

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : **Électrotechnique**
Spécialité : **Énergie et environnement**

Présenté par : BERRACHEDI Ali

Thème

**Caractéristique courant-tension (I-V) d'un
panneau photovoltaïque: Méthodes de
mesure et influence des paramètres externes**

Soutenu publiquement, le 10 / 07 / 2019, devant le jury composé de :

Mme. D.Kherbouche	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Mr M. Mebrouki	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr M. Belhadj Aissa	Ingénieur	SKTM. Ghardaia	Co- Directeur de mémoire
Mr La.Merad	MCA	Univ.Tlemcen	Examinateur
Mme.M.Bouchaour	MCB	Univ.Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2018/2019



Abréviations

1. PV : Système photovoltaïque
2. I-V : Caractéristique Courant-Tension
3. V_{co} : Tension à circuit ouvert
4. I_{cc} : courant de court circuit
5. CAN : Convertisseurs analogique numérique
6. ADC : Analog to Digital Converter

Résumé

Ce mémoire est consacré à la caractérisation d'un panneau photovoltaïque à travers l'étude de l'influence des différents paramètres externes (température, éclairement, etc ...) sur la courbe courant-tension (I-V). Quelques résultats de simulation sur Matlab, ainsi que des mesures expérimentales de la courbe I-V sont présentés. Ensuite, on a passé en revue deux méthodes de mesure de la caractéristique I-V. En plus, un projet de réalisation d'un traceur I-V est présenté avec objectif et principe de fonctionnement. Aussi, des généralités sur les énergies renouvelables, et plus précisément l'énergie photovoltaïque, l'histoire de leur application et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire sont donnés.

Abstract

This dissertation is devoted to the characterization of a photovoltaic panel through the study of the influence of the various parameters on the current-voltage characteristic (IV). Some results of simulation on Matlab and experimental measures of the I-V curve are presented. Two methods for the measure of the curve I-V are presented. Also, a project of realization of a Tracer IV is presented, with principle of operation and objective. Finally, some generalities on renewable energies, especially photovoltaic energy, the history of application and the operating principle of a solar cell are presented.

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant et misericordieux, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail. Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à notre cher enseignant, mon directeur de Master, monsieur Mohamed Mebrouki pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Je tiens à remercier également mon co-directeur, ingénieur à l'entreprise SKTM Monsieur Mohammed Belhadj Aissa pour le temps qu'il m'a consacré et pour les précieuses informations qu'il m'a prodiguées avec intérêt et compréhension.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres de jury pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Mes remerciements vont à tout le personnel avec lequel j'ai eu contact durant mon stage au sein de l'entreprise SKTM et auprès duquel j'ai trouvé l'accueil chaleureux, l'aide et l'assistance dont j'avais besoin.

Je ne laisserai pas cette occasion passer sans remercier monsieur le directeur de notre école Dr. Bouchrit ROUISSAT, tous les enseignants et le personnel de l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen.

Je remercie également mes camarades et amis : Merbah, Riadh, Lamine, Karim, Abdelhak, pour leur aide précieux et surtout pour leur sympathie.

Enfin, je voudrais dédier ce mémoire, avec un merci très spécial, à mes parents : Merci de m'avoir soutenu et permis d'effectuer le parcours qui m'a mené où je suis aujourd'hui.

Une mention toute spéciale à ma famille : Mes sœurs Yassmina et Rania, mon beau frère Abderaouf pour m'avoir encouragé pendant les moments difficiles de ma vie d'ingénieur et pour leurs soutien indéfectible. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et mon amour.

Table des matières

Abréviations	iii
Résumé	v
Abstract	vi
Remerciements	vii
Table des matières	ix
Liste des figures	xi
Introduction	1
1 Généralités	3
1 État de consommation mondiale de l'énergie	3
2 Types d'énergies renouvelables	4
2.1 L'énergie solaire	4
2.2 L'énergie éolienne :	4
2.3 La biomasse :	4
2.4 L'énergie hydraulique	5
2.5 L'énergie géothermique	5
2.6 L'énergie des mers ou énergie marine	5
3 Énergie photovoltaïque	5
3.1 Histoire de l'exploitation de l'énergie solaire	5
3.2 Principe de fonctionnement d'une jonction pn	13
3.3 Fonctionnement d'une jonction p-n en cellule solaire	21
3.4 Générations des cellules solaires	22
4 Conclusion	23
Bibliographie	25
2 Caractéristique courant-tension I-V	27
1 Introduction :	27
1.1 Résistances en série et en parallèle :	30
2 Paramètres externes d'une cellule solaire idéale :	32
2.1 Courant de court-circuit	32
2.2 Tension à circuit ouvert	33
2.3 Puissance maximum	33
2.4 Facteur de remplissage(Fill factor)	33
2.5 Rendement d'une cellule photovoltaïque :	34
2.6 Effet de température :	35
2.7 Simulation de l'effet de l'éclairement	38
2.8 Simulation de l'effet de température	38
3 Ligne de charge	40

4	Branchement en série de cellules photovoltaïques identiques :	40
5	Branchement en parallèle de cellules photovoltaïques identiques :	41
6	Conclusion :	43
Bibliographie		45
3	Méthodes de mesure de la caractéristique I-V	47
1	Introduction :	47
2	Différentes méthodes pour tracer la courbe IV	47
2.1	Méthode de mesure à l'aide d'une résistance variable	47
2.2	Charge capacitive	49
3	Présentation d'un projet pour tracer la caractéristique I-V basé sur le principe d'une charge capacitive	50
3.1	Introduction	50
3.2	Schéma de simulation de Traceur IV	52
3.3	Visite visuelle du matériel	52
3.4	Circuit imprimé avec condensateur de charge	53
3.5	Arduino UNO	53
3.6	Module relais	54
4	Utilisation du logiciel IV Swinger 2	54
4.1	Fenêtre principale	55
4.2	Bouton Swing!	55
4.3	Bouton de l'assistant de résultats	55
4.4	Bouton Préférences	56
4.5	Bouton d'alimentation de tracé	56
5	Conclusion	57
Bibliographie		59
Conclusion générale et perspectives :		61

Liste des figures

1. Figure (1.1) :Sources de production mondiale d'électricité en 2007.
2. Figure (1.2) :L'article d'Edmond Becquerel où il a fait allusion, pour la première fois, à l'effet photovoltaïque.
3. Figure (1.3) : Schéma de la première cellule photovoltaïque montée par Becquerel.
4. Figure (1.4) : Premier moteur solaire avec un réflecteur solaire inventé par le frans Augustin Mouchot
5. Figure (1.5) :Schéma de la cellule photovoltaïque à base de sélénium montée par Adams et Day.
6. Figure (1.6) :Schéma de la première cellule photovoltaïque en couche mince à base de sélénium.
7. Figure (1.7) :Titre de l'article publié par A. Einstein sur le concept du photon.
8. Figure (1.8) :Le chimiste polonais Jan Czochralski et son procédé de croissance de monocristaux.
9. Figure (1.9) :Autobert et Stora et leur découverte de l'effet photovoltaïque dans le CdS.
10. Figure (1.10) :Titre de l'article publié par L. O. Grondahl
11. Figure (1.11) :Titre de l'article (patent) publié par Olh
12. Figure (1.12) :La première cellule solaire produite en 1954 par les laboratoires Bell aux états unis d'Amérique
13. Figure (1.13) :Centrale photovoltaïque de Mojave, Californie (USA)
14. Figure (1.14) :Cellule solaire à base de colorant sensible fabriquée en 1991 EPFL de Lausanne, Suisse
15. Figure (1.15) : Croissance de la capacité de production des installations de cellules solaires de par le monde à partir de l'année 2000
16. Figure (1.16) :Croissance de la capacité de production des installations utilisant des ressources non fossiles
17. Figure (1.17) : Électrons libres (en rouge) dans un réseau cristallin d'ions positifs (en bleu) d'un métal
18. Figure (1.18) :Différents types de bande d'énergie électronique pour différents types de matériaux
19. Figure (1.19) : Passage d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction sous effet de la Température
20. Figure (1.20) :État d'occupation (fondamental) des niveaux énergétiques par les quatorze électrons de l'atome de silicium Si.
21. Figure (1.21) : Le carbone, le silicium, le germanium sont tous des éléments avec 4 électrons de valence (groupe IV) avec une coordination tétraédrique

22. Figure (1.22) :Matériaux semiconducteurs élaborés à partir d'éléments chimiques des colonnes IV, III-V et II-VI
23. Figure (1.23) :La largeur de la bande interdite en fonction de la constant du réseau pour trois types de semiconducteurs : IV, III-V et II-VI
24. Figure (1.24) :Dopage en Bor-Phosphore
25. Figure (1.25) :Le transport des particules par diffusion
26. Figure (1.26) :Une jonction p-n avec à droite une région riche en trou (région p) et à gauche une région riche en électrons (région n).
27. Figure (1.27) :La zone de déplétion dans la jonction pn
28. Figure (1.28) :Une jonction p-n dont les deux régions p et n sont reliées entre elles par un fil conducteur est soumise à un faisceau lumineux incident du côté p.
29. Figure (2.1) :Caractéristique $I - V_{ak}$ d'une diode
30. Figure (2.2) :Dans une jonction p-n éclairée, un courant électrique I_{ph} (appelé photocourant) est produit.
31. Figure (2.3) : Caractéristique $I - V_{ak}$ d'une cellule photovoltae.
32. Figure (2.4) :Caractéristique $I - V_{ak}$ d'une cellule photovoltaïque où l'on a inversé l'axe de ordonnée (courant i positif)
33. Figure (2.5) : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle avec deux rstances : R_{sh} et R_s . Le symbole d'une cellule photovoltaïque y est aussi illustré.
34. Figure (2.6) :les effets représentés par une résistance en série R_s
35. Figure (2.7) :un chemin alternatif au déplacement des porteurs de charge du photo-courant
36. Figure (2.8) :schéma équivalent d'une cellule solaire.
37. Figure (2.11) : Variation de la caractéristique $I - V$ et $P - V$ en fonction de l'airement
38. Figure (??) : Le courant de court circuit I_{cc} varie linéairement avec l'éclairement alors que la tension à circuit ouvert V_{co} varie selon une fonction logarithmique de l'éclairement.
39. Figure (2.9) :Le point de fonctionnement à puissance maximum d'une cellule photovoltaïque.
40. Figure (2.10) :Détermination graphique du facteur de remplissage (Fill factor).
41. Figure (2.13) :Schéma de simulation sur Matlab de l'effet de la température sur la caractéristique d'un panneau photovoltaïque
42. Figure (??) :Variation de la caractéristique $I - V$ et de la puissance en fonction de la température
43. Figure (2.15) :Cellule photovoltaïque branchée à une charge R_0 et la ligne de charge correspondante.
44. Figure (2.16) :Deux cellules photovoltaïques identiques branchées en séries
45. Figure (2.17) :Caractéristique $i - v$ d'un ensemble de deux cellules photovoltaïques identiques branchées en parallèle.
46. Figure (3.1) :Schéma de résistance variable.
47. Figure (3.3) : Schéma d'une charge capacitive
48. Figure (3.4) :Courbe IV typique d'un module PV non ombré.
49. Figure (3.5) : Vue schématique de Traceur IV

- 50. Figure (3.6) :Schéma électronique de Traceur IV
- 51. Figure (3.7) :Port USB de la carte.
- 52. Figure (3.8) :Bornes de reliure et câbles PV
- 53. Figure (3.9) :Circuit imprimé avec condensateur de charge
- 54. Figure (3.10) :Arduino UNO.
- 55. Figure (3.11) :Module relais
- 56. Figure (3.12) :Icône du logiciel Swinger.
- 57. Figure (3.13) :Fenêtre principale du logiciel Swinger.
- 58. Figure (3.14) :Courbe IV avec courbe de puissance tracée.

Introduction

L'énergie est la capacité d'un système de faire un travail. Elle est utilisée pour chauffer l'air et l'eau, pour transporter les gens dans les bus, les avions, les bateaux et les trains, pour produire la nourriture, pour éclairer les maisons et les routes, pour travailler sur nos ordinateurs. D'autre part, l'énergie se montre sous différentes formes dans notre vie quotidienne : énergie gravitationnelle, énergie cinétique, énergie mécanique, énergie électrique, chaleur, radiation (rayonnement), ondes, énergie chimique et énergie nucléaire. L'énergie totale est toujours conservée, bien que sa forme peut changer dans le temps. Pour que cette énergie soit utile, on doit la convertir à une forme utilisable. Le monde comme on le connaît aujourd'hui est basé sur la capacité des humains à transformer une énergie d'une forme à une autre. C'est le cas par exemple du moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en une énergie mécanique.

Le souci majeur de l'humanité est comment aborder le problème de l'énergie et chercher l'accès à ces différentes formes. En fait, les problèmes de l'énergie dans le monde sont dues essentiellement à une croissance terrible de la population mondiale qui peut atteindre les 9 milliards vers 2040 contre 7 milliards en (2017), ce qui entraîne une demande croissante sur l'énergie ; mais aussi à un niveau de vie qui est devenu très exigeant dans les pays industrialisés.

Cette énergie de type fossile (le pétrole, le charbon le gaz) est consommée plus rapidement qu'elle était générée. L'énergie fossile n'est pas donc une énergie durable. Un autre problème causé par l'énergie fossile est l'émission du dioxyde de carbone CO_2 . Pour ces toutes ces raisons, les humains sont en train de se tourner vers les énergies renouvelables.

Parmi ces énergies on cite l'énergie solaire photovoltaïque, laquelle a pris un grand essor ces dernières années, à travers un développement technologique remarquable lui permettant une pénétration croissante dans le marché de la production d'énergie dans le monde. Il est donc important pour les spécialistes du domaine de maîtriser l'aspect théorique du fonctionnement des cellules solaires à la base de la production d'énergie par effet photovoltaïque.

Le présent travail s'inscrit justement dans cette démarche en jetant la lumière sur un aspect très important du fonctionnement d'un panneau solaire, à savoir la variation de la caractéristique courant tension d'un panneau solaire en fonction de certains paramètres externes.

Le présent mémoire est organisé de la manière suivante : Dans le premier chapitre j'introduis les énergies photovoltaïques en retraçant l'historique de l'utilisation de celles-ci et en développant le fonctionnement des cellules solaires. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la caractéristique courant-tension d'un panneau solaire. Dans le dernier chapitre, je passe en revue les différentes méthodes de mesure de la caractéristique courant tension avec quelques résultats de simulation. Enfin, je présente un projet de réalisation d'un traceur IV.

Chapitre 1

Généralités

1 État de consommation mondiale de l'énergie

L'électricité est présente depuis plus d'un siècle dans notre vie quotidienne. Elle représente le symbole de la vie moderne. Les humains l'utilisent pour chauffer l'air et l'eau ; pour transporter les gens dans les bus, les avions, les bateaux et les trains ; pour produire la nourriture ; pour éclairer les maisons et les routes ; pour regarder la télévision ou travailler sur les ordinateurs, etc Ainsi, le souci majeur de l'humanité est comment transformer les différentes formes d'énergie (énergie gravitationnelle, énergie cinétique, énergie mécanique, énergie électrique, chaleur, radiation (rayonnement), ondes, énergie chimique et énergie nucléaire) en électricité.

Les problèmes de l'énergie dans le monde sont dues essentiellement, d'une part, à une croissance terrible de la population mondiale qui peut atteindre les 9 milliards vers 2040 ce qui entraîne une demande croissante sur l'énergie, et d'autre part, à un niveau de vie qui devient très exigeant dans les pays industrialisés [1]. En 2007, l'électricité est produite par l'énergie

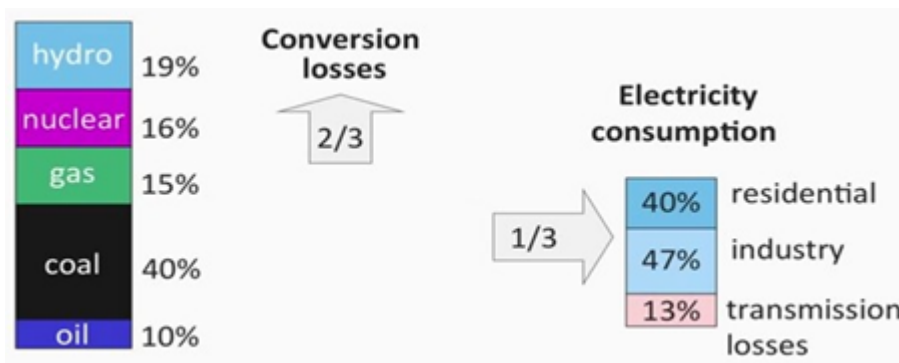


FIGURE 1.1 – Sources de production mondiale d'électricité en 2007.

hydraulique (énergie renouvelable) à 19%, 16% de l'énergie nucléaire, 15% du gaz, 40% du charbon et 10% du pétrole (voir figure (1.1)). Pendant le processus de transformation de ces énergies vers l'électricité deux tiers de l'énergie est perdue et un tiers arrive aux consommateurs. Parmi ce tiers, 40 pour cent est destinée aux résidences de particuliers, et 47 pour cent vers l'industrie, le reste est perdue dans les câbles de transport. D'autre part, l'énergie nucléaire présente des risques ayant des conséquences graves en exploitation, et nécessite une solution viable sur le très long terme au problème du stockage des déchets.

Ainsi, plus de 65% (charbon, gaz et pétrole) de l'électricité est produite par des énergies fossiles. L'humanité consomme cette énergie fossile plus rapidement qu'elle était générée naturellement par photosynthèse. Par conséquent, l'énergie fossile n'est pas une énergie durable

(non renouvelables). En plus, l'exploitation des énergies fossiles entraîne l'émission du dioxyde de carbone CO_2 qui sera ensuite emmagasiné dans les océans et dans l'atmosphère. Beaucoup de spécialistes autour du monde pensent que le dioxyde de carbone est responsable du réchauffement climatique qui peut avoir des effets désastreuses sur la vie humaine. À ce titre, le changement climatique remet fondamentalement en cause l'usage des ressources fossiles ; non seulement parce qu'elles sont limitées, mais aussi par nécessité de stabiliser le climat sur la terre.

Pour ces raisons là, et pour d'autres, les humains sont en train de se tourner vers d'autres types d'énergie : solaire, éolienne, biomasse, marine, etc ... Ce sont là des énergies dites renouvelables car renouvelées à une proportion (rythme) plus grande que celle à laquelle est consommée par les humains. En effet, les énergies renouvelables offriront, à long terme, des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable, à même de répondre à des besoins croissants de l'humanité que les énergies fossiles ne peuvent plus en assurer. Le monde assiste donc à une transition énergétique des sociétés dans leur diversité vers des sources renouvelables.

2 Types d'énergies renouvelables

2.1 L'énergie solaire

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. En effet, le soleil est une source d'énergie gratuite, très puissante et est à l'origine de presque toutes les autres types d'énergie. Les technologies d'exploitation de l'énergie solaire sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique, des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires. Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter avec efficacité l'énergie solaire [2].

2.2 L'énergie éolienne :

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années à travers des moulins à vent, mais aussi dans la navigation. Aujourd'hui, il est possible d'exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales et des machines qui transforment le vent en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante [2].

2.3 La biomasse :

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments. Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes trouve son origine dans l'absorption de l'énergie solaire grâce à la photosynthèse. La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets

municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en des formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz [2].

2.4 L'énergie hydraulique

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années à l'aide des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité [2].

2.5 L'énergie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers ; mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite des réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou à des réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut être également employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur [2].

2.6 L'énergie des mers ou énergie marine

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, qui couvrent presque 70% de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable [2].

3 Énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage. La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base du système. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir en électricité les ondes électromagnétiques (rayonnement) émises par le Soleil. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque et ces modules regroupés entre eux forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par un réseau de distribution et de transport électrique [2].

3.1 Histoire de l'exploitation de l'énergie solaire

Déjà sept siècles avant notre ère, les romains utilisaient des lentilles et des objets paraboliques pour concentrer la lumière du soleil et obtenir ainsi du feu. Bien que réfutée par

des scientifiques modernes, la première utilisation non passive répertoriée de l'énergie solaire thermique par l'homme remonte à 212 avant Jésus Christ (av. J.-C) quand Archimède aurait concentré l'énergie du soleil afin d'enflammer les navires romains qui assiégeaient Syracuse [3].

Plus de 17 siècles plus tard, en 1561, Adam Lonitzer évoque un procédé utilisé par les alchimistes utilisant l'énergie concentrée du soleil dans le but d'élaborer des parfums. En 1615, la pompe solaire de Salomon de Caus utilise des lentilles pour chauffer un récipient rempli d'un mélange air-eau. Cette invention est considérée comme étant la première utilisation de l'énergie solaire depuis l'époque classique. Dans les années 1780, Horace de Saussure invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil, qu'il nomme hélio-thermomètre. Il utilisa l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé : il venait de créer les premiers capteurs solaires thermiques à basse température.

En 1839, le scientifique français (1820-1891) Alexandre Edmond Becquerel (voir figure (1.2)) découvre à l'âge de 19, l'effet photovoltaïque connu alors comme l'effet Becquerel. Sur la même figure on présente une partie de l'article présenté par Edmond Becquerel à l'académie française des sciences, intitulé " Mémoire sur les effets électriques produits par l'influence des rayons solaires : action de la radiation sur les lames métalliques", où il a été question de discuter de l'effet photovoltaïque pour la première fois.

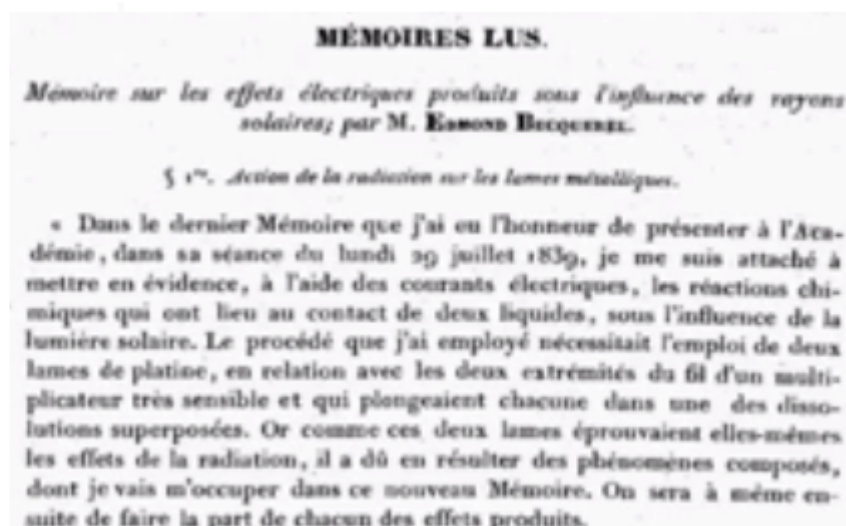


FIGURE 1.2 – L'article d'Edmond Becquerel où il a fait allusion, pour la première fois, à l'effet photovoltaïque.

La cellule photovoltaïque montée par Becquerel (voir figure 1.3) consistait en un récipient de couleur noire (pour absorber la lumière), rempli d'une solution acide et dans lequel sont plongées deux lames (électrodes) recouvertes en AgCl et AgBr. Une membrane fine est placée au milieu entre deux compartiments contenant chacune une électrode. Les deux électrodes sont ensuite branchées à une résistance électrique, formant ainsi un circuit électrique fermé. A chaque fois que la lumière illumine l'une des électrodes, un courant électrique circule dans le circuit. En changeant la nature de la lumière (lumière bleue, ultraviolette, lumière visible), Becquerel avait remarqué que le courant électrique circulait toujours. Dans les années 1866, l'ingénieur français Augustin Mouchot (1825-1912) inventa le premier moteur solaire avec un réflecteur parabolique et une chaudière cylindrique en verre alimentant une petite machine à vapeur (voir figure (1.4)). Le traité de commerce franco-anglais de 1860, ainsi que l'amélioration du réseau ferré ont facilité l'approvisionnement en charbon et accéléré le développement industriel. Cela a

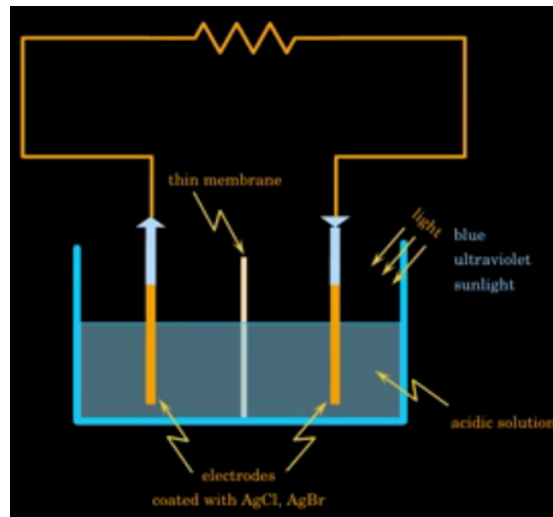


FIGURE 1.3 – Schéma de la première cellule photovoltaïque montée par Becquerel.



FIGURE 1.4 – Premier moteur solaire avec un réflecteur solaire inventé par le français Augustin Mouchot [4].

conduit le gouvernement français à estimer que l'énergie solaire n'était finalement pas rentable et a cessé de financer les recherches de Mouchot.

Après le travail de Becquerel, il fallait attendre l'année 1877, pour que William Grylls Adams et Richard Evan Day, deux physiciens anglais, publiaient un travail dans le journal "The Royal Society Publishing", sur l'action de la lumière sur un matériau en sélénium (The action of light on selenium). La cellule montée par Adams et Day était constituée d'une barre vitreuse à base de sélénium (vitreous selenium) avec, de part et d'autre, deux électrodes en platine, le tout enfermé dans un tube en verre pour laisser passer la lumière (voir figure (1.5)). Un courant électrique passait dans le circuit fermé à chaque fois que la lumière tombait sur la barre en sélénium. Malheureusement, la performance de ce dispositif était insignifiante.

En 1883, Charles Fritts avait publié dans le journal American J. of Science, vol. 26, p.465, 1883, un article scientifique sous le titre "On a New Form of Selenium photocell", où il s'est agi pour la première fois d'une cellule photovoltaïque en couches minces (thin film, en anglais) à base de sélénium (voir figure (1.6)). Cette cellule est composée d'un substrat métallique (plus précisément le laiton), sur lequel est déposée une couche mince de sélénium d'épaisseur 25 m, au-dessus de laquelle est déposé un feuillet semi-transparent en or. Deux contacts sont attachés en bas et en haut des couches. A chaque fois que la lumière arrive sur la couche en sélénium, un courant électrique circule dans le circuit fermé extérieur. La cellule de Fritts avait un rendement

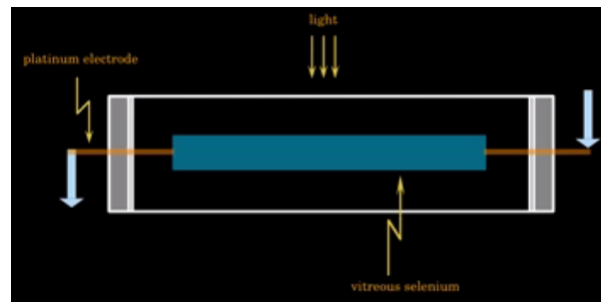


FIGURE 1.5 – Schéma de la cellule photovoltaïque à base de sélénium montée par Adams et Day.

de 1 pour cent. Bien que le processus de fabrication de la cellule de Fritts était reproductible, les scientifiques émettaient des doutes sur la nature physique du fonctionnement de la cellule, les concepts de la physique moderne n'étant pas encore vus le jour à cette époque là, et les lois de la mécanique classique ne pouvant pas expliquer le phénomène physique qui régissait le fonctionnement de la cellule. Fritts lui même n'était pas en mesure de donner une explication plausible.

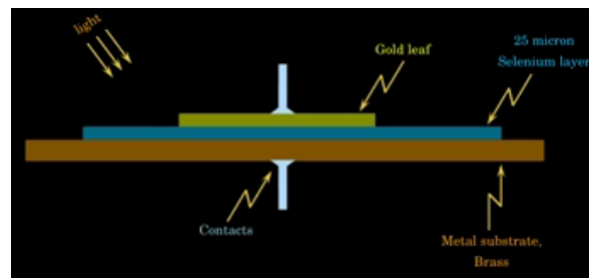


FIGURE 1.6 – Schéma de la première cellule photovoltaïque en couche mince à base de sélénium.

En 1887, Hertz découvrit l'effet photovoltaïque, dans lequel des objets perdent leurs charges une fois exposés à la lumière ultraviolette. En 1893, le physicien britannique James Dewar découvrit l'effet thermos selon le principe d'un récipient à deux parois séparées par un vide d'air, assurant une isolation quasi parfaite. Le principe de la bouteille isotherme permet par la suite le développement des capteurs solaires thermiques à tubes sous vide.

La naissance, en 1900, du concept de quanta, par Max Planck, allait révolutionner la physique (naissance de la mécanique quantique), en supposant que, pour des systèmes microscopiques, l'énergie E devrait prendre des valeurs discrètes, appelés quanta, au lieu des valeurs continues arbitraires, selon la formule :

$$E = h\nu$$

où h est la constante de Planck et ν la fréquence de la lumière considérée. La lumière était donc considérée comme composée de particules d'énergie discrètes appelées **quanta**, ce qui a ouvert la voie vers une nouvelle et extraordinaire formulation des lois physiques, qui vient enfin s'émanciper de la lourdeur et l'incapacité de la mécanique classique face aux problèmes posés jusque là.

En 1905, Albert Einstein, alors encore inconnu, a publié un article dans un journal allemand (annalen der physik) (voir figure (1.7)), où il donna une explication du nouveau concept d'un paquet de lumière appelé **photon** avec une application au phénomène photovoltaïque, enfin complètement expliqué.



FIGURE 1.7 – Titre de l'article publié par A. Einstein sur le concept du photon.

Dans les années 1910, les premiers chauffe-eau solaires individuels apparaissent en Californie. Après une période essentiellement consacrée au développement de l'énergie hydraulique, les essais de développement industriel de centrales solaires thermiques ont été couronnés d'un succès technique, mais non économique, car arrivant au moment où le prix du pétrole diminuait à nouveau.

En 1915, Jan Czochralski, un chimiste polonais a inventé le procédé de Czochralski, une méthode de croissance de monocristaux particulièrement utilisée dans la fabrication de galettes (wafers, en anglais) de semi-conducteurs lorsqu'il étudiait le taux de cristallisation des métaux. (voir figure (1.8)). En 1932, l'effet photovoltaïque a été découvert dans les matériaux **II – VII**



FIGURE 1.8 – Le chimiste polonais Jan Czochralski et son procédé de croissance de monocristaux [4].

de Sulfure de Cadmium (**CdS**) par Autobert et Stora (voir figure (1.9)).

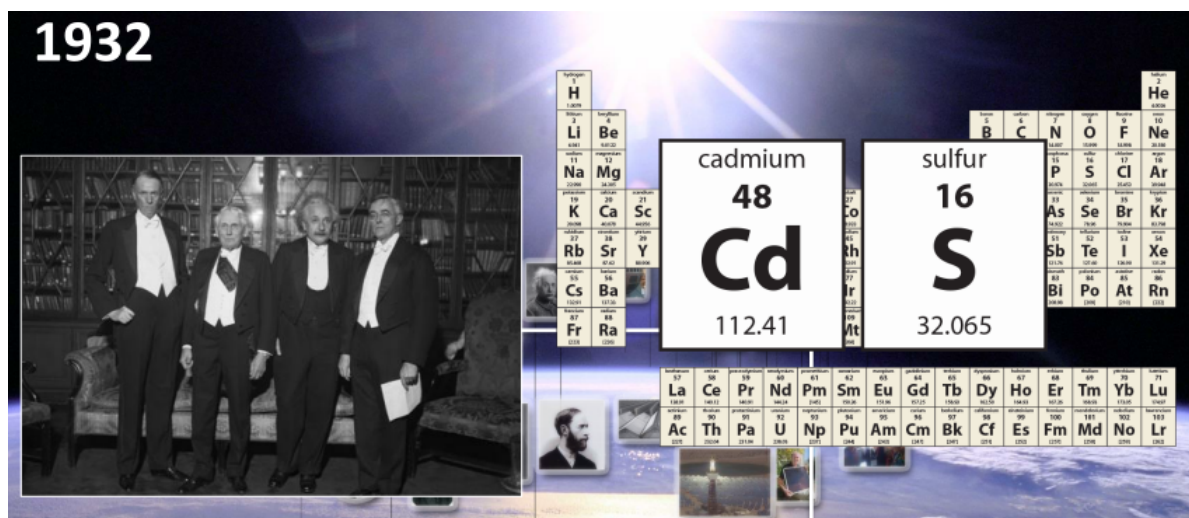


FIGURE 1.9 – Autobert et Stora et leur découverte de l'effet photovoltaïque dans le CdS [4].

En 1933, L. O. Grondahl avait publié un article intitulé *The Copper-Cuprous-Oxide Rectifier and Photovoltaic Cell*, sur l'emploi de matériaux d'oxyde de cuivre dans la fabrication de cellules photovoltaïques (voir figure (1.10)) où il expliquait de manière détaillée la procédure de fabrication de ce type de cellules photovoltaïques, devenu très populaire à l'époque car fabriqué à bas cout.

APRIL, 1933		REVIEWS OF MODERN PHYSICS		VOLUME 5	
The Copper-Cuprous-Oxide Rectifier and Photoelectric Cell					
L. O. GRONDAHL, <i>Research Laboratory, Union Switch and Signal Company, Switzmole, Pennsylvania</i>					
(Received December 17, 1932)					
TABLE OF CONTENTS					
General.....	141	Method of Manufacture and Characteristics of Cop-	147		
Discovery.....	142	per-Oxide Rectifiers.....	153		
Structure.....	143	Location of Rectification.....	155		
History of Solid Rectifiers and Some General Con-	145	Characteristics of Cuprous Oxide.....	157		
siderations.....		Theory.....	162		
		Copper-Oxide Photoelectric Cells.....			

FIGURE 1.10 – Titre de l'article publié par L. O. Grondahl.

En 1941, Ohl aux états unis d'Amérique (USA) présenta pour un brevet (patent) son invention d'un dispositif électrique sensible à la lumière contenant du silicium (*Light-sensitive electric device including silicon*) (voir figure(1.11)). La cellule solaire de Ohl avait un rendement (efficiency) inférieur à 1%, ce qui ne lui pas donné tant de pénétration dans la vie commerciale, bien qu'elle soit la première cellule solaire où on a utilisé du silicium.

The image shows a patent record for 'Light-sensitive electric device including silicon' (US 2443542 A) by Russell S. Ohl. The record includes the following information:

- Publication number:** US2443542 A
- Publication type:** Grant
- Publication date:** 15 Jun 1948
- Filing date:** 17 Sep 1942
- Priority date:** 27 May 1941
- Also published as:** US2402662
- Inventors:** Russell S Ohl
- Original Assignee:** Bell Telephone Labor Inc
- Export Citation:** BibTeX, EndNote, RefMan
- Patent Citations (3), Referenced by (9), Classifications (46)**
- External Links:** USPTO, USPTO Assignment, Espacenet

The record also includes an abstract, images (4), a description (OCR text may contain errors), and claims available in.

FIGURE 1.11 – Titre de l'article (patent) publié par Ohl.

En 1953, Dan Trivich de la Wayne State University a effectué des calculs théoriques en référence au spectre solaire. L'année 1954 était décisive dans la fabrication des cellules photovoltaïques, puisque D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson, qui travaillaient alors au fameux Bell Telephone Laboratories, ont publié dans le journal "Journal of Applied Physics, 1954, 25, 676" un article sur une cellule solaire à base de silicium (diode à base de semiconducteur) avec un rendement de conversion de la lumière en électricité avoisinant les 6%. Ce résultat représente le vrai début de l'ère des cellules photovoltaïques à base de silicium (voir figure (1.12)).

À partir de 1958 et dans les années soixante, les progrès de la technologie photovoltaïque a été déclenchée par la demande de la technologie spatiale. Au milieu et à la fin des années

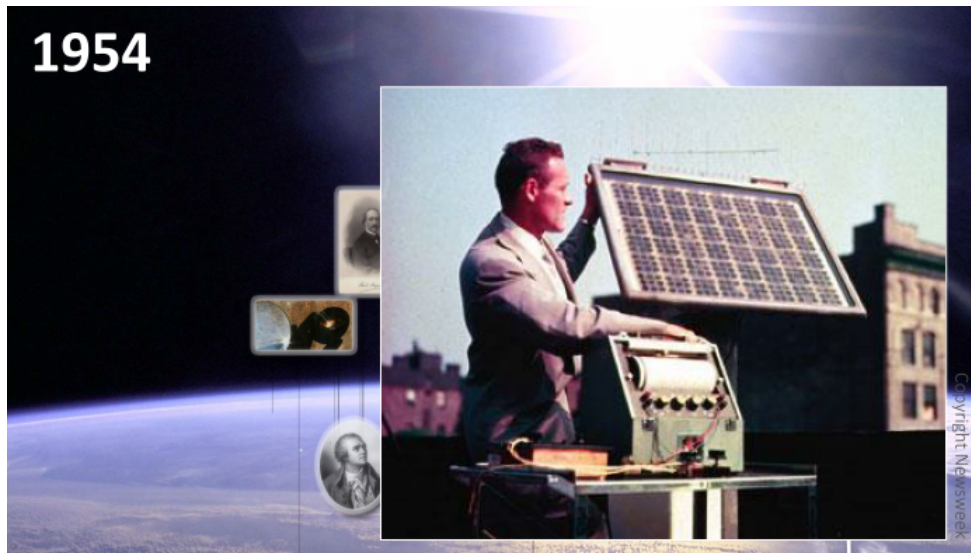


FIGURE 1.12 – La première cellule solaire produite en 1954 par les laboratoires Bell aux états unis d’Amérique [4].

cinquante, diverses sociétés et laboratoires américains, Signal Corps Laboratories, RCA Lab et Hoffman Electronics ont développé des cellules solaires à base de silicium pour alimenter les satellites orbitant autour de la terre. Divers satellites de la série Vanguard, Explorer et Spoutnik ont été lancés avec la technologie PV alimentés à bord. En 1962, le laboratoire Bell lance le premier satellite de télécommunications alimenté avec l’énergie solaire. En 1966, la Nasa lança le premier satellite aéronautique d’observation (Orbiting Astronomical Observatory) alimenté à l’aide de cellules photovoltaïques de 1 kW. En 1968, le physicien Giovanni Francia construisit la première centrale solaire concentrée près de la ville Gênes en Italie. L’usine a pu produire 1 MW avec de la vapeur surchauffée à 100 bar et à 500 degrés Celsius. En 1970 en URSS le scientifique Zhores Alferov développa la cellule solaire à haute efficacité à base d’arsenure de gallium GaAs (hétérojonction). Il s’agit de la première démonstration d’une cellule solaire à base de matériaux semi-conducteurs.

En 1976, dans les laboratoire RCA, Dave Carlson et Chris wronski, ont développé la première cellule photovoltaïque en couche mince (thin lm) basé sur du silicium amorphe (a-Si). En 1978, au Japon, la compagnie SHARP et le Tokyo Electronic Applications Laboratory ont mis sur le marché les premiers calculateurs alimentés par l’énergie solaire. Dans les années 1970, et en raison de la crise du pétrole et de la hausse des prix du pétrole, l’intérêt à la technologie photovoltaïque pour l’application terrestre est en augmentation.

La technologie photovoltaïque n’est plus seulement une technologie de niche pour les applications spatiales. À la fin des années 70 et 80, de nombreuses entreprises commencent à développer des modules photovoltaïques Terrestres. En 1980, les premières cellules solaires à couche mince à base de sulfure de cuivre ou de sulfure de cadmium CdS avec des rendements de conversion supérieurs à 10 pour cent ont été montrés à l’université du Delaware. En 1985, à l’université de New South Wales en Australie, les cellules solaires en silicium cristallin (c-Si) avec des rendements supérieurs à 20 pour cent ont été montrés. En 1984 et jusqu’en 1991, la plus grande centrale photovoltaïque du monde a été construite à Mojave en californie (USA) (voir figure (1.13)) avec une capacité de 354 MW.

En 1991, la première cellule solaire sensibilisée au colorant (dye-sensitized, en anglais) à haute efficacité a été publiée par l’école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse par Michael Grätzel et ses coéquipiers (voir figure (1.14)).



FIGURE 1.13 – Centrale photovoltaïque de Mojave, Californie (USA) [4].

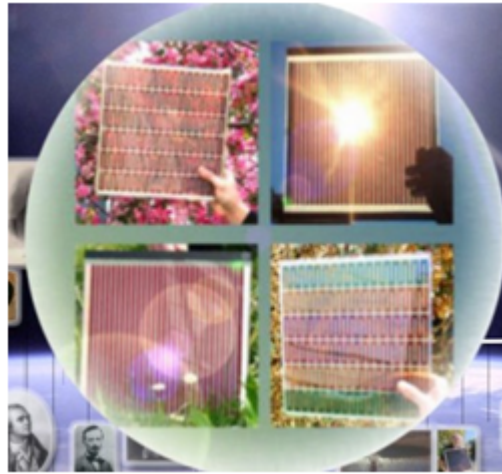


FIGURE 1.14 – Cellule solaire à base de colorant sensible fabriqué en 1991 à l'EPFL de Lausanne, Suisse [4]

La cellule solaire à base de colorant rendu sensible à la lumière est une sorte de système photo-électrochimique, dans lequel un matériau semi-conducteur à base de sensibilisateurs moléculaires (molecular sensitizers), est placé entre une photo-anode et un électrolyte.

En 1994, le laboratoire national des énergies renouvelables (National Renewable Energy Laboratory (NREL)) aux États-Unis a développé des cellules solaires pour concentrateurs (concentrator solar cells) à base de matériau semi-conducteur III-V. La cellule basée sur une cellule solaire à deux concentrateurs terminaux GaInP/GaAs dépassait la limite de conversion de 30%.

À la fin des années 1990, la puissance photovoltaïque installée dans le monde entier a atteint 1 GW en 1999. À partir des années 2000, l'énergie solaire est entrée dans l'ère où les questions environnementales et économiques ont renouvelé l'intérêt du public pour l'énergie solaire. C'est l'ère dans laquelle le marché solaire s'est transformé d'un marché local à un marché mondial. Au cours du nouveau millénaire, l'Allemagne a pris la tête de la politique progressive des tarifs de rachat, conduisant à un grand marché solaire national et à l'industrie (voir figure (1.15)).

En 2010, 43 pour cent des systèmes PV installés dans le monde entier ont été installés en Allemagne. À partir de 2008, le gouvernement chinois a fortement investi dans l'industrie solaire locale et est devenu, en quelques années, le fabricant de modules PV dominant. En 2012,

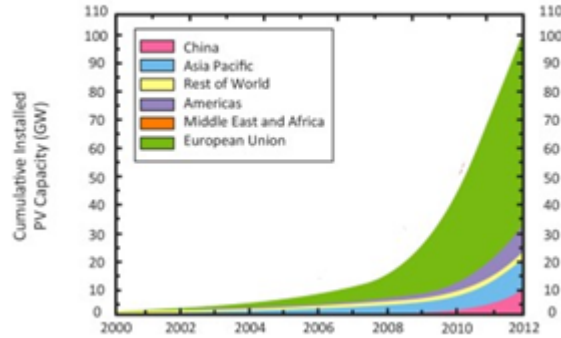


FIGURE 1.15 – Croissance de la capacité de production des installations de cellules solaires de par le monde à partir de l’année 2000 [4].

la capacité d’énergie solaire mondiale a dépassé la barrière magique de puissance installée de 100 GW. Cela représente 100 fois plus que la capacité installée 13 ans plus tôt en 1999. Cela signifie que le marché solaire a augmenté annuellement avec en moyenne 40 pour cent pour les 13 derniers années. Depuis 2008, l’énergie solaire installée a connu une croissance sans précédent et montre le potentiel de l’énergie solaire pour devenir bientôt la plus grande source d’énergie qui n’est pas basée sur les combustibles fossiles (voir figure (1.16)) [5].

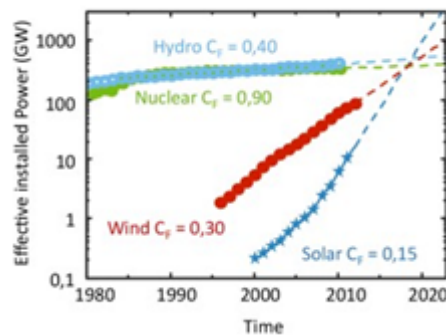


FIGURE 1.16 – Croissance de la capacité de production des installations utilisant des ressources non fossiles.

3.2 Principe de fonctionnement d’une jonction pn

Transformer la lumière en électricité

Les matériaux peuvent être classés en fonction de leurs propriétés électriques :

1. Métaux : Ce sont de bons conducteurs de l’électricité. L’origine de la conductivité élevée des métaux est basée sur le fait que les électrons externes des atomes d’un métal sont faiblement liés (voir figure (1.17)). Il en résulte un océan d’électrons mobiles libres dans le matériau indiqué par les points rouges. La conduction électrique dans un métal est due à la mobilité des charges négatives. Ces électrons se déplacent entre un réseau d’atomes indiqués par les points bleus. Comme beaucoup d’atomes ont donné un électron, ils peuvent être considérés comme fixés et positivement chargés.
2. Isolants : Ce sont des matériaux qui ne conduisent pas l’électricité. Dans les matériaux isolants, l’océan d’électrons mobiles est absent (voir figure (1.17)). Tous les électrons

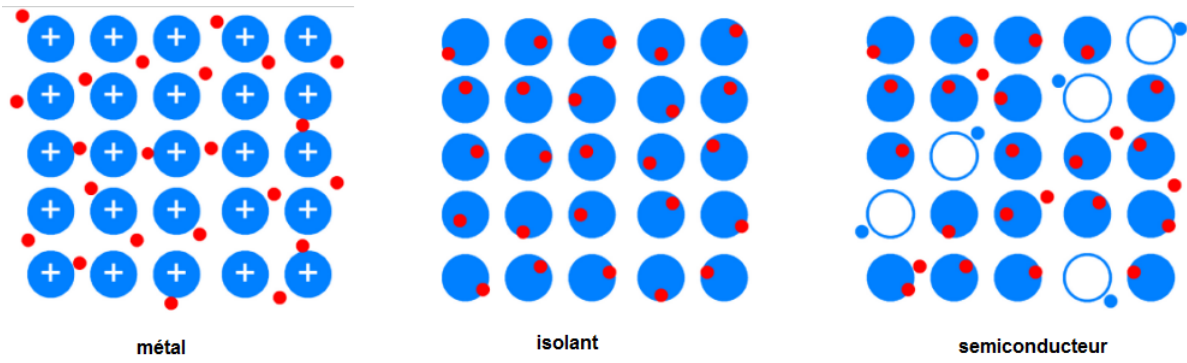


FIGURE 1.17 – Électrons libres (en rouge) dans un réseau cristallin d’ions positifs (en bleu) d’un métal [4].

(points rouges) sont liés aux atomes fixes (en bleu).

3. Semi-conducteurs : Ce sont ni de bons conducteurs comme les métaux ni de mauvais conducteurs comme les isolants. Dans ce type de matériaux, les électrons externes des atomes sont fortement liés aux atomes de fond que les métaux, mais dans certaines conditions, certains des électrons peuvent quitter leurs atomes et deviennent des électrons mobiles. Ces électrons séparés de leurs atomes, laissent derrière eux une entité chargée positivement appelée trou (voir figure (1.17)). Les petits points bleus de l’illustration représentent les trous. Ces trous sont capables de se déplacer, tout comme les électrons. En conséquence, le transport de charges dans un semi-conducteur est fait par des électrons mais aussi par des trous [6, 7, 8].

D’autre part, la théorie des bandes d’énergie donne une explication plausible du comportement électronique des différents types de matériaux. Une bande d’énergie électronique reflète les niveaux d’énergie potentielle qu’un électron pourrait occuper dans le matériau. Selon un principe très important de la mécanique quantique dit principe d’exclusion de Pauli, deux électrons (fermions) ne peuvent jamais occuper simultanément le même état quantique (le même niveau d’énergie et le même spin) [8].

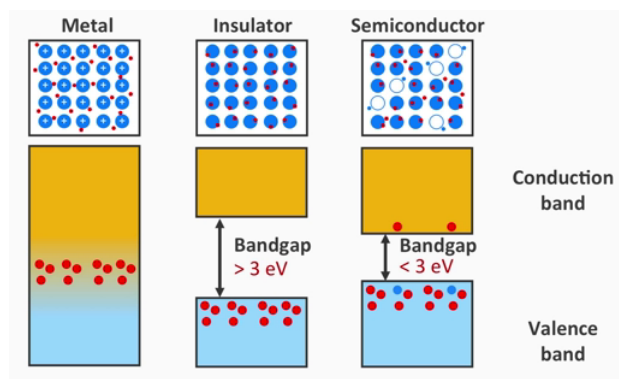


FIGURE 1.18 – Différents types de bande d’énergie électronique pour différents types de matériaux [4].

Ainsi, les métaux ont une bande d’énergie électronique très large pas entièrement remplie d’électrons (voir figure (1.18)). Cette bande d’énergie électronique correspond aux niveaux d’énergie dans lesquels les électrons peuvent diffuser librement dans le métal. Un isolant et un semi-conducteur, au contraire, ont deux bandes distinctes avec un grand intervalle d’énergies

interdites entre elles. La plupart des électrons remplissent la bande électronique inférieure, dite bande de valence, où ils sont immobiles (liés aux atomes du réseau). La bande électronique supérieure est la bande dite de conduction. Les électrons de la bande supérieure, appelée bande de conduction, sont mobiles et contribuent ainsi à la conduction électrique du matériau, tout comme les électrons mobiles dans un métal. L'écart d'énergie interdit entre la bande de valence et la bande de conduction est appelé la bande d'énergie interdite (bandgap, en anglais) où, a priori, il n'existe pas de niveaux d'énergie à être occupés par des électrons ou des trous [6].

La différence entre les isolants et les semi-conducteurs est que la valeur énergétique de la bande interdite dans un isolant est beaucoup plus grande que celle dans un semi-conducteur. En effet, la bande interdite d'un isolant est typiquement supérieure à 3 eV (voir figure (1.18)). Plus la bande interdite est grande, plus la probabilité qu'un électron ait suffisamment d'énergie pour occuper un état dans la bande de conduction est faible. Pour un semi-conducteur, l'écart énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction (bande interdite) est plus petit. Si la bande interdite d'un matériau est inférieure à 3 eV, le matériau peut être considéré comme semi-conducteur. Dans un semi-conducteur, certains électrons peuvent avoir suffisamment d'énergie thermique pour passer de la bande de valence à la bande de conduction (voir figure (1.19)).

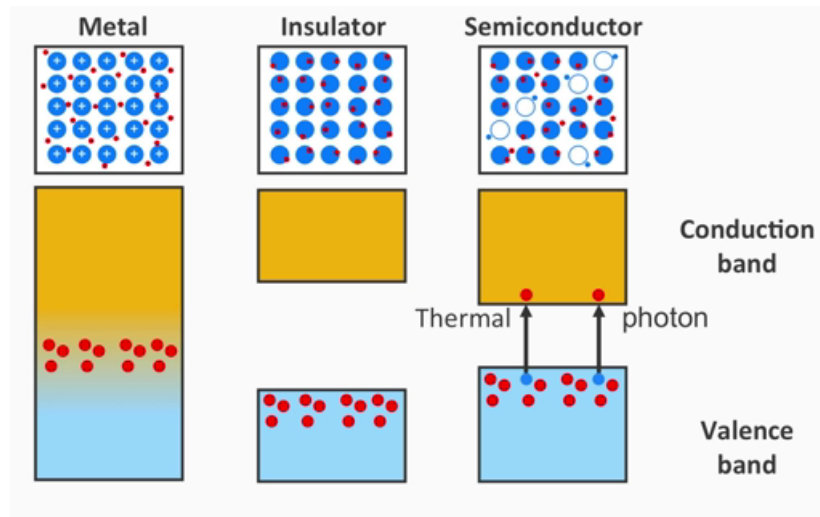


FIGURE 1.19 – Passage d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction sous effet de la Température [4].

Cette énergie peut également être fournie par la lumière considérée comme un ensemble de photons. En fait, si un photon a une énergie égale ou supérieure à l'énergie de la zone interdite, il peut faire passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. C'est ainsi, qu'en éclairant avec de la lumière composée de photons ayant une énergie plus grande que la zone interdite d'un semi-conducteur, on peut rendre ce dernier plus conducteur.

Le silicium **Si** est l'élément chimique le plus utilisé dans la fabrication des cellules photovoltaïques (près de 90 pour cent des panneaux solaires sont à base de silicium). Cet élément chimique a 14 électrons au total, avec une répartition que l'on peut représenter comme ($\text{Si} | 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$) (voir figure (1.20)) [6]. Les 4 électrons de silicium dans la troisième couche électronique sont faiblement liés au noyau et joueront, par conséquent, un rôle très important dans les liaisons que va faire l'atome de **silicium Si** avec d'autres atomes pour former des molécules et des solides. Le silicium comme le germanium et le carbone (diamant) ont tous une coordination tétraédrique et forment un réseau cristallin cubique de diamant dans sa phase cristalline. Le silicium et le germanium peuvent être considérés comme des matériaux

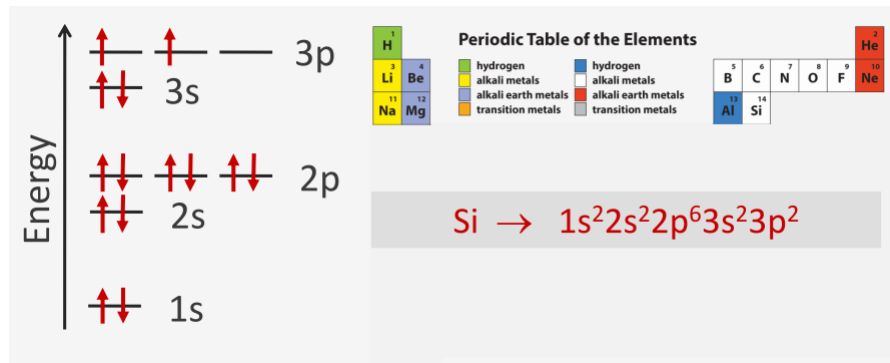


FIGURE 1.20 – État d’occupation (fondamental) des niveaux énergétiques par les quatorze électrons de l’atome de silicium Si [4].

semi-conducteurs IV, où le chiffre IV représente le nombre d’électrons de valence (voir figure (1.21)). Les matériaux qui ont les propriétés des semi-conductrices peuvent être fabriqués à

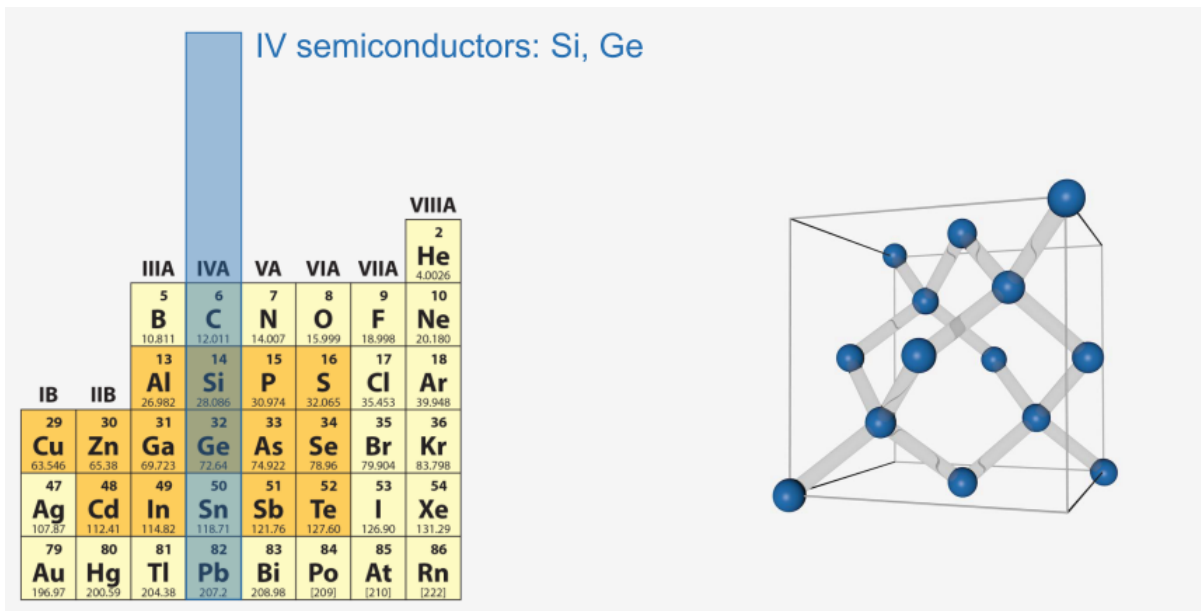


FIGURE 1.21 – Le carbone, le silicium, le germanium sont tous des éléments avec 4 électrons de valence (groupe IV) avec une coordination tétraédrique [4].

partir d’éléments autres que les éléments à quatre électrons de valence. Considérons les matériaux semi-conducteurs III-V comme l’arséniure de gallium (GaAs). Le semi-conducteur III-V se compose de deux éléments : le gallium Ga qui a trois (03) électrons de valence (colonne III) et l’arséniure As qui, lui, a cinq (05) électrons de valence (colonne V) (voir figure (1.22)). Ces matériaux peuvent ressembler au silicium formant un réseau cristallin cubique diamant. Dans le réseau cristallin montré sur la même figure les atomes de gallium Ga sont en bleu (aux sommets d’un tétraèdre) et ceux de l’arséniure As sont en rouge (au centre d’un tétraèdre). La différence avec le silicium est que chaque atome de gallium est entouré de quatre atomes d’arséniure et chaque atome d’arséniure, à son tour, est entouré d’un atome de gallium [7].

Sur la figure (1.23) on reporte les constantes de réseau de trois matériaux semiconducteurs composés III-V à base de gallium [6] : le phosphore de gallium (GaP), l’arséniure de gallium (GaAs) et le l’antimoniure de gallium (GaSb). Il est clair que plus la constante de réseau du matériau est grande, plus la bande interdite sera faible. Le phosphore de gallium (GaP) a la

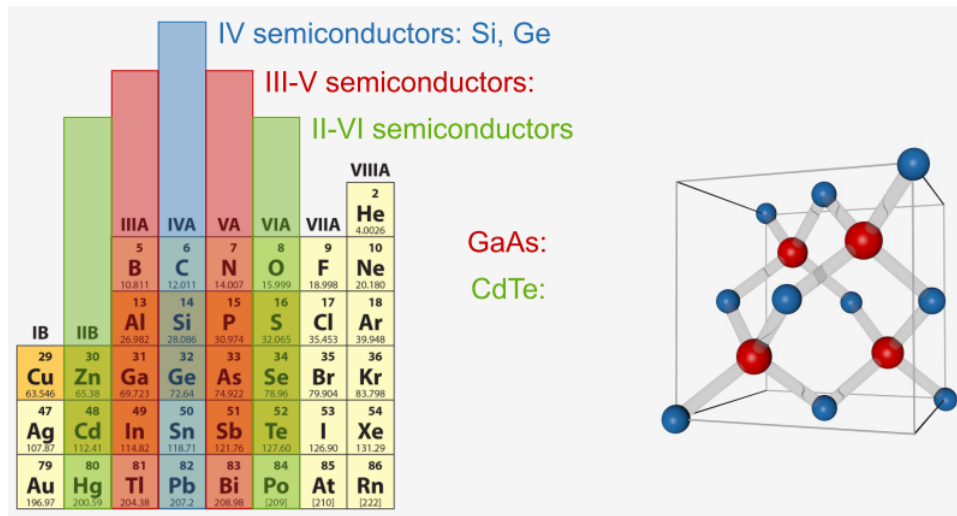


FIGURE 1.22 – Matériaux semiconducteurs élaborés à partir d’éléments chimiques des colonnes IV, III-V et II-VI. [4]

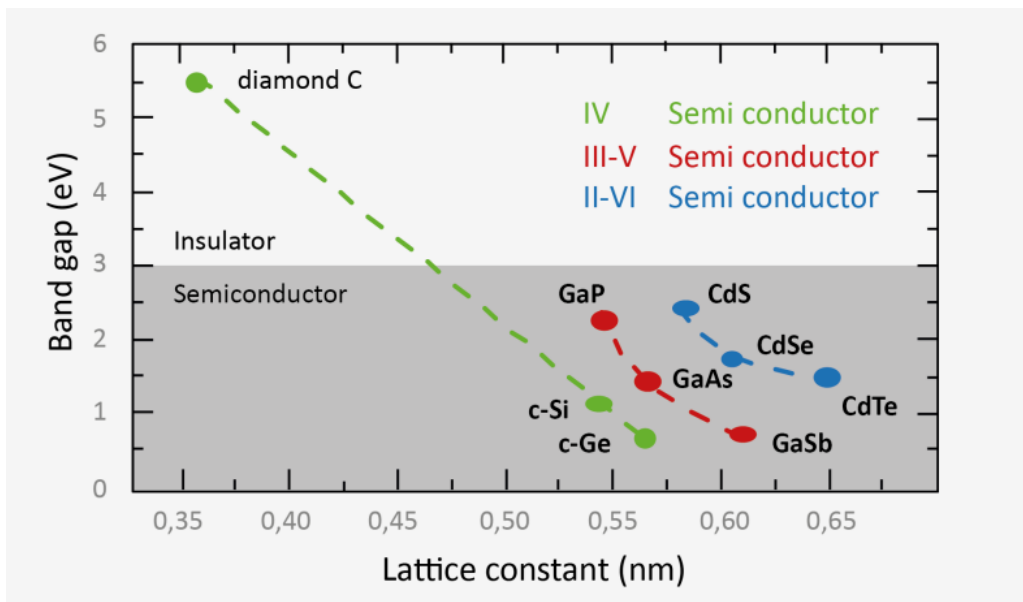


FIGURE 1.23 – La largeur de la bande interdite en fonction de la constant du réseau pour trois types de semiconducteurs : IV, III-V et II-VI [4].

plus petite constante de réseau et donc de bande interdite la plus large. Un autre groupe de matériaux semi-conducteurs sont les matériaux semi-conducteurs dits II-VI (voir figure (1.22)) tel que le tellure de cadmium (CdTe). En effet, les semi-conducteurs II-VI se composent de deux éléments chimiques (composant binaire) : un élément ayant deux (02) électrons de valence (colonne II) et un élément avec six (06) électrons de valence (colonne VI). Ces matériaux peuvent former un réseau cristallin cubique de type diamant. Dans le réseau cristallin montré sur la figure (1.22)) les atomes de cadmium Cd sont en bleu et les atomes de tellure Te sont en rouge. On y voit bien que chaque atome de cadmium est lié à quatre atomes de tellure, et que chaque atome de tellure est entouré de quatre atome de cadmium. Sur la figure (1.23) on reporte les constantes de réseau de trois matériaux semiconducteurs composés II-VI à base de cadmium : le sulfure de cadmium (CdS), le sélénure de cadmium (CdSe) et le tellure de cadmium (CdTe) [7]. Encore une fois, plus la constante de réseau du matériau est grande, plus la bande interdite sera faible. On voit bien que le tellure de cadmium (CdTe) a la plus grande constante de réseau et donc la plus petite bande interdite. Il est important de se rappeler que tous ces semi-conducteurs ont des bandes interdites avec des énergies différentes.

Afin d'améliorer la conductivité électrique d'un semi-conducteur, nous avons besoin d'exciter les électrons pour qu'ils passent de la bande de valence vers la bande de conduction. Cela peut être fait par différents moyens [3]. Le premier consiste à exciter les charges par énergie thermique. La deuxième est d'utiliser des impuretés dans le matériau semi-conducteur. La troisième option, appropriée au domaine des cellules solaires, est d'utiliser l'énergie de la lumière pour exciter les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction.

Dans un réseau de silicium chaque atome est lié à 4 atomes voisins. Remarquons qu'un trou peut faire partie d'une liaison covalente entre deux atomes Si si un des deux électrons assurant la liaison est absent. Les électrons et les trous peuvent donc librement se déplacer dans le réseau entre les liaisons, et au fur et à mesure que la température du matériau augmente le nombre d'électrons et de trous libres, lui aussi, augmente (des électrons et de trous excités). C'est là une manière de changer la densité des porteurs de charges libres dans le matériau.

Une autre approche pour changer cette densité de porteurs de charge et d'utiliser ce qu'on appelle le dopage (en anglais : doping) [3]. En effet, les semi-conducteurs qui ne contiennent aucune impureté (un atome de nature différente de celle des atomes du réseau en question) sont appelés semi-conducteurs intrinsèques. Dans ce type de semiconducteurs le nombre (la densité) de porteurs de charge négatifs (électrons) mobiles est égal au nombre (la densité) de porteurs de charge positifs (trous) mobiles (libres). Par définition, le dopage est le processus physique pendant lequel on rajoute, intentionnellement, des impuretés au matériau ; ce qui affecte d'une façon significative la densité des porteurs de charge de chaque type [6].

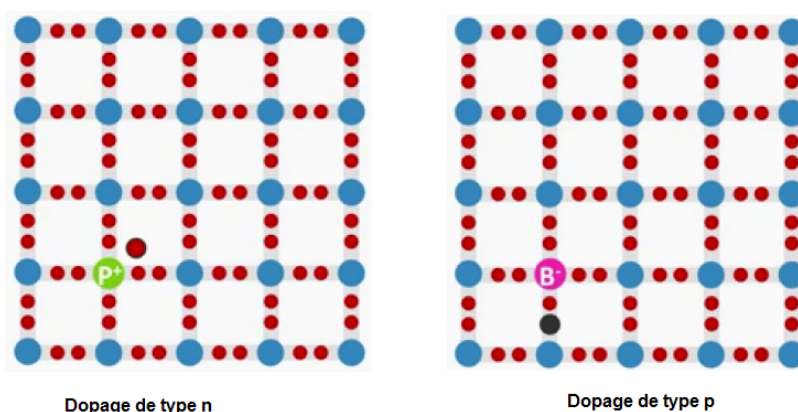


FIGURE 1.24 – Dopage en Bor-Phosphore [4].

Pendant ce processus, un atome de phosphore prend la place d'un atome de silicium (voir figure (1.24)). Puisque le phosphore a 5 électrons de valence, 4 d'entre eux vont former des liaisons covalentes avec les 4 atomes de silicium qui l'entourent alors que le cinquième électron (un cercle en rouge), très faiblement lié à son noyau, sera plus facile à exciter pour devenir un électron libre. Cet électron provenant de l'atome de phosphore s'ajoute aux autres du silicium électrons rendus libres par effet thermique, déjà présents sur le réseau cristallin. De ce fait, l'atome de phosphore P ayant perdu un électron perdra sa neutralité et devient chargé positivement. On se retrouve après dopage avec un électron libre qui peut circuler librement dans le réseau et un ion positif sur le réseau cristallin. On vient de faire là un dopage de type n (en anglais : n-doping) puisque on a rajouté au matériau des porteurs de charges négatifs (électrons libres). Pour les semi-conducteurs dopés n (n-doped semiconductors), les électrons sont appelés les porteurs de charge majoritaires, puisque la densité d'électrons libres a augmenté et est devenue plus grande que celle des trous libres. Les trous sont par conséquent appelés les porteurs de charge minoritaires.

On dope le matériau de Silicium des atomes de Bore (Boron) (voir figure (1.24)). Puisque ce dernier a trois électrons de valence, il en manquera un électron pour former les quatre liaisons covalentes avec les 4 atomes de silicium les plus proches voisins. Par conséquent, une des quatre liaisons covalente (liaison moléculaire) ne contient qu'un seul électron avec un trou. Ce dernier est facilement excité pour aller vers un état de charge libre. L'atome de Bore B devient chargé négativement puisqu'elle peut recevoir dans sa position dans le réseau un électron pour compléter la liaison covalente. On se retrouve donc avec un ion négatif fixe B^{-1} et un trou mobile. C'est là la procédure de dopage de type p (pour positif) (en anglais p-doping). Pour ces semi-conducteurs dopés p , les électrons sont des porteurs de charge minoritaires, alors que les trous sont les porteurs de charge majoritaires, puisque la densité de charge des électrons est plus faible que celle des trous.

Un troisième mécanisme pour exciter des porteurs de charge de façon à les faire passer de la bande valence vers la bande de conduction est l'absorption de la lumière [6]. Un photon absorbé par le matériau semi-conducteur est utilisé pour exciter un électron dans la bande de valence vers la bande de conduction. Ainsi, la lumière peut rendre un semi-conducteur de conductivité faible un bon conducteur. Si le photon a une énergie supérieure à celle de la bande interdite celui-ci peut effectivement exciter un électron sur un niveau plus bas dans la bande de valence vers la bande de conduction. Dans ce cas, les électrons ou les trous excités reviendront rapidement vers leurs positions initiales. Ce retour vers l'état initial des porteurs de charge sera accompagné d'une énergie, émise sous forme de chaleur qui chauffera le semi-conducteur. Ainsi, l'absorption de la lumière permet l'apparition de paires électron-trou, ce qui affecte la densité des porteurs de charge minoritaires. Par contre, la densité des porteurs de charges majoritaires n'est pas affectée par la génération de paires électron-trou car le nombre d'électrons créés par absorption dans un semiconducteur de type n est très petit devant le nombre d'électrons fournis par dopage.

Les porteurs de charges (électrons et trous) peuvent se déplacer dans un matériau semi-conducteurs selon deux mécanismes de transport, à savoir : la diffusion et la dérive [7, 9]. Le transport par diffusion est dû à la présence d'un gradient de concentration alors qu'un champ électrique entraîne un mouvement par dérive. Physiquement, le mouvement net des particules induit par le gradient de densité de particules peut être décrit par la loi de diffusion de Fick,

$$J_e = -q D_e \frac{dn}{dx}$$

où J_e est la densité du courant électronique, exprimée en intensité de courant par unité de surface, q la charge élémentaire, D_e le coefficient de diffusion des électrons, et $\frac{dn}{dx}$ le gradient

de la densité des électrons n dans la direction x (voir figure (1.25)). Les particules chargées

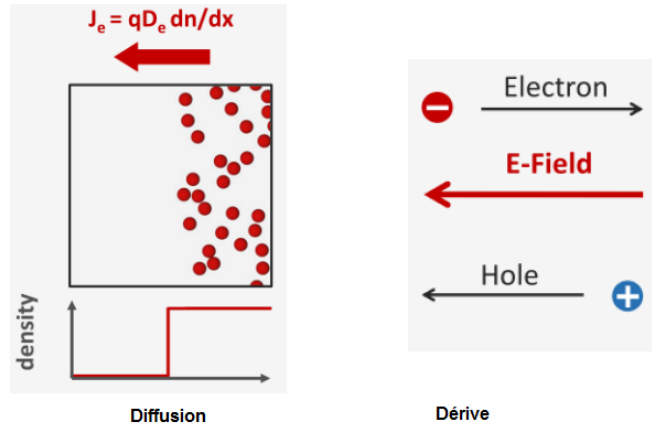


FIGURE 1.25 – Le transport des particules par diffusion [4].

(électrons et trous) peuvent également être déplacées sous l’influence d’un champ électrique. La densité de courant électronique induite par ce champ électrique est donnée par

$$J_t = pq\mu_t E$$

pour les trous et

$$J_e = pq\mu_e E$$

pour les électrons, où $p(n)$ est la densité des porteurs de charge (n pour les électrons et p pour les trous), q la charge du porteur de charge, $\mu_t(e)$ est la mobilité du porteur de charge et E le module du champ électrique appliqué.

Cependant, les trous et les électrons dans un même matériau peuvent se rencontrer, et donc sont capables avec une forte probabilité, de se recombiner : Un électron dans la bande de conduction rejoint le trou dans la bande de valence tout en perdant leurs mobilités respectives (état de liberté) [9]. L’électron après recombinaison avec le trou n’est plus libre et sera de nouveau “collé” au réseau cristallin dans une orbitale moléculaire. Ce mécanisme de perte de porteurs de charge libres (électrons et trous) détermine la durée de vie de ces porteurs de charge. Si la vitesse de recombinaison était élevée, la durée de vie des porteurs de charge serait courte. Dans un matériau semiconducteur dopé n , où les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, et les trous les porteurs de charges minoritaires, les électrons libres auront une infime probabilité de rencontrer des trous libres et donc la vitesse de recombinaison est faible.

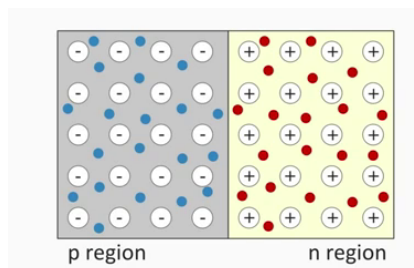


FIGURE 1.26 – Une jonction p-n avec à droite une région riche en trou (région p) et à gauche une région riche en électrons (région n) [4].

La jonction p-n à la base de la plus part des cellules solaires est fabriquée en mettant en contact une pièce d’un semi-conducteur de type n avec une autre de type p [9]. Sur la moitié

gauche de la jonction (région p) (voir figure (1.26)) les trous sont majoritaires, alors que les électrons sont majoritaires dans la moitié à droite de la jonction (région n). Le gradient de densité de charges à l'interface entre ces deux matériaux entraîne une diffusion. La densité de trous dans la région de type n est plus petite que celle dans la région de type p . Aussi, la densité d'électrons dans la région de type p est plus petite que celle dans la région de type n . Pendant le processus de diffusion quelques électrons passeront d'une région de forte densité d'électrons (type n) vers une région de faible densité d'électrons (type p). De même, quelques trous diffuseront de la région de type p vers la région de type n . Toutefois, la longueur de diffusion des trous dans la région n est très courte (les trous sont minoritaires), ils vont sitôt recombiner avec un électron libre dans la région n . De même, les électrons minoritaires dans la région p (leur longueur de diffusion est très courte dans cette région) vont sitôt recombiner avec des trous libres dans la région p . Ce processus a lieu sur une très courte distance autour de l'interface où les porteurs de charge sont recombinés : Pas de charges libres dans cette zone. Les seules charges qui existent dans cette région sont les ions fixés au réseau cristallin (négatifs dans p et positifs dans n). Cette région est dite : région des charges du réseau (voir figure (1.27)) ou zone de déplétion [9].

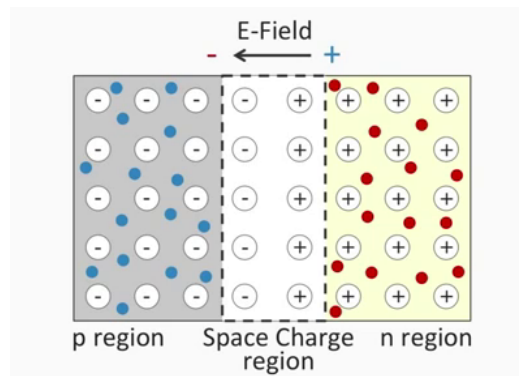


FIGURE 1.27 – La zone de déplétion dans une jonction pn [4].

Ce processus de diffusion crée un champ électrique pointant de la région n vers la région p , créant ainsi un mouvement de charges dans le sens inverse de la diffusion. En effet, le champ électrique dans la région de déplétion oblige les porteurs de charge minoritaires dans la région p (les électrons) à se mouvoir vers la région n . De même, il va obliger les trous dans la région n , là où ils sont minoritaires, à se déplacer vers la région p . On arrive à une situation où les deux mécanismes de transport dans la région de déplétion auront des effets balancés l'un par l'autre sur les porteurs de charge. La jonction pn atteint donc son équilibre thermique [9].

3.3 Fonctionnement d'une jonction p-n en cellule solaire

Une jonction p-n peut absorber la lumière aussi bien dans la région p que dans la région n . L'absorption d'un photon par la jonction génère des paires électron-trou (voir figure (1.28)).

L'absorption de la lumière par des matériaux semi-conducteurs dopés n'affecte que les densités de leurs porteurs de charge minoritaires [9]. Ainsi, les porteurs de charge excités par la lumière contribuent à une augmentation significative de la densité des électrons n dans la région p et des trous p dans la région n . Selon les équations de la densité de courants dû au champ électrique ci dessous

$$J_e = n q \mu_e E$$

et

$$J_h = p q \mu_h E$$

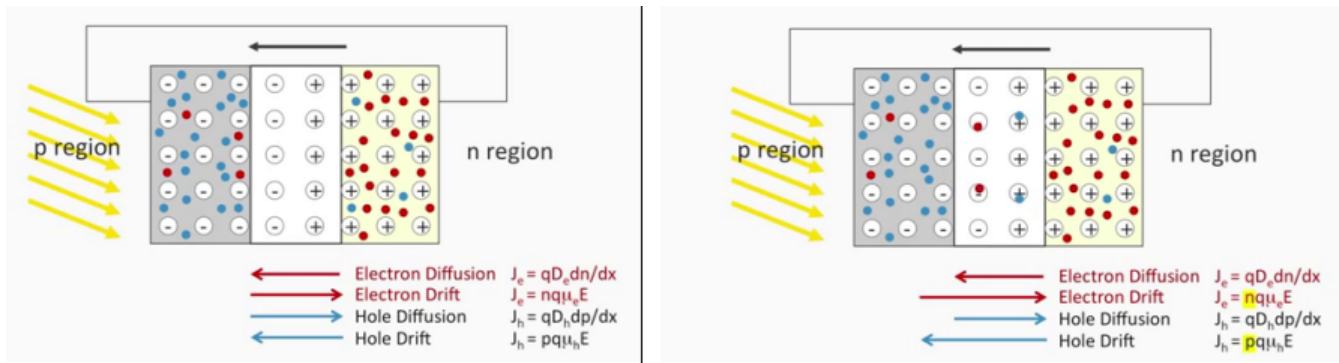


FIGURE 1.28 – Une jonction p-n dont les deux régions p et n sont reliées entre elles par un fil conducteur est soumise à un faisceau lumineux incident du côté p [4].

l'augmentation des densités n et p fait augmenter J_e et J_h (densités de courant de dérive) dans la zone de déplétion, comme indiqué par de longues flèches (voir figure (1.28)).

Ainsi, sous l'effet du champ électrique dans la zone de déplétion, un très grand nombre d'électrons passent de la région p vers la région n . De même, un nombre très grand de trous passent de la région n vers la région p . La densité de courant liée à la dérive peut être facilement accrue de plusieurs ordres de grandeur sous illumination (éclairage) par rapport à ce qui se passe dans une jonction p-n dans l'obscurité. Ainsi, en illuminant une jonction p-n, il est possible de produire un courant électrique. Rappelons que les deux régions p et n sont reliées entre elles par un fil métallique (bon conducteur) : on dit que la jonction p-n est court-circuitée. Dans ce cas, la jonction p-n éclairée produira seulement un courant électrique (pas de tension électrique), appelé courant de court-circuit de la cellule solaire. Au moyenne, un électron minoritaire dans p se déplace sous l'effet du champ électrique dans la zone de déplétion vers la région n puis diffuse vers le contact métallique où il va être attiré par la région p . Une fois dans la région p , l'électron se recombine rapidement avec un trou libre majoritaire dans p . De même, les trous minoritaires dans la région n se déplacent sous le même champ électrique dans la zone de déplétion vers la région p puis diffusent au contact arrière pour se recombinaison avec les électrons. Cependant, si on ouvre le circuit, aucun courant ne pourra circuler et le courant de dérive des porteurs de charge excités par la lumière fait en sorte que la région p se chargera positivement avec plus de trous et la région n se chargera négativement avec plus d'électrons.

Ce processus va créer à son tour un champ électrique dans le sens opposé du champ électrique intégré (built-in electric field, en anglais) déjà présent dans la zone de déplétion ; ce qui fait réduire l'intensité du champ effectif (de dérive) dans la zone de déplétion et partant le courant de dérive net. Ce passage des trous libres vers la région p et des électrons libres vers la région n va continuer jusqu'à ce que les deux champs électriques (courants de dérive) soient égalisées (en équilibre). Dans ce cas, le dispositif (jonction p-n) ne produit pas de courant électrique, mais crée un champ électrique ou plutôt une tension électrique entre les deux régions de la jonction. Cette tension créée par une cellule solaire éclairée dans des conditions de circuit ouvert est appelée tension en circuit ouvert (en anglais : open circuit voltage) [6, 7].

3.4 Générations des cellules solaires

Dans ce paragraphe on passe en revue les différentes générations des cellules solaires. La première génération de cellules solaires était à base de silicium en mono-cristaux avec un rendement de 20%, de poly-cristaux avec un rendement de 18% et des cellules solaires en couches minces (thin films) avec un rendement de 18%. Celles-ci sont fabriquées à une échelle industrielles de

part le monde. D'autre part, les cellules solaires à base d'arséniure de gallium (GaAs) (30%), les GICS (Copper indium gallium selenide) (21%), à base de tellurure de cadmium (CdTe) (21%), à base de silicium amorphe (10%) mais avec un cout de fabrication très bas, et les cellules à base de colorants sensibles (dye-sensitized solar cell) (11%), sont toutes au stade de la recherche (rendements de laboratoire). Il existe aussi une génération de cellules solaires organiques (8%) et d'autres en multi-jonctions (InGaP/GaAs/InGaAs) (37%). La toute nouvelle génération des cellules solaires est basée sur des matériaux de structure pérovskite, ou encore des cellules solaires à base de points quantiques (quantum dots) [10].

4 Conclusion

Il a été question dans ce chapitre de d'introduire le lecteur au domaine très vaste de l'énergie photovoltaïque et ses multiples applications. Un clin d'œil sur l'historique des applications des cellules photovoltaïque s'imposait. En plus, le principe de fonctionnement d'une cellule solaire a été expliqué. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la caractéristique I-V d'un panneau solaire et les effets des paramètres externes. Dans ce chapitre il a été étudié le domaine du photovoltaïque est vaste et complexe, on s'est contenté d'un bref sommaire sur ce phénomène et son champ d'application. Par contre l'objectif de ce chapitre est orienté vers les caractéristiques I-V des cellules photovoltaïques et leurs paramètres les plus usuels. De même, une étude théorique sur l'effet photovoltaïque a été envisagée dans ce chapitre puisqu'elle constitue une partie prenante dans notre travail

Bibliographie

- [1] D. Elliott, "Emergence of European supergrids – Essay on strategy issues," Energy Strategy Reviews, vol. 1, no. 2, pp. 112-129, mai 2012.
- [2] MICHAEL A.LAUGHTON "Renewable Energy Sources" Edited by Professor of Electrical and Electronic Engineering, Queen Mary and Westfield College, University of London Chairman of the Working Group on Renewable Energy Sources appointed by the Watt Committee on Energy, Report Number 22
- [3] Gérard Moine, "L'électrification solaire photovoltaïque", Editeur ObservER (2016)
- [4] Quelques figures du chapitre sont prises d'un cours vidéo fait par Arno Smets, Solar Energy, TUDelft (Netherlands). Voir (<https://ocw.tudelft.nl/courses/solar-energy/?view=lecturessubject=5309>)
- [5] l'utilisation de l'énergie solaire dans la production de l'énergie, site <http://www.solarsystemsusa.net/thefascinatinghistoryofsolarphotovoltaics/>
- [6] Arno HM Smets et al., "Solar energy, The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems", UIT Cambridge, (2015)
- [7] Paul A. Lynn, "Electricity from Sunlight : An Introduction to Photovoltaics", Wiley (2010)
- [8] Robert Foster, Majid Ghassemi, Alma Cota, "SOLAR ENERGY, Renewable Energy and the Environment", CRC Press (2010)
- [9] Richard H, Bube, "Photovoltaic Materials", Imperial College Press (1998)
- [10] Anne Labouret et Michel Viloz, "Energie solaire photovoltaïque", Dunod (2003)

Chapitre 2

Caractéristique courant-tension I-V

1 Introduction :

Une jonction p-n dans l'obscurité se comporte comme une diode. En appliquant une tension extérieure directe aux bornes de la diode (anode et cathode), celle-ci laisse circuler un courant électrique (conductance élevée) entre ces bornes, alors qu'elle ne laissera passer qu'un courant extrêmement faible si on inverse la tension appliquée aux bornes de la diode (très grande résistance). Le courant électrique i à travers la diode passe de l'anode vers le cathode, avec V_{ak} la tension entre l'anode a et le cathode k (voir figure (2.1)). Le courant et la tension dans cette configuration sont considérés comme des valeurs positives avec une puissance électrique entrante dans la diode, laquelle se comporte comme un dissipateur de puissance.

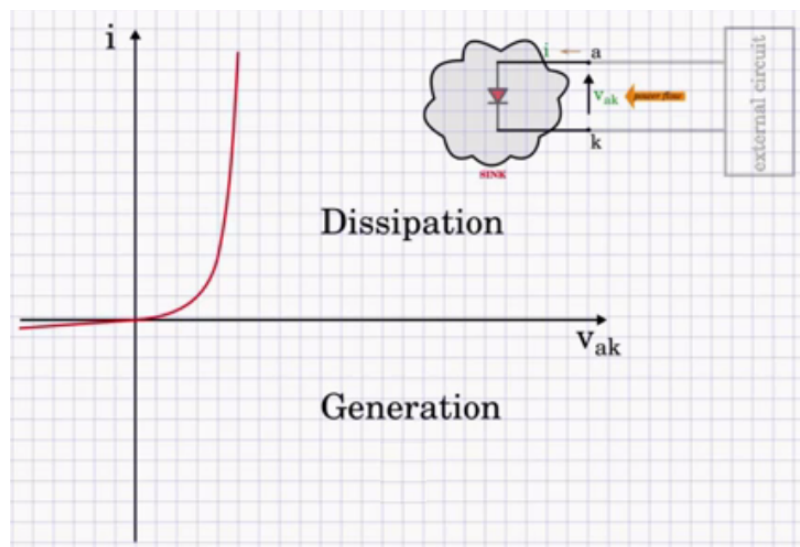


FIGURE 2.1 – Caractéristique $I - V_{ak}$ d'une diode [1].

Une relation existe entre la tension appliquée à une diode et le courant électrique y circulant, laquelle est représentée par une courbe dite courbe caractéristique I-V (voir figure (2.1)). Sur l'axe vertical on reporte les valeurs du courant électrique I alors que les valeurs de la tension V_{ak} sont reportés sur l'axe horizontal. Une tension négative correspond à une tension indirecte (reverse bias voltage) pour laquelle le courant électrique passant à travers la diode est presque nul.

La relation entre I et V dans une courbe caractéristique typique d'une jonction p-n idéale

en silicium dans l'obscurité peut être exprimée à l'aide d'une fonction exponentielle [2] :

$$I = I_{\text{obscurité}} = I_0 \left(e^{\left(\frac{qV}{k_B T} \right)} - 1 \right) \quad (2.1)$$

où q est la charge élémentaire, $V = V_{ak}$ la tension appliquée, k_B la constante de Boltzmann et T la température de la jonction. I_0 représente la faible quantité de courant électrique qui circule dans le circuit dans le cas de l'application d'une tension indirecte. Ce courant est souvent appelé courant de fuite (leakage en anglais) de la jonction p-n.

En illuminant une cellule solaire (jonction p-n), un courant électrique considérable y est produit. Il dépend de l'intensité de l'éclairement solaire capté par la surface de la cellule. Ce courant est représenté dans le circuit équivalent d'une cellule solaire par une source de courant I_{PH} branchée en parallèle avec la diode (voir figure (2.2)) de telle sorte qu'un courant

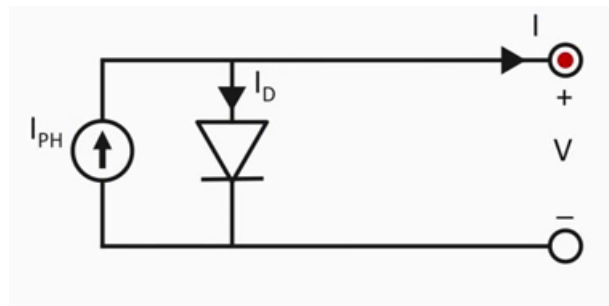


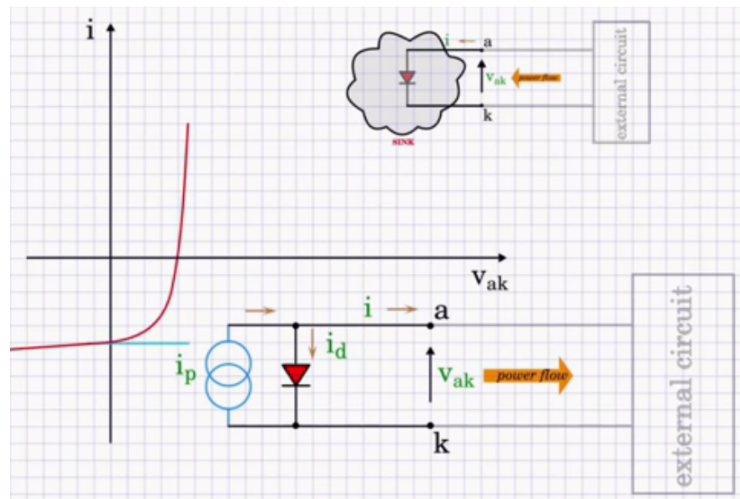
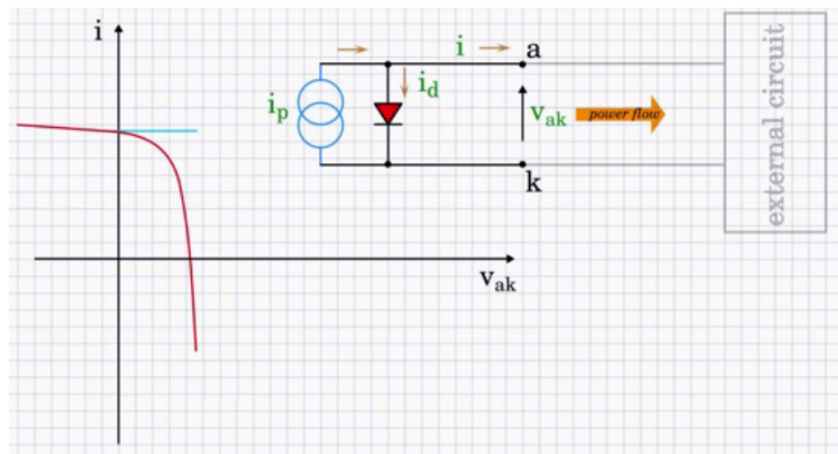
FIGURE 2.2 – Dans une jonction p-n éclairée, un courant électrique I_{ph} (appelé photo-courant) est produit.

additionnel sortant de la source, se sépare en un courant i_D passant à travers la diode (de l'anode vers la cathode) et un courant i qui va de l'anode vers la cathode à travers le circuit extérieur. Le courant sortant de l'anode est négatif selon la convention, alors que la tension $V = V_{ak}$ est toujours positive. Par conséquent, le courant i augmente sans que cela affectera la tension $V = V_{ak}$ (puisque celle-ci dépend de la diode) ; la puissance produite (négative) augmentera aussi. L'écoulement de la puissance est dans le sens sortant ; le bloc composé d'une source de courant et une diode se comporte donc comme une source de puissance. C'est bien là un circuit électrique représentant une cellule photovoltaïque. Cela entraînera un décalage de la courbe de la caractéristique $I - V_{ak}$ vers le bas (voir figure (2.3)), ce qui correspond bien à une puissance négative.

Toutefois, il serait plus agréable d'avoir la courbe de la caractéristique $I - V_{ak}$ dans le premier quadrant. Pour cela on change de convention ; le courant I passant de l'anode vers la cathode à travers le circuit extérieur est considéré comme positif. Il suffit juste d'inverser l'axe des ordonnées sur la courbe de la figure (2.3) pour avoir la caractéristique $I - V_{ak}$ d'une cellule photovoltaïque, comme cela est indiqué sur la figure (2.4).

L'allure de la courbe $I - V_{ak}$ nous renseigne sur le fait que la cellule photovoltaïque n'est ni une source de courant idéale ni, n'en plus, une source de tension idéale. En effet, l'allure de la caractéristique $I - V_{ak}$ sur la région de faibles tensions V_{ak} (source de courant) présente une pente qui indique la présence d'une résistance interne (shunt) R_{sh} de la source de courant, et dont la valeur est égale à l'inverse de cette pente (voir figure 2.5).

D'autre part, l'allure de $I - V_{ak}$ sur la région où la cellule photovoltaïque est considérée comme une source de tension présente une pente qui indique la présence d'une résistance interne R_s (en série) et dont la valeur est égale à cette même pente. On obtient donc le circuit électrique


 FIGURE 2.3 – Caractéristique $I - V_{ak}$ d'une cellule photovoltaïque [1].

 FIGURE 2.4 – Caractéristique $I - V_{ak}$ d'une cellule photovoltaïque où l'on a inversé l'axe de ordonnée (courant i positif) [1].

équivalent d'une cellule photovoltaïque non idéale. Sur la même figure (2.5) on donne le symbole de convention d'une cellule photovoltaïque qui est aussi le symbole d'un module photovoltaïque, sous forme d'une enveloppe reliée d'une part à une anode a et de l'autre part à une cathode k avec les sens du courant i et de la tension v comme y indiqué.

En utilisant la loi des nœuds, il est clair, à partir du circuit équivalent dans la figure (2.5), que le courant produit par l'éclairement i_p est égal à

$$i_p = i_d + i_{R_{sh}} + i \quad (2.2)$$

avec i_d le courant passant à travers la diode et $i_{R_{sh}}$ le courant passant à travers la résistance R_{sh} , alors que i est le courant sortant de la cellule photovoltaïque. D'autre part la tension aux bornes de la résistance R_{sh} est égale à $v + R_s i$, ce qui nous permet d'écrire l'expression de i sous la forme :

$$i = i_p - i_d - \frac{(v + R_s i)}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

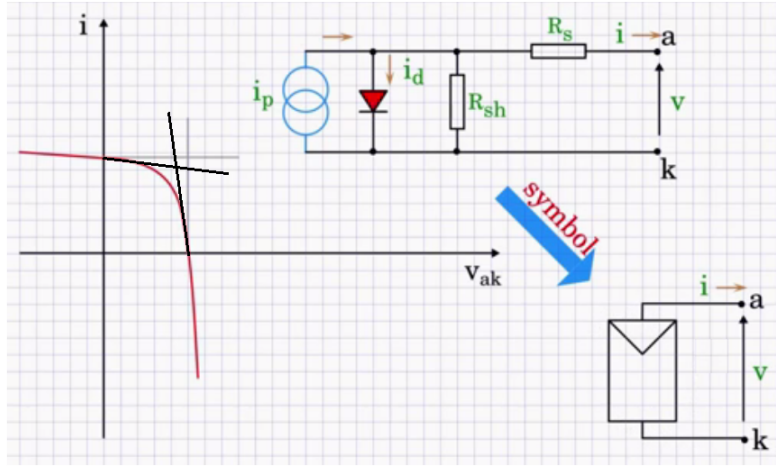


FIGURE 2.5 – Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle avec deux résistances : R_{sh} et R_s . Le symbole d'une cellule photovoltaïque y est aussi illustré [1].

Selon la théorie des semiconducteurs [2], le courant à travers la diode i_d s'écrit comme

$$i_d = I_0 \left(e^{\frac{v + R_s i}{n V_T}} - 1 \right)$$

où I_0 est le courant de saturation pour une polarisation inverse (reverse saturation current), n un facteur d'idéalité de la diode, qui est égal à 2 pour le silicium, et $V_T = \frac{k_B T}{q} = \frac{T}{11600}$, où k_B est la constante de Boltzmann, T la température absolue et q la charge élémentaire.

D'autre part, le courant de saturation I_0 dépend de la nature du matériau, du degré de dopage de la jonction $p - n$, mais aussi de la température, et qui a pour expression [2] :

$$I_0 = K T^m e^{-\frac{V_{GO}}{n V_T}} \quad (2.4)$$

où K est une constante qui dépend de la géométrie de la jonction $p - n$ mais aussi du type du matériau, et V_{GO} l'énergie (en eV) par unité de charge (volts) de la largeur de la bande interdite du matériau. Pour le silicium, on a $V_{GO} = 1.16 \dots 1.21 V$, et dépend de la pureté du matériau. Pour des jonctions $p - n$ dédiées au solaire, V_{GO} est très proche de $1.16 V$. Aussi, pour le silicium, on a $m = 1.5$.

Enfin le courant qui passe à travers le terminal de la cellule s'écrit en fonction de la tension v entre l'anode et la cathode comme :

$$i = i_p - I_0 \left(e^{\frac{v + R_s i}{n V_T}} - 1 \right) - \frac{(v + R_s i)}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

On remarque bien que i apparaît dans les deux termes de l'équation algébrique, ce qui ne doit pas causer de problème si on utilise des logiciels dédiés à ce type de situation.

1.1 Résistances en série et en parallèle :

Dans la réalité une cellule solaire n'est jamais idéale puisque le matériau à base duquel est fabriquée la cellule n'est jamais sans impuretés. Á cela s'ajoute des pertes de nature électrique

dans la cellule solaire. Celles-ci sont représentées dans le circuit électrique équivalent de la cellule solaire sous forme de résistances parasites (en anglais : parasitic resistance). Deux types de résistances sont étudiées ici : La résistance en série et la résistance en parallèle (ou de shunt).

Résistance en série :

Ce type de résistance a pour origine plusieurs effets dans le panneau solaire. Par exemple dans une cellule solaire à base de silicium cristallin c-Si, montrée sur la figure (2.6), plusieurs sources de résistance peuvent être décelées [2] :

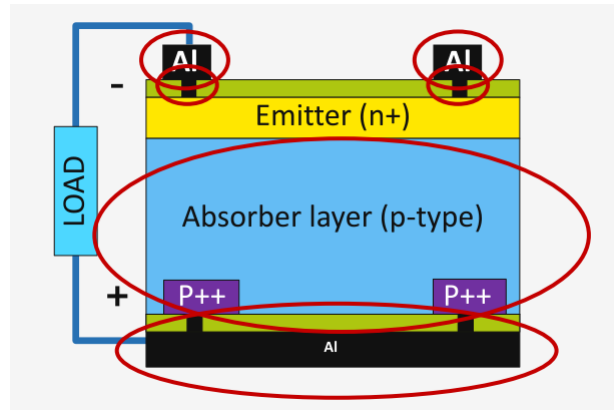


FIGURE 2.6 – les effets représentés par une résistance en série R_s .

1. Le courant à travers le matériau semi-conducteur de la jonction p-n (sur la figure : absorber layer (p-type)) peut rencontrer une résistance.
2. Les contacts métalliques (sur la figure en aluminium Al (région noircie)) peuvent présenter une certaine résistance électrique
3. Les interfaces (en noir sur la figure) entre le matériau semi-conducteur et les contacts métalliques peuvent agir aussi comme des résistances.

Tous ces effets de résistance électrique sont représentés dans le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire non idéale par une résistance R_s placée en série avec une source de courant et une diode de courant (voir figure (2.8)). Cette résistance en série R_s a pour effet de diminuer la tension électrique générée par la cellule solaire aux niveau des deux terminaux.

Résistance en parallèle (de shunt) :

La résistance en parallèle (résistance de shunt) est rajoutée dans le circuit équivalent d'une cellule solaire afin de tenir compte des défauts macroscopiques dans la cellule solaire, pouvant fournir un chemin alternatif pour le photo-courant produit par la cellule. Parmi ces défauts, on peut citer les fissures (en anglais : crack) qui peuvent avoir lieu dans les couches du semi-conducteur absorbant de la cellule. En plus, le photo-courant peut parfois emprunter chemin sur les bords de la cellule solaire (voir figure (2.7)). La résistance de shunt apparait dans le circuit électrique comme une résistance parallèle à la source de courant et la diode (voir figure (2.8)).

Si la valeur de la résistance de shunt était très faible le photo-courant généré par la cellule solaire préférerait se déplacer à travers la résistance de shunt (une grande partie), alors qu'une grande valeur de cette résistance indiquera qu'une partie infime du photo-courant serait perdue sur la shunt. On a intérêt donc à avoir de très petites valeurs de résistance en série R_s et de très grandes valeurs de résistance de shunt R_{sh} pour pouvoir approcher une cellule solaire idéale.

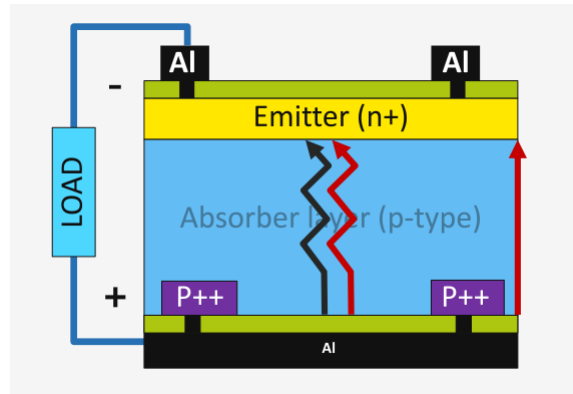


FIGURE 2.7 – Un chemin alternatif au déplacement des porteurs de charge du photo-courant.

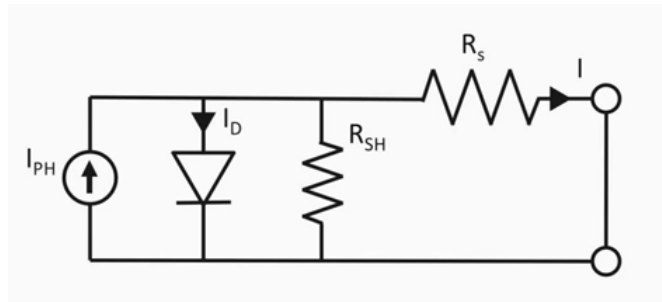


FIGURE 2.8 – schéma équivalent d'une cellule solaire.

2 Paramètres externes d'une cellule solaire idéale :

Il existe sur la courbe de la caractéristique $I - V$ d'une cellule photovoltaïque trois points essentiels [2, 3] :

2.1 Courant de court-circuit

Le premier point correspond à un court circuit de la cellule pour lequel $v = 0$ (l'anode a et la cathode k ont la même tension), appelé courant de court-circuit $i = I_{cc}$. En remplaçant ces deux conditions dans l'équation ci-dessus, on obtient

$$I_{cc} = i_p - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{e n V_T}} - 1 \right) - \frac{(R_s I_{cc})}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

En plus, la résistance R_s est très faible devant R_{sh} , ce qui permettra de faire les approximations suivantes :

$$\frac{(R_s I_{cc})}{R_{sh}} \approx 0 \quad \text{et} \quad e^{\frac{R_s I_{cc}}{e n V_T}} \approx 1 \quad (2.7)$$

On obtiendra donc

$$I_{cc} \approx i_p \quad (2.8)$$

Cela signifie que le courant de court-circuit est approximativement égal au photocourant, qui, lui, est proportionnel à l'intensité de l'éclairement solaire (insolation).

2.2 Tension à circuit ouvert

Le deuxième point sur la courbe correspond à un courant nul $i = 0$ (pas de charge entre l'anode et la cathode de la cellule), appelé tension de circuit ouvert $v = V_{co}$. En remplaçant ces deux conditions dans l'équation ci-dessus, on obtient

$$0 = i_p - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

Encore une fois, on doit remarquer que la valeur de R_{sh} est largement grande par rapport à V_{co} , ce qui nous permettra d'écrire :

$$0 = i_p - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

ou encore

$$V_{co} = nV_T \ln \left(\frac{i_p + I_0}{I_0} \right) \quad (2.11)$$

Il est utile de remarquer que la tension à circuit ouvert est reliée au photocourant i_p (éclairage) à travers une fonction logarithmique, contrairement au courant de court circuit qui, lui, est relié à i_p de manière linéaire.

2.3 Puissance maximum

Pour avoir le troisième point caractéristique de la courbe, on trace sur le même graphe la puissance délivrée par la cellule $p = i \cdot v$ en fonction de v . La courbe a évidemment un maximum noté p_m , qui correspond à la puissance maximum que peut générer la cellule photovoltaïque. Les points sur la courbe de la caractéristique $I - V$ qui correspondent à la valeur maximum de la puissance sont indiqués sur la figure et notés, respectivement, V_{pm} pour la tension pour une puissance maximum et I_{pm} le courant pour une puissance maximum. Ce point sur la caractéristique est appelé le point de fonctionnement à puissance maximum (peak power operating point) (voir figure (2.9)). Ce point est essentiel dans le choix du type de la cellule photovoltaïque, avec un intérêt particulier à ce que la cellule soit fonctionnelle à tout instant, sous charge, en ce point [5].

2.4 Facteur de remplissage(Fill factor)

On détermine le degré de performance d'une cellule photovoltaïque en calculant un paramètre défini comme le facteur de remplissage. Graphiquement, il est possible de calculer ce facteur de la manière suivante ([5], [6]) :

1. Sur la courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque on trace deux lignes droites, une perpendiculaire à l'axe des abscisses et passe par V_{oc} , l'autre parallèle à l'axe des abscisses et passe par I_{cc} . On obtient donc un rectangle de surface $V_{oc} I_{cc}$ (voir figure (2.10)). La valeur de cette surface en unités internationales représente la puissance théorique maximum (qui ne peut pas être atteinte) que peut générer la cellule photovoltaïque. Cette situation correspond à une cellule photovoltaïque fonctionnant soit comme une source de tension idéale, soit comme une source de courant idéale.

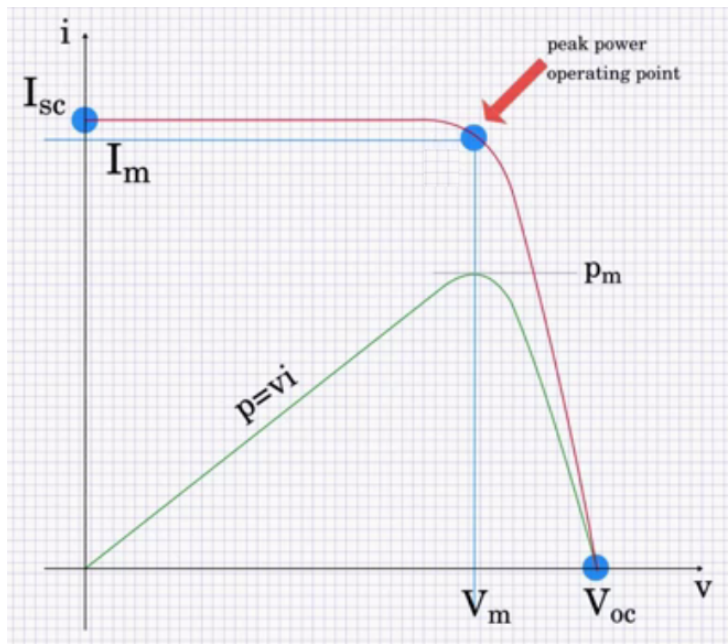


FIGURE 2.9 – Le point de fonctionnement à puissance maximum d’une cellule photovoltaïque [1].

2. Sur la courbe caractéristique d’une cellule photovoltaïque on trace deux lignes droites, une perpendiculaire à l’axe des abscisses et l’autre parallèle à l’axe des abscisses et passant toutes les deux par le point point de fonctionnement à puissance maximum. On obtient donc un deuxième rectangle de surface $V_{pm} I_{pm}$ (voir figure (2.10)). La différence entre les deux surfaces reflète bien le fait que la cellule photovoltaïque n’est ni source de tension idéale (car il existe une pente indiquant une résistance interne en série R_s), ni une source de courant idéale (car il existe une pente indiquant une résistance interne en parallèle R_{sh}))
3. Le facteur de remplissage est défini comme le rapport des deux surfaces, égal à

$$FF \equiv \frac{V_{pm} I_{pm}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.12)$$

Théoriquement, le facteur de remplissage prend des valeurs positives inférieures à 1 ($0 < FF < 1$). La cellule photovoltaïque est d’autant plus performante que son facteur de remplissage est élevé.

2.5 Rendement d’une cellule photovoltaïque :

Le rendement η d’une cellule photovoltaïque est défini comme le rapport entre la puissance reçue par la cellule du rayonnement soleil

$$FF \equiv \frac{V_{pm} I_{pm}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.13)$$

P_{in} et la puissance maximum délivrée par cette dernière, $P_{out} = P_m$:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{pm} I_{pm}}{P_{in}} \quad (2.14)$$

La puissance incidente sur la cellule (reçue du soleil) est donnée par :

$$P_{in} = E \cdot A \quad (2.15)$$

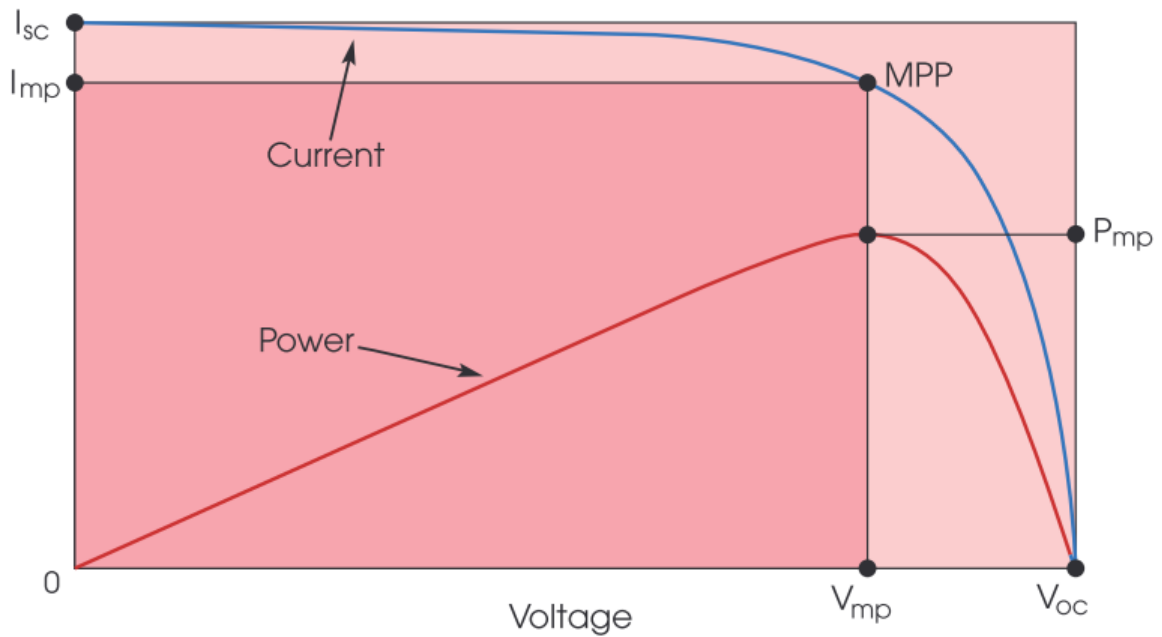


FIGURE 2.10 – Détermination graphique du facteur de remplissage (Fill factor) [3].

où E est l'éclairement solaire (mesuré en W/m^2) reçu sur terre par une surface plane A (mesurée en m^2). Le rendement η s'écrit donc comme :

$$\eta = \frac{V_{pm} I_{pm}}{E \cdot A} \quad (2.16)$$

Il est utile de remarquer que le rendement d'une cellule est plus grand que celui d'un module du même type de matériau, puisque dans un panneau solaire le rapport de la surface recueillant de la lumière à la surface totale du panneau est petit par rapport à celui correspondant à une seule cellule.

2.6 Effet de température :

Trois paramètres importants sont associés à une caractéristique $I-V$ d'une cellule photovoltaïque : Le courant de court-circuit I_{cc} , la tension à circuit ouvert V_{co} et la puissance maximum P_m .

Effet de température sur le courant de court circuit I_{cc} :

On a déjà vu que approximativement le courant I_{cc} est proportionnel au photocourant i_p créé par l'éclairement (insolation) venu de la lumière du soleil :

$$I_{cc} \approx i_p \quad (2.17)$$

En augmentant la température de la cellule, le photocourant augmente car, dans ce cas, l'énergie de gap (bande interdite) diminue, ce qui permet à plus d'électrons de valence à pouvoir aller vers la bande de conduction, ce qui, par conséquent, entrainera une augmentation du photocourant [5, 6].

Effet de température sur la tension à circuit ouvert V_{co} :

On rappelle que la tension à circuit ouvert V_{co} est donnée par la relation :

$$V_{co} = n V_T \ln \left(\frac{i_p + I_0}{I_0} \right) \quad (2.18)$$

où

$$I_0 = K T^m e^{-\frac{V_{GO}}{n V_T}} \quad (2.19)$$

et

$$V_T = \frac{k_B T}{q} = \frac{T}{11600} = 0.0258 \text{ eV} \quad \text{à } 300K \quad (2.20)$$

En considérant que $i_p \gg I_0$, l'équation ci-dessus devient

$$V_{co} = n V_T \ln \left(\frac{i_p}{I_0} \right) \quad (2.21)$$

La tension V_{co} dépend de trois grandeurs qui, à leur tour, dépendent de la température. La variation de V_{co} en fonction de la température est donnée par :

$$\frac{dV_{co}}{dT} = \frac{n V_T}{i_p} \frac{di_p}{dT} + \frac{V_{co} - (V_{GO} + m n V_T)}{T} \quad (2.22)$$

On peut négliger le premier terme de l'expression, puisque $i_p \gg V_T$, ce qui permet d'écrire

$$\frac{dV_{co}}{dT} = \frac{V_{co} - (V_{GO} + m n V_T)}{T} \quad (2.23)$$

Pour le silicium à température ambiante $T = 300K$, on donne les valeurs suivantes :

$$n = 2, \quad m = 1.5, \quad V_{GO} = 1.6 \text{ V}, \quad V_{co} = 0.6 \text{ V} \quad \text{et} \quad V_T = 0.0258 \text{ V}$$

En remplaçant dans l'expression ci-dessus on trouve

$$\frac{dV_{co}}{dT} = \frac{0.6 - (1.16 + 3.0 V_T)}{T} \quad (2.24)$$

A une température égale à $T = 300K$, on trouve

$$\frac{dV_{co}}{dT} = -2.1 \text{ mV/K} \quad (2.25)$$

Il est évident que la tension à circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque V_{co} diminue avec la température.

D'autre part, la puissance délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension qui a un coefficient de température négatif par le courant qui, lui, a un coefficient de température positif :

$$P = v i \quad (2.26)$$

Ce qui donne à la puissance (maximum) une variation décroissante avec la température (coefficient de température négatif).

Comme exemple d'application de l'effet de la température, on considère le cas d'un module photovoltaïque avec $I_{cc} = 8.62 A$ et $V_{co} = 36.30 V$ à température standard de $T = 25 C$. On donne le coefficient de température pour I_{cc} du module est $\alpha_I = +0.045 \%/K$, pour V_{co} est $\alpha_V = -0.34 \%/K$ et enfin pour P_m est $\alpha_P = -0.47 \%/K$ à température standard de $T = 25 C$ [1].

En effet, le coefficient de température de I_{cc} est défini comme

$$\alpha_I = \left(\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}|_{25C}} \times 100 \right) / \Delta T \quad (2.27)$$

avec ΔI_{cc} la variation de I_{cc} en fonction de la température, $I_{cc}|_{25C}$ le courant à circuit ouvert pour la température standard $25C$ et ΔT la variation de la température. De cette expression on peut tirer que

$$\Delta I_{cc} = \frac{\alpha_I \times I_{cc}|_{25C} \times \Delta T}{100} \quad (2.28)$$

Enfin, le courant de court circuit à une température $T = 40C$, $I_{cc}|_{40C}$, est égal à

$$I_{cc}|_{40C} = I_{cc}|_{25C} + \Delta I_{cc} \quad (2.29)$$

En remplaçant ΔI_{cc} par son expression ci-dessus on obtient

$$I_{cc}|_{40C} = I_{cc}|_{25C} + \frac{\alpha_I \times I_{cc}|_{25C} \times \Delta T}{100} \quad (2.30)$$

ou encore

$$I_{cc}|_{40C} = I_{cc}|_{25C} \left[1 + \frac{\alpha_I \times \Delta T}{100} \right] \quad (2.31)$$

En remplaçant par les données citées ci-dessus on trouve

$$I_{cc}|_{40C} = 8.99 \left[1 + \frac{0.045 \alpha_I \times (40 - 25)}{100} \right] = 8.9968 A \quad (2.32)$$

De la même manière, il est possible de trouver la valeur de la tension de circuit ouvert à $T = 40C$, $V_{co}|_{40C}$, en utilisant une formule similaire

$$V_{co}|_{40C} = V_{co}|_{25C} \left[1 + \frac{\alpha_V \times \Delta T}{100} \right] \quad (2.33)$$

En remplaçant par les données on trouve

$$V_{co}|_{40C} = 36.72 \left[1 + \frac{-0.35 \times (40 - 25)}{100} \right] = 34.847 V \quad (2.34)$$

La variation de la puissance maximum en fonction de la température peut être, elle aussi, calculée de la même manière, à savoir

$$P_m|_{40C} = P_m|_{25C} \left[1 + \frac{\alpha_P \times \Delta T}{100} \right] \quad (2.35)$$

En remplaçant par les données, on trouve

$$P_m|_{40C} = 225 \left[1 + \frac{-0.47 \times (40 - 25)}{100} \right] = 209.14 Wp \quad (2.36)$$

2.7 Simulation de l'effet de l'éclairement

Sur la figure (2.11) on donne un schéma de simulation sur Matlab de l'effet de l'éclairement sur la variation des courbes courant-tension et puissance-tension d'un panneau photovoltaïque. Trois valeurs d'éclairement sont simulées : La valeur 1000 W/m^2 (irradiation 1=1) correspond à la courbe en couleur jaune, la valeur 800 W/m^2 (irradiation 2=0.8) correspond à la courbe en couleur violette et la valeur 500 W/m^2 (irradiation 3=0.5) correspond à la courbe en couleur bleue. Les résultats de la simulation sont montrés sur la figure (2.12). L'effet de l'éclairement

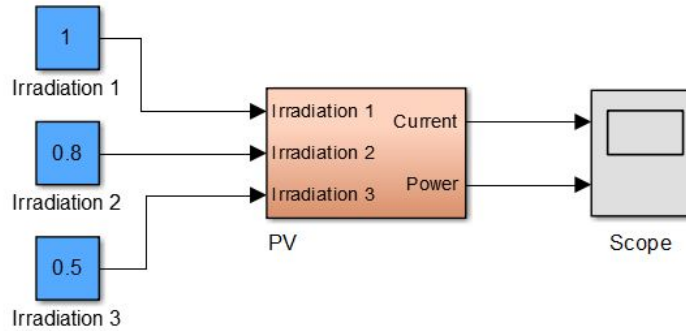


FIGURE 2.11 – Variation de la caractéristique $I - V$ et $P - V$ en fonction de l'éclairement.

est plus prononcé sur le courant de court-circuit I_{cc} , lequel augmente avec l'éclairement. D'autre part, la tension à circuit ouvert V_{co} est elle aussi affectée par le niveau d'éclairement, mais à moins degré (faible variation). Quant à la puissance générée par un panneau photovoltaïque, celle-ci augmente avec l'éclairement avec une augmentation de la puissance maximum.

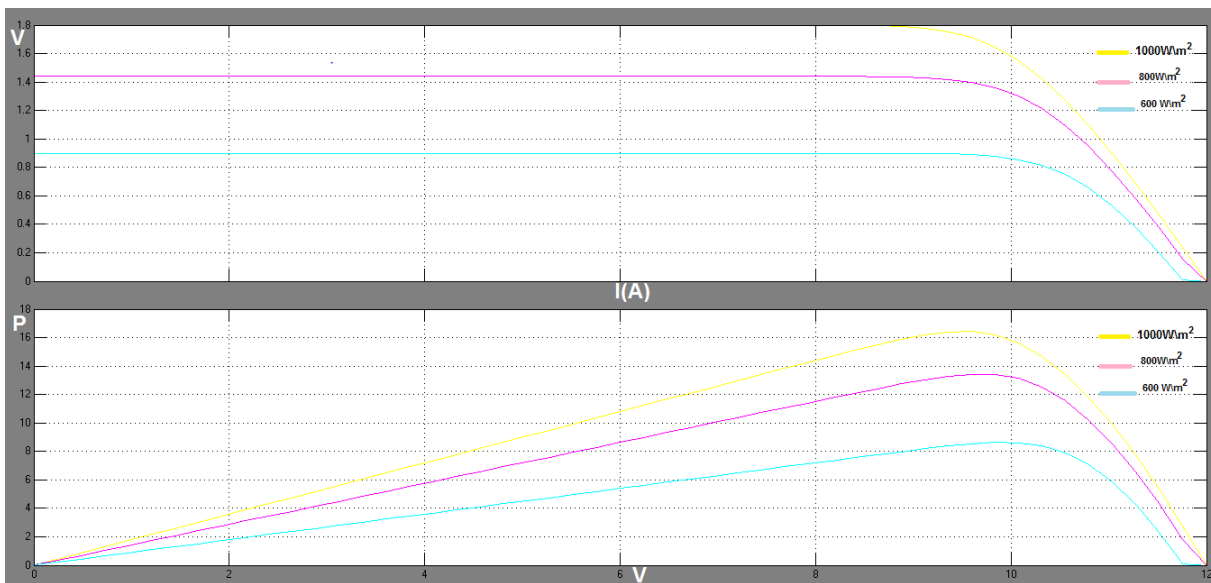


FIGURE 2.12 – Variation de la caractéristique $I - V$ et de la puissance en fonction de l'éclairement.

2.8 Simulation de l'effet de température

Sur la figure (2.13) on donne un schéma de simulation sur Matlab de l'effet de la température sur la variation des courbes courant-tension et puissance-tension d'un panneau photovoltaïque.

Trois valeurs de la température simulées : La valeur 30 C (Temp1=30) correspond à la courbe en couleur jaune, la valeur 50 C (Temp2=50) correspond à la courbe en couleur violette et la valeur 80 C (Temp3=80) correspond à la courbe en couleur bleue. Les résultats de la simulation

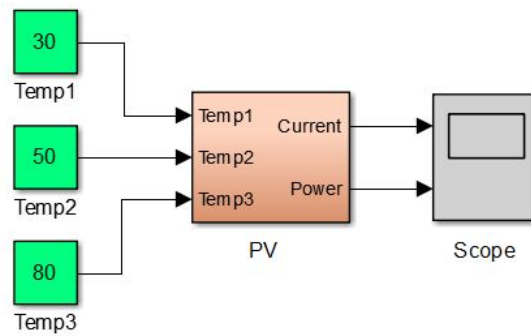


FIGURE 2.13 – Schéma de simulation sur Matlab de l'effet de la température sur la caractéristique d'un panneau photovoltaïque.

sont montrées sur la figure (2.14). L'effet de la température est plus prononcé sur la tension à circuit ouvert V_{co} , laquelle diminue avec la température. D'autre part, le courant à circuit ouvert I_{cc} est faiblement sensible à la variation de la température, quoique celui-ci augmente lorsque la température augmente. Quant à la puissance générée par un panneau photovoltaïque, celle-ci diminue avec la température avec une diminution de la puissance maximum. Ce constat ne s'applique pas à tous les types de panneaux solaires, puisque dans les panneaux solaires à base de silicium amorphe (a-Si), la puissance augmente avec la température. Pour plus de

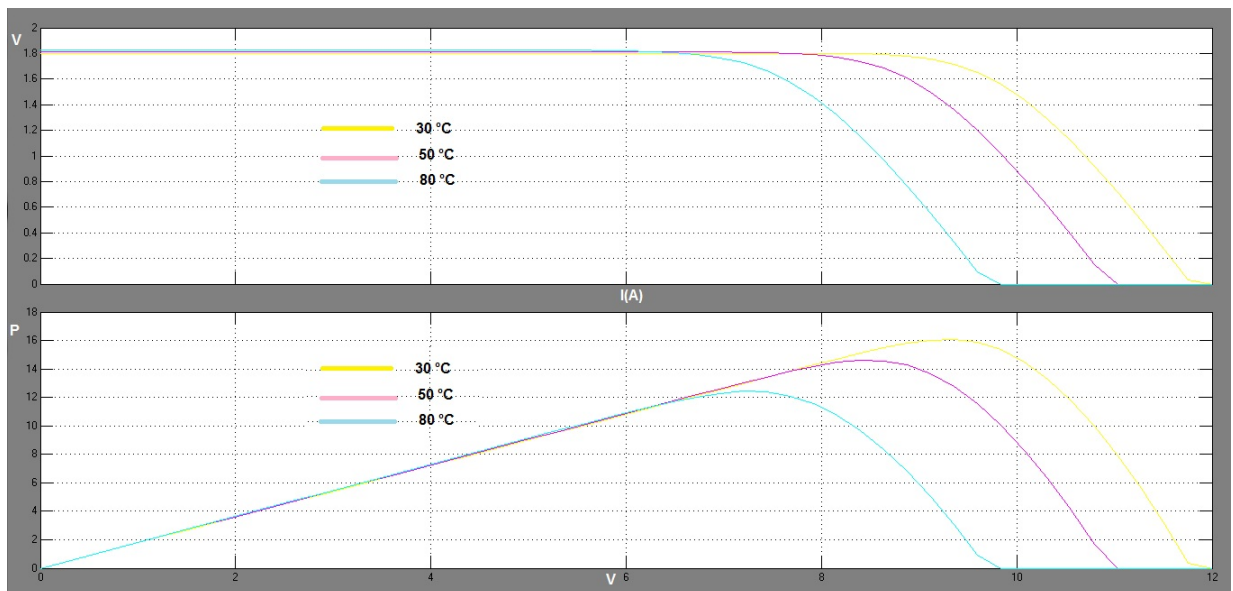


FIGURE 2.14 – Variation de la caractéristique $I - V$ et de la puissance en fonction de la température.

détails sur la simulation sous Matlab de la caractéristique $I - V$ d'un panneau photovoltaïque et l'effet des paramètres externes (éclairage, température, ...) sur la variation de la courbe, nous invitons le lecteur à consulter les références suivantes [7, 8].

3 Ligne de charge

La caractéristique $I - V$ d'une cellule photovoltaïque branchée à une charge variable R est tracée sur la figure (2.15). On trace une droite passant par l'origine et dont la pente est égale à $\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{1}{R}$. Toute droite passant par l'origine et croisant la caractéristique $I - V$ est appelée ligne de charge. Le point d'intersection entre la ligne de charge et la caractéristique $I - V$ est appelé point de fonctionnement [2]. Si la valeur de la charge R est très élevée (circuit ouvert),

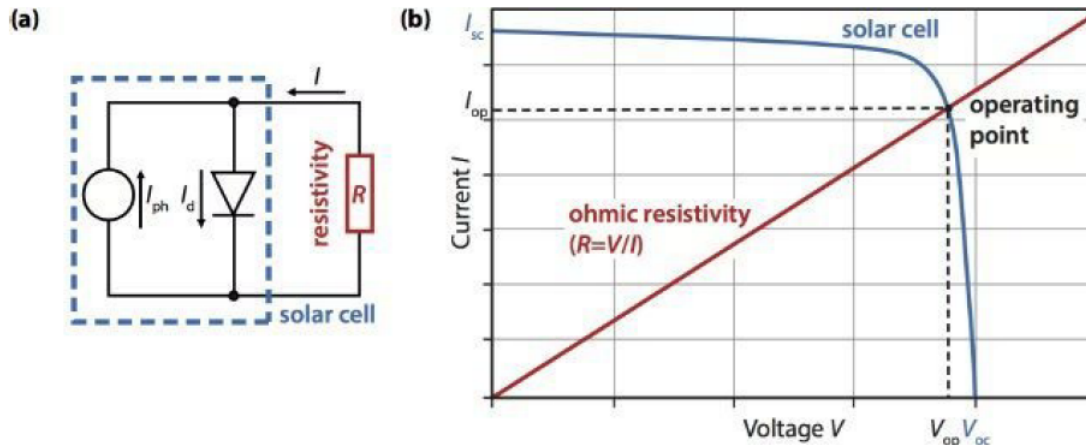


FIGURE 2.15 – Cellule photovoltaïque branchée à une charge R_0 et la ligne de charge correspondante.

la ligne de charge s'alignera avec l'axe des abscisses. Dans ce cas, le point de fonctionnement représente la tension à circuit ouvert V_{co} . D'autre part, si la résistance R est remplacée par un fil conducteur (court-circuit), la ligne de charge s'alignera avec l'axe des ordonnées. Le point de fonctionnement représentera le courant à circuit ouvert I_{cc} . Entre ces deux cas extrêmes, la pente de la ligne de charge prend des valeurs finies selon la valeur de R . Ce concept de ligne de charge permet de comprendre le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est branchée à une charge.

4 Branchement en série de cellules photovoltaïques identiques :

Prenons le cas de deux cellules photovoltaïques branchées en série, comme illustré sur la figure (2.16). L'ensemble des deux cellules est connecté à une charge supposée résistive. Les tensions respectives des cellules v_{T_1} et v_{T_2} s'additionnent :

$$v_T = v_{T_1} + v_{T_2} \quad (2.37)$$

Les courants i_{T_1} et i_{T_2} qui passent à travers ces deux cellules, respectivement, doivent être les mêmes ; on écrit donc :

$$i_T = i_{T_1} = i_{T_2} \quad (2.38)$$

On remplace des cellules par leurs circuits électriques équivalents (voir figure (2.16)). Sans perte de généralité, et pour mieux comprendre l'effet de branchement en série de deux cellules, il est possible de négliger les deux résistances R_s et R_{sh} . Le circuit électrique de l'ensemble des

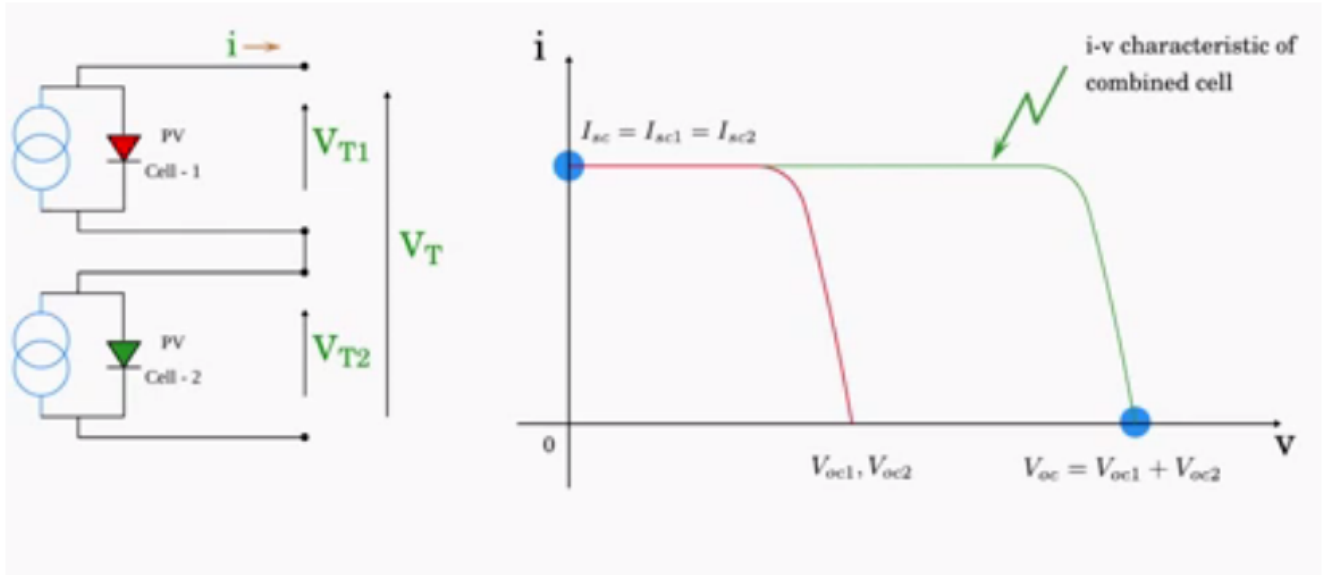


FIGURE 2.16 – Deux cellules photovoltaïques identiques branchées en série [1].

deux cellules photovoltaïques branchées en série est donné sur la figure (2.16). Puisque les deux cellules sont identiques, les courbes des caractéristiques $I - V_{T1}$ (pour la première cellule) et $I - V_{T2}$ (pour la deuxième cellule) sont, elles aussi, identiques.

En utilisant le concept de la ligne de charge pour les deux cas extrêmes, à savoir le courant à court circuit i_{cc} et la tension à circuit ouvert v_{co} , il est facile de constater que les tensions à circuit ouvert s'ajoutent

$$v_{co} = v_{co1} + v_{co2} \quad (2.39)$$

alors que le courant à circuit ouvert est le même que celui qui passe à travers chacune des cellules :

$$i_{cc} = i_{cc1} = i_{cc2} \quad (2.40)$$

5 Branchement en parallèle de cellules photovoltaïques identiques :

Le circuit électrique pour deux cellules photovoltaïques identiques branchées en parallèle et connectées à une charge R_0 est illustré sur la figure (2.17). Les deux cellules, supposées idéales, sont remplacées par leurs circuits électriques équivalents. Dans ce cas les contraintes sur les courants passant à travers les cellules et les tensions aux bornes de celles-ci sont les suivantes :

$$i_T = i_{T1} + i_{T2} \quad (2.41)$$

et

$$v_T = v_{T1} = v_{T2} \quad (2.42)$$

Puisque les deux cellules sont identiques, les courbes des caractéristiques $I - V_{T1}$ (pour la première cellule) et $I - V_{T2}$ (pour la deuxième cellule) sont, elles aussi, identiques. Dans le cas d'un circuit ouvert ($R_0 = \infty$), la tension v_{co} est la même pour les deux cellules :

$$v_{co} = v_{co1} = v_{co2} \quad (2.43)$$

alors qu'un court-circuit ($R_0 = 0$) fait que les deux courants i_{cc1} et i_{cc2} s'ajoutent :

$$i_{cc} = i_{cc1} + i_{cc2} \quad (2.44)$$

Entre ces deux cas extrêmes et pour une charge finie non nulle, la ligne de charge a une pente de valeur finie, comme illustré sur la figure (2.17). Le courant i_T au point de fonctionnement de l'ensemble est la somme des courants i_1 et i_2 émanant chacun d'une cellule, respectivement, alors que la tension v_T est donnée par la distance entre la verticale passant par le point de fonctionnement et l'axe des ordonnées (axe des courants).

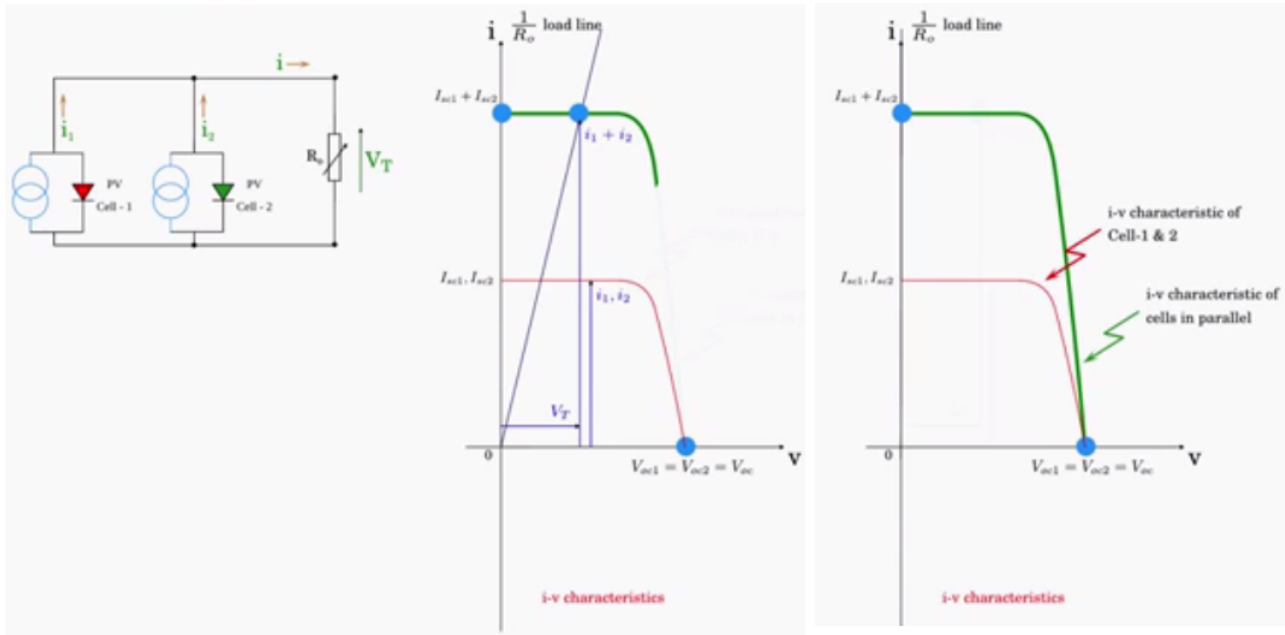


FIGURE 2.17 – Caractéristique $I - V$ d'un ensemble de deux cellules photovoltaïques identiques branchées en parallèle [1].

En balayant entièrement l'intervalle des valeurs que peut prendre la charge R_0 , on obtient la courbe qui relie les deux points de fonctionnement extrêmes i_{cc} et v_{co} , qui n'est autre que la courbe caractéristique $I - V_T$ de l'ensemble des deux cellules identiques branchées en parallèle (voir figure (2.17)).

Les cellules photovoltaïques, même si elles sont fabriquées dans la même usine, en suivant la même procédure, n'auront jamais exactement la même courbe caractéristique IV . En plus, les cellules photovoltaïques montées sur des modules et placées à des endroits entourés par des bâtiments, des arbres ou autres, peuvent ne pas recevoir la même quantité d'éclairage, et certaines seront partiellement ou complètement ombrées. Par conséquent, le branchement en série de deux cellules photovoltaïques non identiques risque d'endommager l'une des cellules qui, sous certaines conditions, se comportera comme un dissipateur. Il est possible de protéger cette dernière en branchant une diode (bypass) à polarisation directe en parallèle avec celle-ci.

Dans le cas de deux cellules photovoltaïques non identiques branchées en parallèle, il est possible dans certaines conditions que l'une des cellules fonctionne comme un dissipateur ; ce qui fait augmenter sa température et le rendement de l'ensemble diminue.

Pour éviter ce fonctionnement à cette cellule, on doit faire en sorte qu'un courant électrique ne circule pas vers la cellule ; ceci est effectué en plaçant une diode (anti-retour) en série avec la cellule.

6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude théorique (équations du courant et de la tension, branchement de plusieurs cellules) de la caractéristique courant-tension et l'influence de différents paramètres externe (températures, irradiation, ombrage.) sur la courbe I-V. Des résultats de simulation sur Matlab sont présentées. Dans le chapitre suivant, on présente deux méthodes de mesure de la caractéristique I-V.

Bibliographie

- [1] Certaines figures du chapitre et des passages de calcul sont prises d'un cours vidéo fait par L. Umanand, Design of photovoltaic system, Dept. of electronic system engineering, Indian institute of science, bangalore (India). Voir (https://www.youtube.com/channel/UC5lfb08DKO5JYn_wsd6gu1g/videos)
- [2] Arno HM Smets et al., "Solar energy, The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems", UIT Cambridge, (2015)
- [3] Paul A. Lynn, "Electricity from Sunlight : An Introduction to Photovoltaics", Wiley (2010)
- [4] Robert Foster, Majid Ghassemi, Alma Cota, "SOLAR ENERGY, Renewable Energy and the Environment", CRC Press (2010)
- [5] Richard H, Bube, "Photovoltaic Materials", Imperial College Press (1998)
- [6] Anne Labouret et Michel Villoz, " Energie solaire photovoltaïque", Dunod (2003)
- [7] Habbati Bellia et al., A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics (2014) 3, 53–61.
- [8] Jobeda J Khanam, Simon Y Foo, Modeling of a photovoltaic array in MATLAB simulink and maximum power point tracking using neural network, Electric Electron Tech Open Acc J. 2018 ;2(2) :4046. DOI : 10.15406/eetoaj.2018.02.00019

Chapitre 3

Méthodes de mesure de la caractéristique I-V

1 Introduction :

L'efficacité d'un dispositif photovoltaïque est définie comme la puissance maximale générée (P_m) divisée par le produit de l'éclairement énergétique en entrée et de sa surface. Cette efficacité de conversion dépend de nombreux facteurs, tels que l'irradiation et la température. Les processus de fabrication entraînent généralement des différences de paramètres électriques, même dans des cellules du même type. De plus, si l'on prend en compte les pertes dues aux connexions de cellules dans un module, il est difficile de trouver deux modules photovoltaïques identiques. Par conséquent, seule la mesure expérimentale de la courbe I-V nous permet de connaître avec précision les paramètres électriques d'un dispositif photovoltaïque. Cette mesure fournit des informations très pertinentes pour la conception, l'installation et la maintenance des systèmes PV. Compte tenu du grand nombre de méthodes de mesure I-V, leur étude serait très utile aux chercheurs en systèmes PV.

2 Différentes méthodes pour tracer la courbe IV

Le principe de base pour mesurer la courbe I-V est basé sur le contrôle du courant fourni par le module photovoltaïque entre le point de courant nul (V_{co}) au point de court-circuit (I_{cc}). Il existe différentes méthodes pour effectuer cette tâche. Dans ce qui suit, deux méthodes de deux mesures seront exposées, à savoir :

2.1 Méthode de mesure à l'aide d'une résistance variable

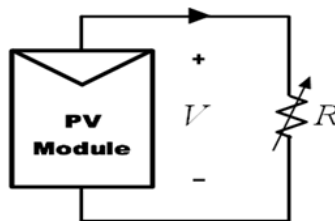


FIGURE 3.1 – Schéma de résistance variable.

C'est une méthode simple pour mesurer la courbe IV d'un module photovoltaïque. Elle

consiste à utiliser une résistance variable R , comme indiqué sur la figure (3.1). La valeur de la résistance R varie par paliers de zéro à l'infini afin de capturer les points de la courbe $I - V$ de court-circuit à circuit ouvert, en mesurant la tension et le courant à chaque étape. D'ailleurs, cette méthode a été utilisée durant les séances de travaux pratiques d'énergie renouvelables à notre école. Elle est uniquement applicable aux modules de faible puissance, car des résistances plus puissantes sont difficilement disponibles. Les résistances de charge ne sont pas recommandées pour la caractérisation des modules photovoltaïques, car le courant de court-circuit (I_{cc}) n'est jamais exactement atteint et les caractéristiques de polarisation inverse ne peuvent pas être déterminées. Cependant, l'utilisation de résistances de charge pour évaluer les performances d'un module solaire peut fournir un moyen peu coûteux pour évaluer les performances. Selon les auteurs de [1], la résistance de charge est augmentée manuellement par étapes. À chaque étape, la tension et le courant (en fait la tension aux bornes d'une résistance de dérivation) sont détectés à l'aide d'une paire de multimètres numériques à main. Il est rapporté dans [2] que le changement manuel de la résistance de charge rend le processus très lent, ce qui permet de modifier le rayonnement solaire et les conditions thermiques pendant la mesure. Le système présenté dans [3] et [4] utilise un ensemble de résistances en charge. Un ensemble de relais, contrôlés par ordinateur, est utilisé pour sélectionner la combinaison de résistances afin de réaliser une charge résistive spécifique. Les résistances sont choisies pour obtenir une bonne répartition des points autour du "genou" de la courbe. Deux convertisseurs analogique numérique de la carte informatique sont utilisés pour mesurer chaque paire I-V. Avec cette approche, le fonctionnement manuel sur la résistance est évité et le temps d'acquisition est amélioré.

Tension(V)	Courant(A)	Puissance(W)
0	3.91	0
33.6	3.12	104.8
34.5	2.73	94.1
35.1	2.35	82.1
35.8	1.96	70.1
36.4	1.57	57.1
36.2	1.63	59
36.9	1.21	44.6
37.5	0.79	29.6
38.2	0.38	14.5
39.2	0	0

TABLE 3.1 – Relevés des mesures effectués avec le panneau solaire pour $E=961 \text{ W/m}^2$, Site : ESSAT

Des mesures de la caractéristique $I - V$ et $P - V$ d'un panneau solaire (Model JW-G2100 à base de silicium monocristallin : $V_{co} = 45.9 \text{ V}$, $I_{cc} = 6.0 \text{ A}$, $P_{max} = 210 \text{ W}$), que nous avons effectuées nous-même au site de l'ESSAT (École des sciences appliquées de Tlemcen) durant une séance de travaux pratiques (énergies renouvelables) qui a eu lieu le 08 octobre 2017 à 15 :30 sous un ciel dégagé avec un éclairement $E = 961 \text{ W/m}^2$, sont reportées sur le tableau (3.1). Afin de varier la charge sur une plage de valeurs plus ou moins étendue on a utilisé des lampes (pour véhicules) à faible puissance branchées en série et en parallèle. Les mesures obtenues à l'aide d'un multimètre sont utilisées pour tracer les deux courbes $I(V)$ (courant-tension) et $P(V)$ (puissance-tension) sur la figure (3.2). La nature de la charge ne nous a pas permis d'évaluer la caractéristique $I - V$ ($P - V$) pour de faibles tensions. En plus, la courbe ne nous permet pas de nous prononcer sur la valeur exacte de la puissance maximum du panneau ; le nombre de

points de mesure étant limité. La durée des mesures étant relativement longue, les conditions de mesures (éclairage, ombrage, température) ne peuvent pas restées constantes.

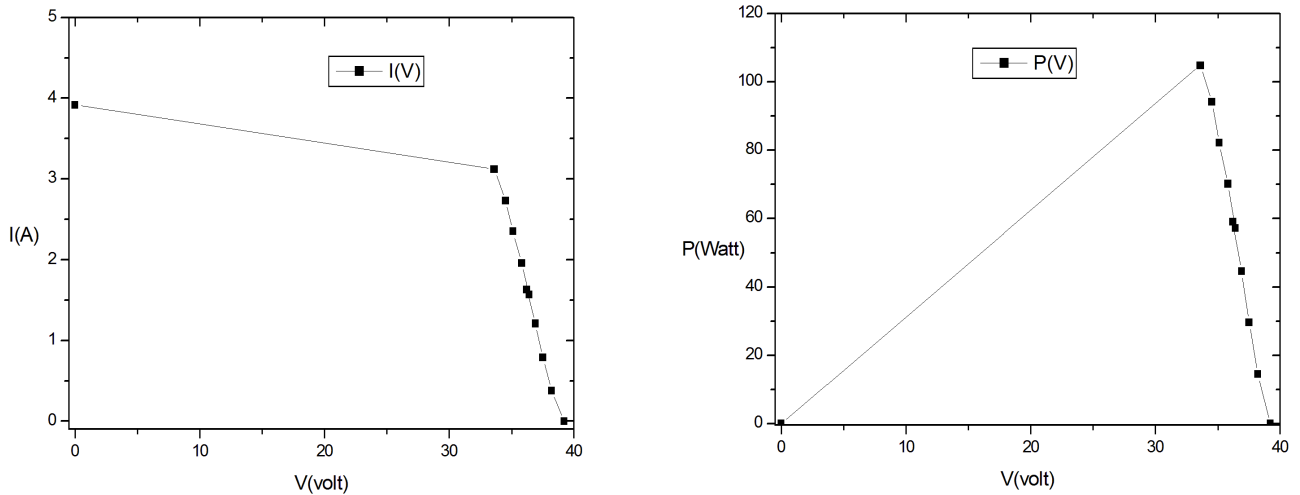


FIGURE 3.2 – Courbes $I(V)$ (courant-tension) et $P(V)$ (puissance-tension) d'un panneau solaire (Model JW-G2100).

2.2 Charge capacitive

La deuxième méthode de mesure est basée sur la polarisation du module par un grand condensateur ; qui est chargé pendant que le premier passe de court-circuit à circuit ouvert. La figure (3.3) montre un circuit schématique utilisant ce principe.

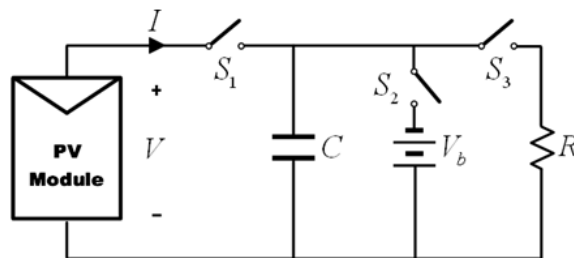


FIGURE 3.3 – Schéma d'une charge capacitive.

Au début de la mesure, le condensateur est court-circuité et lorsque le commutateur S_3 est ouvert et que le S_1 est fermé, le chargement commence. À mesure que la charge du condensateur augmente, le courant diminue et la tension augmente. Lorsque la charge est terminée, le courant fourni par le module devient nul et la condition de circuit ouvert est atteinte. Au lieu de commencer en court-circuit, nous pourrions commencer avec S_2 fermé, de sorte que le condensateur est chargé initialement à une tension négative et que la courbe I-V croise l'axe du courant pour obtenir I_{cc} . Pour obtenir une courbe I-V fiable avec la méthode du condensateur, des condensateurs de haute qualité (faible résistance série équivalente) avec de petites pertes sont nécessaires. De plus, les trois commutateurs doivent être activés avec la séquence appropriée et la décharge préalable du condensateur est nécessaire pour lancer une nouvelle mesure. La reproduction de la courbe I-V n'étant pas cyclique, une visualisation directe ou une reproduction

partielle de la courbe n'est pas possible. Selon les auteurs de [5], la tension et le courant sont contrôlés au moyen d'une carte informatique. La mesure commence lorsque la carte envoie un signal de déclenchement au commutateur qui connecte le condensateur à la cellule. Les auteurs de [6] décrivent une charge capacitive portable à base de transistors bipolaires à porte isolée (IGBT), destinée aux réseaux photovoltaïques dans des conditions de fonctionnement réelles. Les commutateurs sont mis en œuvre à l'aide d'un IGBT et le condensateur est réalisé avec un agencement parallèle de condensateurs et de résistances. L'auteur de [2] rapporte que la taille du condensateur doit être directement proportionnelle à I_{cc} et indirectement proportionnelle à V_{co} . En outre, plus la vitesse du système de mesure est élevée, plus la taille du condensateur requis sera petite.

3 Présentation d'un projet pour tracer la caractéristique I-V basé sur le principe d'une charge capacitive

C'est un traceur de la courbe IV des panneaux photovoltaïque (PV) solaires (modules), qui a été utilisé pour les étudiants de Master à l'université de Stanford depuis 2017 [7]. La réalisation de ce dispositif est à même de simplifier la tâche de mesure de la caractéristique $I - V$ par les étudiants de notre école et même ceux des universités qui s'intéressent au domaine des panneaux photovoltaïques (PV). Malheureusement, le manque de composants bien spécifiques sur le marché national a fait que le projet a été retardé.

Proprement dit, ce dispositif peut être très utile pour ceux qui veulent se renseigner sur les effets de l'irradiation, la température, et surtout l'effet de l'ombrage sur la production d'énergie d'un seul module PV. Bien que le logiciel supporte calibration, il n'y a aucune garantie quant à la compatibilité de l'appareil en terme de précision et/ou exactitude. Il est utile de remarquer que le projet matériels et logiciels (software et hardware) sont des sources libres (open source) [8, 9].

3.1 Introduction

La courbe IV est un graphique du courant en fonction de la tension pour diverses valeurs de charge pilotées par le panneau photovoltaïque. Sur la figure (3.4), on donne la courbe IV typique d'un panneau PV non ombré.

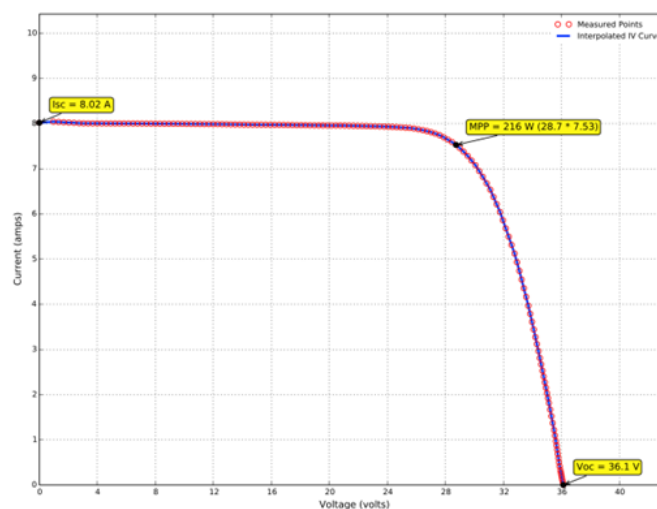


FIGURE 3.4 – Courbe IV typique d'un module PV non ombré.

À une extrémité, on trouve le courant de court-circuit (I_{cc}), qui est le courant fourni par le PV lorsque les conducteurs sont directement connectés les uns aux autres (auquel cas la charge est de 0 ohm et la tension de 0 volt). À l'autre extrémité se trouve la tension à vide (V_{co}), qui correspond à la tension aux bornes du PV lorsqu'il n'y a pas de connexion entre eux (auquel cas la résistance de charge est infinie et le courant est 0 ampères). Entre ces deux points se trouve une courbe qui dépend de la charge (résistance) connectée entre les terminaux PV. Comme on l'a vu plus haut, la courbe IV typique est une ligne assez horizontale légèrement décroissante de I_{cc} lorsque la tension augmente, puis diminue fortement lorsque la tension se rapproche de V_{co} . La puissance fournie est le produit de courant et de tension. Aucune alimentation n'est fournie lorsque le circuit est en court-circuit (puisque la tension est égale à 0) et aucune l'alimentation est délivrée lorsque le circuit est ouvert (puisque le courant est à 0). La puissance maximale est livrée pour la valeur de charge au "genou" de la courbe.

L'un des objectifs de la génération d'une courbe IV est de déterminer la puissance maximale qu'un panneau peut générer dans un ensemble de conditions (telles que l'irradiation et la température). Tracer les courbes IV pour différentes conditions, y compris l'ombrage est un important exercice dans les cours sur les principes de fonctionnement du photovoltaïque.

La génération manuelle d'une courbe IV est un processus assez fastidieux (bien qu'éducatif). D'abord les valeurs de I_{cc} et de V_{co} sont mesurées avec un multimètre. Ensuite, le panneau photovoltaïque est connecté à une charge variable. Cela peut être un banque d'ampoules pouvant être commutées dans ou hors du circuit. Ou ce peut être un rhéostat lourd. La valeur de charge est modifiée de manière incrémentielle et à chaque point, le compteur est utilisé pour mesurer le courant et tension, qui sont enregistrés manuellement. Ensuite, les valeurs sont saisies dans une feuille de calcul et tracées la courbe IV. Effectuer ce processus manuellement au moins une fois est un bon moyen d'avoir une idée réelle de ce qui se passe. Mais la procédure prend beaucoup de temps, et est entachée d'erreurs humaines avec des conditions changeantes, etc. La première génération Traceur IV utilise le chauffage par immersion des bobines pour les charges et un mono-carte Raspberry Pi pour contrôler les relais qui commutent les charges dans et hors du circuit. Il possède un voltmètre et un ampèremètre intégrés qui sont lus par le logiciel à chaque valeur de charge. Les résultats sont écrits sur une clé USB pour une visualisation ultérieure.

La dernière version de Traceur IV est une conception complètement différente. Il utilise un condensateur comme charge. Un condensateur déchargé «ressemble» à un court-circuit (résistance nulle). Mais à mesure qu'il se charge, son apparente résistance augmente. Lorsqu'il est complètement chargé, il "ressemble" à un circuit ouvert (résistance infinie). Un module PV typique sous plein soleil chargera le condensateur jusqu'à la tension V_{co} en quelques milli-secondes. Un Arduino UNO est utilisé pour contrôler un seul relais qui bascule entre la charge et le condensateur à connecter le module PV. Après avoir connecté le module PV au circuit, la carte Arduino lit très rapidement les valeurs du voltmètre et de l'ampèremètre pour enregistrer des points sur la courbe IV lorsque le condensateur se charge. Le traceur IV nécessite la connexion d'un ordinateur portable Mac ou Windows à l'aide d'un câble USB avec la carte Arduino pour l'alimentation et d'autres informations passent par le câble USB. Un programme d'application fonctionnant sur le laptop communique avec l'Arduino via le câble USB et fournit l'interface à l'utilisateur.

Bien que le traceur IV ne soit pas aussi facile à assimiler à la méthode manuelle que la version originale, il présente de nombreux avantages :

1. Résultats en temps réel
2. Résolution bien meilleure (> 100 points par courbe contre environ 20)
3. Temps beaucoup plus court pour changer de courbe (milli-secondes vs secondes)
4. Taille beaucoup plus petite et poids réduit

5. Interface utilisateur simplifiée
6. Conception plus simple, plus fiable et réparable
7. Connectivité plus flexible (bornes)
8. Coût de construction beaucoup moins élevé (50 \$ par rapport à 330 \$)
9. Beaucoup moins de temps et d'efforts pour construire

3.2 Schéma de simulation de Traceur IV

Les deux figures (3.5) et (3.6) présentent les fichiers de conception Fritzing du module Traceur IV. Sur les images de la vue schématique (Traceur IV), il est toujours utile de regarder le schéma créé avec l'outil Fritzing pour la conception de la cellule, car il inclut les composants externes (Arduino, relais, reliures) et montre amplificateurs opérationnels internes dans le circuit intégré TLV2462. Toute personne possédant un niveau modéré de connaissances en électronique devrait pouvoir la comprendre sans autre explication.

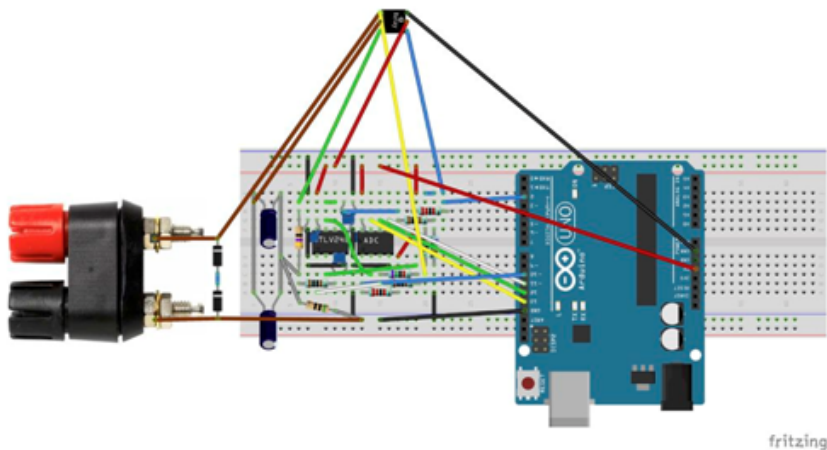


FIGURE 3.5 – Vue schématique de Traceur IV.

3.3 Visite visuelle du matériel

Port USB

Sur le devant de Traceur IV se trouve un seul port / prise USB «Type B». C'est ainsi que le Traceur IV se connecte à l'ordinateur portable à la fois pour l'alimentation et la communication.

Bornes de connexion / câbles de connexion PV

Sur le côté inférieur gauche, à l'arrière, se trouvent les bornes de reliure Rouge et Noir . La borne Rouge se connecte à le câble de module positif (PV +) et la borne NOIRE se connecte au câble de module négatif (PV-). Les câbles de connexion PV sont insérés dans les trous des bornes à l'arrière et les boutons resserré. Assurez-vous que le câble de connexion avec le connecteur femelle MC4 est connecté au Reliure en Rouge et le câble avec le connecteur mâle MC4 est connecté au Reliure en NOIRE. Les bornes permettent la flexibilité d'utiliser des câbles de connexion PV de différentes longueurs, mais vous devez faire attention à bien respecter la polarité.

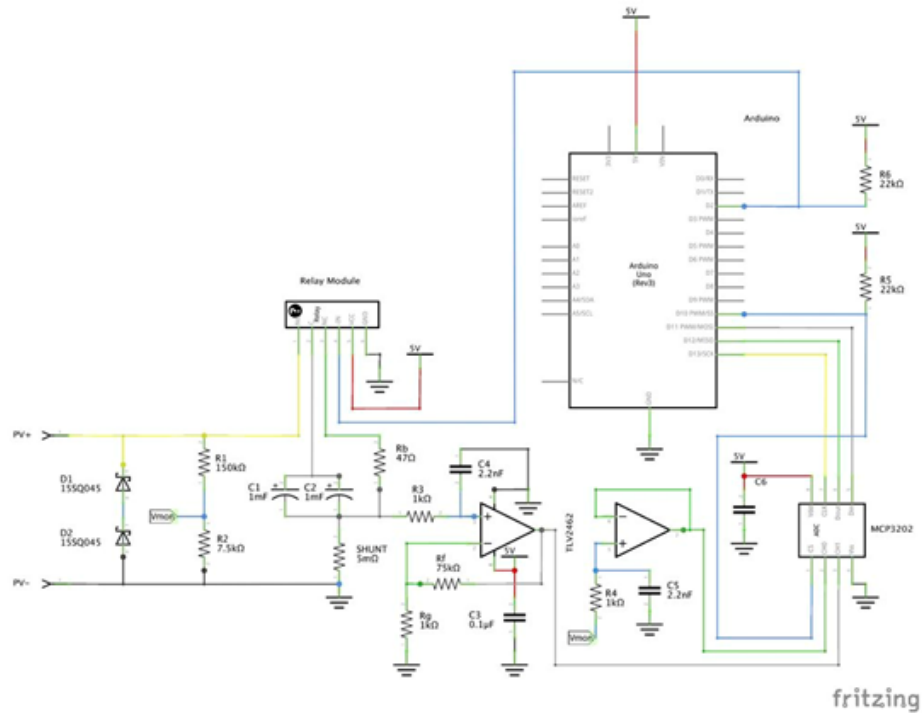


FIGURE 3.6 – Schéma électronique de Traceur IV.

3.4 Circuit imprimé avec condensateur de charge

La carte blanche sur le côté avec les bornes de fixation (voir figure (3.9)) contient les éléments suivants :

1. Capacité de charge 2000 F (deux condensateurs 1000 F en parallèle)
2. Résistance de charge.
3. Un relais qui connecte cette résistance aux condensateurs.
4. Un convertisseur analogique-numérique (ADC) pour voltmètre et ampèremètre
5. Résistance shunt (à l'arrière). Ceci est utilisé pour l'ampèremètre. C'est une précision faible résistance (0.005Ω) résistance qui est dans le circuit de charge. La tension aux bornes est mesurée par l'ADC (après amplification par le circuit ampli op).
6. Circuit diviseur de tension permettant de réduire la tension PV dans la plage prise en charge par le CAN
7. Circuit de l'amplificateur opérationnel pour ajuster la tension à travers la résistance de shunt d'ampèremètre dans la plage prise en charge par l'ADC.

3.5 Arduino UNO

Arduino UNO est la carte (avec le port USB) montée au bas du boîtier (voir figure (3.10)). Lorsque demandé par l'ordinateur portable, il exécute l'algorithme pour balancer la courbe IV. Cet algorithme consiste à activer le relais et à lecture répétée des valeurs de l'ampèremètre et du voltmètre de l'ADC pendant le chargement du condensateur. Lorsque tous les points ont été mesurés, les valeurs sont téléchargées sur l'ordinateur portable.

3. PRÉSENTATION D'UN PROJET POUR TRACER LA CARACTÉRISTIQUE I-V3 BASÉ SUR LE PRINCIPE D'UNE CHARGE CAPACITIVE

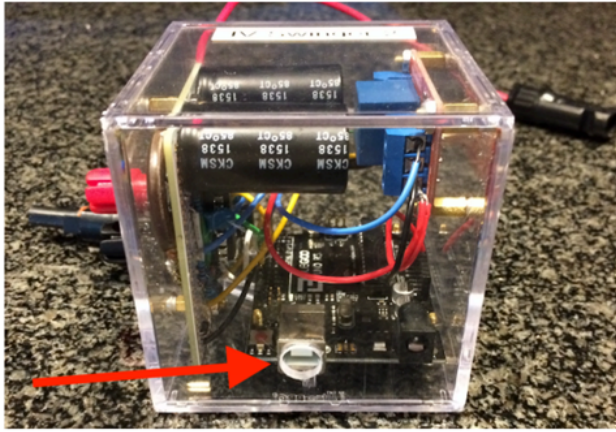


FIGURE 3.7 – Port USB de la carte.



FIGURE 3.8 – Bornes de reliure et câbles PV.

3.6 Module relais

Le module est commandé par la carte Arduino pour commuter la charge du condensateur. Un relais est un commutateur physique actionné par un électroaimant (voir figure (3.11)). Vous pouvez l'entendre «cliquer» lorsqu'il bascule. Les deux clics (représentant le début et la fin du IV courbe) sera très proche les uns des autres dans la plupart des cas («clic-clic»). Mais dans les cas de soleil bas, il peut y avoir plusieurs secondes entre les deux clics, car la charge du condensateur prend beaucoup plus de temps à se charger jusqu'à la tension V_{co} .

4 Utilisation du logiciel IV Swinger 2

Le logiciel IV Swinger 2 fonctionne sur un ordinateur portable Mac ou Windows. S'il est déjà installé, vous pouvez le reconnaître à partir de son icône illustré sur la figure (3.12).

Sur un Mac, le programme se trouve dans le dossier Applications, alors que sous Windows, on peut le chercher dans la rubrique "programmes" (par exemple, le dossier «Program Files (x86)»). L'application est à usage libre et est disponible sur le net.

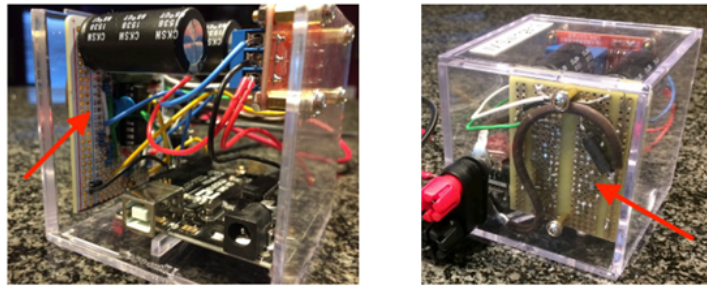


FIGURE 3.9 – Circuit imprimé avec condensateur de charge.

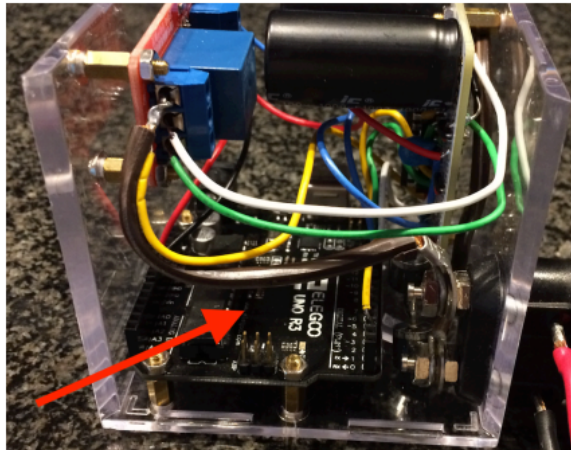


FIGURE 3.10 – Arduino UNO.

4.1 Fenêtre principale

Lorsque l'application est ouverte pour la première fois, un «écran de démarrage» avec le logo et le titre est affiché. L'annoté L'image de la figure (3.13) ci-dessus provient de la version windows. Boutons de commande de fenêtre standard et le fait que Windows inclut les menus de la fenêtre elle-même. Dans l'ordre d'importance, les éléments annotés sont les suivants :

4.2 Bouton Swing !

Ce bouton est utilisé pour lancer le traçage d'une courbe IV. Avant le matériel Traceur IV est connecté, le bouton ressemble à ceci :

Vous ne pouvez pas appuyer sur le bouton tant que le matériel n'est pas connecté et que le bouton ne change pas d'aspect : Vous pouvez appuyer sur le bouton en cliquant dessus avec la souris ou en appuyant sur la touche Entrée.

4.3 Bouton de l'assistant de résultats

Cliquez sur le bouton "Results wizard" pour ouvrir l'Assistant de résultats, qui est une boîte de dialogue offrant des options pour :

1. Voir les résultats des courbes précédentes
2. Combiner plusieurs courbes sur le même tracé (superpositions)
3. Modifier le titre et l'apparence des courbes et des superpositions
4. Copiez-les sur une clé USB (ou ailleurs)

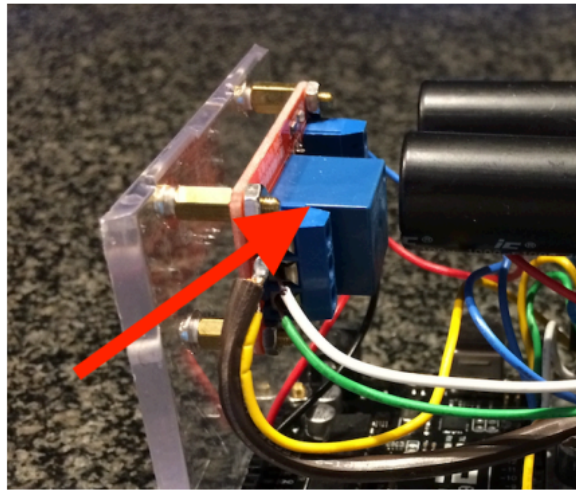


FIGURE 3.11 – Module relais.

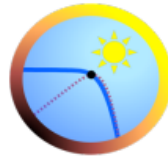


FIGURE 3.12 – Icône du logiciel Swinger.

5. Voir le PDF

L'assistant de résultats n'exige pas que le matériel soit connecté. En fait, il peut être exécuté sur des résultats qui ont été collectés par un autre ordinateur et copiés sur une clé USB.

4.4 Bouton Préférences

Cliquez sur ce bouton pour ouvrir la boîte de dialogue Préférences, qui propose des options pour :

1. Modifier l'apparence du graphique tracé (taille de la police, taille de la ligne, etc.)
2. Changer le comportement de l'option de bouclage
3. Changer le comportement du code Arduino de bas niveau

4.5 Bouton d'alimentation de tracé

Cochez cette case pour afficher la courbe de puissance superposée à la courbe IV. La figure (3.14) ci-dessus est un exemple. Le graphique a maintenant un axe vertical secondaire à droite indiquant puissance en watts. Cet axe est mis à l'échelle de sorte que la courbe de puissance (ligne rouge pointillée) coupe la courbe IV à le point d'alimentation maximal (MPP).

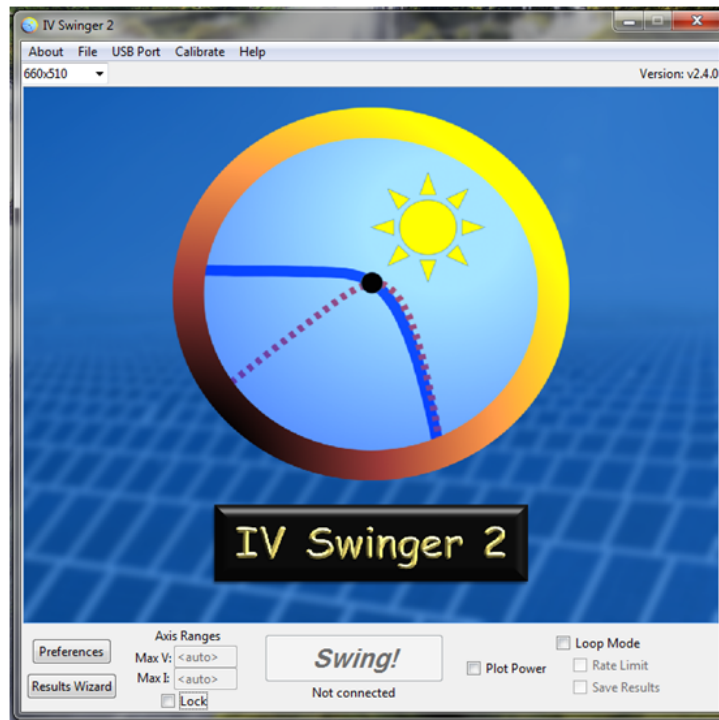
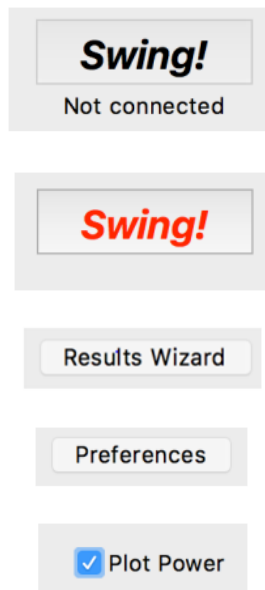


FIGURE 3.13 – Fenêtre principale du logiciel Swinger.



5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter deux méthodes différentes pour l'obtention de la caractéristique IV. La première méthode, utilisée actuellement dans notre école, est basée sur le principe de la résistance variable. La deuxième méthode est basée sur le principe d'une charge capacitive. Il serait intéressant qu'un dispositif électronique utilisant une charge capacitive pour la mesure de la caractéristique I-V soit monté à l'école.

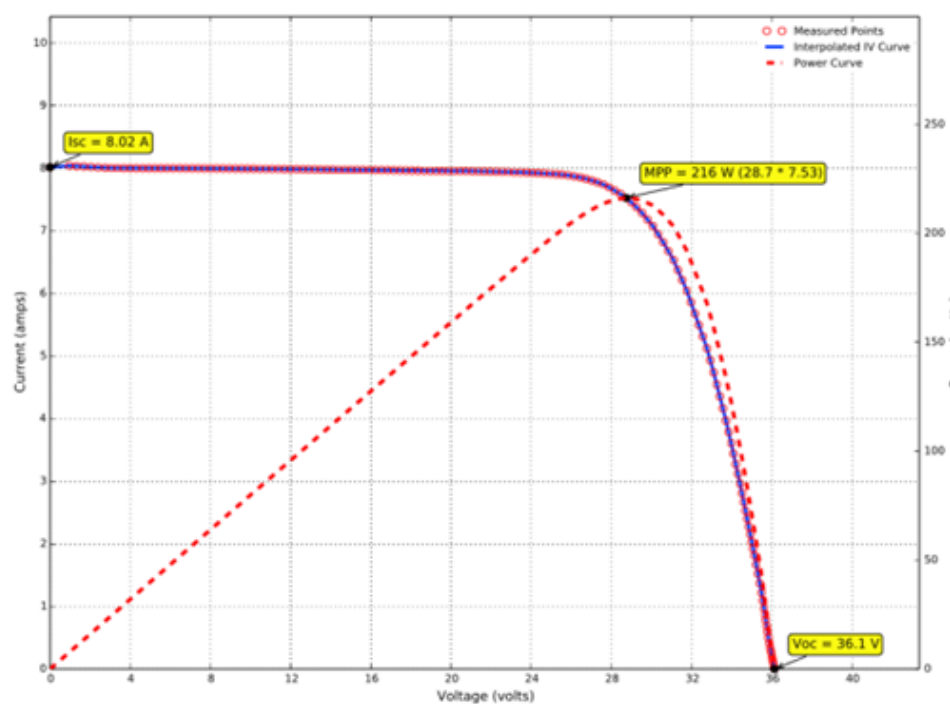


FIGURE 3.14 – Courbe IV avec courbe de puissance tracée.

Bibliographie

- [1] A.Q. Malik, S.J. Bin Haji Damit, "Outdoor testing of single crystal silicon solar cells ", Renewable Energy, 28, 2003, pp. 1433-1445
- [2] M.M. Mahmoud, "Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I-V characteristics ", Renewable Energy, 31, 2006, pp. 2198- 2206
- [3] E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka, E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules", IEEE PVSC, 2002, pp. 1516-1519.
- [4] E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka, E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules", Renewable Energy, 30, 2005, pp. 399-411
- [5] F. Recart, H. Mäckel, et al., "Simple data acquisition of the current-voltage and illumination-voltage curves of solar cells ", IEEE WCPEC, 2006, pp. 1215-1218.
- [6] J. Muñoz, E. Lorenzo, "Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays ", Solar Energy, 80, 2006, pp. 1489-1497.
- [7] Current versions of the license files, documentation, hardware design files, and software can be found at : https://github.com/csatt/IV_Swinger
- [8] Permission to use the hardware design is garanted under the tearms of the TAPR Open Hardware Hardware License Version 1.0 (May 25, 2007)<http://www.tapr.org/OHL>
- [9] Permission to use the software is granted under the terms of the GNU General Public License v3 -<http://www.gnu.org/licenses>.

Conclusion générale et perspectives :

Dans le cadre du travail de ce mémoire, on s'est principalement intéressé à la caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque et à l'influence de certains paramètres externes sur la courbe I-V. L'objectif est de développer un dispositif qui nous permet de tracer la courbe I-V d'une manière assez rapide et plus précise que la méthode utilisant une charge résistive, utilisée par les étudiants de notre école, et qui présente des inconvénients (le temps de mesure relativement long, le nombre limité de points de mesure, etc) pouvant entacher l'exactitude des mesures. Malheureusement, le manque de quelques composants électroniques spécifiques au projet sur le marché national, ne nous a pas permis de réaliser ce projet, malgré que l'étude détaillée a été effectuée. Toutefois, le projet d'un traceur IV a été présenté en détail avec objectifs et principe de fonctionnement. Le travail a été aussi l'occasion de présenter quelques simulations des effets des paramètres externes sur la courbe I-V. Aussi, des résultats d'une mesure de la caractéristique I-V effectuée au laboratoire de l'ESSAT aide d'une charge résistive sont intégrés.

Ce travail de mémoire a ouvert de nombreuses perspectives à cibler et qui se résument dans les points suivants :

- réalisation de dispositif présenté sur le troisième chapitre.
- utilisation d'un afficheur intégré sur la carte de Traceur pour afficher les courbes au lieu d'une application sur pc portable.
- intégration d'une carte mémoire pour stocké les courbes des testes effectué.
- intégration d'un capteur de température et d'irradiation pour connaitre les conditions de mesure.