attraction de l'atome, si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap du matériau. Il y aura, par conséquent, création d'un électron libre et d'un trou. Un trou correspond au comportement d'une bande entièrement pleine privée d'un électron. Pour simplifier, on assimile ce comportement à celui d'une charge positive dans une bande entièrement occupée. La circulation des électrons dans un sens et des trous dans l'autre formeront un courant électrique, lorsqu'une charge sera branchée. Ce phénomène peut être mis en jeu dans les semi-conducteurs. Pour les isolants, soit le gap est très large et il est quasi impossible d'engendrer des paires électron-trou, c'est le cas du diamant par exemple, soit le nombre de défauts, très grand en raison de la structure amorphe du matériau, est tel que les porteurs sont constamment piégés et ne peuvent donc pas créer de courant par leur déplacement, c'est le cas du verre. Dans le cas du verre, la représentation schématique des diagrammes de bandes (figure 1.10) de l'isolant n'est en réalité pas juste car, de part sa structure amorphe, les électrons ne respectent pas le schéma de bande. Ce schéma permet néanmoins de bien comprendre la difficulté de porter un électron dans la bande de valence pour les isolants. Dans le cas du diamant si on peut engendrer des porteurs dans la bande de conduction leur mobilité est extrêmement grande et la conductivité est très grande également.

Pour les conducteurs, il existe déjà une forte densité d'électrons totalement libres.

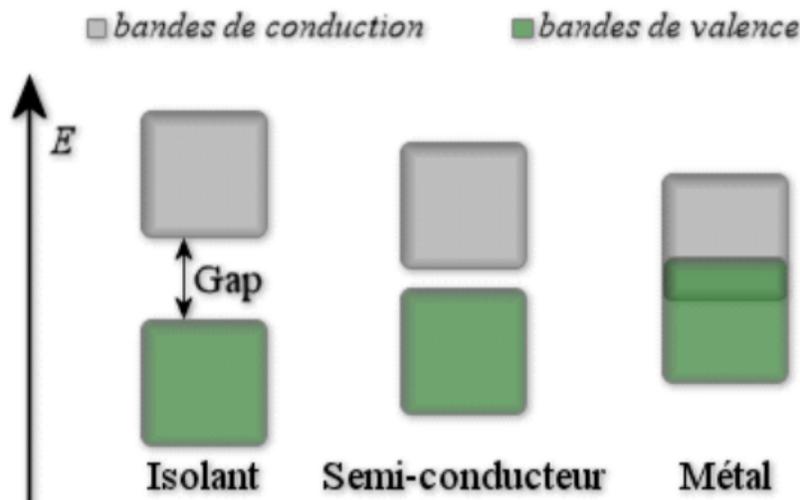


Figure 1.9 – schématique des diagrammes de bandes d'un isolant, semi-conducteur et conducteur.

On voit clairement sur la figure 1.10 qu'il faut fournir une énergie au moins égale à celle du gap, qui est dépendant du matériau, pour faire monter un électron de la bande de valence à la bande de conduction et avoir création d'une paire électron-trou. De plus, l'énergie du photon supplémentaire

à celle du gap, sera convertie en chaleur. On a donc création d'une paire d'électron-trou par photon au maximum.

Il y a donc deux phénomènes qui limitent le rendement théorique :

- ☞ l'impossibilité de convertir des photons d'énergie inférieure au gap optique. Le gap optique représente l'énergie minimum requise à un électron de la bande de valence pour accéder à la bande de conduction.
- ☞ la perte de l'énergie du photon qui dépasse celle du gap optique.

Cette absorption incomplète du spectre solaire, représentée sur la figure 1.10 est responsable des principales pertes de rendement des cellules : si l'on additionne les pertes par absorption incomplète des photons (23.5%) et celles des excès d'énergie des photons (33%), la perte due à ces deux phénomènes s'élève à 56.5% pour du silicium cristallin dont le gap est égal à  $1.12\text{eV}$ . Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront l'énergie suffisante pour créer du courant mais la tension en circuit-ouvert sera plus grande. Il existe donc un compromis qui a été quantifié par Shockley et Quessier (Shockley and Queisser, 1961) : La limite de Shockley-Quessier place le maximum du rendement de conversion à 33.7% pour une simple jonction p-n avec un gap de  $1.34\text{eV}$ , sous conditions standards de test.

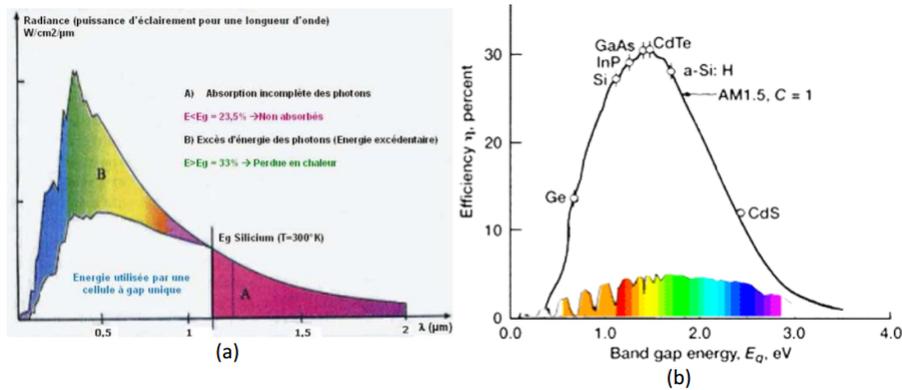


Figure 1.10 – Fraction du spectre solaire convertie en électricité par une cellule photovoltaïque en silicium cristallin (Green, 2003) (a) et matériaux optimum pour la conversion photovoltaïque(Shockley and Queisser, 1961)(b)

### 1.3.3 La collecte des charges

Le fait de créer des paires électron-trou ne suffit pas car celles-ci peuvent se recombiner naturellement provoquant uniquement de l'énergie thermique. Il faut séparer les charges pour qu'elles puissent circuler sans se recombiner. Une solution est de créer un champ électrique dans le matériau. Pour cela, on dope une partie d'un semi-conducteur en atomes ayant un électron de valence supplémentaire par rapport à l'atome du semi-conducteur. Il y aura, dans cette partie de semi-conducteur, un excédent de charges négatives. Cette partie sera par conséquent donneuse d'électrons. On dit qu'elle est dopée de type **n**. Une autre partie de semi-conducteur sera dopée en atomes ayant un électron de valence de moins que l'atome du matériau semi-conducteur. Il y aura cette fois un excédent de charges positives. Le matériau deviendra alors accepteur d'électrons. On dit qu'il est dopé de type **p**. La mise en contact de ces deux zones provoquera un champ électrique. En effet, les charges négatives excédentaires du matériau dopé **n** chercheront à rejoindre les charges positives du matériau dopé **p**.

Et inversement pour les charges positives excédentaires du matériau **p**. On réalise ainsi ce que l'on appelle une jonction **p-n**, c'est-à-dire une barrière de potentiel dans le semi-conducteur. La figure 1.11 donne une illustration du phénomène.

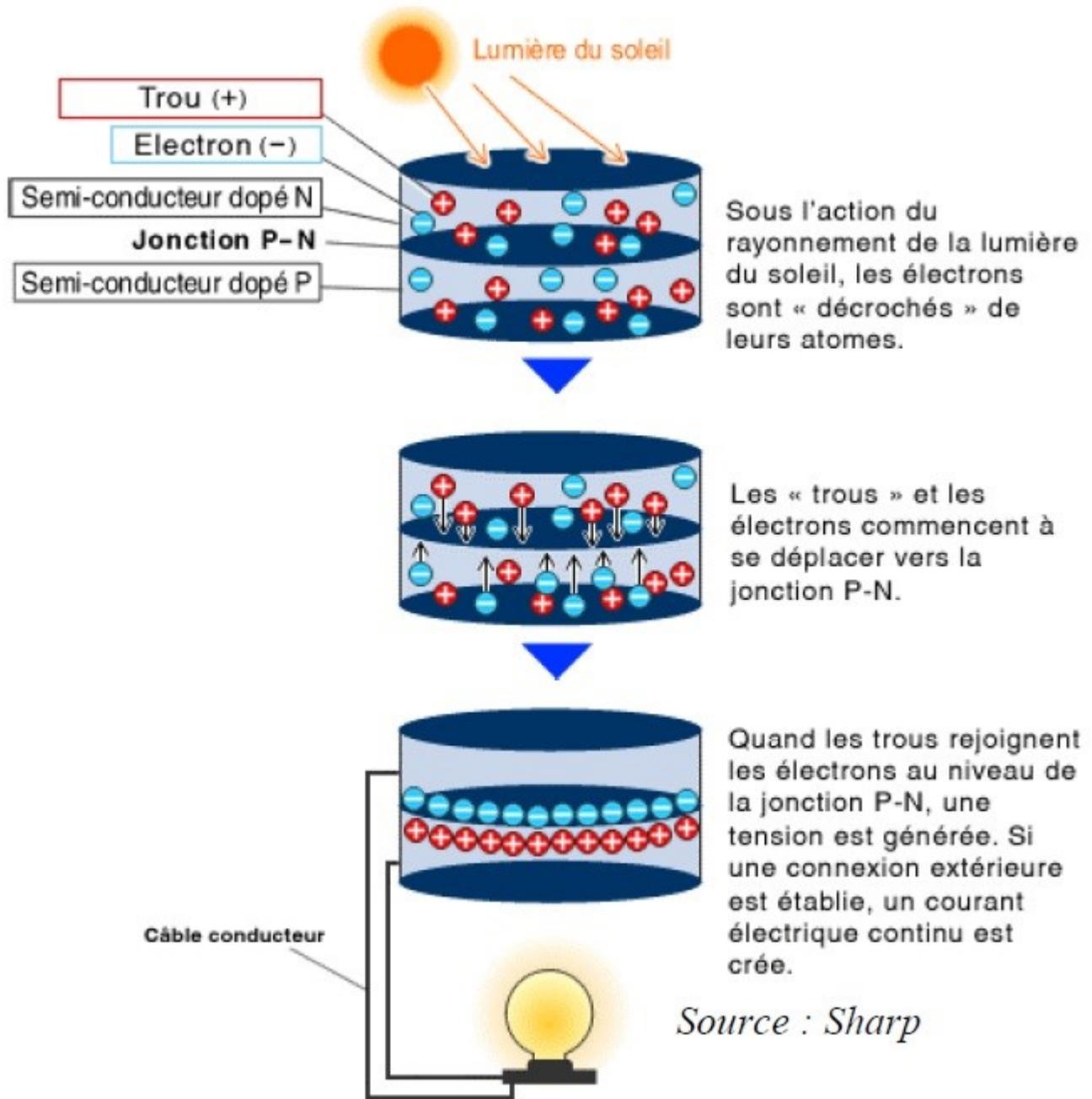


Figure 1.11 – Schéma de descriptif de la Conversion photovoltaïque.

Dans la zone **n** ou **p**, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone **p** (pour les trous) ou dans la zone **n** (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Il y aura un photo-courant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller dans la région **n** et les trous vers la

région p. Il y aura un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour former un photo-courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

### 1.3.4 La diffusion et les recombinaisons des porteurs.

Malgré le champ électrique créé par la jonction p-n, des recombinaisons au sein de la cellule auront tout de même lieu. Pour évaluer ces recombinaisons, qui dépendent de la qualité du matériau, on utilise la longueur de diffusion des porteurs de charge ( $L_d$ ). Elle correspond à la distance moyenne que les porteurs peuvent parcourir avant de se recombiner. Elle dépend essentiellement de la qualité du matériau utilisé ainsi que de la mobilité  $\mu$  du porteur concerné :

$$L_d = \sqrt{\tau D_{n,p}} = \sqrt{\mu_{n,p} \tau \frac{kT}{q}} \quad (1.7)$$

avec,  $L_d$  : longueur de diffusion des porteurs (cm),  $D_{n,p}$  : coefficient de diffusion des porteurs, électrons ou trous ( $cm^2s^{-1}$ )  $k$  : constante de Boltzmann ( $JK^{-1}$ ),  $T$  : température (K),  $q$  : charge électronique (C)  $\tau$  : durée de vie des porteurs, électrons ou trous, dans le matériau (s),  $\mu_{n,p}$  : mobilité des porteurs, électrons ou trous, ( $cm^2V^{-1}s^{-1}$ ).

Dans le volume du matériau, les mécanismes principaux de recombinaisons sont les recombinaisons radiatives, Auger et Shockley-Read-Hall :

Les recombinaisons radiatives : elles correspondent aux recombinaisons bande à bande d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence et s'accompagnent de l'émission d'un photon. On utilise cette propriété pour la fabrication de diodes électroluminescentes.

Les recombinaisons Auger : ce type de recombinaisons intervient lorsqu'une paire électron/ trou se recombine en transférant son énergie cinétique à une autre charge libre (électron ou trou). C'est un phénomène qui implique trois particules. Il se manifeste lorsque la densité de porteurs libres dépasse  $10^{17}cm^{-3}$ .

Les recombinaisons Shockley-Read-Hall : des centres recombinants induits par des défauts présents dans le volume du matériau (atomes dopants, impuretés métalliques, etc.) peuvent être le siège de recombinaisons. Elles dépendent du niveau énergétique introduit par le défaut et de sa section efficace de capture. Ces paramètres sont liés à la qualité cristallographique du matériau.

A la surface du semi-conducteur, la rupture de continuité du réseau cristallin engendre la présence de liaisons pendantes, responsables d'une répartition d'états énergétiques dans le gap.

En conclusion, une cellule solaire photovoltaïque est une diode semi-conductrice qui a été soigneusement conçue et construite pour obtenir un rendement de conversion optimum des rayons lumineux en courant électrique.

## 1.4 Les technologies de captation du rayonnement solaire : les cellules PV

Après avoir brièvement parlé de rayonnement solaire et de principe de conversion photovoltaïque, il sera question dans cette partie de présenter les technologies permettant la conversion

de ce rayonnement solaire en électricité. En effet cette conversion se fait avec des cellules dites photovoltaïques. Il existe à cette effet plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Nous présenterons dans cette partie uniquement des filières utilisées pour la fabrication des modules commerciaux, pour applications terrestres (Ce qui exclut la description des cellules de 3ème génération.). Notamment la figure 1.12 présente les filières les plus commercialisés et on retrouve en tête la cellule au silicium monocristallin suivi par celle au silicium poly-cristallin. Le but

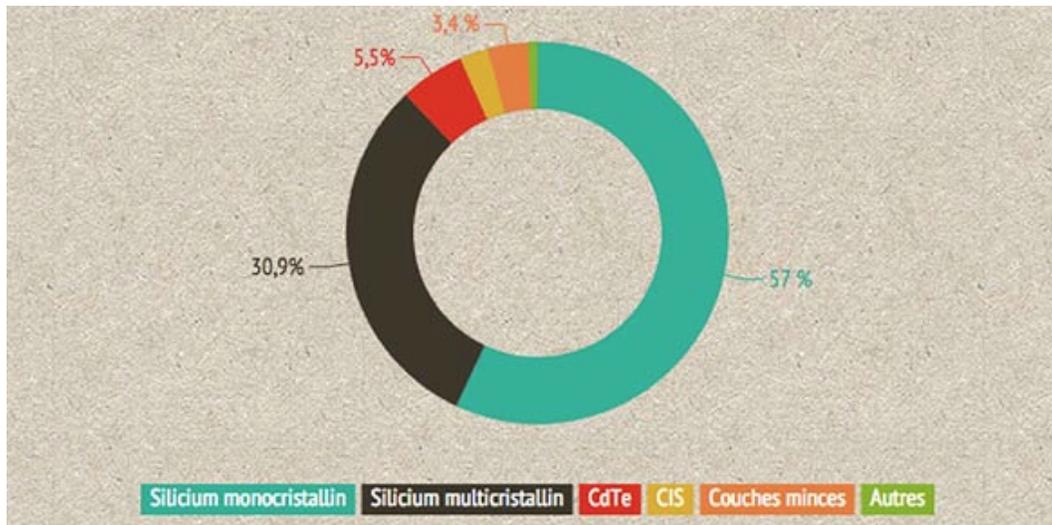


Figure 1.12 – Répartition des technologies des cellules PV sur le marché (EPIA, 2014)

est, ici, d'énoncer les principales caractéristiques de chacune pour pouvoir par la suite comprendre leur comportement dans différentes conditions d'utilisation. Nous n'aborderons pas les procédés de fabrication de ces différentes filières car ce n'est pas l'objet de ce mémoire.

Nous pouvons distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques :

- ☞ Les matériaux solides cristallisés ;
- ☞ Les couches minces solides.

### 1.4.1 Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin

Les cellules les plus utilisées sont encore aujourd'hui les cellules au silicium cristallin, dites de première génération (80% des panneaux sur le marché). Comme nous pouvons le voir à la figure 1.12.

#### 1.4.1.1 Les matériaux solides cristallisés (c-Si, p-Si, $\mu$ c-Si)

La recherche sur la filière du silicium cristallin a débuté dans les années 1950 en France et a pour principal but de réduire les coûts de production en mettant en jeu les problèmes de rendements en fonction des épaisseurs de cellules. Les recherches actuelles dans le silicium s'effectuent au niveau de l'amélioration de divers procédés tels que la purification, la cristallisation et l'élimination des impuretés, pour atteindre des rapports coûts/rendements optimaux. La figure 1.13 (a), (b) et (c) nous présente une forme finale des trois cellules au silicium sus cité.

Les avantages du silicium cristallin sont :

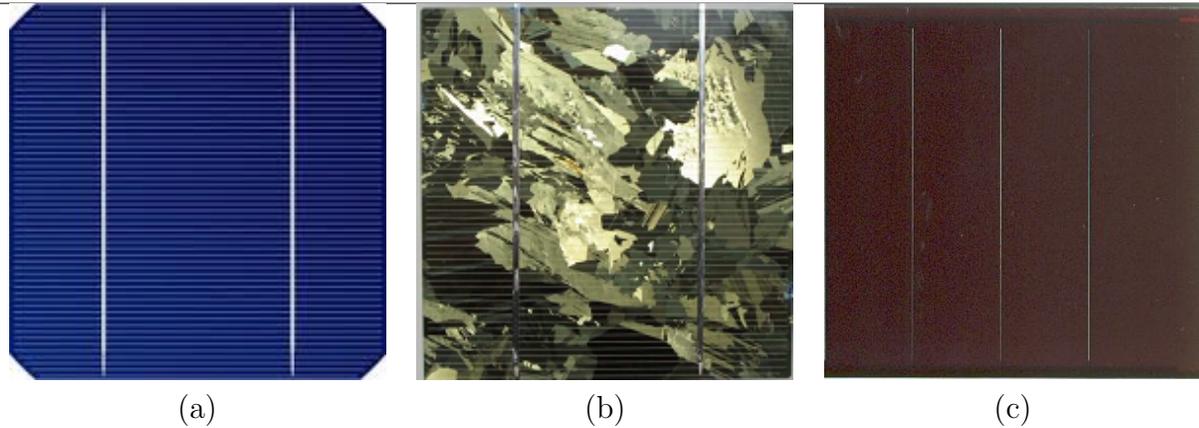


Figure 1.13 – Texture des trois cellules au silicium c-Si(a), p-Si(b),  $\mu$ c-Si(c)(Flèche and Delagnes)

- ☞ Ce semi-conducteur de type IV se dope facilement avec du bore et du phosphore ;
- ☞ Le Silicium est le deuxième élément le plus présent de la croûte terrestre :O2 (46%), Si (28%), Al (8%) ;
- ☞ Il possède un oxyde naturel SiO2 présentant d'excellentes propriétés électroniques ;
- ☞ Les technologies de production sont aujourd'hui matures et leur industrialisation ne pose pas de difficulté ;
- ☞ Les cellules PV offrent un rendement de conversion élevé ;
- ☞ La durée de vie et le vieillissement des cellules PV sont maîtrisés.

**Les inconvénients principaux** de cette technologie sont :

- ☞ Un coût de fabrication élevé ;
- ☞ Une performance qui diminue fortement lorsque la température de module augmente ;
- ☞ Une performance qui diminue fortement à faible éclairciment ;
- ☞ Presque aucune flexibilité d'utilisation (surface rigide) ;
- ☞ Un gap indirect à 1.12 eV : pour absorber 90% de l'énergie reçue, il faudrait une épaisseur de 100  $\mu$ m, ce qui est conséquent notamment par rapport aux couches minces que nous verrons par la suite. De plus, cela fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part maximale du spectre solaire.

La cellule au silicium monocristallin est constituée d'un seul cristal. Elle a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté (La figure 1.13 (a)), ou noir. Il existe également des cellules composées de plusieurs cristaux assemblés, dites au silicium microcristallin (grains plus petits que  $\mu$ m), polycristallin (grains plus petits que 1 mm) ou multicristallin (grains plus petits que 10 cm). On peut les reconnaître, si les grains sont suffisamment épais, car elles forment une mosaïque de macles. Le rendement des cellules monocristallines est actuellement de l'ordre de 15 à 19% en industrie et de 25% en laboratoire. Pour les cellules au silicium multicristallin, le rendement en industrie est de 12 à 16% et 20.4% en laboratoire(Goodrich et al., 2012). Cependant, il existe de nos jours des solutions qui permettent d'augmenter significativement les rendements comme les cellules à hétérojonction qui consistent à déposer des couches de silicium amorphe sur une ou deux faces d'une plaquette cristalline. Un de ces procédés existant et actuellement mis sur le marché est le procédé HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer), qui se substitue au procédé standard de fabrication des cellules cristallines, en atteignant des rendements commerciaux de l'ordre de 20%. Le silicium amorphe permet de réaliser l'hétérojonction ; l'absorbeur étant le silicium cristallin.

### 1.4.1.2 La structure des cellules cristallines

Toutes les cellules ne sont pas fabriquées exactement de la même façon. Aussi, nous décidons de prendre pour donner une composition assez générale, représentée sur la figure 1.14. Composition d'une cellule photovoltaïque cristalline « classique » (a) et d'une cellule HIT (b), pour observer les différentes composantes d'une cellule. Nous ne parlerons pas, par exemple, des cellules à contacts inter-digités ou à hétérojonction.

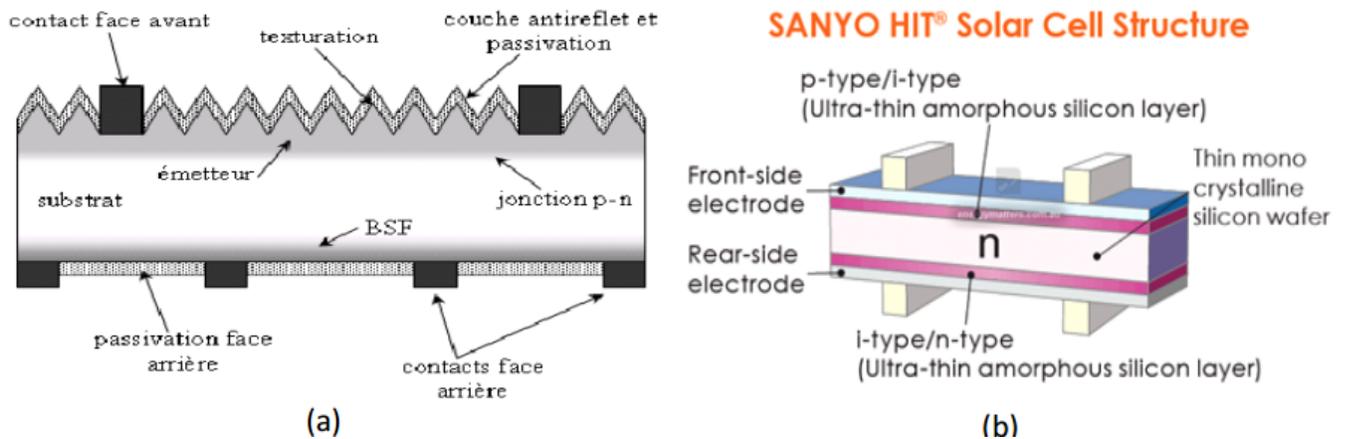


Figure 1.14 – Structure d'une cellule photovoltaïque cristalline classique (a) et d'une cellule HIT

### 1.4.1.3 Quelques propriétés des cellules cristallines

- ☞ Influence de l'éclairement : la tension baisse de manière importante lorsque l'éclairement descend en dessous de  $30-50 W m^{-2}$ . Cela est pénalisant pour l'emploi du cristallin dans les pays à climat tempéré ou encore sous lumière artificielle.
- ☞ Influence de la température : une cellule cristalline a une perte de l'ordre de  $0.4\%/^{\circ}C$ , en puissance, pour une température supérieure à  $25^{\circ}C$ , principalement due à une chute de la tension.
- ☞ Propriétés physiques :

**Masse atomique** : 28

**Température de fusion** :  $1496^{\circ}C$

**Structure** : tétraédrique cubique faces centrées

**Hybridation**  $sp^3$

**Gap optique à l'état cristallin** :  $1.12 eV$

## 1.4.2 Les cellules photovoltaïques en couches minces

Les couches minces consistent en un dépôt de matériaux semi-conducteurs sur un substrat rigide ou souple. Il existe plusieurs technologies de couches minces commercialisées dont trois voies qui semblent s'imposer, même si cela ne représente actuellement pas plus de 20% du marché PV : le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe) et les combinaisons à partir du diséléniure de cuivre et d'indium (CIS ou CIGS lorsque du gallium est ajouté).

Elles présentent les avantages suivants :

- ☞ un fort potentiel de réduction des coûts liés à des processus de fabrications peu onéreux : utilisation de verre de faible qualité ou de polymères comme substrat, sur lesquels on dépose une mince couche active ;
- ☞ une flexibilité de mise en œuvre des matériaux, notamment avec l'utilisation de substrats souples ;
- ☞ la possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes.

Les principaux inconvénients sont :

- ☞ le rendement encore faible ;
- ☞ la rareté de certains matériaux ;
- ☞ la toxicité de certains matériaux.

Les couches minces nécessitent beaucoup moins de matières que le silicium cristallin (moins de  $1\mu m$  contre  $100\mu m$  pour le silicium cristallin).

#### 1.4.2.1 Les couches minces au silicium

Le silicium amorphe est un semi-conducteur ayant d'excellentes propriétés optiques, mais de faibles propriétés électroniques, ce qui mène à des rendements modules dans l'industrie assez faible, de l'ordre de 6 à 8% (13.4%, record cellule en laboratoire) (Goodrich et al., 2012). Le processus de fabrication présente en revanche des coûts peu onéreux. Les principales différences avec les cellules cristallines sont que les cellules sur couches minces de silicium amorphe ont besoin de support pour leur tenue mécanique et qu'elles ne peuvent pas être basées sur une simple jonction p-n : l'effet de diffusion est négligeable pour le silicium amorphe. Sa longueur de diffusion est de l'ordre de  $150\text{ nm}$  contre  $10$  à  $200\ \mu m$  pour le silicium cristallin. Les porteurs de charges minoritaires ne peuvent pas aller très loin dans le silicium amorphe et donc une structure de jonction **p-n** comme dans le cristallin ne pourrait, en aucun cas, collecter les porteurs des photons générés dans une très petite couche près de la surface illuminée. D'autre part les couches dopées p et n du silicium amorphe sont très défectueuses et présentent des taux de recombinaison importants. C'est pourquoi on place une zone intrinsèque beaucoup moins défectueuse entre deux couches dopées extrêmement minces. Ces couches dopées créent un champ interne qui doit s'étendre sur toute l'épaisseur de la cellule afin de collecter les porteurs engendrés dans la zone intrinsèque. En raison des méthodes d'élaboration, (évaporation, pulvérisation, décomposition d'hydrure gazeux comme  $SiH_4$  dans du plasma), le silicium amorphe a une structure désordonnée. Il faudrait citer la figure 1.15 D'autre part l'épaisseur de la couche intrinsèque n'est que de  $1-2\ \mu m$

#### 1.4.2.2 Quelques propriétés des couches minces au silicium

Influence de l'éclairement : Une particularité du silicium amorphe est qu'il continue à produire de l'électricité à très faible éclairement ( $< 20\text{ W m}^{-2}$ ), contrairement aux autres technologies. C'est pour cette raison qu'on l'utilise pour les appareils en usage intérieur (calculatrices, montres).

- ☞ Influence de la température : une cellule au silicium amorphe a une perte de l'ordre de  $0.2\%^\circ\text{C}$  en puissance en moyenne, pour une température de fonctionnement supérieure à  $25^\circ\text{C}$ . Mais ce coefficient dépend de la cellule. Il peut très bien être proche de 0 ou voire être même positif.

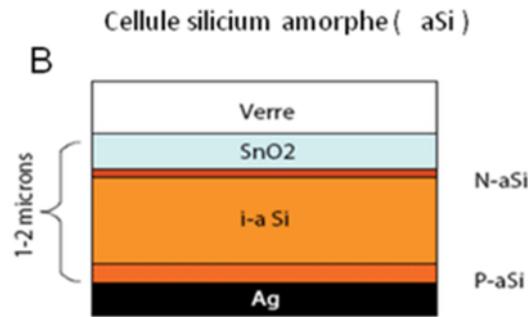


Figure 1.15 – Structure cellule au silicium amorphe

- ☞ Effet de stabilisation sous lumière : une autre spécificité des cellules au silicium amorphe est l'effet Staebler-Wronski (Staebler and Wronski, 1980). Le matériau qui comporte un certain nombre de défauts à l'échelle atomique, se dégrade de 10 à 15 % pour une multi-jonction et de 20 à 25% (Goodrich et al., 2012). pour une simple jonction pendant les premiers temps d'exposition au soleil (typiquement, les 1 000 premières heures d'exposition) à la suite de quoi, il se stabilise. Ce phénomène est lié aux défauts métastables du matériau qui s'activent aux premières heures d'illumination. Il s'agit d'une baisse de la photoconductivité du matériau sous fort éclairage et cet effet dépend de l'épaisseur de la jonction et des conditions de dépôt. Il est en partie réversible : lorsque les panneaux sont exposés dehors, ils récupèrent une partie de leur puissance perdue en été lorsque la température est élevée ( $> 60^{\circ}\text{C}$  dans les cellules) de même lors d'un recuit (par ex  $150^{\circ}\text{C}$ ).

Une solution pour augmenter le rendement de ces cellules consiste à déposer sur un substrat à faible coût du silicium microcristallin (20 à 100  $\mu\text{m}$ ) également à l'aide d'un plasma à haute pression, ce qui permet d'éviter la phase de sciage, en combinaison avec du silicium amorphe sous forme de double jonction. Le rendement de ces cellules, dite tandem, peut atteindre 10 à 11%.

### 1.4.2.3 Le tellure de cadmium

La technologie à base de CdTe présente des rendements en dessous du cristallin, de l'ordre de 7 à 9% en industrie (21.0%, record cellule en laboratoire) (Goodrich et al., 2012). mais bénéficie d'un faible coût à la production. Sa capacité d'absorption de la lumière et son coefficient thermique avantageux lui permettent d'être en adéquation presque parfaite avec le spectre solaire. Son principal inconvénient est sans nul doute la limitation naturelle de la quantité de tellure sur terre qui oblige la recherche à réduire au maximum son épaisseur, qui avoisine aujourd'hui 3  $\mu\text{m}$ . De plus, le cadmium est toxique. Il faut tout de même préciser que celui-ci est dangereux seulement lors de la fabrication et qu'un module PV ne contient que très peu de cadmium : un module CdTe de 60W (12 kg) contient environ 2g de Cd.

Sa structure consiste en une couche d'absorption en CdTe qui est placée sur un substrat de verre au contact d'autres couches de jonction, puis couverte par une plaque de verre qui scelle le panneau hermétiquement. Comme on ne sait pas réaliser de jonction **p-n** sur CdTe, une hétérojonction est formée en déposant un autre semi-conducteur peu absorbant, le sulfure de cadmium (CdS type **n**).

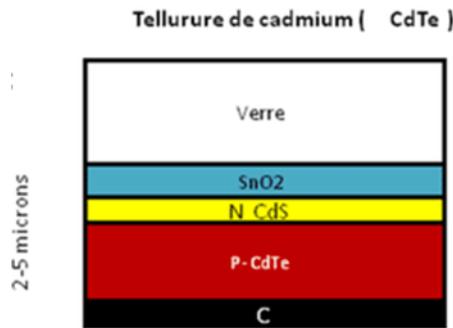


Figure 1.16 – Structure CpTe

#### 1.4.2.4 Le diséléniure de cuivre et d'indium

Le *CIS* partage des points communs avec le *CdTe* : la faible disponibilité de l'indium (une centaine d'années selon Indium Corporation) oriente la recherche à travailler sur la réduction de l'épaisseur de ce composant ( $2 \mu\text{m}$  aujourd'hui). Il nécessite également une couche de *CdS* pour former une jonction **p-n**. On peut associer une quantité limitée de gallium (*CIGS*) pour améliorer ses propriétés d'absorption. Il présente le plus fort coefficient d'absorption des semi-conducteurs *PV*.

Sa stabilité, son haut rendement par rapport aux autres couches minces (13% pour certains modules commerciaux et 21.0% pour les cellules en laboratoire) (Goodrich et al., 2012) ainsi que son coût de fabrication relativement peu onéreux permettent à cette technologie de croître rapidement.

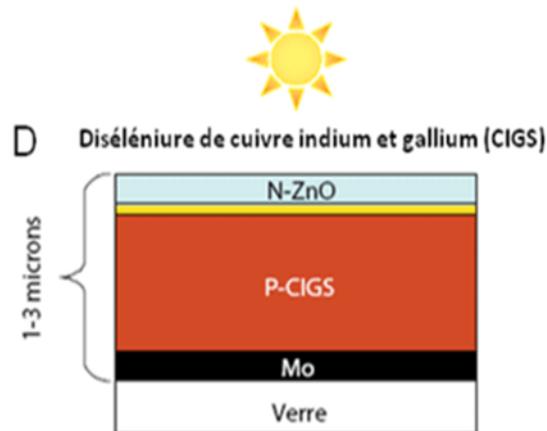


Figure 1.17 – Structure CIGS

### 1.4.3 Les cellules photovoltaïques de troisième génération

Il existe d'autres cellules, dites de troisième génération, qui reposent sur des macromolécules et des nanoparticules dont les procédés de fabrication sont bien moins consommateurs d'énergie et,

potentiellement, d'un coût de revient plus faible : les cellules organiques et les cellules à colorants.

Malheureusement pour l'industrie *PV*, ces cellules manquent de stabilité dans le temps, ce qui entraîne une durée de vie, lorsqu'elles sont exposées au soleil, trop courte pour les applications *PV*. Une autre catégorie de cellules appartenant à la troisième génération, basées cette fois-ci sur une logique de très hauts rendements, sont les cellules à multijonctions qui peuvent atteindre un rendement de plus de 40% (Goodrich et al., 2012).en laboratoire et une limite théorique de 81%. Ces cellules sont en revanche très onéreuses et ne sont utilisées, pour le moment, que dans le domaine du spatial ou du solaire à concentration. Les cellules de troisième génération sont, pour l'instant, soit au stade de recherche, soit appliquées pour des domaines autre que le solaire *PV* terrestre (sans concentration).

## Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que malgré le contexte environnement actuelle, les énergies fossiles auraient encore compté pour 85,2% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2017. Nous avons également vu le principe de la conversion photovoltaïque. Nous avons conclu qu'une cellule solaire photovoltaïque est une diode semi-conductrice qui a été soigneusement conçue et construite pour obtenir un rendement de conversion optimum des rayons lumineux en courant électrique.

Nous exposons par la suite plusieurs schémas électriques qui permettent de modéliser une cellule *PV* afin de comprendre les facteurs qui influencent caractéristiques électriques d'un module/panneaux *PV*

---

## MODÉLISATION DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

---

### Introduction

La composante élémentaire du panneau photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. Cette dernière peut être considérée comme une source idéale de courant fournissant un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode ou deux diodes qui permet ainsi de modéliser la jonction P-N. Ainsi fonction du nombre de diode on distingue deux modèles principales que nous verrons à la suite.

### 2.1 Modélisation des cellules

Le modèle électrique d'une cellule solaire est composé d'une source de courant idéal, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série  $R_s$ . La première diode  $D_1$  décrit les propriétés de semi-conducteur de la cellule et la seconde  $D_2$  modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge. Il existe plusieurs modèles pour étudier la variation de la puissance maximale et la caractéristique courant-tension, dans notre travail on va s'intéresser aux modèles à une diode et deux diodes.

#### 2.1.1 Modèles à une diode

##### 2.1.1.1 Modèle à trois paramètres 1D3

Une Cellule photovoltaïque idéal peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. Nous allons donner le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à trois paramètres à une seule diode comme il est illustré sur la figure 2.1. Les trois paramètres de ce circuit sont : le photo-courant ( $I_{ph}$ ), le facteur d'idéalité ( $n$ ) et Le courant de saturation inverse de la diode ( $I_{sat}$ ).

Appliquons les lois de Kirchhoff au nœud  $A$  du schéma équivalent de la figure 2.1. Nous obtenons l'équation suivante :

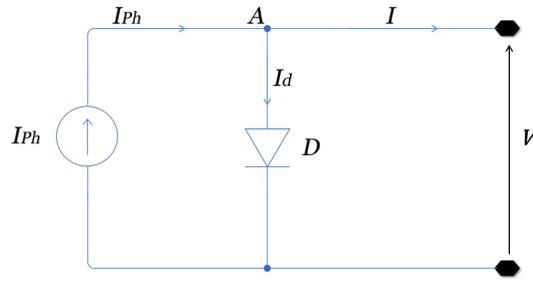


Figure 2.1 – Schéma électrique équivalent pour un modèle 1D3

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

Le courant qui traverse la diode  $I_d$  est donné par la relation suivante :

$$I_d = I_{sat} \left( \exp \left( \frac{qV}{nKN_sT} \right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

On obtient au final :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp \left( \frac{qV}{nKN_sT} \right) - 1 \right) \quad (2.3)$$

### 2.1.1.2 Modèle à quatre paramètres 1D4P

Les quatre paramètres pris en compte dans ce modèle sont : le photo-courant ( $I_{ph}$ ), le facteur d'idéalité ( $n$ ), le courant de saturation inverse de la diode ( $I_{sat}$ ) et la résistance série  $R_s$ . La figure 2.2 nous en donne l'illustration. En effet, le paramètre résistance série  $R_s$  vient modéliser les pertes de tension observées à la sortie dues à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.

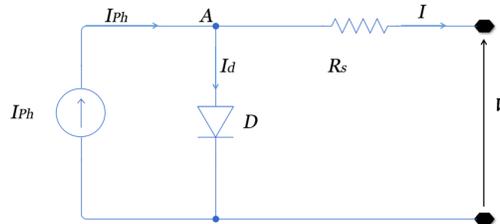


Figure 2.2 – Schéma électrique équivalent pour un modèle 1D4

Les lois de Kirchhoff appliquées au schéma précédent nous donnent :

— nœud A

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.4)$$

— maille i

$$V_d = V_s + V = R_s I + V \quad (2.5)$$

Le courant qui traverse la diode  $I_d$  est donné par la relation suivante :

$$I_d = I_{sat} \left( \exp \left( \frac{qV_d}{nKN_sT} \right) - 1 \right) \quad (2.6)$$

Or  $V_d = R_s I + V$  cela entraîne que :

$$I_d = I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{nK N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.7)$$

On obtient donc au final :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{nK N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.8)$$

### 2.1.1.3 Modèle à cinq paramètres 1D5

Le modèle précédent est complété par une résistance parallèle ou shunt  $R_{sh}$  qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule. Les cinq paramètres pris en compte dans ce modèle sont le photo-courant ( $I_{ph}$ ), le facteur d'idéalité ( $n$ ) Le courant de saturation inverse de la diode ( $I_{sat}$ ), la résistance série  $R_s$  et la résistance shunt  $R_{sh}$ . La figure 2.3 nous donne le schéma électrique équivalent.

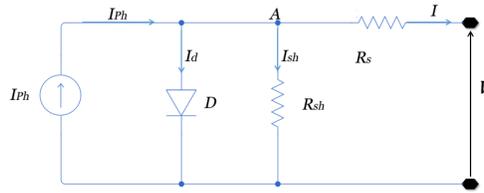


Figure 2.3 – Schéma électrique équivalent pour un modèle 1D5

Si on applique à ce schéma équivalent les lois de Kirchhoff on obtient :

— nœud A

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.9)$$

— maille  $i$

$$V_d = V_s + V = R_s I + V \quad (2.10)$$

— maille  $ii$

$$V_{sh} = V_s + V \Rightarrow R_{sh} I_{sh} = R_s I + V \Rightarrow I_{sh} = \frac{R_s I + V}{R_{sh}} \quad (2.11)$$

Le courant qui traverse la diode  $I_d$  dans ce cas est donné par la relation suivante :

$$I_d = I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{nK N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.12)$$

En remplaçant les equations 2.11 et 2.12 dans l'équation 2.9, nous obtenons :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{nK N_s T} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I + V}{R_{sh}} \quad (2.13)$$

## 2.1.2 Modèles à deux diodes

le modèle à deux diodes est un peu plus complexe à mettre œuvre que le modèle à une seule diode car la seconde diode vient ajouter deux nouveaux paramètres que sont le courant de saturation inverse  $I_{sat2}$  et le facteur d'idéalité de cette dernière. cela augmente le nombre de mettre

à déterminer. En effet l'ajout de la seconde s'avère nécessaire car permet de la modélisation de phénomène de recombinaison porteurs minoritaires qui représente des pertes importantes; lesquelles ne peuvent pas être convenablement modélisées en utilisant le modèle à une diode (Ishaque et al., 2011; Sah et al., 1957).

### 2.1.2.1 Modèle à cinq paramètres 2D5P

Les cinq paramètres de ce modèle sont : photo-courant ( $I_{ph}$ ), facteur d'idéalité ( $n_1$ ) et le courant de saturation inverse ( $I_{sat1}$ ) de la diode  $D_1$ , et le facteur d'idéalité ( $n_2$ ) et le courant de saturation inverse ( $I_{sat2}$ ) de la diode  $D_2$ . La figure 2.4 nous en donne le schéma équivalent.

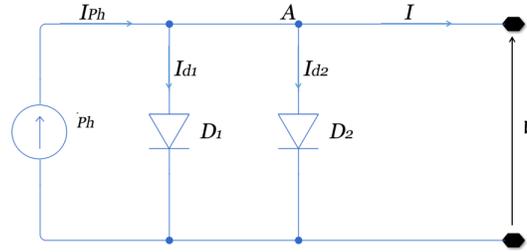


Figure 2.4 – Schéma électrique équivalent pour un modèle 2D5

L'équation caractéristique est déduite de façon directe à partir de la loi de Kirchhoff au nœud A :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (2.14)$$

Les courants qui traversent les diodes  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont donnés par les relations suivantes :

— La diode  $D_1$

$$I_{d1} = I_{sat1} \left( \exp \left( \frac{qV}{n_1 K N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.15)$$

— La diode  $D_2$

$$I_{d2} = I_{sat2} \left( \exp \left( \frac{qV}{n_2 K N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.16)$$

Au final le courant électrique produit par la cellule a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_{sat1} \left( \exp \left( \frac{qV}{n_1 K N_s T} \right) - 1 \right) - I_{sat2} \left( \exp \left( \frac{qV}{n_2 K N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.17)$$

### 2.1.2.2 Modèle à six paramètres 2D6P

Dans ce modèle les six paramètres sont constitués des cinq paramètres du modèle 2D5P au quelle on ajoute une résistance série  $R_s$ . Le schéma électrique équivalent est donné à la figure suivante :

Les lois de Kirchhoff nous donne l'équation caractéristique de la cellule :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (2.18)$$

Les courants qui traversent les diodes  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont donnés par les relations suivantes :

— La diode  $D_1$

$$I_{d1} = I_{sat1} \left( \exp \left( \frac{qV_{d1}}{n_1 K N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.19)$$

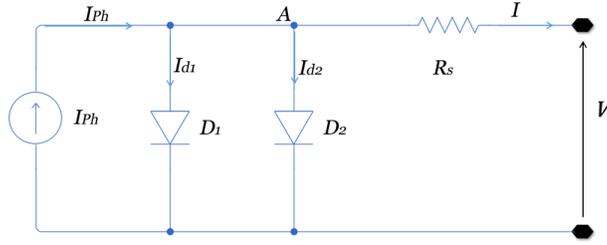


Figure 2.5 – Schéma électrique équivalent pour un modèle 2D6

— La diode  $D_2$

$$I_{d2} = I_{sat2} \left( \exp \left( \frac{qV_{d2}}{n_2 K N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.20)$$

Or  $V_{d1} = V_{d2} = V + R_s I$  Au final le courant électrique produit par la cellule a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_{sat1} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_1 K N_s T} \right) - 1 \right) - I_{sat2} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_2 K N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.21)$$

### 2.1.2.3 Modèle à sept paramètres 2D7P

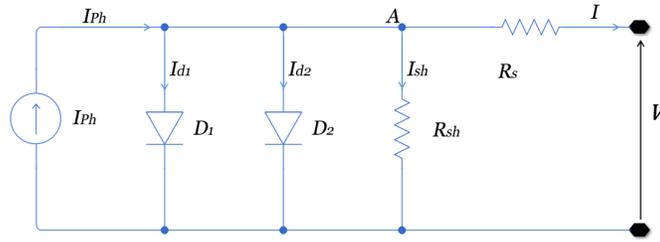


Figure 2.6 – Schéma électrique équivalent pour un modèle 2D7

Les lois de Kirchhoff nous donne l'équation caractéristique de la cellule :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (2.22)$$

Les courants qui traversent les diodes  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont donnés par les relations suivantes :

— La diode  $D_1$

$$I_{d1} = I_{sat1} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_1 K N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.23)$$

— La diode  $D_2$

$$I_{d2} = I_{sat2} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_2 K N_s T} \right) - 1 \right) \quad (2.24)$$

Le courant qui traverse de la résistance shunt  $R_{sh}$  est donné par la relation :

$$I_{sh} = \frac{R_s I + V}{R_{sh}} \quad (2.25)$$

Au final le courant électrique produit par la cellule a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_{sat1} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_1 K N_s T} \right) - 1 \right) - I_{sat2} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_2 K N_s T} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I + V}{R_{sh}} \quad (2.26)$$

## 2.2 Détermination des paramètres

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, le nombre de paramètres varie en fonction du modèle choisi et des hypothèses retenues par les chercheurs. Par exemple, dans les travaux de Kou et al. (1998) et De De Soto et al. (2006), ils ont considéré que  $I_{ph}$ ,  $I_{sat}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  et le facteur d'idéalité  $n$  sont les cinq paramètres à déterminer qui dépendent du rayonnement solaire incident et de la température de la cellule. Dans les travaux de (Townsend, 1989) et de F (1999) les paramètres inconnus qui y sont révélés sont au nombre de quatre savoir  $I_{ph}$ ,  $I_{sat}$ ,  $R_s$  et  $\gamma$ . Ou  $\gamma = n \times N_s$ .

Dans le cadre de notre travail nous évaluerons le modèle à deux diodes 2M7P qui comporte 7 paramètres  $I_{sat1}, I_{sat2}, n_1, n_2, I_{ph}, R_s$  et  $R_{sh}$ . Nous avons admis que les facteurs d'idéalité  $n_1$  et  $n_2$  sont connus et valent respectivement 1 et 1. Les travaux antérieurs dans la simulation des cellules PV ont démontré que l'on pouvait obtenir de très bon résultat avec ces valeurs prisent de  $n_1$  et  $n_2$  (Charles et al., 1984; Müllejans et al., 2004; Yordanov et al., 2010).

### 2.2.1 Détermination du photo-courant $I_{ph}$

Selon la figure 2.1, le courant de sortie dans les conditions de test standard donc l'abréviation en anglais ( $STC$ ) est :

$$I = I_{ph,STC} - I_{sat,STC} \left( \exp \left( \frac{qV}{nKN_sT_{STC}} \right) - 1 \right) \quad (2.27)$$

Cette équation permet de quantifier  $I_{ph,STC}$  qui ne peut être déterminé autrement. Lorsque la cellule photovoltaïque est court-circuitée, on a :  $V = 0$  et  $I = I_{sc,STC}$

$$I_{sc,STC} = I_{ph,STC} - I_{sat,STC} \left( \exp \left( \frac{q \times 0}{nKN_sT_{STC}} \right) - 1 \right) \quad (2.28)$$

Mais cette équation n'est valable que dans le cas idéal. Donc, l'égalité n'est pas correcte. Et ensuite, l'équation 2.29 doit être écrite comme suit :

$$I_{sc,STC} \approx I_{ph,STC} \quad (2.29)$$

Le photo-courant dépend à la fois de la température  $T$  et de l'éclairement énergétique  $G$  est donné par :

$$I_{ph}(G, T) = \frac{G}{G_{STC}} [I_{ph,STC} + \mu_{sc}(T - T_{STC})] \quad (2.30)$$

### 2.2.2 Détermination du courant de saturation inverse de $I_{sat}$

Le courant de saturation inverse dépend fortement de la température de la cellule et de l'énergie de la bande interdite des matériaux et est défini par (Coors and Böhm, 1997) :

$$I_{sat} = DT^3 \exp \left( \frac{-qE_g}{nKT} \right) \quad (2.31)$$

Avec  $E_g$  : Énergie de la bande interdite des matériaux (eV), 1.12eV pour Si)

$D$  = facteur de diffusion de la diode

Afin d'éliminer le facteur de diffusion des diodes, à l'équation 2.31, on calcul une fois de plus  $I_{sat}$  à la température  $T_{STC}$ . Cela donne :

$$I_{sat,STC} = D(T_{STC})^3 \exp\left(\frac{-qE_g}{nKT_{STC}}\right) \quad (2.32)$$

Nous obtenons à la suite du rapport des deux équations (équation  $\frac{2.31}{2.32}$ ), les expressions suivantes qui caractérisent chacune des diodes :

$$I_{sat1}(T) = I_{sat1,STC} \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{n_1K} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2.33)$$

$$I_{sat2}(T) = I_{sat2,STC} \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{n_2K} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2.34)$$

$$\text{Avec : } I_{sat(i),STC} = I_{sc,SCT} \left(\exp\left(\frac{qV_{oc}}{n_i N_s K T}\right) - 1\right) \quad i = 1, 2$$

### 2.2.3 Détermination des résistances $R_s$ et $R_{sh}$

Les paramètres  $R_s$  et  $R_{sh}$  se calculent de façon simultanée et similaire à la procédure proposée par Villalva et al. (Villalva et al., 2009). Nous utiliserons le modèle 2D7P. Les paramètres sont calculés tel que  $P_{max}$  (La puissance maximale calculée par le modèle  $I - V$ ) soit égale à la puissance maximale expérimentale  $P_{max,e}$  fournie par le fabricant sur le datasheet.

Ainsi on a :

$$P_{m,STC} = P_{m,ex} = V_{m,STC} \times I_{m,STC} \quad \Rightarrow \quad I_{m,STC} = \frac{P_{m,ex}}{V_{m,STC}} \quad (2.35)$$

En remplaçant dans l'équation 2.26 on obtient :

$$I_{m,STC} = I_{ph,STC} - I_{sat1,STC} \left(\exp\left(\frac{q(R_s I_{m,STC} + V_{m,STC})}{n_1 K N_s T_{STC}}\right) - 1\right) - I_{sat2,STC} \left(\exp\left(\frac{q(R_s I_{m,STC} + V_{m,STC})}{n_2 K N_s T_{STC}}\right) - 1\right) - \frac{R_s I_{m,STC} + V_{m,STC}}{R_{sh}} \quad (2.36)$$

Au final l'expression permettant déterminer les résistances est :

$$R_{sh} = \frac{R_s I_{m,STC} + V_{m,STC}}{I_{ph,STC} - I_{sat1,STC} \left(\exp\left(\frac{q(R_s I_{m,STC} + V_{m,STC})}{n_1 K N_s T_{STC}}\right) - 1\right) - I_{sat2,STC} \left(\exp\left(\frac{q(R_s I_{m,STC} + V_{m,STC})}{n_2 K N_s T_{STC}}\right) - 1\right) - \frac{P_{m,ex}}{V_{m,STC}}} \quad (2.37)$$

L'itération commence à  $R_s = 0$ , valeur qui doit augmenter pour que le point de puissance maximal modélisé se déplace jusqu'à ce qu'il corresponde au point de puissance maximal expérimental. Le  $R_{sh}$  correspondant est ensuite calculé. Une seule paire ( $R_{sh}, R_s$ ) satisfait à cette condition. L'organigramme à la figure 2.7 en illustre le schéma de calcul.

## 2.3 Le rendement

Le rôle important de la température de fonctionnement en relation avec le rendement électrique d'un dispositif photovoltaïque  $PV$ , qu'il s'agisse d'un simple module, d'un capteur  $PV$ /thermique ou d'un réseau photovoltaïque intégré au bâtiment ( $BIPV$ ), est bien établi et documenté, peut être

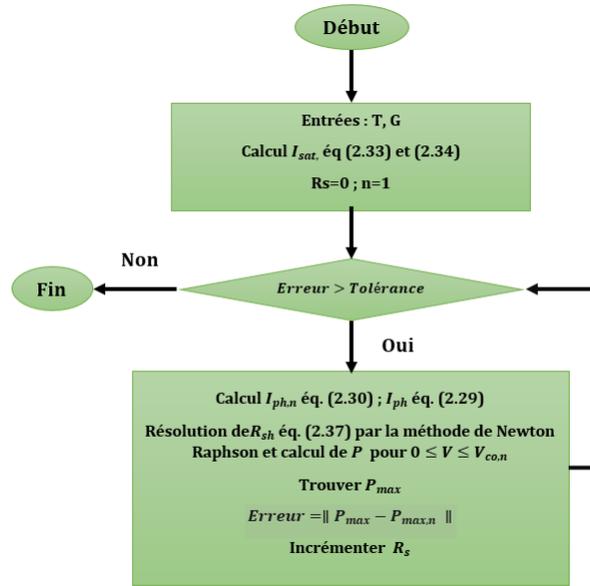


Figure 2.7 – organigramme de calcul des composantes

vu de l'attention qu'il a reçue par la communauté scientifique. Il existe de nombreuses corrélations exprimant  $T_c$ , la température de la cellule  $PV$ , en fonction de variables météorologiques telles que la température ambiante,  $T_a$ , la vitesse du vent local,  $V_w$ , et l'irradiation solaire,  $G$ , avec les propriétés dépendant du matériau et du système. Comme paramètres, par exemple, le facteur de transmission du revêtement de vitrage, etc. Un nombre non négligeable de corrélations exprimant la dépendance en température du rendement électrique du module  $PV$ ,  $\eta_c$ , peut également être récupéré, bien que beaucoup d'entre elles prennent la forme linéaire familière, ne différant que par les valeurs numériques des paramètres pertinents qui, comme prévu, dépendent du matériel et du système. En ce qui concerne les variables météorologiques pertinentes et qualitativement, il a été constaté que la température de la cellule  $PV$  au-dessus de la température ambiante est extrêmement sensible à la vitesse du vent, moins à la direction du vent et pratiquement insensible à la température atmosphérique (S. Griffith et al., 1981). D'autre part, cela dépend évidemment fortement de l'irradiation incidente, c'est-à-dire du flux de rayonnement solaire sur la cellule ou le module. D'un point de vue mathématique, les corrélations pour la température de fonctionnement  $PV$  sont soit de forme explicite, donnant ainsi directement  $T_c$ , soit implicites, c'est-à-dire qu'elles impliquent des variables qui dépendent elles-mêmes de  $T_c$ . Dans ce dernier cas, une procédure d'itération est nécessaire pour le calcul en question. La plupart des corrélations incluent généralement un état de référence et les valeurs correspondantes des variables pertinentes.

Nous avons également des corrélations qui expriment la température de la cellule  $PV$  ( $T_c$ ) en fonction de variables météorologiques telles que la température ambiante ( $T_a$ ), la vitesse du vent local ( $V_w$ ), le rayonnement solaire  $G$ , les propriétés dépendantes du matériau et du système ( $\alpha$ ), telles que le vitrage ( $\tau$ ). L'effet de la température sur le rendement électrique d'une cellule/d'un module photovoltaïque peut être obtenu en utilisant une équation fondamentale,

$$P_m = I_m V_m = (FF) I_{sc} V_{oc} \quad (2.38)$$

La tension de circuit ouvert et le facteur de remplissage diminuent sensiblement avec la température (à mesure que les électrons excités thermiquement commencent à dominer les propriétés électriques du semi-conducteur), tandis que le courant de court-circuit augmente, mais légèrement, de Zondag

(2008). Ainsi, l'effet net conduit à une relation linéaire sous la forme :

$$\eta_c = \eta_{STC} [1 - \beta_{STC} (T_c - T_{STC}) + \gamma \log_{10} G] \quad (2.39)$$

Avec  $\eta_{STC}$ , Le rendement électrique du module à la température de référence,  $T_{STC}$  et à un rayonnement solaire  $G_{STC}$  de  $1000W/m^2$ . Le coefficient de température,  $\beta_{STC}$ , et le coefficient de rayonnement solaire,  $\gamma$ , sont principalement des propriétés des matériaux, avec des valeurs d'environ  $0,004K^{-1}$  et  $0,12$ , respectivement, pour les modules de silicium cristallin, Notton et al. (2005). Ce dernier, cependant, est généralement pris à zéro, (Skoplaki and Palyvos, 2009), et l'équation 2.40 réduite à :

$$\eta_c = \eta_{STC} [1 - \beta_{STC} (T_c - T_{STC})] \quad (2.40)$$

La valeur réelle du coefficient de température, en particulier, dépend non seulement du matériau PV, mais également de  $T_{STC}$ . Il est donné par le ratio [18]

$$\beta_{STC} = \frac{1}{T_0 - T_{STC}} \quad (2.41)$$

Dans lequel  $T_0$  correspond à la température (élevée) de Garg et Agarwal (Garg and Agarwal, 1995). Pour les cellules solaires au silicium cristallin, cette température est de  $270C$ , Evans et Florschuetz (Evans and Florschuetz, 1978). Dans un certain nombre de corrélations, la température cellule / module qui n'est pas facilement disponible a été remplacée par  $T_{NOCT}$ , c'est-à-dire par la température nominale de la cellule en fonctionnement. Une de ces expressions est :

$$\eta_c = \eta_{STC} \left[ 1 - \beta_{STC} \left[ T_a - T_{STC} + (T_{NOCT} - T_a) \frac{G}{G_{NOCT}} \right] \right] \quad (2.42)$$

Les quantités étiquetées *NOCT* sont mesurées dans des conditions de circuit ouvert (c'est-à-dire sans charge attachée) tout en fonctionnant dans l'environnement dit "environnement terrestre nominal" (*NTE*), défini comme suit, Stultz et Wen (Stultz and Wen, 1977) :

- ☞ Flux solaire global :  $1000W/m^2$ ,
- ☞ Température de l'air :  $293,16K(20C)$ ,
- ☞ Vitesse moyenne du vent :  $1m/s$ ,

Des travaux antérieurs (Durisch et al., 2002) effectués à l'Institut Paul Scherrer (PSI) [2,3] ont montré que les spécifications techniques des fabricants pour les modules ne suffisaient pas pour choisir le type de module le mieux adapté à un système photovoltaïque (PV) aux conditions climatiques d'un site particulier. Durisch et al. (Durisch et al., 2002) ont développé un modèle d'efficace semi-empirique permettant de calculer le rendement des cellules et des modules dans diverses conditions climatiques. L'efficacité  $\eta_c$  est en général fonction de l'irradiation globale  $G$ , de la température de la cellule  $T_c$  et de la masse d'air relative  $AM$ . Il est donc exprimé sous la forme :

$$\eta_c = p \left[ q \frac{G}{G_0} + \left( \frac{G}{G_0} \right)^m \right] \times \left[ 1 + r \frac{T_c}{T_0} + s \frac{AM}{AM_0} + \left( \frac{AM}{AM_0} \right)^u \right] \quad (2.43)$$

Avec :  $G_0 = G_{STC} = 1000W/m^2$ ,  $T_0 = T_{STC} = 25^\circ C$  et  $AM_0 = 1.5$ . Les paramètres  $p$ ,  $q$ ,  $m$ ,  $r$ ,  $s$  et  $u$  sont spécifiques à chaque type de module à partir d'un ensemble de mesures extérieures, c'est-à-dire le traitement de multitudes de données obtenues dans diverses conditions climatiques.

Dans les calculs de rendement énergétique, les masses d'air  $AM$  sont obtenues à partir de la date et de l'heure du jour et des coordonnées géographiques du site sélectionné pour le système photovoltaïque. Les températures de cellules mesurées ont été mises en relation avec la température de l'air ambiante  $T_a$ . La relation de Ross (Mon et al., 1985) a été confirmée, ce qui est donné comme :

$$T_c = T_a + hG \quad (2.44)$$

$h$  est le coefficient de Ross pour les différents types de modules dans le tableau à l'annexe. le rendement  $\eta_{STC}$  et le coefficient de température  $\beta_{STC}$  peuvent être déterminés à partir des conditions de test standard (STC) :  $G_0 = G_{STC} = 1000W/m^2$ ,  $T_0 = T_{STC} = 25^\circ C$  et  $AM_0 = 1.5$ ). Nous avons les relations suivantes :

$$\eta_{STC} = p(q + 1)(2 + r + s) \quad (2.45)$$

$$\beta_{STC} = \left( \frac{\partial \eta_c}{\partial T_c} \right)_{STC} = \frac{p(q + 1)r}{T_{STC}} \quad (2.46)$$

## 2.4 Méthode de modélisation numérique d'un module photovoltaïque

Le logiciel Matlab nous a permis de modéliser la cellule  $PV$  et un panneau  $PV$ . **Matlab** est un logiciel de calcul numérique commercialisé par la société MathWorks (MatLab, 2018). Il a été initialement développé à la fin des années 70 par Cleve Moler, professeur de mathématique à l'université du Nouveau-Mexique puis à Stanford, pour permettre aux étudiants de travailler à partir d'un outil de programmation de haut niveau et sans apprendre le *Fortran* ou le *C*. **Matlab** signifie **Matrix laboratory**. Il est un langage pour le calcul scientifique, l'analyse de données, leur visualisation, le développement d'algorithmes. Son interface propose, d'une part, une fenêtre interactive type console pour l'exécution de commandes, et d'autre part, un environnement de développement intégré (IDE) pour la programmation d'applications. **Matlab** trouve ses applications dans de nombreuses disciplines. Il constitue un outil numérique puissant pour la modélisation de systèmes physiques, la simulation de modèles mathématiques, la conception et la validation (tests en simulation et expérimentation) d'applications. Le logiciel de base peut être complété par de multiples **toolboxes**, c'est-à-dire des boîtes à outils. Celles-ci sont des bibliothèques de fonctions dédiées à des domaines particuliers. Nous pouvons citer par exemple : l'Automatique, le traitement du signal, l'analyse statistique, l'optimisation ...

Avec le logiciel MatLab, la modélisation de notre cellule/module peut ainsi être faite de trois façons :

### 2.4.1 Modélisation par un Code Matlab

Les équations donnant l'intensité de courant au borne de la cellule  $PV$  étant non linéaire, pour résoudre ces dernières on utilise la méthode de Newton Raphson décrite par :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.47)$$

Où :  $f'(x_n)$  : Le dérivé de la fonction  $f(x_n)$ ;  $x_n$  : La présente itération et correspond à  $I$ ;  $x_{n+1}$  : L'itération suivante et égale à  $f(I)$ .

En utilisant le modèle  $2M7P$  oit  $f(I)$  donnée par l'équation :

$$f(I) = -I + I_{ph} - I_{sat1} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_1 K N_s T} \right) - 1 \right) - I_{sat2} \left( \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_2 K N_s T} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I + V}{R_{sh}} = 0 \quad (2.48)$$

Et  $f'(I) = \frac{df(I)}{dI}$  est égale :

$$f'(I) = -1 - I_{sat1} \frac{qR_s}{n_1 K N_s T} \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_1 K N_s T} \right) - I_{sat2} \frac{qR_s}{n_2 K N_s T} \exp \left( \frac{q(R_s I + V)}{n_2 K N_s T} \right) - \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (2.49)$$

Nous avons utilisé l'organigramme de la figure 2.7 pour écrire un programme avec l'extension *.m* permettant de déterminer ces paramètres.

## 2.4.2 Modélisation sous MatLab Simulink

**Simulink** est un logiciel muni d'une interface graphique pour la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques. Étant intégré à **MATLAB**, les deux environnements sont parfaitement compatibles et les différentes fonctionnalités de ce dernier sont alors directement accessibles. **Simulink** est basé sur une interface graphique qui permet une construction aisée et conviviale de schémas-blocs. Chaque bloc composant le système est sélectionné depuis un ensemble de bibliothèques prédéfinies.

### 2.4.2.1 Première approche

Dans cette approche l'équation peut être modélisé avec les blocs mathématiques classiques tel l'addition la multiplication soustraction, division et exponentielle. On a donc une série d'opérations qu'on doit enchaîner les unes derrières les autres pour construire facilement notre équation et de simuler le fonctionnement des systèmes. La figure 2.8 nous en donne une brève illustration utilisant cette approche :

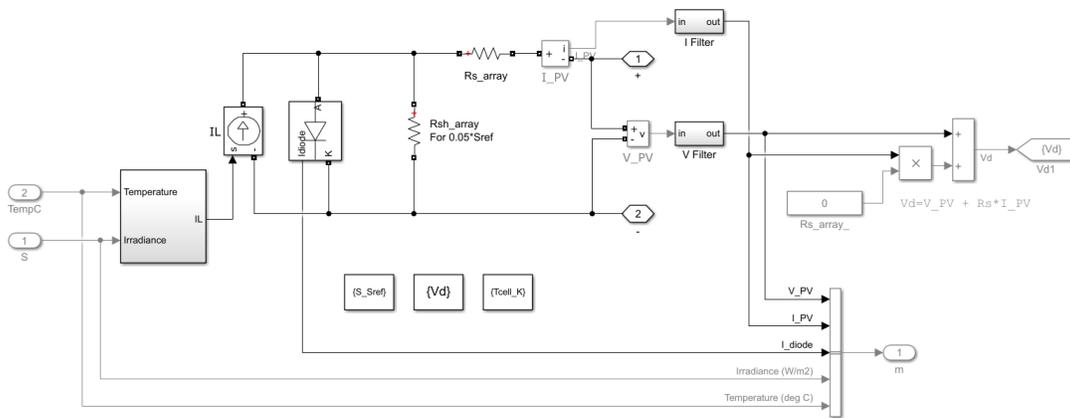


Figure 2.8 – modélisation cellule avec les blocs mathématique de simulink

Cette approche est purement mathématique.

### 2.4.2.2 Deuxième approche

Depuis quelques années maintenant, nous pouvons travailler avec les composantes physiques qui vont reproduire le comportement physique. Nous utilisons pour cela la bibliothèque Simscape qui est un outil de modélisation et de simulation de systèmes physiques multi-domaine (mécanique, électrique, hydraulique). Les modèles Simscape peuvent servir à concevoir les lois de commande et à tester les performances au niveau système. Les blocs des bibliothèques de Simscape représentent ainsi des composants tels, des résistances, diodes, transistors, moteurs, etc.

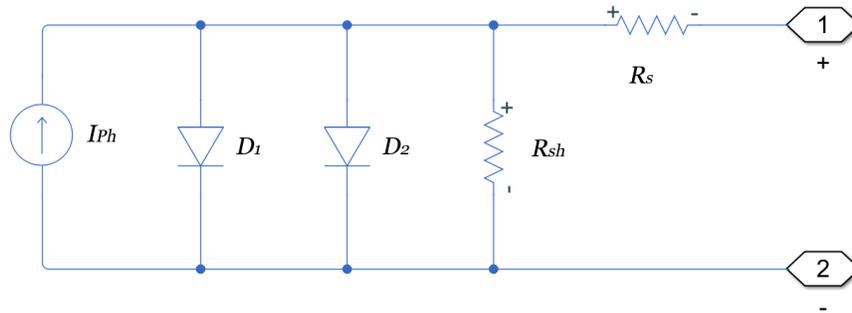


Figure 2.9 – modélisation avec les composantes SimElectronics

### 2.4.2.3 Troisième approche

Nous pouvons également utiliser directement le composant “solar Cell” qui est un composant disponible dans une bibliothèque avancée de simElectronics qui est un produit complémentaire par rapport à Simscape. Ce composant implémente l’équation précédente et modélise les phénomènes plus complexes même.

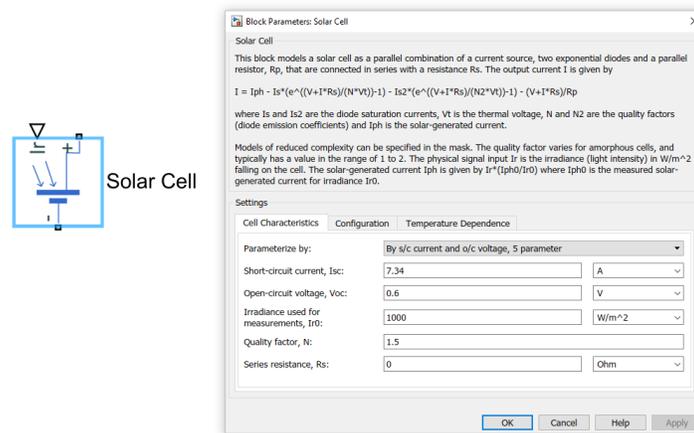


Figure 2.10 – modélisation utilisant le composant ”solar cells”

Le composant “solar cells” comme vous pouvez le voir à la figure 2.10 possède une option de configuration qui permet non seulement de choisir le nombre de paramètre mais et de les modifier au besoin.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes modélisations des cellules (modèle à une diode et modèle à deux diodes) et leurs nombres de paramètres respectifs. Nous avons également vu des méthodes de détermination des différents paramètres. En fin nous présenter les différentes approches de simulation de la cellule. Il nous reste à présenter les différentes influences sur les caractéristiques de la cellule. Cela sera fait au chapitre qui suit .

### Introduction

Dans le but d'étudier les différentes caractéristiques des modules *PV* au silicium mono et poly cristallin nous avons commencé dans ce chapitre par concevoir un module du *PV* à l'aide de Matlab Simulink en s'appuyant sur les équations données au chapitres 2. Et par la suite nous étudierons les influences de certains paramètres notamment climatique sur les différentes caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  et enfin nous verront quel est l'impact sur le rendement de conversion des modules *PV*.

### 3.1 Conception du module photovoltaïque

Nous avons utilisé le modèle *2D7P* pour modéliser le module car et l'avons mis en œuvre par la deuxième approche présentée au paragraphe 2.4.2.2. le modèle à deux diodes tient compte de tous phénomènes physiques au niveau de la cellule photovoltaïque comme nous l'avons mentionné plus haut et est de ce fait plus précis par rapport au modèle à une diode.

#### 3.1.1 Calcul des différents paramètres

Nous avons pour cela utilisé les équations présentées plus haut et nous les avons modélisées avec les blocs de fonction mathématiques de MatLap Simulink pour déterminer chacun des paramètres afin de concevoir le module *PV*.

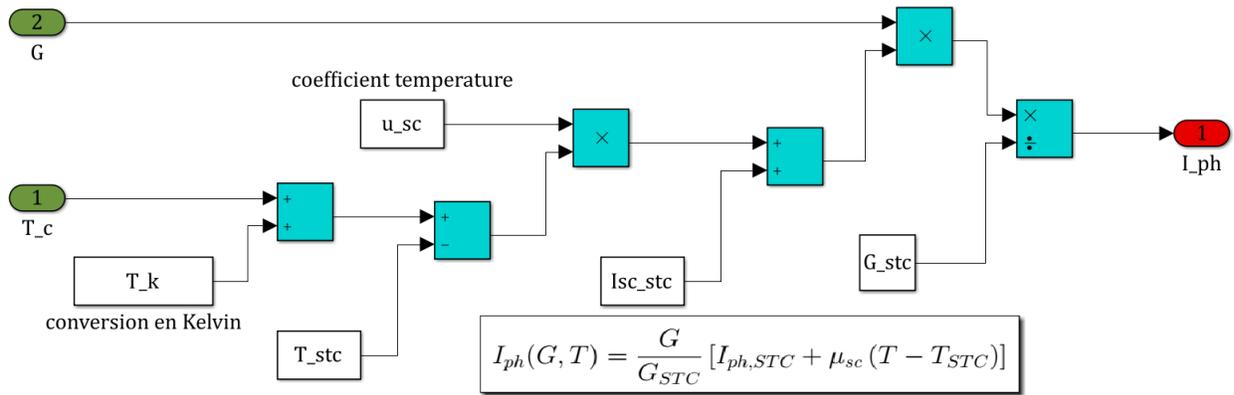


Figure 3.1 – Calcul du photo courant

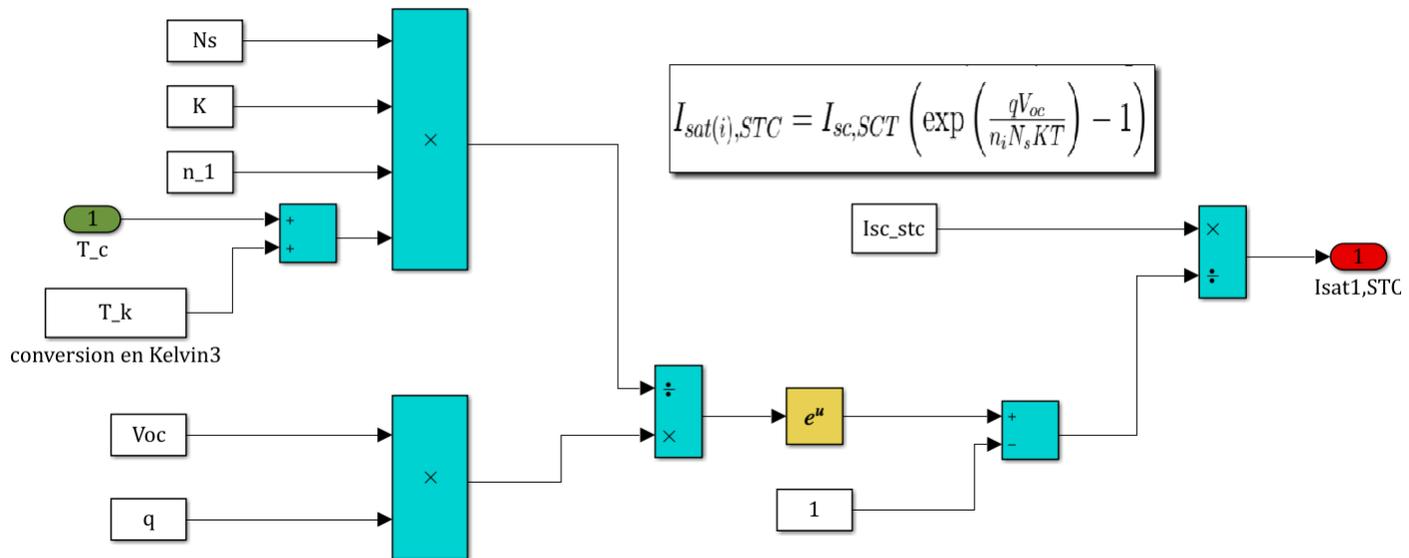
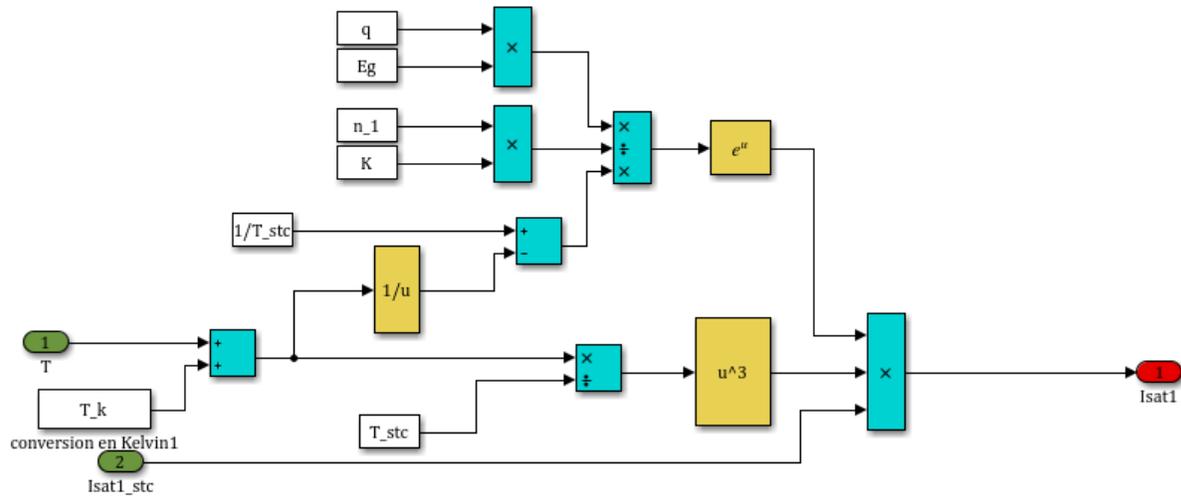


Figure 3.2 – calcul du courant de saturation inverse des diodes dans les STC



$$I_{sat1}(T) = I_{sat1,STC} \left( \frac{T}{T_{STC}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{n_1K} \left( \frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Figure 3.3 – calcul du courant de saturation inverse des diodes

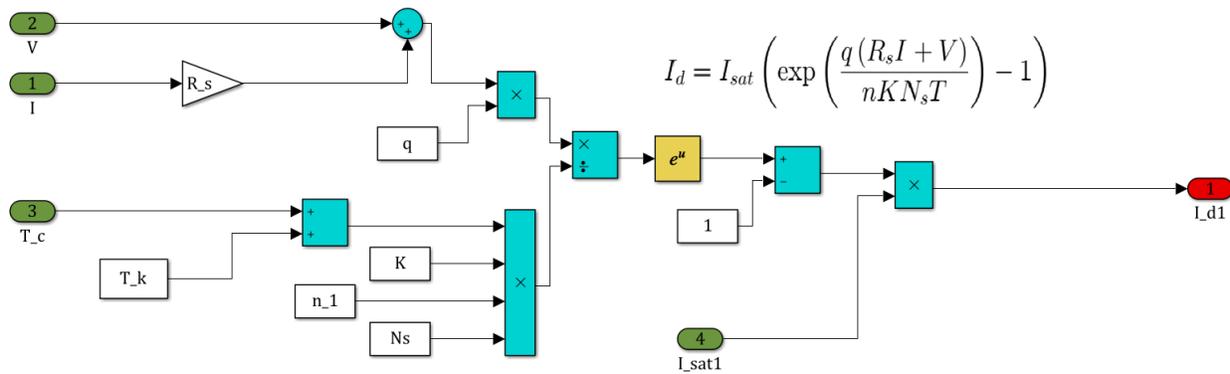


Figure 3.4 – calcul du courant de la diode

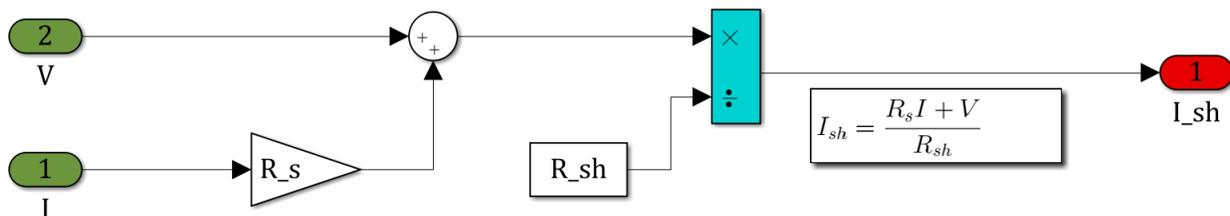


Figure 3.5 – calcul du courant traversant la résistance shunt

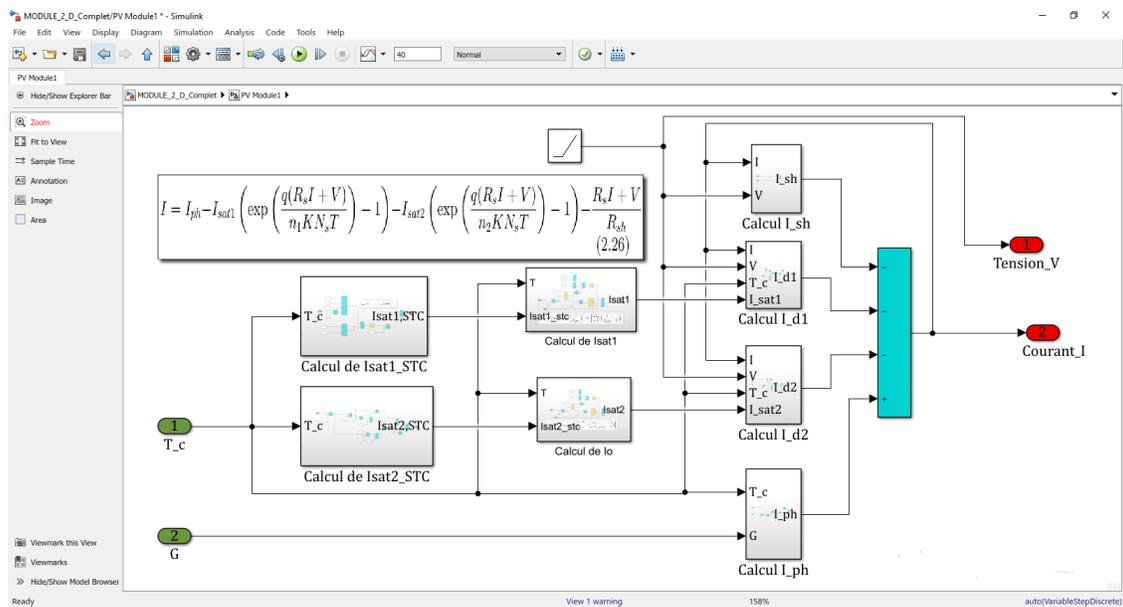


Figure 3.6 – Calcul d'intensité du courant de module photovoltaïque

### 3.1.2 Module photovoltaïque

Tous les blocs de calculs précédents nous ont permis de concevoir le module tel que nous pouvons le voir à la figure 3.7. La figure (a) possède des sorties numériques et la figure (b) des sorties bornées. La figure (b) nous permettra de faire de réaliser des associations séries où parallèles où séries/parallèle.

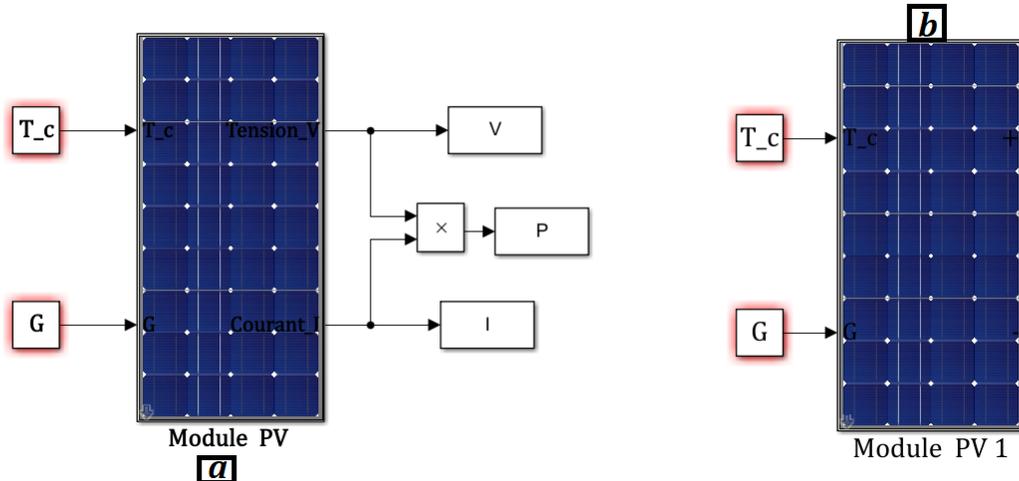


Figure 3.7 – Module photovoltaïque Conçu avec la seconde approche

Après avoir modélisé le module *PV* en se servant des blocs mathématiques classiques sous Matlab Simulink. Nous avons fait une comparaison avec un module *PV* utilisant le composant “Solar cell” inclut dans la bibliothèque SimElectronics de Simscape.

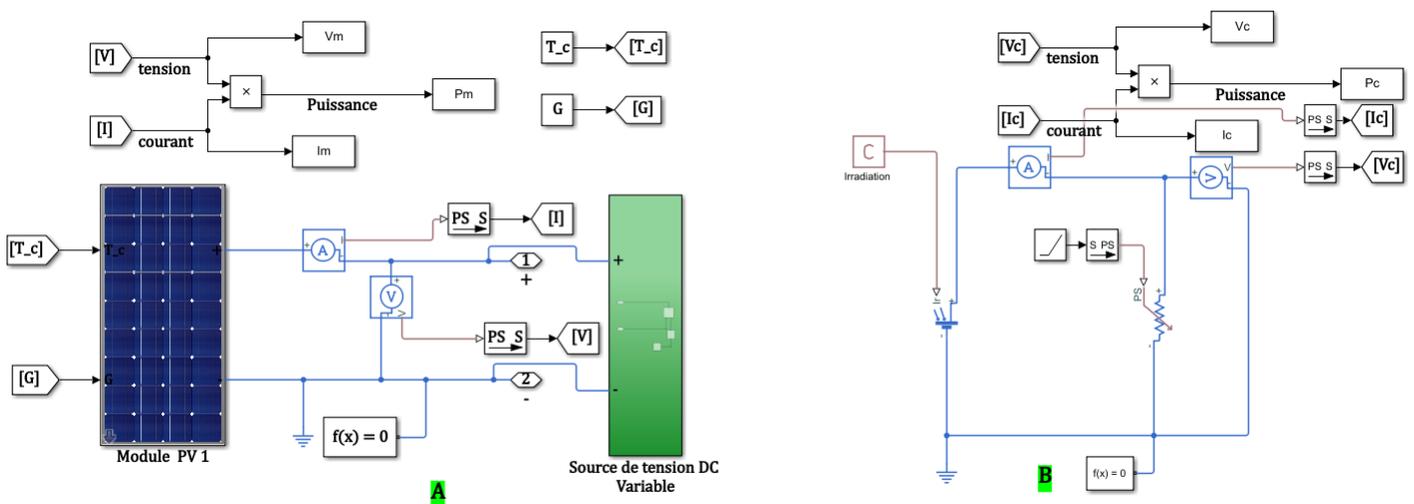


Figure 3.8 – Schéma de comparaison utilisé.

La figure 3.9 témoigne de la validité du module conçu. Nous pouvons constater que pour différentes valeurs de la température et de l’irradiation les courbes  $I(V)$  en (b) et  $P(V)$  en (a) de notre module se superposent presque avec celle obtenu avec la “solar cell” de même puissance.

Dans la suite il sera question d’évaluer les différentes influences subit par le module.

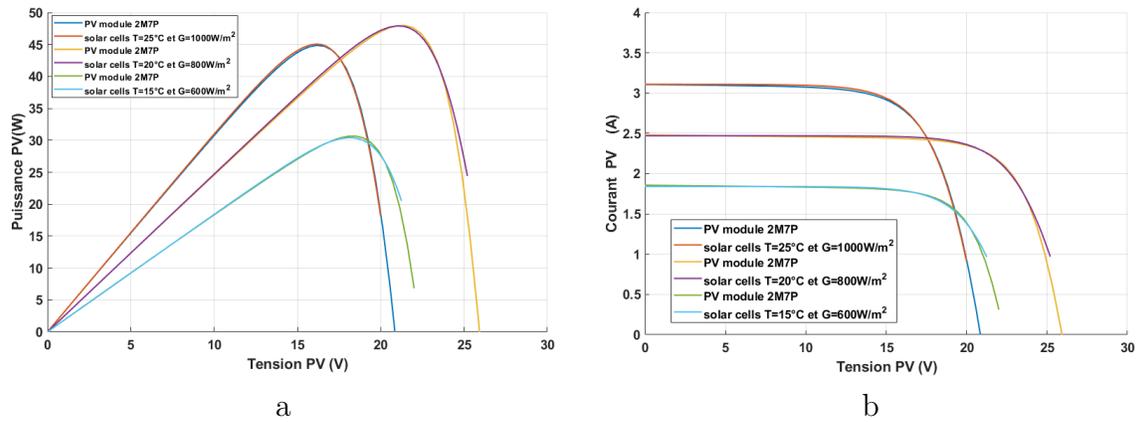


Figure 3.9 – Comparaison des modules photovoltaïques

## 3.2 Évaluation des différentes influences sur un module photovoltaïque

Les équations d'intensité de courant et de puissance données plus haut montrent une forme de dépendance à la température, à l'irradiation et à d'autres paramètres tel que les résistances shunt et série. Pour réaliser cette évaluation nous utiliserons le schéma d'expérimentation de la figure 3.8 (a).

### 3.2.1 Influence de la température sur le module photovoltaïque

Pour évaluer cette influence nous avons procédé comme suit : maintenons constant l'irradiation  $G = 1000W/m^2$  et faisons varier la température. Nous observons sur la figure 3.10 qu'une augmentation de température entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  cela a pour conséquence une diminution de la puissance max que peut fournir un module  $PV$  voir figure 3.10 (a). Par contre le courant de court circuit est resté quasi constant ( figure 3.10 (b)).

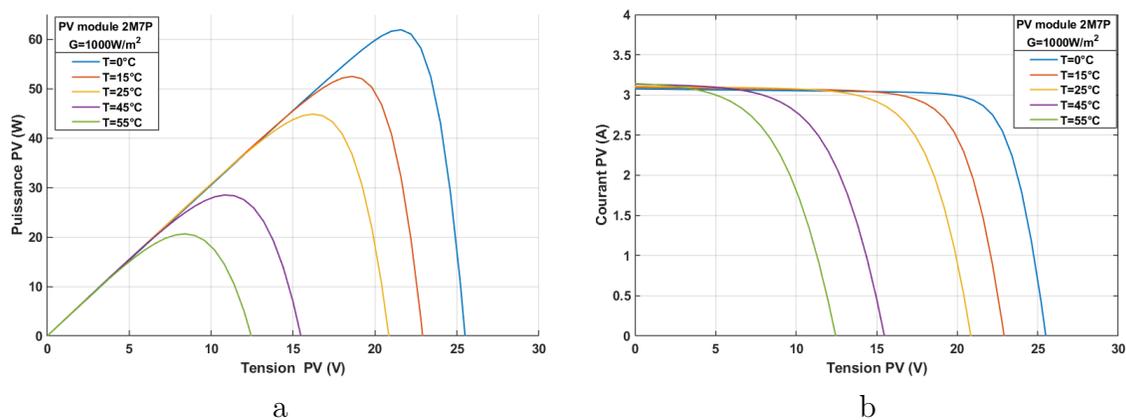


Figure 3.10 – Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque pour différentes températures.

### 3.2.2 Influence de l'irradiation sur le module photovoltaïque

La figure 3.11 (a) et la figure 3.11 (b) présentent les caractéristiques courant et puissance du module en fonction de la tension en circuit ouvert. Ici la température du module est maintenue constante  $T_c = 25C$  et nous faisons varier l'irradiation  $G$ . Nous remarquons que le courant électrique et la puissance, sont directement proportionnels à l'irradiation (une augmentation de  $G$  entraîne une augmentation de  $I$  et  $P$ ). La tension est dégradée légèrement par rapport au courant, lorsque l'irradiation  $G$  baisse.

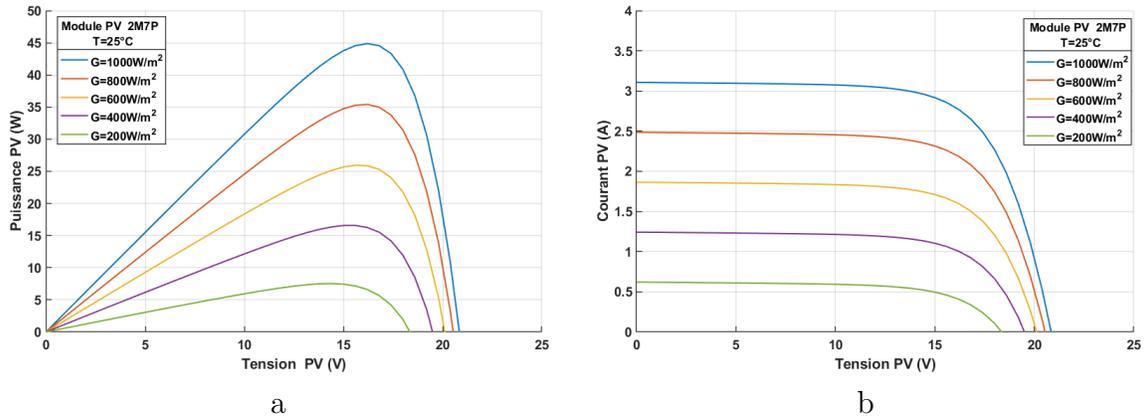


Figure 3.11 – Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un module  $PV$  pour différentes Irradiations.

### 3.2.3 Influence de la résistance série sur le module photovoltaïque

La résistance série dépend de la résistivité du matériau, des résistances de contact des électrodes et de la résistance de la grille collectrice. Nous remarquons que la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et le courant du court-circuit ( $I_{sc}$ ) ne sont pas modifiés, mais les courbes de  $I(V)$  et  $P(V)$  se déforment très rapidement sous l'effet de  $R_s$ . Cette influence se traduit par une diminution de leur pente dans la zone de fonctionnement de la cellule; comme il est montré sur la figure 3.12 (a) et la figure 3.12(b). Nous observons également que la puissance maximale est directement

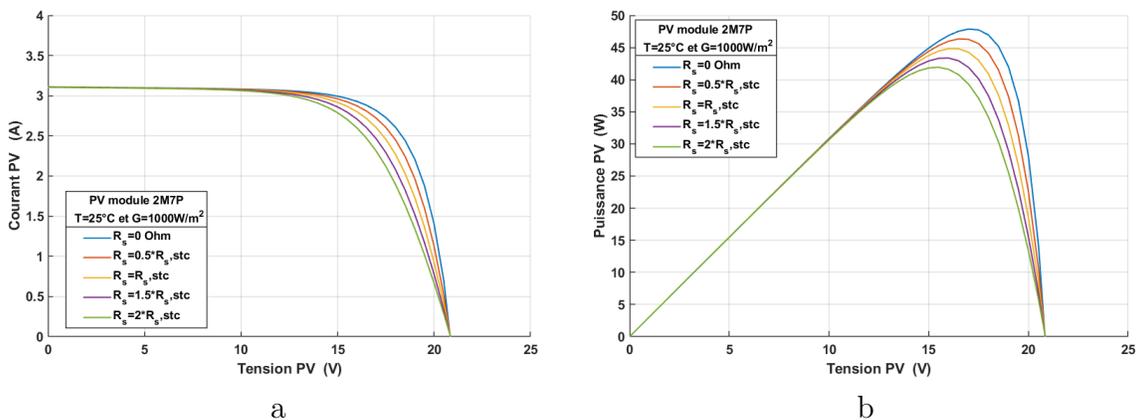


Figure 3.12 – Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de la  $R_s$ .

proportionnelle à la résistance série. En effet la décroissance de la résistance série entraîne une augmentation de la puissance maximale, cela est observé à la figure 3.12 (b).

### 3.2.4 Influence de la résistance shunt sur le module photovoltaïque

La résistance shunt peut être causée par les défauts existant au sein du matériau, tel que : les dislocations... dans la zone de déplétion ou le long de la cellule solaire. Son influence sur les paramètres  $I(V)$  et  $P(V)$  est illustré sur la figure 3.13, et il est clair que le courant du court-circuit ( $I_{sc}$ ) n'est pas modifié mais la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) est très peu modifiée. Nous remarquons

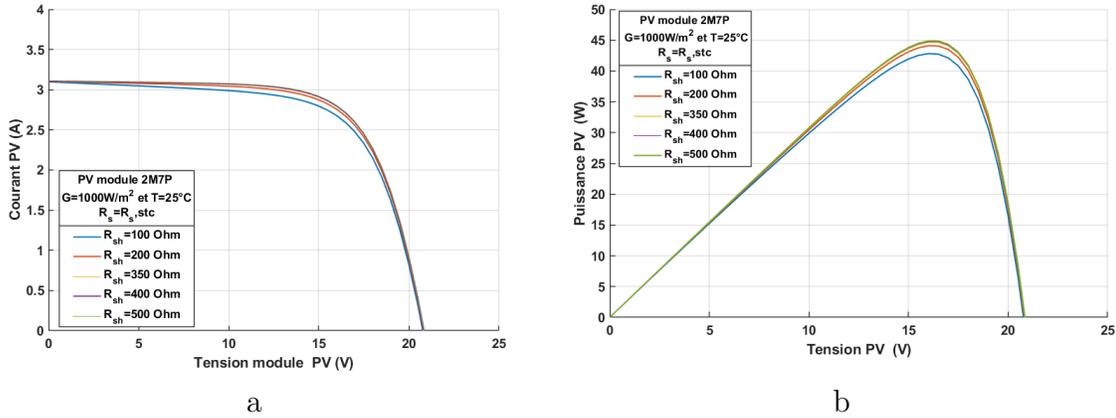


Figure 3.13 – Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un module photovoltaïque pour différentes valeur de la  $R_{sh}$ .

qu'une augmentation de la résistance shunt  $R_{sh}$  entraîne une augmentation de la puissance max. Lorsque cette augmentation atteint une certaine valeur les courbes  $I(P)$  et  $I(V)$  se superposent. On observe dans notre cas une superposition de ces courbes à partir de  $R_{sh} = 339\omega$ .

## 3.3 Association des modules

Pour évaluer l'influence de l'association des modules, Nous avons maintenu constant la température des modules à  $T_c = 25C$  et l'irradiation  $G = 1000W/m^2$ .

### 3.3.1 Association en série

Le montage en série est illustré à la figure 3.14. Dans ce cas nous avons 3 modules en séries.

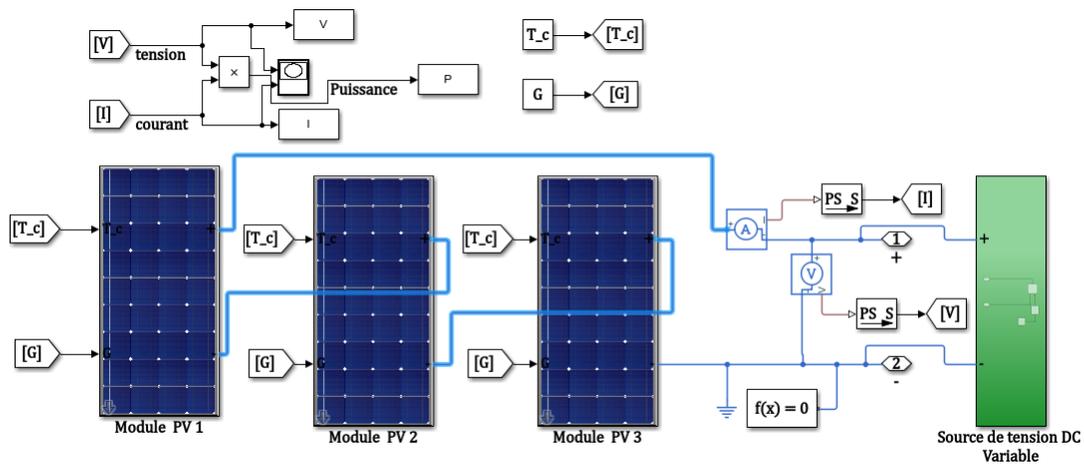


Figure 3.14 – Association de 3 modules photovoltaïques en série

En faisant varier le nombre de module *PV* connecté en série nous pouvons observer que le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) reste constant par contre la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et tension max ( $V_m$ ) sont proportionnelles aux nombres de modules en série ( figure 3.15 (a)). Cette proportionnalité de la tension max entraine directement celle de la puissance max ( $P_m$ ) ( figure 3.15 (b)). L'augmentation du nombre de module en série entraine l'augmentation de la tension et puissance.

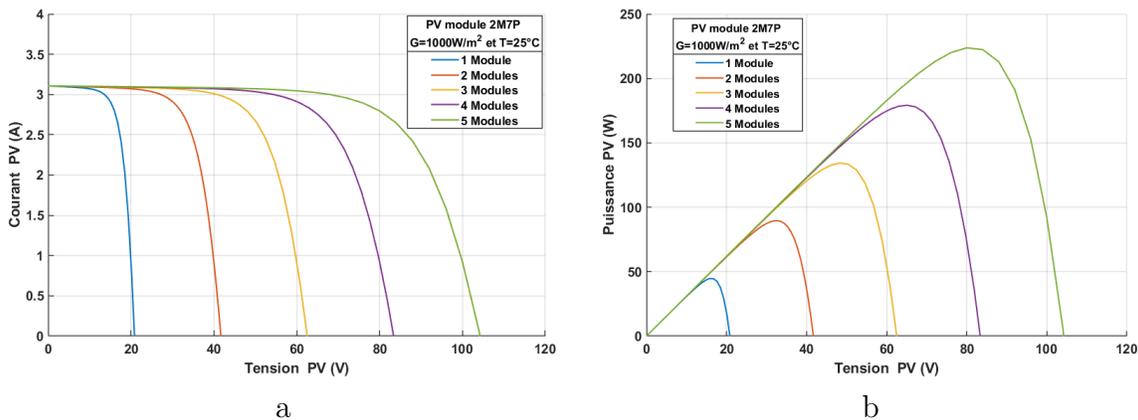


Figure 3.15 – Caractéristiques I(V) et P(V) en fonction du nombre de module photovoltaïque en série

### 3.3.2 Association en parallèle

Le montage en parallèle est illustré à la figure 3.16. Dans ce cas nous avons 3 modules en parallèles.

En faisant varier le nombre de module *PV* connecté en parallèle nous pouvons observer que dans ce cas c'est plutôt la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) qui reste constante mais le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) et le courant max ( $I_m$ ) sont proportionnelles aux nombres de modules en parallèles ( figure 3.15 (a)). Cette proportionnalité du courant max entraine directement celle de la puissance max ( $P_m$ ). Et donc l'augmentation du nombre de module en parallèle entraine l'augmentation du courant et de la puissance.

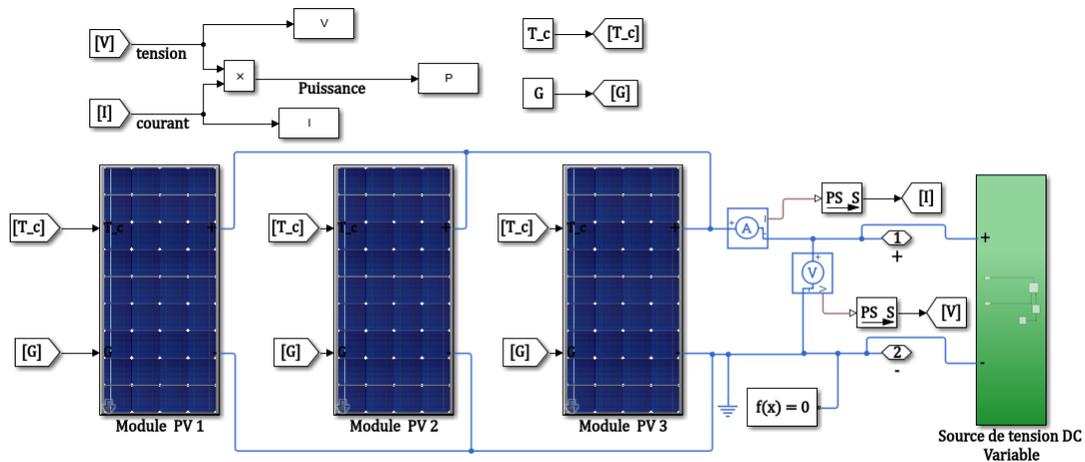


Figure 3.16 – Association de 3 modules photovoltaïques en parallèle

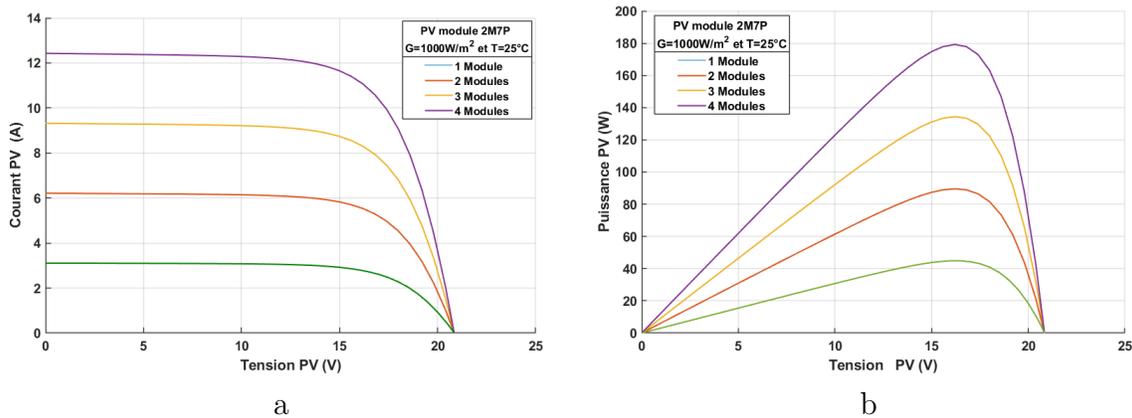


Figure 3.17 – Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  en fonction du nombre de module photovoltaïque en parallèle

### 3.3.3 Association en Série/Parallèle

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension. Et une association de plusieurs modules dans un même plan s'appelle un panneau et le montage de plusieurs panneaux en rangées de panneaux série et parallèle forme un champ photovoltaïque ou ce que l'on appelle parfois une sous-station photovoltaïque. La figure 3.18 (a) et la figure 3.18 (b) illustrent l'influence de cette association sur les paramètres  $I(V)$  et  $P(V)$ .

La figure 3.19 présente un tel groupement de  $N_{ms}$  module en série dans une branche et  $N_{bp}$  branches en parallèle.

Si on note  $P_m$ ,  $V_m$ , et  $I_m$  les caractéristiques du module de base, représentant respectivement la puissance crête, tension maximale, et courant maximal. Nous pouvons dégager les relations suivantes aux bornes du champ photovoltaïque :

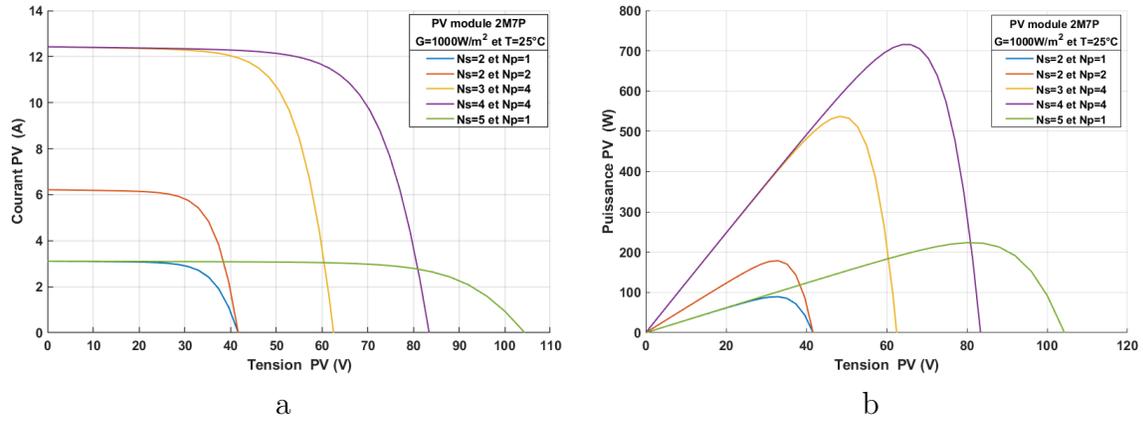


Figure 3.18 – Caractéristiques I(V) et P(V) en fonction du nombre de module photovoltaïque en série/parallèle

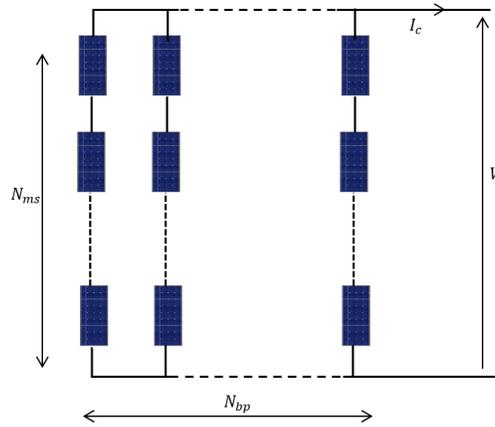


Figure 3.19 – montage Série / parallèle

☞ Puissance crête disponible  $P_{mc}$  :

$$P_{mc} = N_{ms} \times N_{bp} \times P_m \quad (3.1)$$

☞ La tension maximale  $V_{mc}$  :

$$V_{mc} = N_{ms} \times V_m \quad (3.2)$$

☞ Le courant maximal  $I_{mc}$  :

$$I_{mc} = N_{bp} \times I_m \quad (3.3)$$

### 3.4 Influence due à l'ombrage

Additionner les tensions dans le cas d'un assemblage série de cellules PV est aisé si toutes les cellules sont identiques et qu'elles travaillent sous les mêmes conditions d'ensoleillement et de température. Mais, dans les conditions réelles de fonctionnement, si les cellules sont légèrement différentes ou ne sont pas uniformément éclairées, le comportement électrique n'est pas facilement prévisible et dépend des caractéristiques de chaque cellule et des conditions d'éclairage. Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques de diodes by-pass qui ont

pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives ( figure 3.20). La diode by-pass lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors le panneau, évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules. Par contre, cette solution efficace réduit d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau. La dégradation d'une seule cellule dans un groupement en série, condamne donc le groupe de cellules protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance.

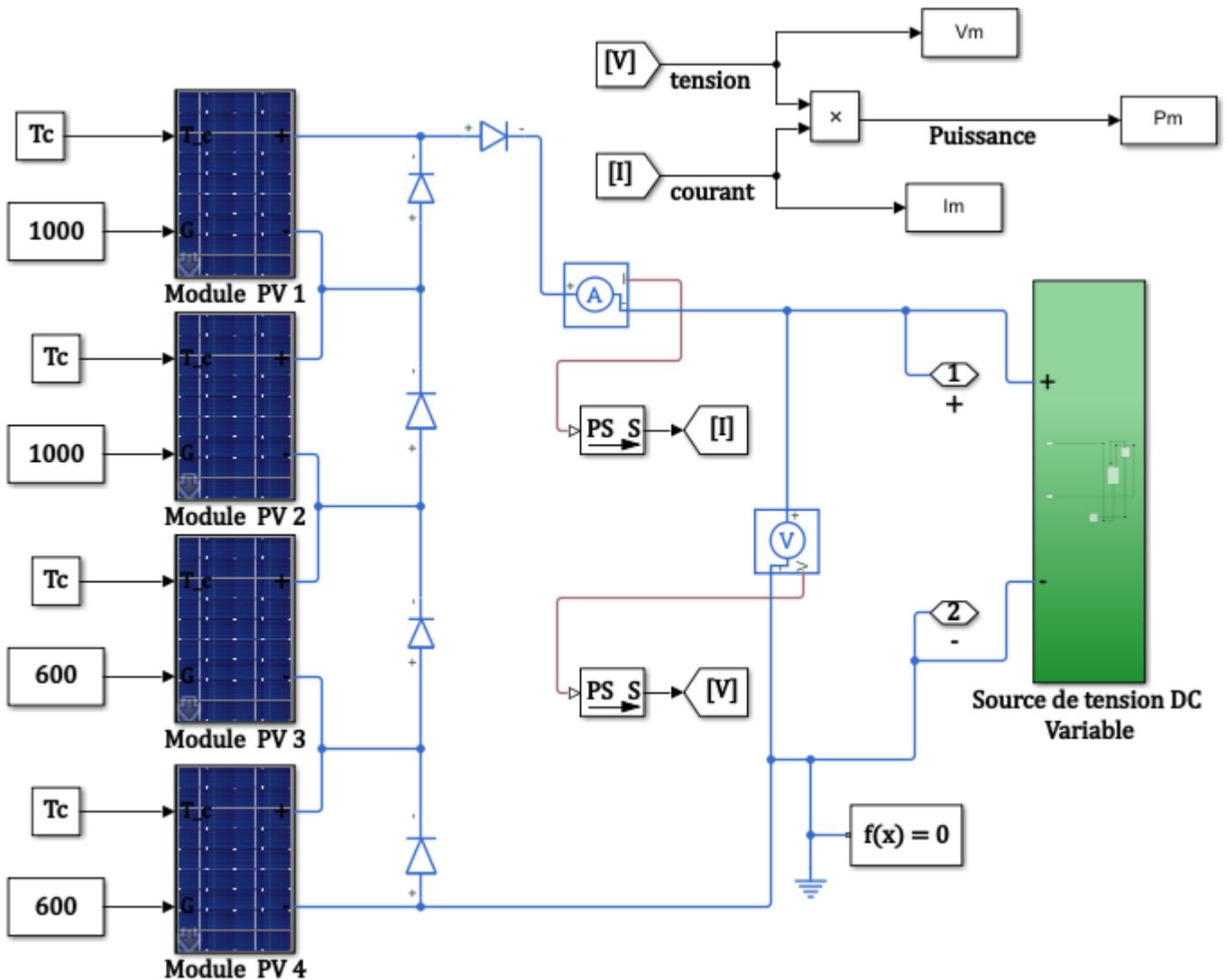


Figure 3.20 – Montage de 4 modules photovoltaïques donc 2 sont soumis à un ombrage de  $600W/m^2$ .

Dans le cas d'une association de quatre modules PV en série, et en faisant varier progressivement le nombre de module PV ombragé de Zéro à 3. ( figure 3.20).

Les résultats de simulation obtenus pour un éclairage direct  $G = 1000W/m^2$  de et une température de la cellule ( $T_c = 25C$ ) avec un pourcentage d'ombrage allant de 0% à 75% sont montrés sur la figure 3.21 (a) et la figure 3.21 (b).

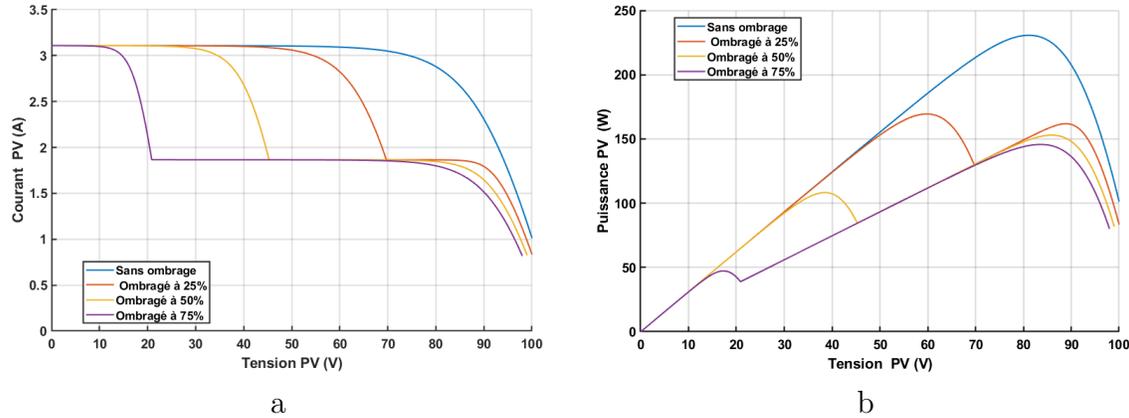


Figure 3.21 – Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un module photovoltaïque pour différents valeur de la  $R_s$ .

Les caractéristiques externes d'un générateur photovoltaïque subi d'un ombrage partiel ont été déformés en comparant avec celle dans le cas normal, en effet ils présentent plusieurs points de puissance maximale (un point de puissance globale  $GMPP$  et des points de puissance locale  $LMPP$ ). Pour la même structure des panneaux  $PV$  et dans les mêmes conditions climatiques, la puissance maximale dans le mode normal est supérieure à la puissance dans le cas d'ombrage, ce qui traduit par une diminution de la puissance fournie à la charge.

### 3.5 Évaluation du rendement du module

Après avoir étudié les différentes influences sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  il sera question dans cette partie de voir quel est l'impact de ces derniers sur l'efficacité de la production  $PV$ . La plupart de travaux antérieurs considèrent généralement deux facteurs qui influencent sur la production  $PV$  qui sont la température  $T$  et l'irradiation  $G$ . Mais les travaux de Wilhelm Durisch et al. Durisch et al. (2002) on mit en évidence un troisième paramètre qui est la Masse d'air relative  $AM$ . Cette donnée est propre à la situation géographique.

En utilisant le tableau de l'annexe et aux conditions de test standard ( $G = 1000W/m^2$ , ( $T_c = 25C$ ) et  $AM = AM_o = 1.5$  on détermine le rendement  $\eta_{STC}$  à partir de l'équation 2.45.

☞ Pour un module Silicium monocristallin on a :

$$\eta_{STC} = p(q + 1)(2 + r + s) = 15,37\% \quad (3.4)$$

☞ Pour un module Silicium polycristallin on a :

$$\eta_{STC} = p(q + 1)(2 + r + s) = 12,701\% \quad (3.5)$$

### 3.5.1 Influence de la masse d'air relative

Pour évaluer cette influence nous avons maintenu constant  $G = 1000W/m^2$  et ( $T_c = 25C$ ) dans l'équation 2.43, cela nous a donné l'équation réduite 3.6 et nous avons fait varier la masse d'air relative  $AM$  de 0 à 8.

$$\eta_c = p(q + 1) \left[ 1 + r + s \frac{AM}{AM_0} + \left( \frac{AM}{AM_0} \right)^u \right] \quad (3.6)$$

La figure 3.22 illustre le comportement de rendement des deux types de module cité plus haut face à cette variable.

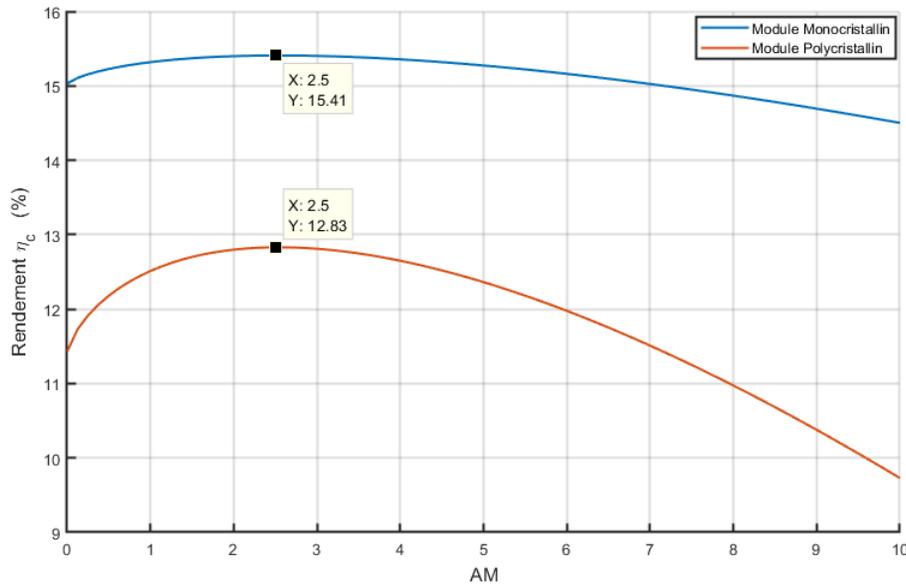


Figure 3.22 – Rendement des modules PV en fonction de la masse d'air relative  $AM$

En effet nous pouvons constater que les masse d'air relative on une influence non négligeable sur le rendement de production d'un module PV et cela en fonction de la technologie du module PV. Avec  $G = 1000W/m^2$  et ( $T_c = 25C$ ) nous avons atteint un rendement max de 12.83% pour le module silicium poly-cristallin et 15.45% pour un module silicium mono cristallin. Ces rendements max ont été atteint pour une masse d'air relative  $AM = 2.5$ .

### 3.5.2 Influence de la température

Dans cette partie nous avons maintenu constant  $G = 1000W/m^2$  et  $AM = 1.5$  dans l'équation 2.43 et nous avons fait varier la température  $T_c$  de 0 à 75C.

Nous obtenons l'équation réduite suivante :

$$\eta_c = p(q + 1) \left( 2 + s + r \frac{T_c}{T_0} \right) \quad (3.7)$$

La figure 3.23 illustre le comportement des rendements face à cette variable en effet nous pouvons constater que le rendement dans ce cas subit une décroissance linéaire avec l'augmentation de la température. Le module silicium mono-cristallin est plus sensible à des fortes températures car sa pente décroît plus vite que celle du module silicium poly-cristallin.

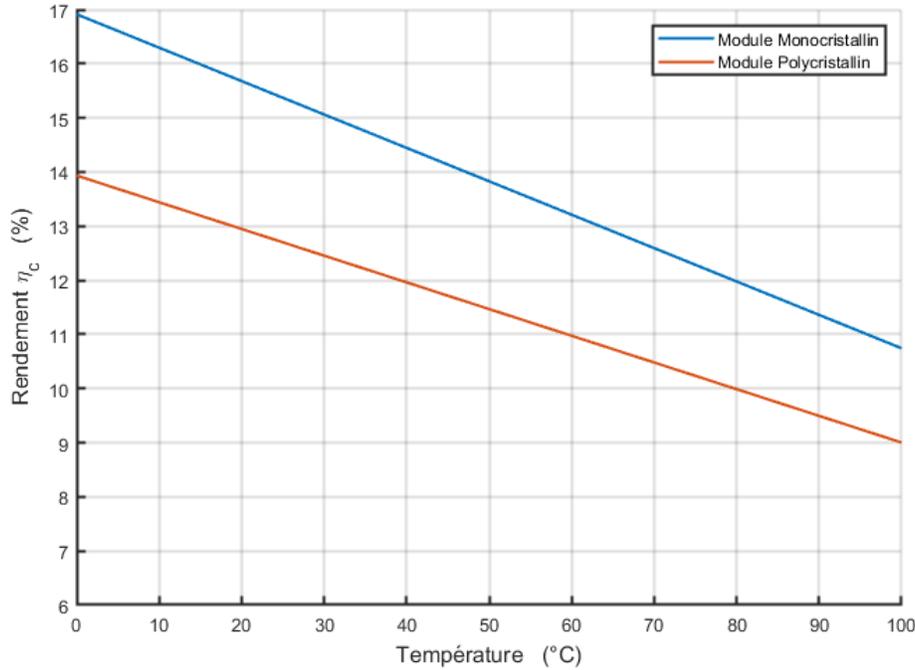


Figure 3.23 – Rendement des modules photovoltaïques en fonction de la Température  $T$

### 3.5.3 Influence de l'irradiation

Nous avons fait varier l'irradiation  $G$  de 0 à  $1200W/m^2$  dans cette partie et nous avons maintenu constant la température ( $T_c = 25C$ ) et la masse d'air relative  $AM = 1.5$  dans l'équation 2.43 et nous obtenons l'équation réduite suivante :

$$\eta_c = p(2 + r + s) \left[ q \frac{G}{G_0} + \left( \frac{G}{G_0} \right)^m \right] \quad (3.8)$$

La figure 3.24 illustre le comportement de rendement face à cette variable en effet nous relevons que les modules silicium monocristallin atteignent un rendement max à  $600Wm^{-2}$  tandis que les modules au silicium polycristallin l'atteignent à  $400Wm^{-2}$ . Cela traduit le faite que les modules au silicium poly-cristallin sont moins sensibles aux fortes irradiations.

Comme de façon générale il y a une interdépendance entre l'irradiation et la température, nous avons maintenu constant juste la masse d'air relative  $AM = 1.5$  et avons fais varier de façon simultanée la température  $T$  et l'irradiation  $G$  dans l'équation 3.9.

$$\eta_c = p \left( 2 + s + r \frac{T_c}{T_0} \right) \left[ q \frac{G}{G_0} + \left( \frac{G}{G_0} \right)^m \right] \quad (3.9)$$

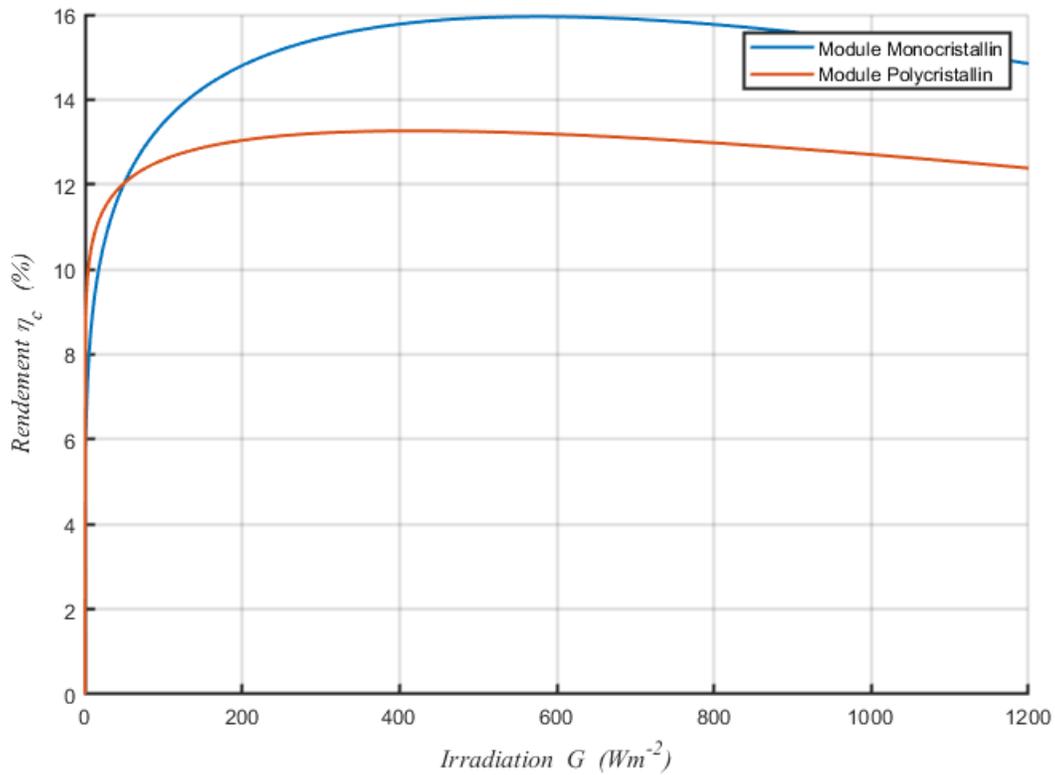


Figure 3.24 – Rendement des modules photovoltaïques en fonction de l'irradiation  $G$

On obtient les courbes de niveau donnant les rendements en fonction de la température et de l'irradiation suivante :

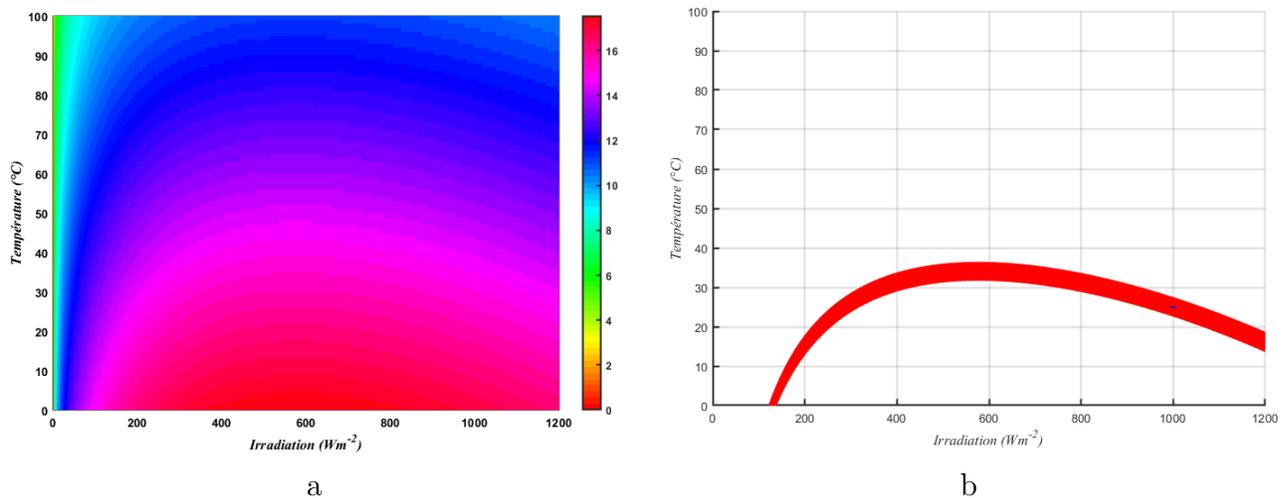


Figure 3.25 – Courbe de niveau du Rendement du module photovoltaïque mono-cristallin en fonction de la  $T$  et  $G$  avec  $AM = 1.5$

La figure 3.25 et la figure 3.26 sont respectivement les courbes de niveau des modules au silicium mono et poly-cristallin. La figure 3.25 et la figure 3.26 (a) sont leurs rendements respectifs et

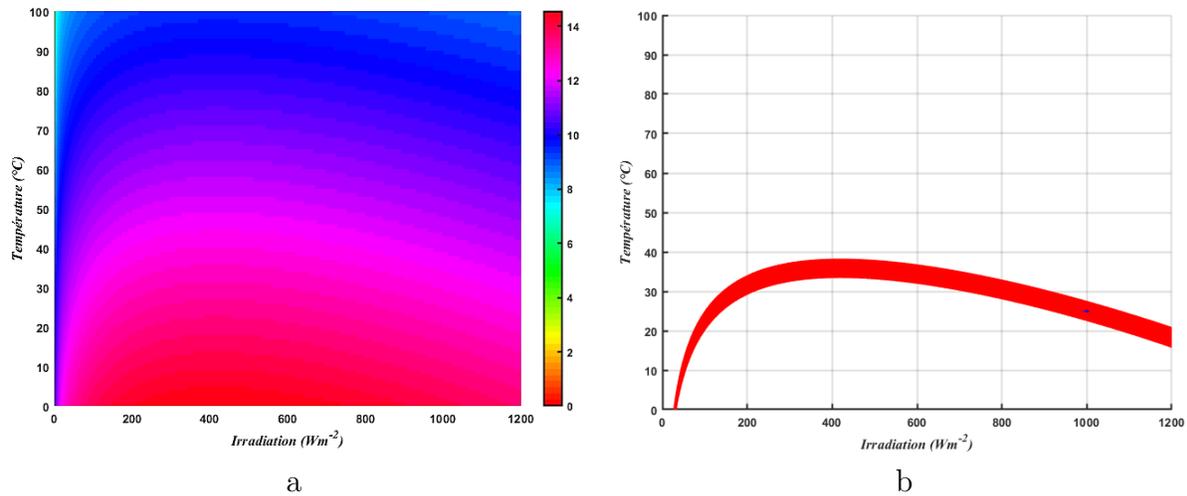


Figure 3.26 – Courbe de niveau du Rendement du module photovoltaïque poly-cristallin en fonction de la  $T$  et  $G$  avec  $AM = 1.5$

la figure 3.25 et la figure 3.26 (b) les erreurs relatives respectives par rapport à leurs rendements dans les conditions de test standard  $\eta_{stc(m,p)}$  respectifs. Le tracé est donné pour des erreurs  $\leq$  à 0,01.

Ces erreurs sont données par le relation :

$$erreur_{(m,p)} = \frac{|\eta_{c(m,p)} - \eta_{stc(m,p)}|}{\eta_{stc(m,p)}} \quad (3.10)$$

## Conclusion

Dans ce chapitre il était question de comprendre le comportement de nos modules  $PV$  soumis à différente influence. Nous avons notamment l'influence de la température, de l'irradiation et de la masse d'air qui n'est surtout pas à négliger car cette dernière impacte sur le rendement de la production photovoltaïque.

---

## IMPLICATION DU SUJET SUR LE SYSTÈME ÉDUCATIF

---

### Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre l'implication du sujet traité sur le système éducatif et nous élaborons une fiche pédagogique d'une leçon en rapport avec la recherche menée. Mais avant d'y arriver nous ferons tout d'abord une brève présentation du système éducatif en vigueur au Cameroun.

### 4.1 Présentation du système éducatif en vigueur au Cameroun

Le système éducatif dans un pays est une organisation formelle du parcours académique et professionnel. Le système éducatif camerounais est tributaire de l'héritage colonial. Il comprend à cet effet six niveaux d'enseignement :

- ☞ L'enseignement maternel.
- ☞ L'enseignement primaire.
- ☞ L'enseignement post-primaire.
- ☞ L'enseignement normal.
- ☞ L'enseignement secondaire.
- ☞ L'enseignement supérieur.

En ce qui concerne l'enseignement secondaire elle est divisée en deux :

- ☞ L'enseignement secondaire technique
- ☞ L'enseignement secondaire générale

### 4.2 Intérêt didactique

La didactique et la pédagogie sont deux disciplines essentielles et constitutives de l'éducation.

La didactique est une science de l'éducation qui a pour but l'étude des processus de l'enseignement, de l'apprentissage et de l'élaboration rationnelle des programmes scolaires des enseignements à dispenser. La didactique d'une discipline étudie les différents processus de transmission des savoirs relatifs à la discipline considérée et leur acquisition par les élèves. Étymologiquement, le concept pédagogie dérive du mot grec ; paidôgogia, paidogogos, qui signifie conduire, mener, accompagner, élever un enfant. Dans l'antiquité, le pédagogue était un esclave qui accompagnait l'enfant à l'école, lui portait ses affaires, mais aussi lui faisait réciter ses leçons et faire ses devoirs. Ainsi, le terme regroupe toutes les méthodes et pratiques d'enseignement et d'éducation ainsi que toutes les qualités requises pour transmettre une connaissance, un savoir ou un savoir-faire.

Dans l'éducation des enfants, plusieurs démarches pédagogiques qui s'appuient sur les théories d'apprentissage sont proposées. Actuellement au Cameroun, dans l'enseignement des Sciences Physiques, l'Approche Par Compétences est celle qui rencontre du succès. Cette approche se fonde sur une pédagogie socio constructiviste. L'appropriation des ressources et le développement des compétences ne se transmettent pas, ils se « construisent ». Dans une Approche Par Compétences, les savoirs, savoir-faire et savoir-être continuent à faire l'objet d'apprentissages ponctuels, selon les méthodes pédagogiques en vigueur.

Le professeur fera tout pour mettre les apprenants au centre des apprentissages :

- ☞ En mettant un accent sur le développement des savoirs, savoir-faire et savoir-être qui se rapportent à un agir compétent ;
- ☞ En essayant, dans la mesure du possible, de rendre les apprentissages significatifs, montrant aux apprenants à quoi ils serviront, et comment combiner progressivement les différentes ressources (savoirs, savoir-faire et savoir-être) entre elles.

### 4.3 Intérêt didactique de la leçon

Nos idées en matière d'éducation sont trop étroites, trop limitées. Il nous faut les élargir et viser plus haut. La véritable éducation implique plus que la poursuite de certaines études. Elle implique bien plus qu'une préparation à la vie présente. Elle intéresse l'être tout entier, et toute la durée de l'existence qui s'offre à l'homme. La préservation de l'environnement étant un problème majeur dans monde entier de nos jours. L'enseignement des Sciences Physiques joue un rôle capital dans le développement des outils qui permettront à l'apprenant de sensibiliser et de résoudre des situations de vie avec succès. En tant que représentation, la fiche pédagogique projette une image idéale de la situation que l'on souhaite créer, ou que l'on s'imagine avoir créée. L'étude menée permettra à un enseignant des Sciences Physiques de mieux aborder les enseignements en classe de 3<sup>ème</sup> notamment le module II : ACTIONS MÉCANIQUES ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE, LEÇON 2 : PRODUCTION D'UN COURANT ALTERNATIF donc la compétence à développer sera « l'utilisation et la production de l'énergie électrique au quotidien » ; La fiche pédagogique ci-après représente un modèle de leçon conçu en relation avec le programme officiel des Sciences Physiques en vigueur au Cameroun.

## FICHE PEDAGOGIQUE DE PREPARATION D'UNE SEANCE D'ENSEIGNEMENT/APPRENTISSAGE selon APC

<b>ÉTABLISSEMENT :</b> LYCEE BILINGUE D'APPLICATION	<b>MODULE II :</b> ACTIONS MÉCANIQUES ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
<b>CLASSE :</b> 3 <sup>ème</sup> ARE1	<b>FAMILLE DE SITUATION :</b> Utilisation de l'énergie électrique au quotidien
<b>DATE :</b> Mardi 19 Février 2019	<b>CATÉGORIE D'ACTION (compétences) :</b> Production de l'énergie électrique
<b>PERIODE :</b> 13H30-15H10	<b>TITRE DE LA LEÇON 2 :</b> PRODUCTION D'UN COURANT ALTERNATIF
<b>RESSOURCES HUMAINES ET MATÉRIELS :</b> Enseignants, élèves, craies, tableau, documentation, planches et fiche d'activité	<b>DURÉE :</b> 90 MINUTES
<b>EFFECTIF :</b> 32	<b>GARÇON :</b> 15 <b>FILLE :</b> 17
<b>NOMS DES ENSEIGNANTS :</b> TIOKANG LIBAWO HUSSERL	<b>PRÉREQUIS :</b> notions de moteurs électriques, courant de secteur, puissance nominal
	<b>BIBLIOGRAPHIE :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PROGRAMMES D'ETUDES DE 4<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> : PHYSIQUE - CHIMIE - TECHNOLOGIE</li> <li>• COLLECTION DEWATEK PCT 3<sup>ème</sup>.</li> <li>• Major en PCT 3<sup>ème</sup>.</li> </ul>

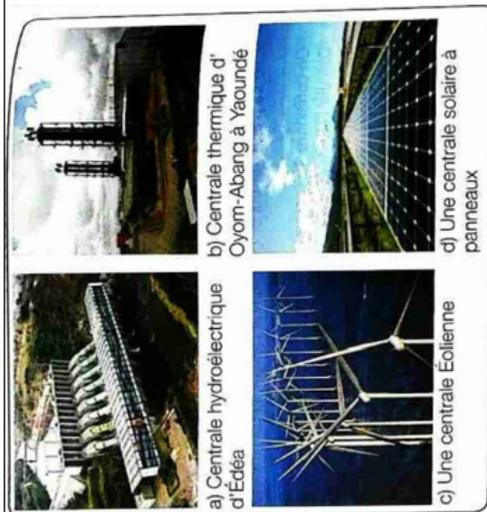
Étapes	Durée	OPI	Actions	Savoirs	Savoir-faire	Savoir-être	Activités d'enseignement	Activités d'apprentissage	Autres ressources
INTRODUCTION	5 min	-Vérifier les prérequis -intérêt de la leçon - communiquer les OPO	-Vérification des prérequis. -activités d'éveil - brainstorming				<p><b>Q1.</b> TAMO qu'avons-nous fait la cour passée ?</p> <p><b>-Q2.</b> Qu'avez-vous retenu ?</p> <p><b>Situation problème:</b> Le papa de TALLA vient de construire sa case qu'il désire électrifier or le réseau électrique de "ENEO" n'arrive pas dans votre village.</p> <p><b>Consignes:</b> 1.Propose les différentes solutions possibles à son problème. 2.Décris le mode de production du courant électrique qui te paraît moins coûteux en ce lieu.</p>	Écotent réfléchissent et répondent aux questions.	
	10mn	Connaître les symboles normalisés, noms et rôles des éléments essentiels constitutifs d'une installation électrique.	-Présenter la situation problème -chercher les solutions au problème présenté	1- METHODES DE PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	Identifier un élément dans une installation électrique ;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gérer judicieusement et de manière responsable des biens de consommation usuelle ;</li> <li>- Respecter les normes de fonctionnement d'un appareil ;</li> <li>- Être prudent ;</li> <li>- Être Curieux ;</li> <li>- Se maîtrise</li> </ul>	<p><b>Activité 1 :</b> Le document 1 présente quelques modes de production de l'énergie électrique recensés au Cameroun. a) Citer les. b) Quel est la société distributrice de l'énergie électrique au Cameroun ? Quel est la source d'énergie principalement utilisé ?</p>	Écotent réfléchissent et répondent aux questions. <b>RAA :</b> a) Les centrales hydroélectriques, Les centrales thermiques, les centrales éoliennes et Les centrales solaires b) l'ENEO.	
DEVELOPPEMENT									



10 mn	Identifier élément nécessaire au fonctionnement d'une centrale solaire	Observer et interpréter	I.3 -La centrale solaire	Expliquer le fonctionnement de la centrale	<p><b>Activité 4 :</b></p> <p>a) Décris ce que tu observes sur le dispositif de la figure 3.</p> <p>b) Quelle est l'autre appellation du générateur photovoltaïque ?</p> <p>c) Indique son rôle.</p> <p>d) Quelle précaution doit-on prendre lors de son installation ?</p> <p>e) Donne la fonction de l'onduleur.</p> <p>- Observent la figure 3. Répondent aux questions</p> <p>Écoulent et prennent des notes</p>
15 mn	Identifier les éléments du montage	Observer et réaliser	II – PRODUCTION D'UN COURANT ALTERNATIF  Principe d'un alternateur		<p><b>Activité 5 :</b></p> <p>a) Réalise le dispositif de la figure 4 constitué :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-D'une bobine d'axe vertical (1) -D'un barreau aimanté (2)</li> <li>-D'un oscilloscope (3)</li> <li>-D'une pièce fixe à cavité cylindrique (4)</li> <li>-D'une manivelle (5)</li> </ul> <p>b) Fais tourner rapidement et de manière uniforme la manivelle. Que fait l'aimant ?</p> <p>c) Qu'observes-tu sur l'écran de l'oscilloscope ?</p> <p>d) Que représente la courbe observée ? Quelle est sa forme ?</p> <p>-Bobine ; -Aimants ;</p>

15 mn			<p><b>III- DESCRIPTION DES MÉTHODES DE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE</b></p>		<p><b>Activité 6 :</b> Description des méthodes de transport de l'énergie électrique a) Observe attentivement la figure 1 :</p> <p>a1) Par quel élément passe l'énergie électrique à la sortie de l'alternateur ? a2) Quel est son rôle ? a3) Comment l'énergie est-elle ensuite acheminée vers les lieux de consommation ? b) Observe les réseaux électriques dans ton quartier et réponds aux questions ci-après. b1) Quelle traitement doit subir la tension avant la distribution de l'énergie électrique aux consommateurs ? b2) Comment appelle-t-on le dispositif où s'effectue ce traitement ?</p>		
10mn	Utiliser les nouvelles connaissances pour résoudre les problèmes.	Vérification des acquis			<p>1- citer deux 2- Comment l'énergie est-elle ensuite acheminée vers les lieux de consommation ? 3- Comment s'appelle la société chargée du transport de l'énergie au Cameroun ?</p>	Utilisent les nouvelles connaissances pour résoudre l'exercice	
5 mn	-Vérifier l'atteinte des objectifs	Chercher les exercices	Exercice à faire à la maison :		-Exercice à faire à la maison : exercice 1,2, et 5 de DEWATECK Page 60	Recopient les devoirs à faire à la maison.	
ÉVALUATION		CONCLUSI					

**PLANCHE DE L'ÉLÈVE :**



Document 1

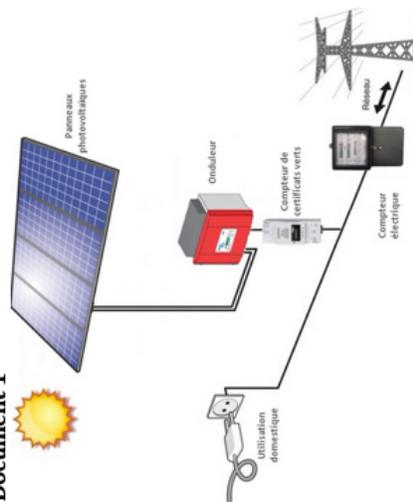


Figure 3

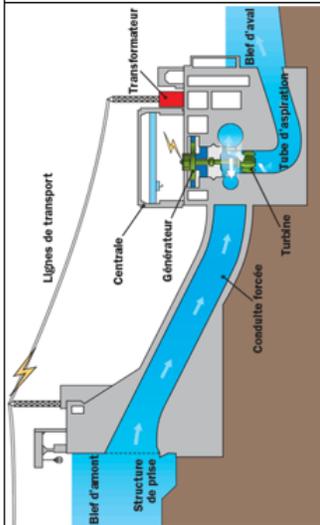


Figure 1

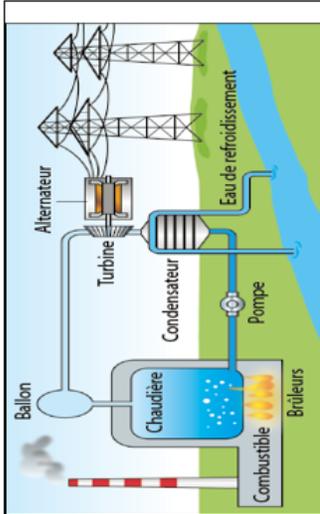


Figure 2

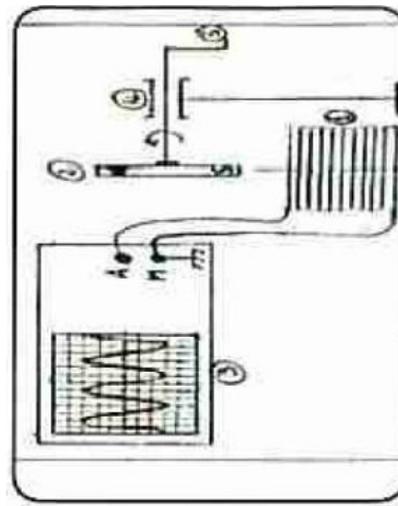


Figure 4

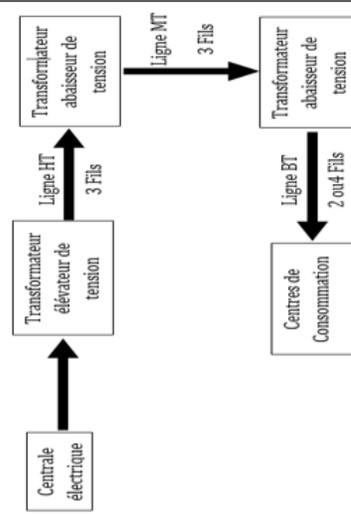


Figure 5

## Conclusion

Dans ce chapitre, il était question pour nous de donner l'implication pédagogique de notre travail intitulé « étude des caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques Mono et poly cristallins » dans le système éducatif. Nous avons donc pu conclure que, au regard du contexte énergétique et environnemental actuel « changement climatique » que ce sujet pourrait susciter un éveil de conscience aux élèves du secondaire. Cela en leur permettant de savoir qu'il existe plusieurs sources d'énergie électrique et que l'énergie solaire est un bon candidat pour palier au déficit énergétique rencontré au Cameroun.

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

---

Notre travail a porté sur l'étude des caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques mono et poly-cristallin.

Dans le premier chapitre, nous avons fait une généralité sur l'énergie solaire, sur les systèmes PV et sur les différentes technologies utilisées par ces derniers. Nous avons vu que le Cameroun possède un potentiel permettant l'implantation des systèmes PV notamment dans la zone du septentrion avec des irradiances moyennes annuelles supérieures à 2200kWh. Nous avons également vu que le Cameroun est un pays riche en minerais tel que sable qui constitue la matière première dans la fabrication des panneaux photovoltaïques au silicium. Ensuite nous avons fait un panorama sur les méthodes de fabrication des panneaux à base de silicium et nous avons noté que cette fabrication est très énergétivore notamment dans la purification de sable pour l'obtention du silicium.

Dans la seconde partie, nous avons présenté les différentes façons de modéliser une cellule *PV* et par la suite de celle d'un panneau/module. Nous notons qu'il existe en effet plusieurs modèles donc les plus cités ont été présentés dans ce chapitre (modèle à une diode et à deux diodes : avec sans résistance série et/ou shunt). Nous avons également effectué une modélisation des performances des modules *PV* en étudiant leur rendement de conversions d'énergie solaire. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des différents outils de modélisations de nos modules *PV*.

Le troisième chapitre présente des différents résultats. Nous avons commencé dans ce chapitre par la modélisation de notre module *PV*. À ce niveau, il n'est pas intéressant de dissocier un module *PV* au silicium monocristallin à celui au silicium poly-cristallin car, pris à puissance égale nous n'observons pas une réelle différence entre leurs caractéristiques puisque que les mêmes équations sont utilisées pour les modéliser. Ce n'est qu'au niveau de leur rendement qu'on observe une certaine différence. Nous avons par la suite comparé le module *PV* que nous avons réalisé sur Matlab Simulink au composant "solar cell" qui existe déjà dans la bibliothèque SimScape intégré sous Simulink. Cela nous a permis de valider notre modélisation. Nous avons noté que les performances des panneaux photovoltaïques sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module mais il n'est vaudrait pas à négliger la masse d'air relative. Nous avons également relevé l'influence de la résistance série, de résistance shunt, de l'association de module en série et / ou en parallèle.

Pour terminer, au quatrième chapitre nous avons présenté l'implication de cette études sur le système éducatif camerounais.

Comme perspectives, nous prévoyons :

☞ de travailler sur un système de collecte de données avec Arduino pour une validation beaucoup

plus expérimentale de ce travail.

- ☞ d'évaluer influences du système solar tracking mono axe et biaxes sur les caractéristiques des modules *PV*.
- ☞ d'étendre notre étude à d'autres technologies de module photovoltaïque tel que celle à couche mince afin de donner une cartographie des modules et les localités du Cameroun.

---

## Bibliographie

---

- BP (2017). Statistical Review of World Energy, 2017. Technical report, [bp.com/statsreview](http://bp.com/statsreview).
- BP (2018). Statistical Review of World Energy, 2018. Technical report, [bp.com/statsreview](http://bp.com/statsreview).
- Charles, J.-P., Mekkaoui-Alaoui, I., Bordure, G., and Mialhe, P. (1984). Etude comparative des modèles à une et deux exponentielles en vue d'une simulation précise des photopiles. *Revue de Physique Appliquée*. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01984001909085100>.
- Coors, S. and Böhm, M. (1997). Validation and comparison of curve correction procedures for silicon solar cells. *Proceedings 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1(220).
- De Soto, W., Klein, S. A., and Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>.
- Durisch, W., Lam, K., H., and Close, J. (2002). Behaviour of a copper indium gallium diselenide module under real operating conditions, in : Proceedings of the world renewable energy congress vii. *Pergamon Press, Oxford, Elsevier, Amsterdam*.
- Enerray, S. (2018). Le photovoltaïque devient service public au cameroun. *MédiaTerre*. <https://www.mediaterre.org/actu,20180307094630,6.html>.
- EPIA (2014). Global market outlook for photovoltaics 2014-2018. <https://doi.org/10.1007/s10854-007-9177-9>.
- Evans, L., D. and Florschuetz, W., L. (1978). Terrestrial concentrating photovoltaic power system studies. *Solar Energy*, 6 :93–105.
- F, B. (1999). *Simulation of grid-tied building integrated photovoltaic systems*. Solar energy laboratory, University of Wisconsin, Madison.
- Flèche, B. and Delagnes, D. *Energie solaire photovoltaïque.doc*. Un gros éditeur. juin 2007.
- Garg, H. P. and Agarwal, R. K. (1995). Some aspects of a PV/t collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells. *Energy Conversion and Management*, 36(2) :87 – 99. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(94\)00046-3](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)00046-3).

- GEAPI (2017). l'indice mondial de la performance de l'architecture énergétique. Technical report, Global Energy Architecture Performance Index.
- Goodrich, A., James, T., and Woodhouse, M. (2012). Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States : Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities. *NREL Technical Report*. <https://doi.org/10.2172/1036048>.
- Green, M. A. (2003). *Third Generation Photovoltaics : Advanced Solar Energy Conversion*. <https://doi.org/10.1021/la100123q>.
- IEA (2018). Snapshot of Global Photovoltaic Markets - 2018. Technical report, Report International Energy Agency PVPS T1-33 :2018.
- IPCC (2018). Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5. In *Global warming of 1.5C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change.*, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
- Ishaque, K., Salam, Z., and Taheri, H. (2011). Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.023>.
- Kasten, F. and Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28 :4735–4738. <https://doi.org/10.1364/ao.28.004735>.
- Kou, Q., Klein, S. A., and Beckman, W. A. (1998). A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems. *Solar Energy*. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00049-8).
- MatLab (2018). <http://www.mathworks.com/>.
- Mon, G., Wen, L., Ross, R. G., and Adentk, D. (1985). Effects of Temperature and Moisture on Module Leakage Currents. *Proc.18th Photovoltaic Specialists Conference*, pages 1179–1185.
- Müllejans, H., Hyvärinen, J., Karila, J., and Dunlop, E. (2004). Reliability of Routine 2-Diode Model Fitting of Pv Modules. *19th European Solar Energy Conference and Exhibition Paris*.
- Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., and Poggi, P. (2005). Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.02.008>.
- ONR (2016). <http://energie28.blogspot.com/2016/11/rayonnements-direct-diffus-et-reflechi.html>.
- Pacha, M. R. Un avenir brillant pour le solaire africain. *La Tribune Afrique*. <https://afrique.latribune.fr/think-tank/tribunes/2018-05-20/un-avenir-brillant-pour-le-solaire-africain-tribune-778781.html>.
- S. Griffith, J., S. Rathod, M., and Paslaski, J. (1981). Some tests of flat plate photovoltaic module cell temperatures in simulated field conditions. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*.

- Sah, Chih, T., Noyce, Robert, N., and Shockley, W. (1957). Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics. *Proceedings of the IRE*. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1957.278528>.
- Shockley, W. and Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>.
- Skoplaki, E. and Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
- Staebler, D. L. and Wronski, C. R. (1980). Optically induced conductivity changes in discharge-produced hydrogenated amorphous silicon. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.328084>.
- Stultz, J., W. and Wen, L., C. (1977). Thermal performance testing and analysis of photovoltaic modules in natural sunlight. *LSA Task Report*.
- Townsend, T., U. (1989). *Method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled Photovoltaic Systems*. Mechanical engineering, U. Of Wisconsin-Madison.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>.
- Yordanov, G, H., Midtgård, O, M., and Saetre, T, O. (2010). TWO-DIODE MODEL REVISITED : PARAMETERS EXTRACTION FROM SEMI-LOG PLOTS OF I-V DATA. In *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*.
- Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems : A review. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.012>.

Tableau des paramètre de Ross

Parameters for the efficiency model for modules with cells fabricated of different solar cell material

Module	Producer	p	q	m	r	s	u	h
BP 585F mono-Si	BP Solar	23.62	-0.2983	0.1912	-0.09307	-0.9795	0.9865	0.028
LA361K51S poly-Si	Kyocera	15.39	-0.1770	0.0794	-0.09736	0.8998	0.9324	0.026
UPM US-30 a-Si	UniSolar	36.02	-0.7576	0.6601	-0.02869	-1.1432	1.0322	0.022
CIS ST40 CulnSe <sub>2</sub>	Siemens	18.55	-0.3288	0.2612	-0.10039	-0.967	0.9864	0.032
WS11003 uInSe <sub>2</sub>	Wuerth	12.33	-0.0685	0.0618	-0.0673	-0.9172	0.9701	0.032

The Ross coefficient  $h$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{Wm}^2$ ) is also included in the table, since it is finally required to calculate the cell temperature in the different modules.