



Université Abdelmalek Essaadi
Faculté des Sciences et Techniques
Tanger



2019/2020

Projet de Fin d'Études
Master Sciences et Techniques

Option : Génie Énergétique

Titre :

Estimation des paramètres des cellules photovoltaïques

Présenté par :

Youssef Kharchouf

Date de soutenance : Juin 2020

Devant le Jury :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Établissement</i>	<i>Qualité</i>
		<i>Président</i>
		<i>Examineur</i>
		<i>Encadrant Externe</i>
Dr. Adil Chahboun	FST de Tanger	Encadrant de la FST

PFE effectué au :

LOGO du Laboratoire ou de la Société ou de l'organisme,

Résumé

Les cellules solaires photovoltaïques sont généralement modélisées avec un circuit électrique comprenant un certain nombre de paramètres.

Abstract

Solar PV cells are generally represented by a lumped-element model with a set number of components which are represented by their parameters. These parameters are not readily available in manufacturer data-sheets despite being crucial to the accuracy of the model. A possible approach is to estimate these parameters using the Current-Voltage characteristic of a cell using numerical or analytic techniques. Metaheuristics such as Differential Evolution take the approach of an optimization with the objective function to be minimized being the error with experimental Current-Voltage data. This work is a comparative analysis between different combinations of methods such as Differential Evolution and Particle Swarm Optimization applied to the single and double diode models for various solar cell technologies. PSO is used to initially cover the entire multidimensional search space in order to find a region with global minimum, which is subsequently given to the DE algorithm in order to locate the solution with the best fitness within this region. A small tool implementing these methods has been developed using the Python programming language.

Nomenclature

GHG	Green House Gas	Gaz à effet de serre
DE	Differential Evolution	
E_g		Bandgap
EQE		External Quantum Efficiency

Table des matières

Introduction Générale	5
1 Modèles à circuits électriques pour les cellules PV	9
1.1 Généralités	9
1.1.1 Modèles à simple diode	9
1.2 Les modèles simple diode R_S et R_P	10
1.3 Modèle double diode	11
1.4 Méthodes d'extraction et estimation des paramètres	12
2 Évolution Différentielle	13
2.1 Introduction	13
2.2 Description de l'algorithme	13
2.3 Application aux modèles simple et double diodes	13
2.4 Métaheuristique	13

Introduction Générale

L'épuisement des énergies fossiles et leur nature non-durable a conduit à la croissance rapide des énergies renouvelables comme sources alternatives d'énergie. L'énergie solaire est l'une de ces sources renouvelables les plus répandues et a prouvé son utilité dans plusieurs domaines d'applications grâce à sa nature quasiment inexhaustible en principe. Les technologies photovoltaïques en particulier ont fait l'objet intense d'étude de la part de la communauté scientifique depuis la première cellule en silicone cristallin à 6% de Chapin et al. [1] en 1954. Ceci a entraîné une croissance considérable de l'industrie photovoltaïques. En fait, la capacité de production en PV a dépassé les 150GW [2] en 2019 (figure 1), ce qui correspond une croissance d'environ 100GW depuis 2014. Les décennies de recherche depuis la cellule de Chapin et al. visent généralement l'amélioration des cellules solaires (*i*) en explorant les différentes architectures possibles des cellules, (*ii*) en développant des matériaux qui permettent d'augmenter l'efficacité de conversion de l'énergie solaire incidente ou (*iii*) en réduisant le coût du processus de production. La première génération des technologies PV se basait sur des wafer de Silicone comme matériau actif de conversion. La deuxième génération remplace le silicone avec des semi-conducteurs à couches minces, qui, parmi d'autres avantages, réduit considérablement les besoins en matières premières (silicone). Les troisièmes et futures générations comprennent les cellules organiques, Perovskite et les Quantum Dots et présentent des pistes d'investigations pour réduire davantage les coûts de production et augmenter l'efficacité de conversion.

Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques a été discuté en profondeur dans la littérature [3, 4, 5]. Les photons à énergie supérieure au bandgap du matériau semi-conducteur sont absorbé en transférant leur énergie aux électrons dans la bande de valence, ce qui leur permet de passer vers la bande de conduction en laissant un "trou" derrière. Le rôle du champ électrique présent dans la zone de déplétion des jonctions P-N est de séparer ces paires électron-trou et leur permettre de circuler à travers une charge extérieure. Toutefois, il y aurait toujours un plafond sur ce mécanisme de conversion "lumière \rightarrow électricité" pour les cellules mono-jonction selon la limite Shockley-Queisser (SQ) [6]. Le modèle SQ postule que tous les photons à énergie supérieure au gap E_g sont absorbés et que la totalité des recombinaisons qui surviennent sont strictement l'inverse du processus d'absorption, c'est-à-dire des recombinaisons radiatives qui re-emettent des photons. Cependant, la performance d'une cellule réelle sera toujours inférieure à la limite SQ (figure 2). Les mécanismes idéaux postulés par le formalisme de SQ sont affectés dans la pratique par plusieurs phénomènes imprévus qui parviennent des propriétés des matériaux utilisés. A titre d'exemple, la présence des défauts dans un semi-conducteur entraîne des recombinaisons non-radiatives où l'énergie des électrons est libérée en phonons dans la structure cristalline et non pas en lumière, ce qui génère de la chaleur dans le semi-conducteur. Les difficultés qui limitent les technologies PV nécessitent une meilleure compréhension des phénomènes physiques complexes impliqués, et l'étude de la performance des cellules par rapport au modèle SQ donne des indices sur la nature

des gains en performance qu'une technologie particulière à le potentiel de réaliser.

La modélisation des cellules solaires est essentielle pour la conception, l'analyse et l'estimation de la performance des cellules solaires. Elle permet d'effectuer l'analyse des propriétés électriques pendant leur phase de développement, l'émulation des systèmes PV pour la prédiction des rendements énergétiques [7], le contrôle de qualité des cellules en phase de production et l'étude des effets de dégradation pendant la phase d'opération [8, 9]. Bien qu'il y a des méthodes de simulations des phénomènes physiques dans la cellule comme celles qui reposent sur la dynamique moléculaire, la théorie fonctionnelle de la densité ou tout simplement des méthodes numériques appliquées aux équations des semi-conducteurs (équation de Poisson et équations de continuité) etc. Dans ce travail nous nous intéressons à l'approche des circuits équivalents à éléments localisés qui modélisent le comportement I-V de la cellule.

La modélisation d'éléments localisés permet de décrire le comportement des phénomènes physiques dispersés spatialement avec un ensemble d'éléments localisés dont chacun représente un phénomène physique particulier. L'analogie électrique dans les problèmes de transferts de chaleur est un exemple de cette méthode où une résistance localisée dans le modèle pourrait représenter la résistance thermique spatialement distribuée selon l'épaisseur de la paroi concernée. Dans le cas des cellules PV, chaque élément du circuit équivalent représente aussi un phénomène physique spécifique dans la cellule (e.g. une résistance en série modélise les pertes ohmiques causées par la résistance intrinsèque au semi-conducteur utilisé). La caractéristique I-V dépend des paramètres associés aux éléments localisés du circuit. Il s'agirait donc d'essayer de minimiser l'erreur entre la courbe caractéristique du modèle et celle de la cellule réelle en jouant sur les valeurs des paramètres. Pour ce faire, il existe deux approches principales. La première est l'approche analytique. Elle consiste à utiliser les données sur les points clés de la courbe caractéristique (tension circuit ouvert, courant court circuit, la pente de la courbe en ces points, ou encore le point de puissance maximale etc) et à effectuer certaines simplifications pour concevoir des formules approximatives, mais rapide à calculer. Toutefois, les simplifications effectuées peuvent conduire à des résultats imprécis ou non physiques (e.g. résistance négative). Le fait que cette approche utilise les données des quelques points seulement la rend vulnérable au bruit de mesures. La deuxième approche est l'extraction numérique. On se retrouve avec un problème d'optimisation, dont la fonction objective à extrémiser (minimiser) est l'erreur entre le modèle et la courbe expérimentale de la cellule réelle. L'algorithme utilisé pour l'optimisation en soi pourrait être déterministe comme dans le cas des méthodes de Newton-Raphson, Levenberg-Marquardt etc ou des algorithmes stochastiques/métaheuristique tel que les techniques évolutionnaires. Ces dernières comprennent l'algorithme génétique (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Recuit Simulé (SA) etc. Les méthodes déterministes imposent généralement des critères de convexité, différentiabilité (et par conséquent continuité) de la fonction objective. Bien qu'elles soient efficaces en terme d'optimisation locale avec des données de gradient, elles sont très susceptibles à se piéger dans des extremums locaux, ce qui limite leurs capacités d'optimisation globale. Par contre les métaheuristicques n'ont pas d'exigences sur la fonction objective, et le choix des conditions initiales appropriées les rends plus robuste envers les pièges d'extremums locaux.

Dans ce travail..

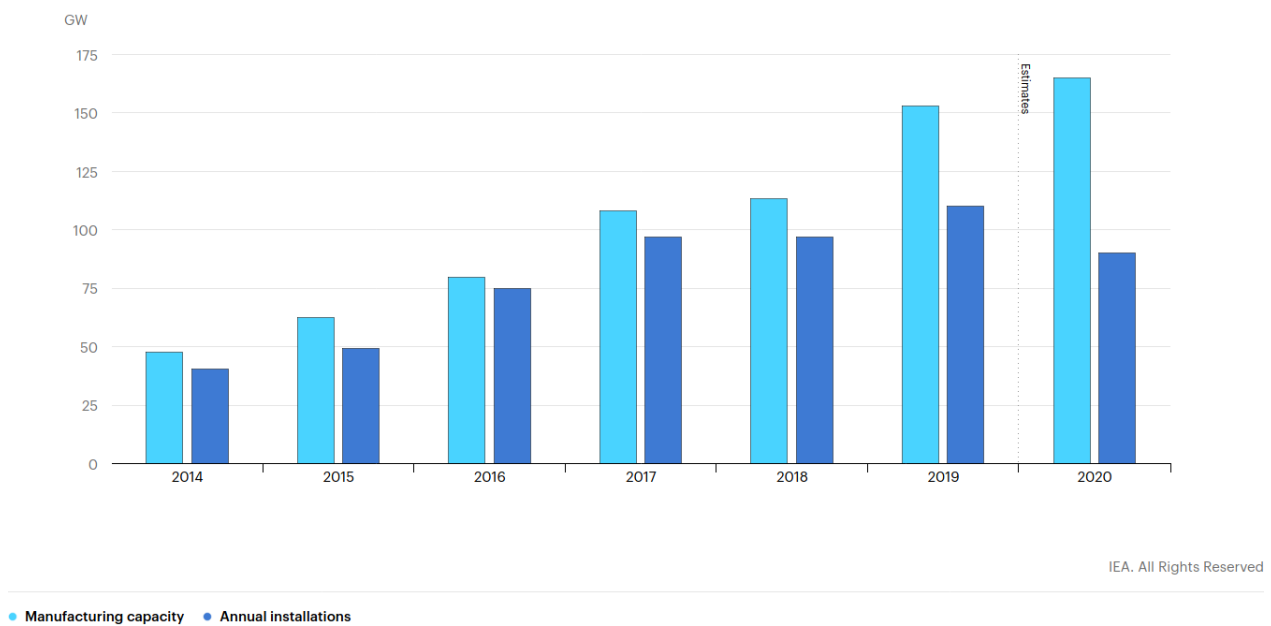


FIGURE 1 – Fabrication et demande des modules solaires photovoltaïques, 2014-2020. Source : IEA analysis based on Paula Mints (2020), The Solar Flare, SVP Market Research, San Francisco, CA [2]

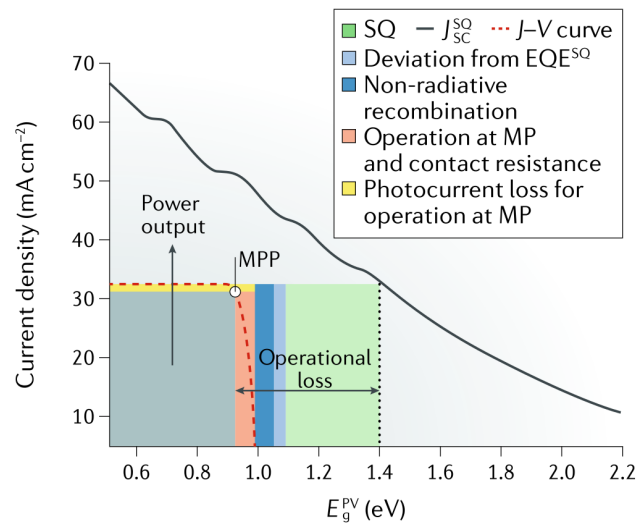


FIGURE 2 – Différence entre le formalisme de SQ et une cellule réelle. Le photo-courant maximal CC à la limite de Schockley-Queisser est tracé en fonction du gap (E_g^{PV}). La ligne pointillée en rouge indique la caractéristique J-V de la cellule [10]

Chapitre 1

Modèles à circuits électriques pour les cellules PV

1.1 Généralités

Fondamentalement, les cellules PV se composent de deux couches de semi-conducteurs à dopages différents, la jonction de ces deux couches étant exposée à la lumière incidente. En effet, les électrons dans la bande de conduction sont capables d'être transférés vers la bande de valence tant que l'énergie du photon incident $E = h\nu$ est supérieure à la largeur de la bande interdite $E_g = E_c - E_v$. Toute l'architecture d'une cellule quelconque vise à profiter le plus que possible de la différence de tension engendrée par les excitons séparés par le champ électrique dans la zone de déplétion (ou zone de charge d'espace) (figure 1.1). Par exemple, les contacts supérieurs sont des oxydes transparents conductifs (dit couche fenêtre) pour laisser passer le plus grand nombre de photons possible vers la couche absorbante de la cellule. Pour quelques cellule en couche mince, le contact arrière se compose d'une couche réfléchissante (ZnO et Ag ou Al) qui renvoie la lumière vers la couche absorbante pour minimiser davantage les pertes en lumière transmise [11].

En fait, le comportement électrique d'une telle cellule en l'absence de la lumière est identique à celui d'une diode PN classique dont la caractéristique est décrite par l'équation de Shockley (équation 1.1). Dans cette formule, le I_0 est le courant de saturation de la diode, q la charge élémentaire e^- , a le facteur d'idéalité, k la constante de Boltzmann et T la température de la cellule. Parfois on utilise la notion de *voltage thermique* : $V_t = \frac{kT}{q}$.

$$I_D = I_0 \left[e^{\left(\frac{qV}{akT} \right)} - 1 \right] \quad (1.1)$$

Bien que ces modèles d'éléments localisés sont efficaces et précis pour les cellules de première génération et celles en couches minces, il existe aujourd'hui plusieurs technologies émergentes qui n'utilisent pas le champ électrique de la zone de déplétion pour la séparation des charges, et utilisent d'autres mécanismes et sources de champ électrique comme par la divergence positive de la polarisation $\nabla \cdot \mathbf{P} \neq 0$ qui crée un déséquilibre de charges aux parois de domaines à polarisation différentes sein des matériaux ferroélectriques [13]. Pour ce genre de technologies, il est toujours difficile de concevoir un modèle de diode pour simuler le comportement complexe de ces cellules.

1.1.1 Modèles à simple diode

Avec la présence de la lumière, les photons assez énergétiques permettent la création des paires électron-trous qui, à leur tour, créent une différence de potentiel à travers la jonction. Une partie

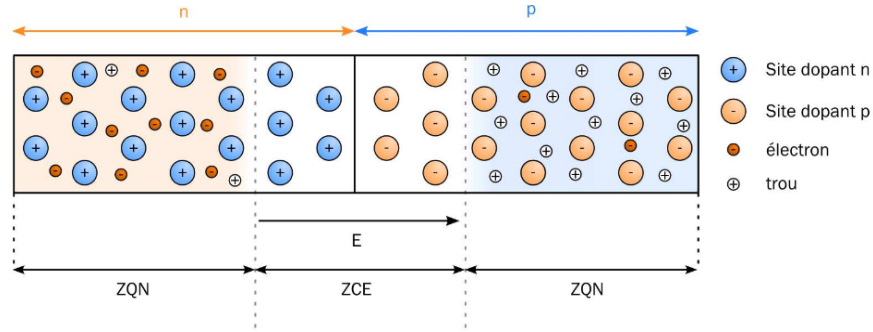


FIGURE 1.1 – Schéma d’une jonction PN représentant : la zone de charge d’espace (ZCE), les zones quasi-neutres (ZQN), les différents porteurs de charge, les sites dopants et le champ électrique E - Roger, 2013 [12].

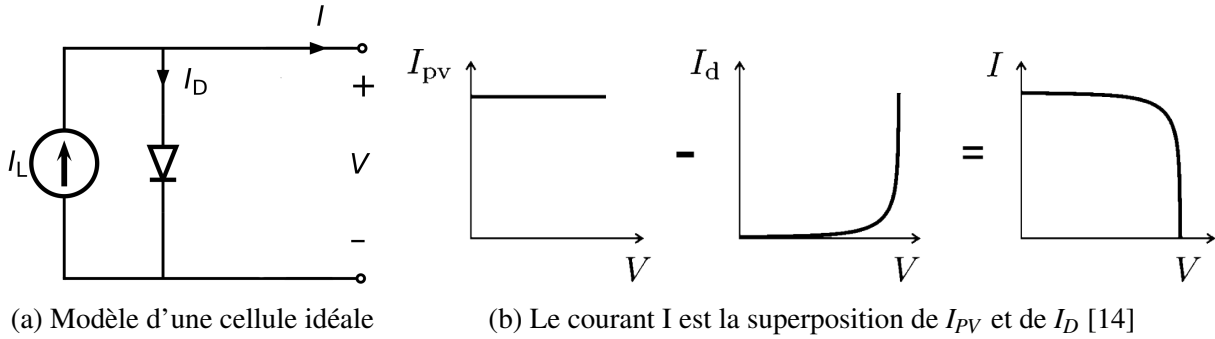


FIGURE 1.2 – Modèle idéal d’une cellule PV

de ces porteurs de charge se recombine, mais l’autre se diffuse à travers les contacts de la cellule, ce qui donne naissance à un *photo-courant* I_{PV} (ou I_L) dont la valeur dépend de l’intensité de la lumière incidente.

En ajoutant le photo-courant I_{PV} à l’équation de Shockley 1.2, on retrouve un modèle élémentaire qui décrit une cellule idéale, composé d’une source de courant connectée à une diode en parallèle (figure 1.2). Évidemment ce modèle est complètement décrit par trois paramètres : (i) Le photo-courant I_{PV} , (ii) le facteur d’idéalité de la diode a et (iii) son courant de saturation I_0 .

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{qV}{a k T} \right)} - 1 \right] \quad (1.2)$$

On voit dans la figure 1.2.b que la courbe caractéristique connue de la cellule se forme par une translation verticale par I_{PV} d’une part, et de la forme exponentielle de la diode de l’autre. Le facteur la courbure dans la région du point de puissance maximale est déterminée par le facteur d’idéalité de la diode.

1.2 Les modèles simple diode R_S et R_P

Le modèle idéal précédent est utile pour éclaircir le concept de la modélisation par circuits d’éléments localisés. Dans la pratique, et pour plus de précision, il est nécessaire de considérer

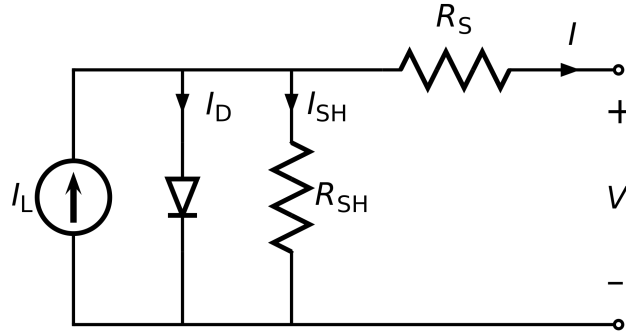


FIGURE 1.3 – Modèle Simple Diode

les pertes ohmique de la cellule dans le matériau semi-conducteur utilisé et dans les contacts des électrodes. La manière la plus directe de modéliser ces phénomènes est de tout simplement ajouter une résistance en série R_S au circuit idéal. Ceci nous laisse avec la relation modifiée 1.3 du modèle dit "*simple diode- R_S* " qui a besoin de 4 paramètres pour une description complète : I_{PV} , a , I_0 et R_S . L'une des limites de ce modèle provient de son imprécision lorsque la cellule subit des variations négligeables de température. L'insertion d'une résistance shunt permet d'améliorer la sensibilité du modèle aux variations de température, et en même temps de considérer tout courant de fuite pouvant traverser la jonction [15]. On se retrouve cette fois avec les 5 paramètres du modèle dit "*simple diode- R_P* " ou tout simplement "*simple diode*" : I_0 , I_{PV} , a , R_S et R_P . La relation entre ces paramètres est décrite par l'équation 1.4. Ce modèle offre un compromis entre la simplicité et la précision et par conséquent est très largement testé et utilisé dans la littérature [16]. Le diagramme du circuit de ce modèle est présenté dans la figure 1.3.

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V+R_S)}{akT} \right)} - 1 \right] \quad (1.3)$$

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V+R_S)}{akT} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (1.4)$$

1.3 Modèle double diode

Jusque là on a graduellement amélioré la performance et la précision des modèles de cellules PV en considérant de plus en plus de phénomènes physique qui se produisent dans la cellule (pertes ohmiques, effets des variations de température et courants de fuites). Un phénomène potentiellement influent qui n'est pas considéré par le modèle simple diode est celui des recombinaisons. Comme son nom l'indique, le modèle "*double diodes*" (figure 1.4 n'est que qu'un modèle simple diode auquel on ajoute une autre diode en shunt pour mieux modéliser les effets de recombinaisons surtout aux conditions d'illumination faible [15].

Il est évident que l'addition d'une autre diode complique considérablement le modèle et on se retrouve avec deux paramètres supplémentaires (I_{PV} , I_{01} , I_{02} , a_1 , a_2 , R_S et R_P). Toutefois, dans les cas où la complexité des calculs associés n'est pas contraignante, la précision de se modèle est

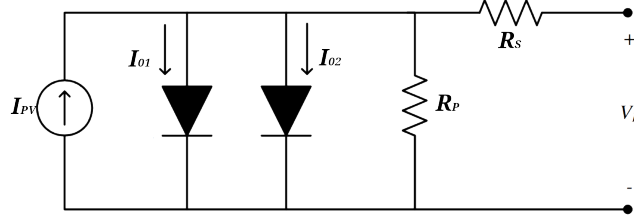


FIGURE 1.4 – Le modèle double diode

supérieure. L'équation 1.5 décrit la relation entre les 7 paramètres du modèle.

$$I = I_{PV} - I_{01} \left[e^{\left(\frac{q(V+RS)}{a_1 kT} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\left(\frac{q(V+RS)}{a_2 kT} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (1.5)$$

1.4 Méthodes d'extraction et estimation des paramètres

Chapitre 2

Évolution Différentielle

2.1 Introduction

2.2 Description de l'algorithme

2.3 Application aux modèles simple et double diodes

2.4 Métaheuristique

Bibliographie

- [1] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, “A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power [3],” 1954.
- [2] “Renewable Energy Market Update,” tech. rep., IEA, 2020.
- [3] L. Fraas and L. Partain, *Solar Cells and their Applications : Second Edition*. 2010.
- [4] S. M. Sze, *Semiconductor Devices : Physics and Technology*. 2006.
- [5] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, R. P. Corkish, and A. B. Sproul, *Applied photovoltaics, third edition*. 2013.
- [6] W. Shockley and H. J. Queisser, “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells,” *Journal of Applied Physics*, 1961.
- [7] J. P. Ram, H. Manghani, D. S. Pillai, T. S. Babu, M. Miyatake, and N. Rajasekar, “Analysis on solar PV emulators : A review,” 2018.
- [8] K. L. Kennerud, “Analysis of Performance Degradation in CDS Solar Cells,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1969.
- [9] W. J. Jamil, H. Abdul Rahman, S. Shaari, and Z. Salam, “Performance degradation of photovoltaic power system : Review on mitigation methods,” 2017.
- [10] P. K. Nayak, S. Mahesh, H. J. Snaith, and D. Cahen, “Photovoltaic solar cell technologies : analysing the state of the art,” *Nature Reviews Materials*, 2019.
- [11] K. L. Chopra, P. D. Paulson, and V. Dutta, “Thin-film solar cells : an overview,” *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 2004.
- [12] C. Roger, *Developpement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2013.
- [13] H. Huang, “Ferroelectric photovoltaics,” *Nature photonics* 4, pp. 134–135, 2010.
- [14] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009.
- [15] V. J. Chin, Z. Salam, and K. Ishaque, “Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application : A review,” 2015.
- [16] C. Carrero, J. Amador, and S. Arnaltes, “A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances,” *Renewable Energy*, 2007.