

*PROJET DE MÉMOIRE*

# **OPTIMISATION DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES**



Mémoire de **Lucía TOMÁS GARCÍA**

2020-2021

Sous la direction de **René AUBREE**

## SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	2
2. LES BESOINS D'ÉNERGIES RENOUVELABLES.....	2
3. ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	5
3.1.-Rayonnement solaire.....	5
3.2.-Énergie solaire photovoltaïque.....	7
3.3.-L'effet photovoltaïque.....	7
3.4.-Les systèmes photovoltaïques.....	8
4. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES CONVENTIONNELLES.....	10
5. GÉNÉRATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	13
6. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES.....	14
6.1.-Principe de fonctionnement.....	15
6.2.-Types de cellules solaires photovoltaïques organiques.....	15
6.3.-Avantages des cellules photovoltaïques organiques.....	16
7. MODÈLE ÉLECTRIQUE.....	17
7.1.-Paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.....	20
7.2.-Fonctionnement à puissance maximale.....	22
7.3.-Influence de la température et de l'éclairement.....	23
7.4.-Panneaux et matrices photovoltaïques.....	25
8. NOTRE CAS D'ÉTUDE.....	25
8.1.-Contexte. Des démonstrateurs solaires sur le campus de l'ICAM appartenant à ASCA.....	25
8.2.-Caractéristiques techniques du film ASCA.....	26
8.3.-Description du film photovoltaïque installé dans l'ICAM.....	29
9. PRISE DE DE MESURES ET EXPÉRIMENTATION.....	30
10. SIMULATION AVEC LTSPICE.....	34
10.1.-Simulation du modèle électrique avec une diode par défaut.....	34
10.2.-Étude comparative des diodes optimales pour ajuster le circuit à la réalité.....	36
10.3.-Modèle électrique avec deux diodes par défaut.....	42
10.4.-Étude comparative pour sélectionner deux diodes pour le modèle de deux diodes.....	44
10.5.-Conclusion.....	47
11. OPTIMISATION MPPT. MÉTHODE OBSERVE & PERTURB.....	47
11.1.-Principe de fonctionnement de la méthode P&O.....	48
11.2.-Algorithme P&O avec des modifications.....	49
11.3.-Résultats de la simulation.....	52
11.4.-Conclusion et propositions pour les futurs chercheurs.....	56
12. ANNEXES.....	57
13. RÉFÉRENCES.....	59

# 1. INTRODUCTION

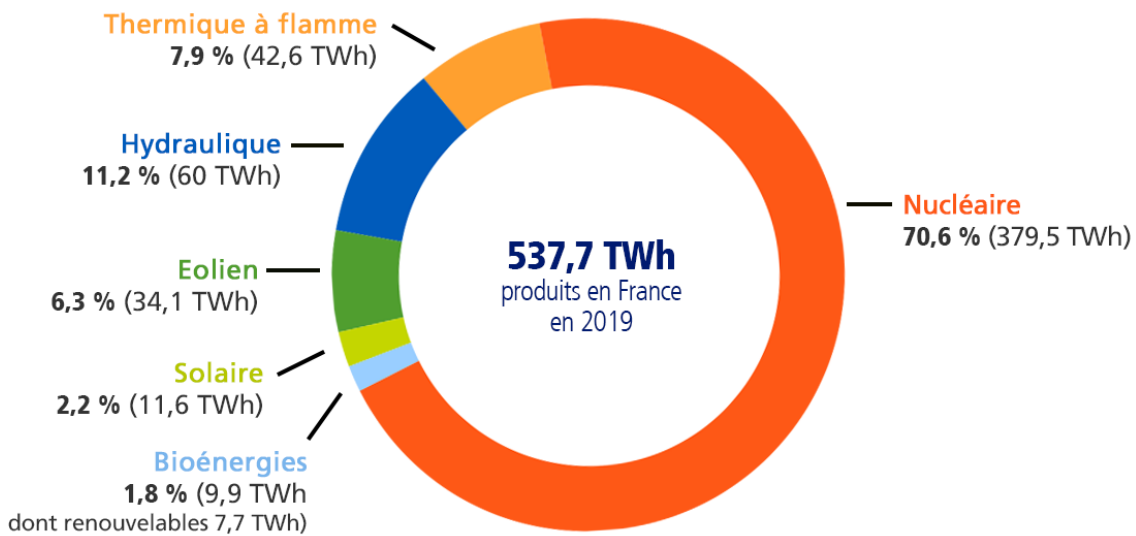
Une cellule photovoltaïque a pour but de transformer l'énergie lumineuse qu'elle reçoit en une tension électrique continue. Il existe de nombreuses technologies, mais nous nous concentrerons sur les propriétés de certaines molécules organiques ou polymères.

Ce projet de mémoire élaboré à l'ICAM Nantes montre l'étude des systèmes photovoltaïques organiques(OPV). Concrètement, il se concentre sur les panneaux solaires qui ont été installés par le groupe ARMOR sur la façade du bâtiment principal en février 2021. Dans les prochaines pages, nous décrirons des informations concernant cette nouvelle technologie, élaborer une simulation du système électrique, collecter des données et programmer d'algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking) sur Arduino.

Ce dossier a pour objectif non seulement de faire une recherche pour arriver à une bonne optimisation des systèmes photovoltaïque organiques, mais encore de guider les futures recherches vers le succès.

## 2.- LE BESOIN D'ÉNERGIES RENOUVELABLES.

Le fonctionnement des sociétés modernes, industrielles et post-industrielles est une conséquence de l'utilisation de quantités disproportionnées d'énergie. La majeure partie de l'énergie utilisée provient de la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dont les réserves sont limitées. L'un des types d'énergie les plus demandés dans la société actuelle est l'énergie électrique. Pour l'obtenir, on peut recourir à de nombreuses méthodes de génération. À titre d'exemple, la figure 1.1 présente le panorama actuel de la production d'électricité en France.



**Figure 2.1.- Production d'électricité en France en 2019. Extrait du site officiel d'EDF.**

L'augmentation exponentielle de la consommation de ces ressources a déclenché une multitude de problèmes qui peuvent être classés en trois catégories :

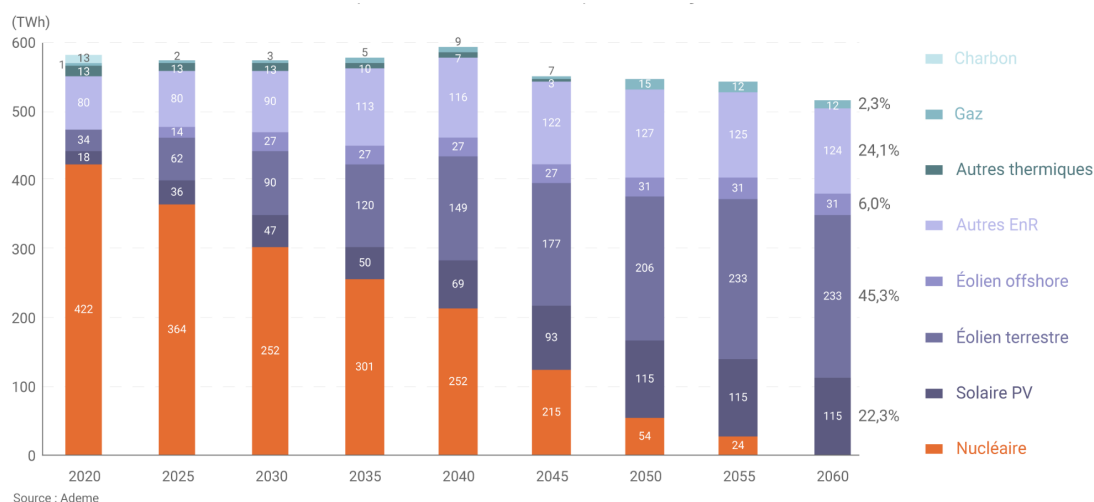
1. Les problèmes environnementaux. Comme le réchauffement de la planète, dû à l'effet de serre croissant provoqué par l'augmentation de la concentration de  $CO_2$  dans l'atmosphère qui provient de la combustion de carburants.
2. Les problèmes de durabilité. Lié à l'épuisement des sources d'énergie traditionnelles.
3. Problèmes sociaux et politiques. L'emplacement des sources d'énergie dans les différentes parties de la planète est très conflictuel et à l'origine de guerres et de tensions constantes.

Les énergies renouvelables sont de plus en plus populaires. Ces énergies sont des ressources propres, inépuisables et de plus en plus compétitives fournies par la nature. Leur utilisation nous procure d'innombrables avantages, dont les plus importants sont la réduction de l'effet de serre et la protection de notre planète. Les énergies renouvelables ont reçu une impulsion et un soutien importants après l'Accord de Paris de 2015, qui établit un objectif mondial contraignant pour tous les pays signataires. Tous se sont engagés à réduire leurs émissions polluantes afin de

limiter les effets du changement climatique, notamment en augmentant le recours aux énergies propres.

La croissance des énergies renouvelables est imparable, comme le montrent les statistiques fournies chaque année par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). Selon les prévisions de l'AIE, la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement mondial en électricité passera de 26 % en 2018 à 44 % en 2040, et elles assureront les 2/3 de l'augmentation de la demande d'électricité enregistrée au cours de cette période, principalement grâce aux technologies éoliennes et photovoltaïques.

La transition vers un système énergétique basé sur les technologies renouvelables aura également des effets économiques très positifs sur l'économie mondiale et le développement. Selon l'IRENA (Agence internationale pour les énergies renouvelables), pour atteindre les accords de Paris, il faut doubler la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité pour la porter à 57 % au niveau mondial d'ici à 2030. Il faut pour cela faire passer les investissements annuels dans les énergies renouvelables des 330 milliards de dollars actuels à 750 milliards de dollars, ce qui stimulera la création d'emplois et la croissance liée à l'économie verte.



**Figure 2.2.- Évolution du mix de production électrique en France. Extrait du site "Connaissance des énergies".**

Dans la figure 2.2, on peut voir un diagramme qui vise à prédire l'évolution de l'utilisation des énergies renouvelables en France. On souligne la diminution de l'utilisation de l'énergie nucléaire avec une augmentation

conséquence de l'énergie solaire photovoltaïque et photovoltaïque terrestre et offshore.

Pour conclure cette section on liste les principaux avantages des énergies renouvelables, car leur utilisation joue un rôle crucial dans le futur de la planète. Parmi beaucoup d'autres, il convient de mentionner les suivantes :

- Contre le changement climatique. Ils n'émettent pas de gaz à effet de serre dans les processus de production d'énergie, ce qui les révèle comme la solution la plus propre et la plus viable à la dégradation de l'environnement.
- Inépuisable. Contrairement aux sources d'énergie traditionnelles telles que le charbon, le gaz, le pétrole ou l'énergie nucléaire, dont les réserves sont limitées, les énergies propres ont la même disponibilité que le soleil dont elles sont issues et s'adaptent aux cycles naturels.
- Ils réduisent la dépendance énergétique. Partout sur la planète, il existe une sorte de ressource renouvelable (vent, soleil, matière organique) qui peut être utilisée pour produire de l'énergie de manière durable.
- Une concurrence de plus en plus forte. Les principales technologies renouvelables réduisent leurs coûts, de sorte qu'elles sont déjà pleinement compétitives par rapport aux technologies conventionnelles.

### 3.- ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.

#### 3.1.- Rayonnement solaire.

Le soleil est une étoile dont la température moyenne est de 5.000 °C. À l'intérieur de l'étoile, une série de réactions ont lieu et produisent une perte de masse qui est transformée en énergie. Cette énergie libérée par le soleil est transmise à l'extérieur par ce que l'on appelle le rayonnement solaire.

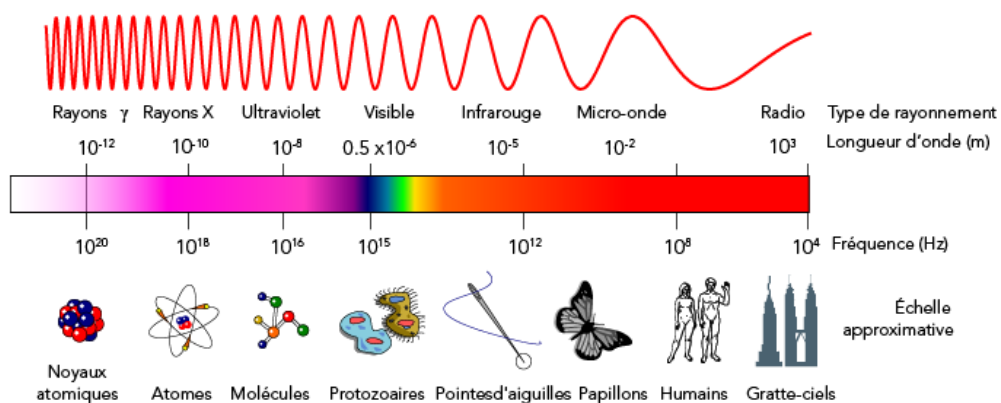
Le rayonnement du soleil est de 63.450.729 W/m<sup>2</sup>. Si on suppose que le soleil émet dans toutes les directions et que nous construisons une sphère qui atteint l'atmosphère terrestre, c'est-à-dire qui a un rayon de la distance

de 149,6 millions de km, on peut déterminer quel est le rayonnement en ce point. Cette valeur du rayonnement solaire reçu hors de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil est connue sous le nom de constante solaire (1.535 W/m<sup>2</sup>), qui varie au cours de l'année de 3 % en raison de l'ellipticité de l'orbite terrestre.

Seul un 30% de l'énergie totale interceptée par l'atmosphère atteint la terre, et 70% de cette énergie tombe dans la mer.

La lumière du soleil est incolore et est appelée "lumière blanche". Mais en réalité, elle est composée de différentes couleurs. On ne peut le voir que lorsque la lumière passe à travers un prisme qui sépare les couleurs en un spectre appelé "arc-en-ciel". Ce spectre est composé de:

- **Gamme ultraviolette.** Elle représente 5% du rayonnement et comprend les longueurs d'onde comprises entre 300 et 400 nm.
- **Range visible.** Elle représente 43 % du rayonnement et comprend les longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm (rouge, jaune, vert, bleu, indigo et violet).
- **Infrarouge.** Elle représente 52% du rayonnement et comprend des longueurs d'onde comprises entre 700 et 2500 nm.



**Figure 3.1.-Différents types de rayonnements. Extrait du site web "Parlons Sciences".**

Les dispositifs photovoltaïques sont capables d'absorber les longueurs d'onde comprises entre le domaine visible et l'ultraviolet, qui représente 48 % de l'énergie solaire.

### 3.2.- Énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque transforme directement la lumière du soleil en électricité en utilisant une technologie basée sur l'effet photovoltaïque[7].

Lorsque le rayonnement solaire tombe sur l'une des faces d'une cellule photoélectrique, il se produit une différence de potentiel électrique entre les deux faces qui fait sauter les électrons d'un endroit à un autre, générant ainsi un courant électrique.

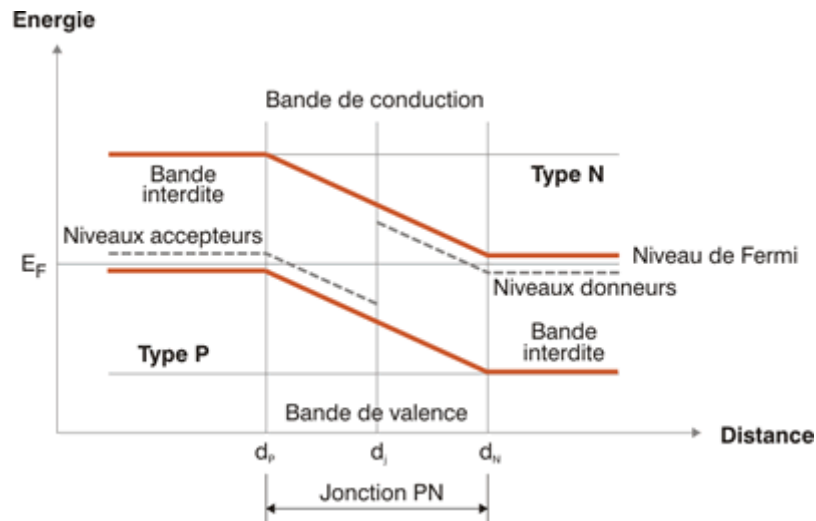
### 3.3.- L'effet photovoltaïque.

On sait que la lumière est constituée d'entités physiques appelées photons, qui sont capables d'interagir avec les électrons des corps sur lesquels ils frappent. Nous pouvons observer deux types d'interaction[18] :

- [Effet photoélectrique](#). Elle consiste en un détachement d'électrons de la surface des métaux lorsqu'ils entrent en collision avec la surface de photons d'énergie suffisante, donnant lieu à un courant électrique appelé photoélectrique.
- [Effet photovoltaïque](#). Elle consiste en la génération d'une force électromotrice au cœur d'un matériau lorsque des photons qui interagissent avec des électrons génèrent la paire électron-trou, donnant lieu à un courant électrique.

La théorie des bandes permet d'expliquer cet effet photovoltaïque à l'état solide: lorsqu'un grand nombre d'atomes sont réunis, comme dans les structures solides, le nombre d'orbitales de valence est si important et la différence d'énergie entre chacune d'elles est si faible que l'on peut considérer que les niveaux d'énergie conjoints forment des bandes continues plutôt que des niveaux d'énergie discrets comme c'est le cas dans les atomes isolés. Cependant, comme certains intervalles d'énergie ne contiennent pas d'orbitales, quel que soit le nombre d'atomes ajoutés, certains écarts d'énergie sont créés entre les différentes bandes.





**Figure 3.2.-Niveau d'énergies au voisinage de la jonction. Extrait du site “Énergie Plus Le Site”.**

La bande de valence est occupée par les électrons de valence des atomes et la bande de conduction est occupée par les électrons libres ou de conduction qui se sont détachés de leurs atomes pour se déplacer facilement. La bande interdite ou bande interdite dans laquelle les électrons ne peuvent pas se rencontrer.

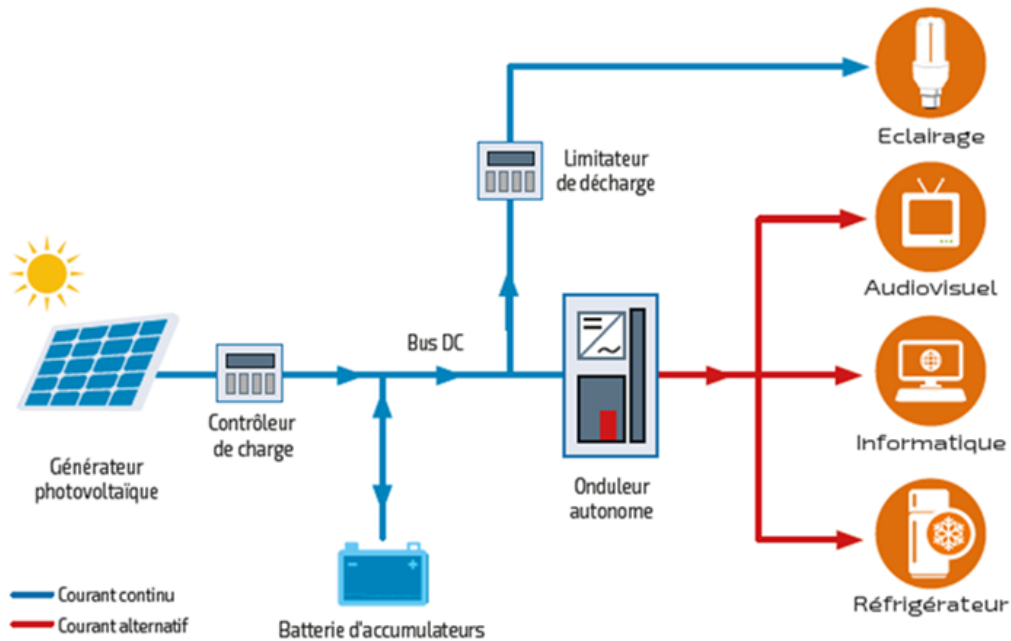
### 3.4.- Les systèmes photovoltaïques.

Un système photovoltaïque est l'ensemble des composants mécaniques, électriques et électroniques qui concourent à capter l'énergie solaire disponible et à la transformer en énergie électrique utilisable.

Il existe différentes options pour construire un système photovoltaïque, mais il comporte principalement les éléments suivants [12][23]:

- Générateur photovoltaïque. Chargé de capter et de convertir le rayonnement solaire en courant électrique.
- Piles ou accumulateurs. Ils stockent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque pour pouvoir l'utiliser dans les périodes où la demande dépasse la capacité de production du générateur photovoltaïque.

- Régulateur de charge. Chargé de protéger et de garantir le maintien correct de la charge de la batterie et d'éviter les surtensions qui pourraient la détruire.
- Onduleur ou conditionneur d'énergie électrique. Chargé de transformer le courant continu produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif, nécessaire pour alimenter certaines charges ou pour introduire l'énergie produite dans le réseau de distribution électrique.
- Éléments de protection des circuits. Interrupteurs de déconnexion, diodes de blocage, etc... disposés entre différents éléments du système, pour protéger la décharge et la dérivation des éléments en cas de défaillance ou de surcharge.



**Figure 3.3.- Schéma d'un système photovoltaïque autonome avec stockage. Extrait du site web "Power-Africa".**

Après avoir stocké l'énergie électrique dans l'accumulateur, on peut suivre deux voies: prendre la ligne directement de celui-ci pour l'installation et utiliser des lampes et des éléments de consommation en courant continu ou transformer le courant continu en courant alternatif de 230V à travers un onduleur.

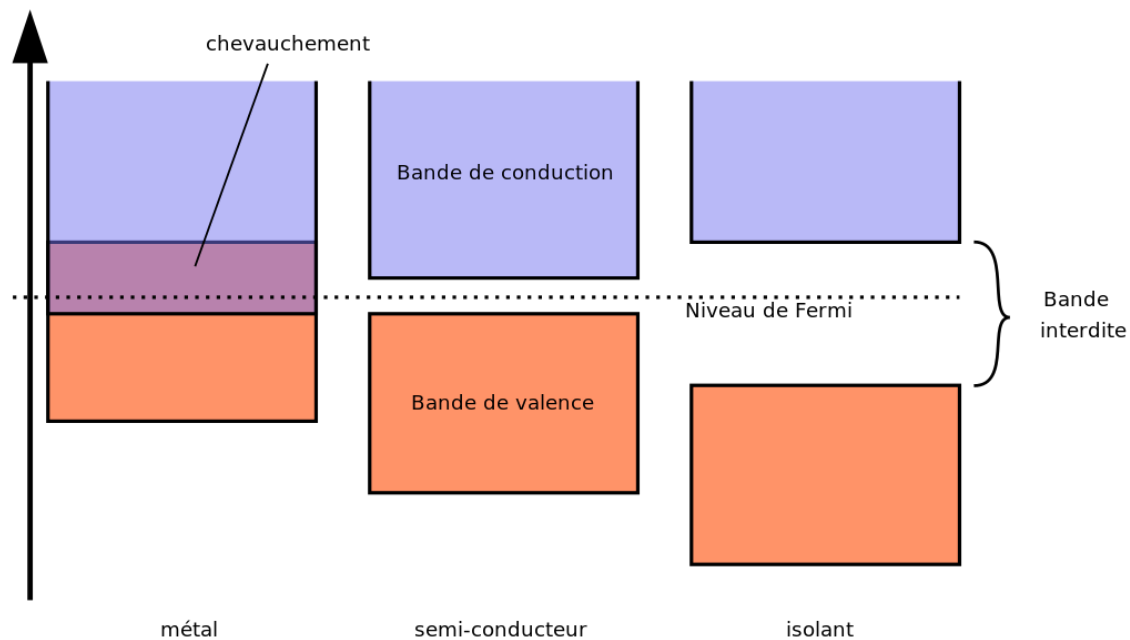
## 4.- CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES CONVENTIONNELLES.

Une cellule photovoltaïque est un mécanisme de dispositif électronique qui convertit l'énergie lumineuse, la lumière, en énergie électrique. En d'autres termes, ils produisent de l'électricité lorsque la lumière du soleil les frappe ou tombe sur eux[17].

Il existe différents types de cellules photovoltaïques que l'on peut classer en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés. Le type le plus courant et dont nous parlerons ci-dessous est la cellule en silicium cristallin.[19] Cependant, on ne va expliquer que brièvement son fonctionnement afin de comprendre plus tard comment fonctionnent les cellules photovoltaïques organiques.

Selon ce modèle, les matériaux peuvent être classés comme suit (Figure 3.4):

- **Conducteurs.** Matériaux dont les bandes de valence et de conduction sont très proches l'une de l'autre, dans certains cas elles se chevauchent même. Dans ce cas, les électrons de valence peuvent être facilement promus vers la bande de conduction avec une petite perturbation.
- **Isolateurs.** Il s'agit de matériaux dont les bandes de valence et de conduction sont excessivement séparées par une grande lacune, ce qui rend impossible la promotion d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction.
- **Semi-conducteurs.** Ce sont des matériaux qui se situent entre les conducteurs et les isolants car ils ont une bande interdite mais qui peut être surmontée en fournissant une petite quantité d'énergie afin que les électrons de valence puissent être promus dans la bande de conduction.



**Figure 4.1.- Schéma des couches d'électrons de valence et d'électrons de conduction. Extrait du site web "Couleur-Science".**

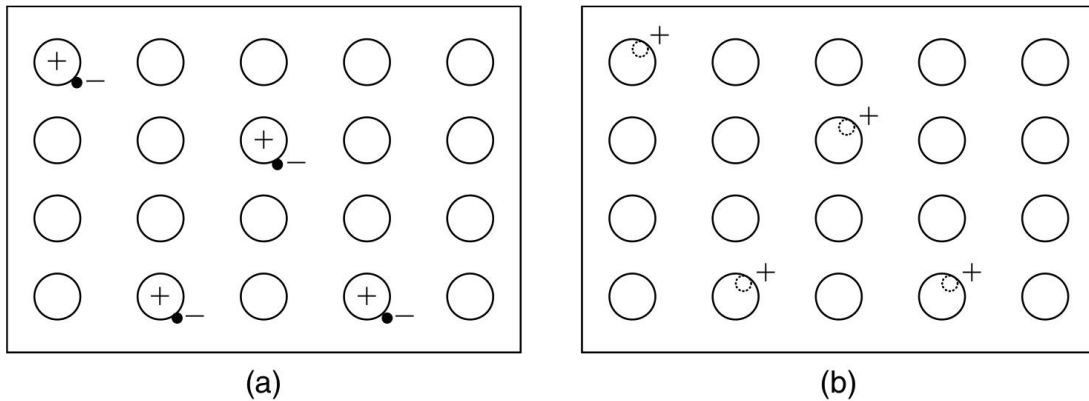
Les matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques sont des semi-conducteurs dont la bande interdite se situe entre 1,4 eV et 2,2 eV car l'énergie nécessaire pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction (générant ainsi un courant électrique) est similaire à l'énergie des photons qui forment les rayons du soleil.

Cet effet ne suffit pas à lui seul à générer un courant électrique car l'absorption du photon génère l'excitation de l'électron vers la bande de conduction mais celui-ci perd rapidement de l'énergie et revient à sa position initiale en émettant de l'énergie sous forme de lumière.

Les semi-conducteurs peuvent être dopés pour augmenter leur conductivité et générer des propriétés intéressantes telles que celles responsables du fonctionnement des cellules solaires [34].

- Lorsqu'un semi-conducteur est dopé avec un matériau contenant un électron de valence supplémentaire, on obtient un semi-conducteur de type n. L'atome dopant est lié par des liaisons covalentes à ses voisins, laissant l'électron comme porteur de charge.
- Lorsqu'un semi-conducteur est dopé avec un matériau contenant un électron de valence en moins, on obtient un semi-conducteur de type p. L'atome dopant est lié par covalence à ses voisins, laissant un trou

libre dans la bande de valence. Par conséquent, il y a un grand nombre de trous comme porteurs de charge.



**Figure 4.2.- Diagrams schématiques des semiconducteurs type-n et type-p. (a) Type-n, avec des électrons en excès. (b) Type-p, avec des trous positifs en excès. Extrait du site web “Les Revues Scientifiques En Libre Accès 2021”**

Les semi-conducteurs constituent le principal composant des cellules photovoltaïques classiques. Le matériau le plus couramment utilisé est le silicium. Le silicium est utilisé car il possède des propriétés très avantageuses par rapport à d'autres matériaux, outre le fait qu'il s'agisse d'un élément très abondant dans la croûte terrestre. Les dopants les plus courants sont le phosphore (type p) ou le bore (type n), ce qui signifie que la dernière couche cherche toujours à être remplie.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques ne diffère pas beaucoup de celui de leurs parents, les cellules inorganiques. Ces derniers sont fabriqués à partir de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'un chargé positivement (p) et l'autre négativement (n). Lorsqu'ils sont exposés à la lumière, ils permettent à un photon de la lumière solaire de "frapper" un électron, créant ainsi un "trou" dans l'atome excité. Ce "trou" sera rempli par un autre électron qui, à son tour, a été arraché à son propre atome. C'est ainsi que se forme ce que l'on appelle une paire d'électrons. Le but de la cellule est de forcer les électrons et les "trous" à se déplacer vers le côté opposé du matériau, ce qui produit une différence de potentiel et donc un courant électrique. L'électricité circule du point de plus fort potentiel vers le point de plus faible potentiel, ce qui crée une tension entre les deux parties du matériau et reproduit le comportement d'une batterie. De cette façon, un courant continu est créé.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques repose essentiellement sur l'utilisation des propriétés des matériaux semi-conducteurs, qui se caractérisent par le fait qu'ils ne se comportent comme des conducteurs que dans certaines conditions, tandis que dans d'autres conditions, ils se comportent comme des isolants. Par exemple, il existe des matériaux qui, au-dessus d'une certaine température, sont des conducteurs, mais en dessous de cette température, ce sont des isolants.

Les autres facteurs qui peuvent influencer la conductivité des semi-conducteurs sont la pression, la présence d'un champ magnétique ou électrique, ou un rayonnement affectant le semi-conducteur (cas qui nous concerne).

## 5.- GÉNÉRATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.

Les cellules photoélectriques sont classées en trois générations qui indiquent l'ordre d'importance et de pertinence qu'elles ont historiquement. Aujourd'hui, les trois générations font l'objet de recherches, tandis que les technologies de première génération sont les plus représentées dans la production commerciale[16].

- **Première génération.** Ils ont une grande surface, sont de haute qualité et peuvent être facilement collés. Cependant, ces technologies ne permettent pas d'avancées significatives dans la réduction des coûts de production. Les dispositifs formés par l'assemblage de cellules de silicium s'approchent de la limite du rendement théorique (37 %) et ont un délai de récupération de 5 à 7 ans, c'est-à-dire, le laps de temps qui s'écoule avant que la somme actualisée des bénéfices prévisionnels arrive au niveau de la ca de la capitalisation boursière de l'entreprise.
- **Deuxième génération.** Les matériaux de la deuxième génération ont été développés pour répondre aux besoins d'approvisionnement en énergie et au maintien des coûts de production des cellules solaires. Parmi les matériaux les plus performants, citons le tellure de cadmium (CdTe), le CIGS et les films minces de silicium amorphe. Ces technologies promettent des rendements de conversion plus élevés de l'ordre de 16%, en particulier le CIGS-CIS et le CdTe qui offrent des coûts de production nettement inférieurs. Ces technologies peuvent

avoir des rendements de conversion plus élevés combinés à des coûts de production moins élevés.

- **Troisième génération.** Ce sont celles qui permettent des rendements théoriques de conversion électrique beaucoup plus élevés qu'aujourd'hui et à un prix de production beaucoup plus bas. Les recherches actuelles visent des rendements de conversion de 30 à 60 %, en conservant des matériaux et des techniques de fabrication à faible coût. Il s'agit encore d'un stade expérimental, l'objectif étant d'améliorer encore les panneaux à couche mince.

Actuellement, les cellules à base de silicium pourraient être remplacées dans quelques années par d'autres matériaux et des technologies très avancées. L'objectif est d'accroître l'efficacité énergétique de ces dispositifs à l'avenir, de réduire les coûts de production et d'obtenir une grande variété d'applications qui leur permettront de concurrencer les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire.

Un tableau comparatif a été ajouté en annexe pour une meilleure visualisation et différenciation des caractéristiques de chaque génération. Il compare au sein de chaque génération les performances d'un module théorique et expérimental. Il comprend également l'état de développement, ainsi que les différents types au sein de chaque génération.

## 6.- CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES.

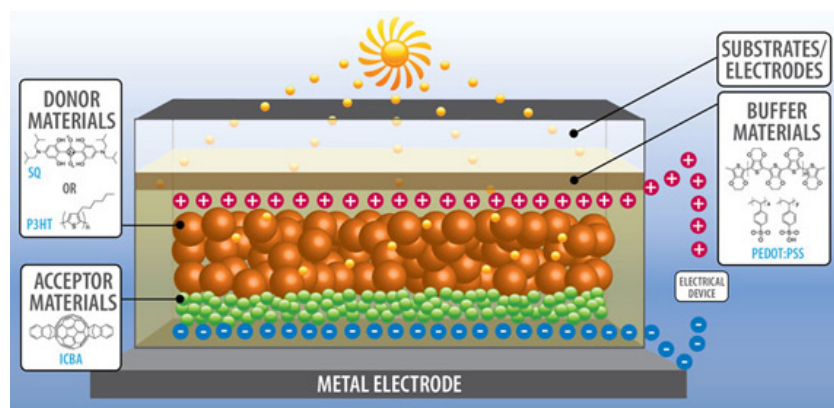
Une cellule solaire organique ou une cellule solaire en plastique est un type de système photovoltaïque qui utilise l'électronique organique, une branche de l'électronique qui traite des polymères organiques conducteurs ou des petites molécules organiques, pour l'absorption de la lumière et le transport des charges afin de produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil par l'effet photovoltaïque. La plupart des cellules photovoltaïques organiques sont des cellules solaires en polymère[3].

Les molécules utilisées dans les cellules solaires organiques peuvent être traitées en solution à des rendements élevés et sont peu coûteuses, ce qui permet de réduire les coûts de production pour une fabrication en grande quantité[8][22]. Associés à la flexibilité des molécules organiques, ils sont potentiellement rentables pour les applications photovoltaïques.

L'ingénierie moléculaire peut déplacer la bande interdite, ce qui permet un réglage électronique. Le coefficient d'absorption optique des molécules organiques est élevé, de sorte qu'une grande quantité de lumière peut être absorbée par une petite quantité de matériaux, généralement de l'ordre de centaines de nanomètres.[13] Les principaux inconvénients associés aux cellules photovoltaïques organiques sont un faible rendement, une faible stabilité et une faible résistance par rapport aux cellules photovoltaïques inorganiques telles que les cellules solaires au silicium.

### 6.1.- Principe de fonctionnement.

Comme les panneaux solaires en silicium, les cellules solaires des panneaux organiques produisent de l'électricité par effet photovoltaïque, transformant la lumière du soleil en électricité. Ils comportent une couche de matériau donneur d'électrons, une couche de matériau récepteur, des électrodes anode et cathode et un matériau d'encapsulation qui permet de les isoler de l'environnement (Figure 6.1)[4][15].



**Figure 6.1.- Structure d'une cellule photovoltaïque organique. Extrait du site "ResearchGate".**

### 6.2.- Types de cellules solaires photovoltaïques organiques.

Il existe quatre types de cellules photovoltaïques organiques[6]:

- **Cellules de Grätzel.** Ces cellules utilisent des additifs ou des pigments qui absorbent une grande quantité de lumière et transfèrent rapidement l'électron à un oxyde nanostructuré tel que le TiO<sub>2</sub>.



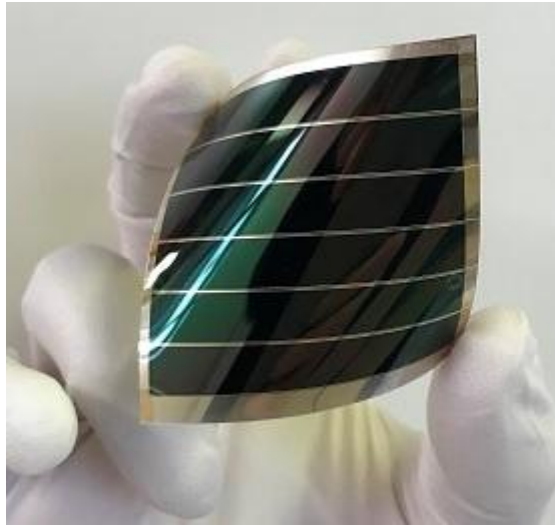
- **Cellules multicouches.** Des couches successives de différents matériaux semi-conducteurs sont déposées séquentiellement afin de maximiser l'intensité du champ optique.
- **Cellules à hétérojonctions organiques internes multiples.** Deux matériaux polymères non miscibles ayant des affinités électroniques et des potentiels d'ionisation différents sont mélangés dans la même solution.
- **Cellules hybrides organo-inorganiques.** Le rôle d'accepter les électrons et de les transporter vers leur électrode respective correspond, dans ce cas, aux matériaux inorganiques à grande bande interdite tels que le TiO<sub>2</sub> ou le ZnO.

Dans ce travail de recherche, nous nous baserons sur l'étude des cellules organiques formées par des polymères, puisque c'est notre cas d'étude et qu'on va réaliser la partie expérimentale spécifiquement dans ce modèle.

### 6.3.- Avantages des cellules photovoltaïques organiques.

Les cellules photovoltaïques organiques présentent l'avantage de pouvoir être collées sous la forme d'une couche ultra-mince de deux polymères semi-conducteurs sur toute surface plastique.[27] En outre, les panneaux solaires composés de cellules organiques sont moins chers, plus légers et plus faciles à installer.

Les cellules solaires organiques ont dû répondre à un certain nombre d'exigences en termes de stabilité, d'efficacité et de coût afin de concurrencer la technologie au silicium existante et de trouver de nouvelles applications. Les matériaux organiques présentent des avantages du point de vue des coûts de fabrication, de l'impact éventuel sur la sécurité environnementale et, fondamentalement, de la possibilité de produire des dispositifs flexibles qui absorbent le rayonnement à différentes longueurs d'onde et dans lesquels il est possible de moduler les propriétés électroniques en utilisant les ressources fournies par la synthèse organique.

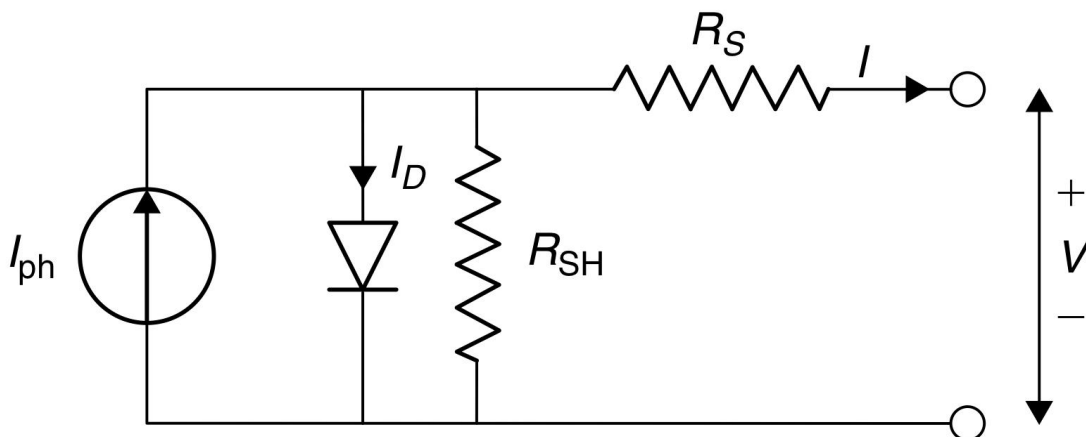


**Figure 6.2.- Photographie d'une petite cellule photovoltaïque organique.**

Ces propriétés représentent une avancée significative dans la conception des dispositifs électroniques. Et c'est dans ce sens que nous orientons nos recherches en matière de cellules photovoltaïques organiques. Nos efforts se concentrent sur la création de dispositifs qui utilisent des cellules photovoltaïques organiques comme base de leur structure. Pour cette raison, on recherche quelles sont les structures moléculaires les plus appropriées pour obtenir les meilleurs résultats.

## 7. MODÈLE ÉLECTRIQUE

Dans le cadre qui concerne le modèle électrique des cellules photovoltaïques, il est représenté par un modèle équivalent d'un diode. Ce circuit peut être utilisé pour une cellule individuelle, une module de plusieurs cellules ou plusieurs modules[10][33].



### Figure 7.1.- Modèle un diode cellule photovoltaïque.

Le modèle contient une source de courant ( $I_{ph}$ ), un diode et une résistance en série  $R_s$ , qui représente la résistance interne de chaque cellule. En plus, la diode a une résistance interne ou "shunt resistance" ( $R_{sh}$ ). Le courant ne peut se calculer en faisant la différence entre le courant photovoltaïque et le courant de la diode[14].

$$I = I_{ph} - I_D = I_0 * \left\{ \exp\left[\frac{e(V+IR_s)}{kT_c}\right] - 1 \right\} - \frac{V+IR_s}{R_{SH}}$$

C'est important de remarquer que la valeur de la résistance est normalement plus élevée que la résistance de charge, tandis que la résistance en série est plus petite que la résistance de charge, alors moins de puissance interne est dissipée dans la cellule. Par conséquent, on peut réécrire la formule de la manière suivante:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT_c}\right) - 1 \right]$$

Avec:

$k$ = constante de Boltzmann, =  $1.381 * 10^{-23} J/K$ .

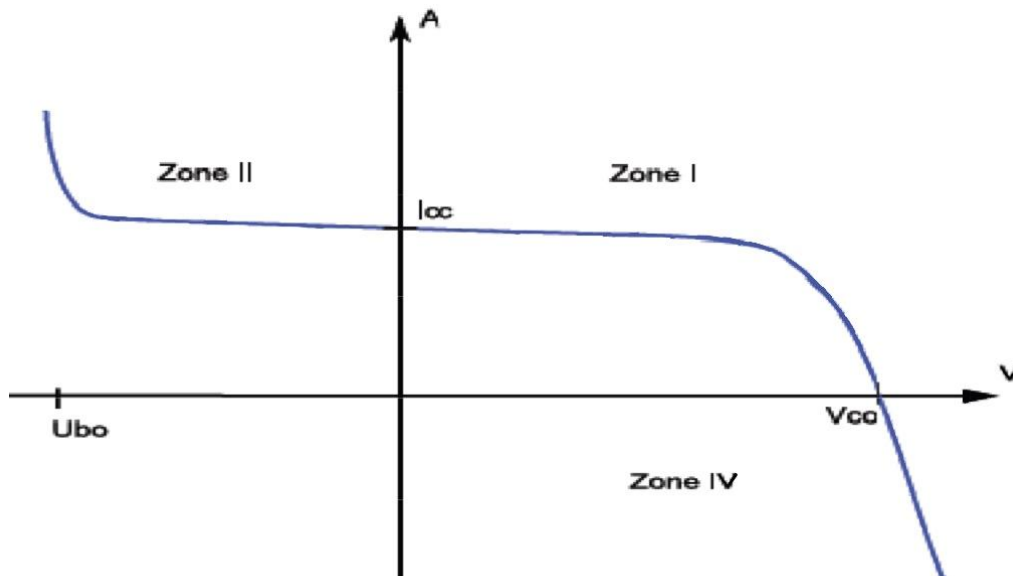
$T_c$  = température absolue de la cellule (K).

$e$  = charge électronique, =  $1.602 * 10^{-19} J/V$ .

$V$  = tension imposée à la cellule (V).

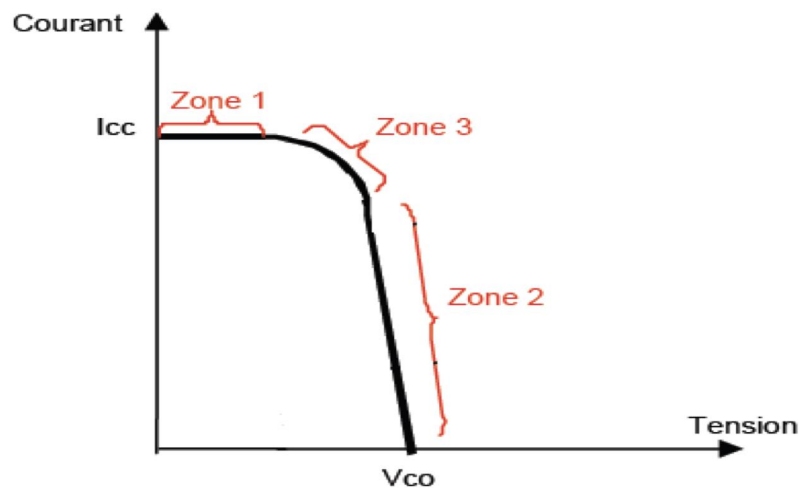
$I_s$  = courant de saturation sombre, qui dépend fortement de la température (A).

Le comportement du courant électrique en fonction de la tension n'est pas linéaire. Dans le figure 7.2a on représente la courbe caractéristique I-V d'une cellule solaire pour une certaine éclaircement ( $G_t$ ) et une température fixée ( $T_c$ )[21]. Ici on peut différencier quatre quadrants. Cependant, ce qui nous intéresse d'étudier c'est l'attitude de la courbe dans le quadrant I parce que c'est le fonctionnement normal.



**Figure 7.2a.- Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.**

En regardant le quadrant 1 (figure 7.2b) on distingue 3 zones importantes appelées zones de fonctionnement, qui sont obtenues quand on branche les bornes de la cellule à une résistance variable. Cependant, on est dans un cas idéal donc on ne considère pas des possibles déséquilibres [24].



**Figure 7.2b.- Élargissement du premier quadrant de la courbe caractéristique I(V).**

- Zone 1.

Lorsque la résistance de la charge prend des petites valeurs, la cellule se comporte comme une source de courant. Zone assimilable à un courant

$I_{cc}$  qui est proportionnel à l'irradiation et avec une impédance interne de  $R_{sh}$

- Zone 2.

Lorsque la résistance de la charge prend des grandes valeurs où la cellule travaille comme une source de tension. Zone assimilable à un générateur de tension  $V_{co}$  d'impédance interne équivalente à la résistance en série.

- Zone 3.

Puisque on peut exprimer la puissance comme  $P = V * I$ , on se trouve dans la zone où est localisé le point de puissance maximale (MPP), c'est-à-dire le point ( $I_{max}, V_{max}$ ). Ce point représente la valeur optimale de la résistance de charge.

## 7.1.- Paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

Pour caractériser une cellule solaire, il existe de nombreux paramètres. En traçant la courbe  $I(V)$  on peut accéder à ceux qui sont plus significatifs: la tension à circuit ouvert, le courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement[11][14].

- ❖ *Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).*

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué est nul et c'est le courant le plus important que la cellule peut contribuer, donc il est égal à le courant photovoltaïque de la cellule ( $I_{ph}$ ). Il varie selon la température, la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. En plus, il est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

- ❖ *Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).*

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque la cellule n'est pas alimentée ou lorsqu'elle possède une résistance de charge infinie. Par conséquent, le courant photovoltaïque ( $I_{ph}$ ) est égal au courant de la diode ( $I_D$ ).

La tension peut varier en fonction du type de cellule solaire, des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. En plus, on peut exprimer la tension de circuit ouvert comme:

$$V_{oc} = \frac{kT_c}{e} * \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) = V_t * \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right)$$

Avec  $V_t$  = tension thermique (V) qui est donnée par:

$$V_t = \frac{kT_c}{e}$$

Selon le matériau utilisé, la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) peut varier entre 0.3 et 0.7 V et le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) dépend du niveau d'éclairement et selon les technologies et les tailles de cellules.

❖ *Facteur de forme (FF).*

Il s'utilise pour qualifier la qualité d'une cellule et représente le rapport entre la puissance maximale que peut fournir la cellule et la puissance formée par  $I_{cc} * V_{oc}$ .

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{oc}} = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{cc} * V_{oc}}$$

Le but est de s'approcher le plus possible aux conditions idéales, donc plus la valeur est grande, plus la puissance exploitable le sera également. Pour les bonnes cellules, la valeur est plus grande que 0.7. Cette valeur diminue lorsque la température de la cellule augmente.

❖ *Rendement ( $\eta$ ).*

Il est défini comme le quotient de la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente. La connaissance de cette valeur nous permettra d'évaluer les performances de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF * I_{cc} * V_{co}}{A * G_t}$$

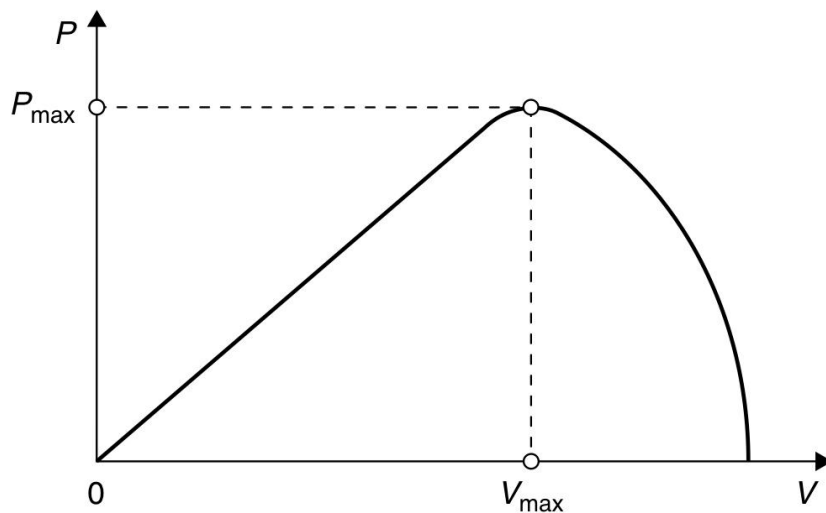
Avec  $A$  = surface de la cellule ( $m^2$ )

Comme on peut le voir dans la formule du rendement, il est possible de l'améliorer en augmentant le facteur de forme, le courant court circuit et la tension à circuit ouvert.

## 7.2.- Fonctionnement à puissance maximale.

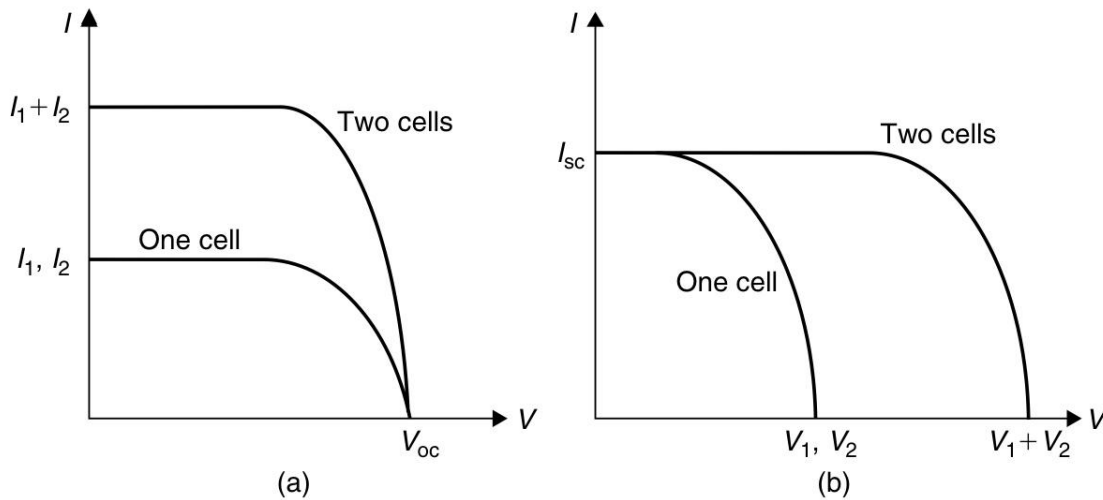
Même si on est dans le cas du court circuit ou on établit un circuit ouvert, la puissance prend une valeur de zéro et entre le court circuit et le circuit ouvert la valeur de la puissance est positive[14][21].

La courbe caractéristique  $P(V)$  dépend des rapports de proportionnalité, lesquels varient en fonction du nombre des cellules connectées en série et du nombre des cellules connectées en parallèle. Cette courbe présente un comportement non linéaire au même temps qu'un point de puissance maximal (PPM) défini par un certain courant et une certaine tension.



**Figure 7.3.- Courbe caractéristique  $P(V)$  pour une cellule photovoltaïque.**

La disposition des cellules influence aussi la valeur de la puissance. Dans la pratique, les cellules peuvent être branchées en série ou en parallèle. En regardant les figures 7.4a et 7.4b, on peut découvrir le comportement des cellules pour chaque type de connexion[26].



**Figure 7.4. Disposition de deux cellules identiques. a) Connection en parallèle. b) Connection en série.**

Lorsqu'elles sont mises en série, la tension de circuit ouvert est multipliée par le nombre des cellules mises en cette configuration. D'autre côté, si on connecte les cellules en parallèle, ce qu'on multiplie par le nombre de cellules est le courant de court circuit[24][25].

La puissance peut-être calculée avec le produit du courant et de la tension. Et la puissance maximale passe par un point de puissance maximale où la résistance a une valeur optimale et la puissance dissipée dans la résistance est maximale et on la peut calculer comme:

$$P_{max} = V_{max} * I_{max}$$

En plus, on peut exprimer la puissance maximale comme suit en regardant le facteurs de forme:

$$P_{max} = V_{oc} * I_{cc} * FF$$

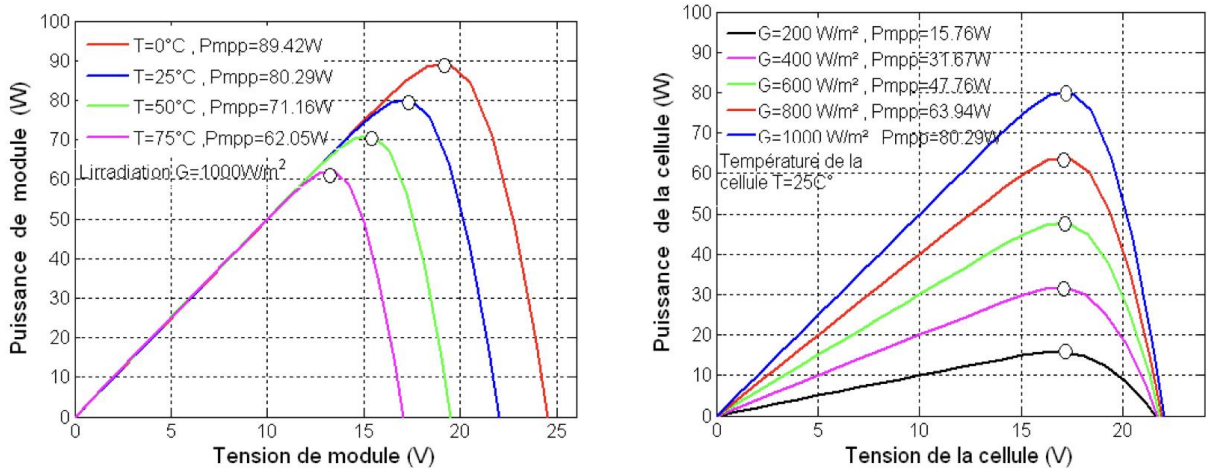
### 7.3.- Influence de la température et de l'éclairement.

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est directement dépendante de l'éclairement et de la température[20][14].

L' influence de température est plus visible dans la tension de circuit ouvert, laquelle diminue linéairement avec la température de la cellule à

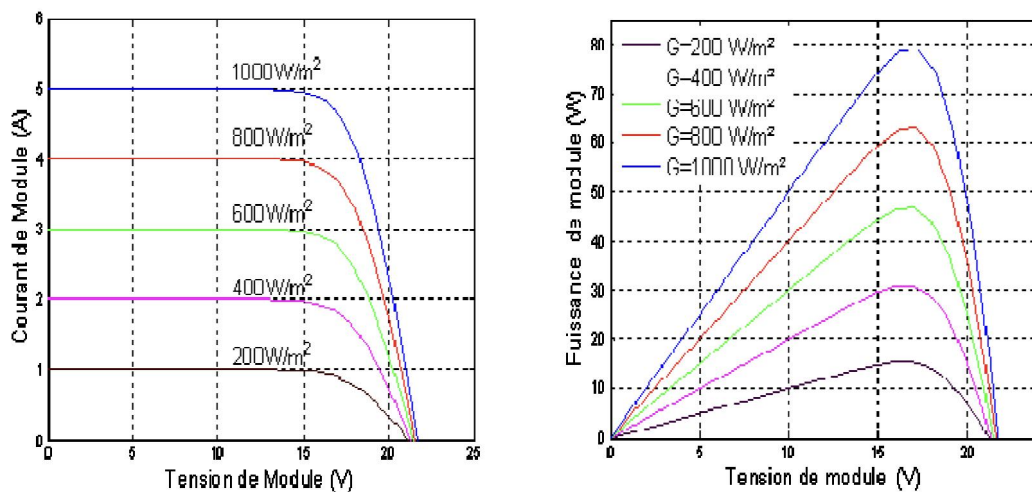


irradiation constante. Le courant de court circuit est plus petite aussi mais il s'agit d'une réduction moins appréciable, donc l'influence de la température sur  $I_{cc}$  peut être négligé dans la majorité des cas. Cela entraîne une baisse du rendement de la cellule.



**Figure 7.5.- Évolution de la puissance en fonction de la température.**

Par contre, lorsque l'irradiation varie pour une température constante, le courant de court circuit augmente linéairement avec la valeur d'irradiation. Au même moment, la tension de circuit ouvert augmente de façon logarithmique mais très peu.



**Figure 7.6.- Évolution du courant et de la puissance en fonction de la puissance lumineuse.**

## 7.4.- Panneaux et matrices photovoltaïques.

Les cellules sont normalement groupées en modules, lesquels sont encapsulés en avec divers matériaux pour protéger les cellules et les connecteurs électriques de l'environnement. Comme le montre la figure, un module consiste en le groupement de N cellules en série et M cellules en parallèle[9][21].

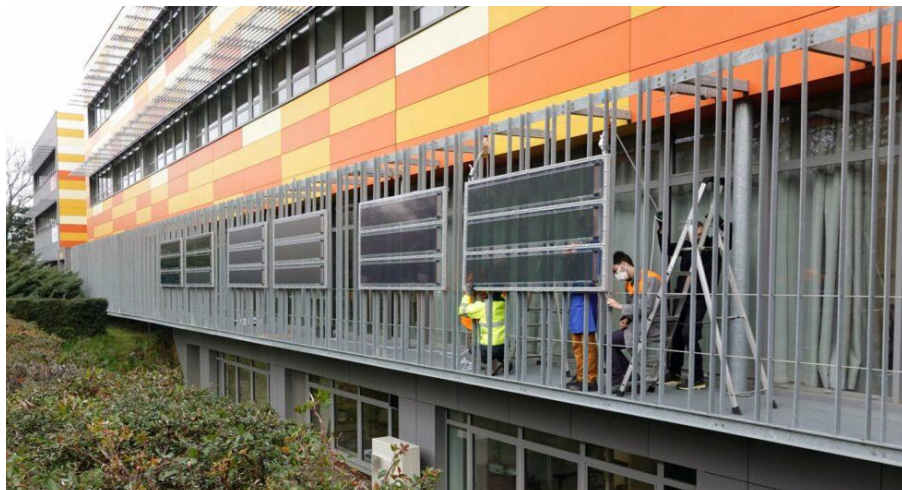
## 8.-NOTRE CAS D'ÉTUDE

### 8.1.-Contexte. Des démonstrateurs solaires sur le campus de l'ICAM appartenant à ASCA.

Grâce au partenariat de l'ICAM Nantes et le groupe ARMOR, s'effectue le lancement d'un programme de déploiement à grande échelle et d'analyse des films organiques photovoltaïques fournis par ASCA pour le bâtiment (dit produits BAPV-Building Applied Photovoltaics, photovoltaïque appliqué sur le bâtiment)[29].

Ce projet a été baptisé comme "RESTORE" et s'élève à un montant de près de 600.000 € . Il aura lieu sur le campus de l'ICAM à Carquefou et sera maintenu sur plus de 10 ans. En plus, comprendra une première phase de R&D (Recherche et Développement) pendant deux ans avec un monitoring poussé suivi d'une deuxième phase d'exploitation sur plusieurs années.

Afin de concrétiser la première phase de ce programme, un banc a été installé sur le campus la dernière semaine de janvier.



**Figure 8.1.- Installation des OPV dans le bâtiment principal de l'ICAM.  
Extrait du site officiel de ASCA.**

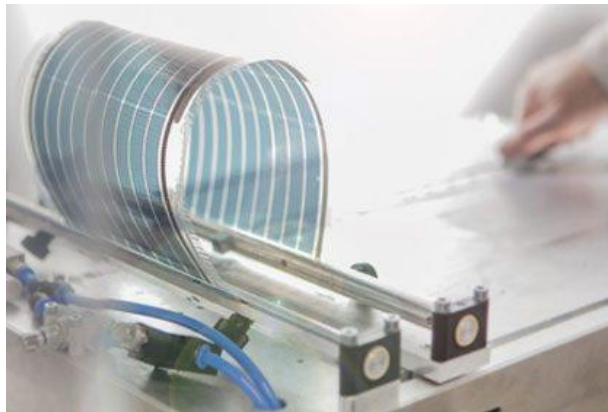
Le but de cette étape stratégique est l'industrialisation des produits BAPV, qui offrent de multiples solutions aux enjeux du secteur du bâtiment mais également pour la formation des ingénieurs et techniciens de demain. On veut valider à grande échelle la valeur ajoutée des films OPV ASCA dans les conditions réelles d'utilisation.

## 8.2.-Caractéristiques techniques du film ASCA.

Le film ASCA se compose de fines couches d'encre, déposées grâce à un procédé d'enduction sur un film mince et souple, permettant d'offrir des atouts innovants qu'on va mentionner dans les paragraphes suivants. Ce film se base sur des composés semi-conducteurs à base de polymères organiques.

En regardant la fiche technique, on peut souligner les caractéristiques suivantes[28]:

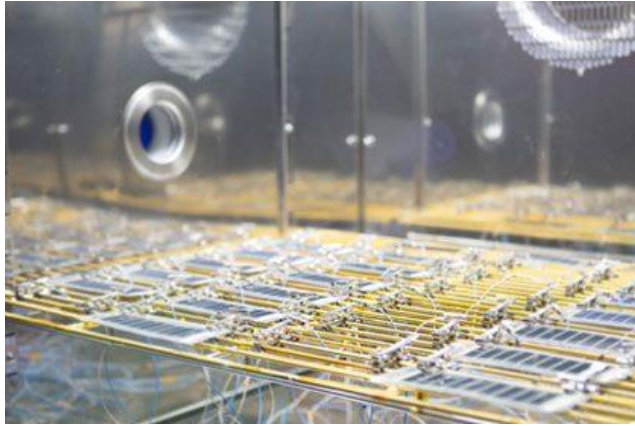
- ❖ *Flexibilité.* Grâce à sa flexibilité, le film est capable de supporter certaines torsions, des déformations et des vibrations sans difficulté.



**Figure 8.2.- Test de flexibilité d'un film ASCA. Extrait du site officiel de ASCA.**

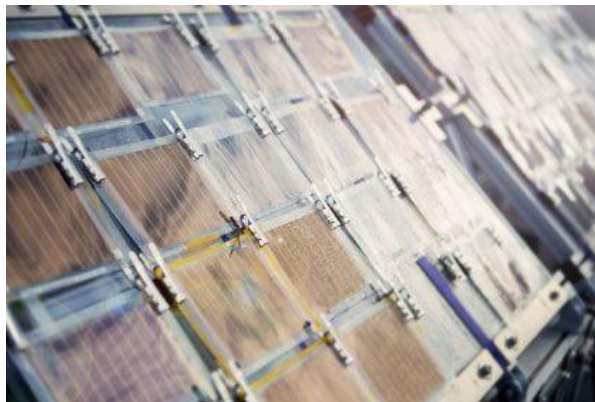
- ❖ *Légèreté.* Le film ASCA pèse environ 450g/m<sup>2</sup>, soit 30 fois moins que les autres technologies photovoltaïques.
- ❖ *Résistance au choc.*

- ❖ *Comportement à la chaleur.* La température n'a pas d'incidence sur le film ASCA. Par exemple, un module ASCA de 10 Wc à 20°C aura la même puissance à 35°C.



**Figure 8.3.- Essai de résistance à la chaleur.**

- ❖ *Production journalière.* Le film ASCA a une production énergétique journalière plus importante à puissance égale que les autres technologies photovoltaïques.



**Figure 8.4.- Test des mesures de production journalière.**

- ❖ *Retour énergétique (Energy Payback Time).* La technologie ASCA présente des atouts environnementaux forts avec un temps de retour énergétique court (EPBT).



**Figure 8.5.- Expérimentation sur le temps de retour énergétique photovoltaïques, c'est-à-dire, le temps nécessaire à une application pour fournir une énergie équivalente à l'énergie consommée pour la fabriquer.**

- ❖ *Low-light.* Pour être fonctionnel, le film ASCA est sensible à des niveaux de luminosité d'intensité plus faible que d'autres technologies.
- ❖ *Transparence.*



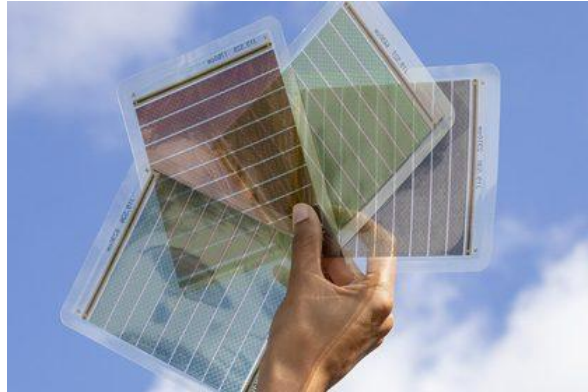
**Figure 8.6.- Photographie qui montre la transparence qu'un film ASCA peut atteindre.**

- ❖ *Durée de vie.* La durée de vie actuelle d'un module ASCA varie selon les conditions d'usage (intérieur ou extérieur), du type de film barrière utilisé et de son mode d'intégration. Cette durée peut s'étendre jusqu'à 20 ans.
- ❖ *Revêtements.* Il est possible de fonctionnaliser le film ASCA en ajoutant des revêtements spécifiques tels que verre, plastique,



composite, textile, pour optimiser son intégration dans les applications.

❖ *Couleurs.*



**Figure 8.7.- Échantillons de différentes couleurs.**

❖ *Dimensions.* Ils possèdent des standards en termes de largeur pour correspondre aux standards électriques, 5V, 12V, 24V.

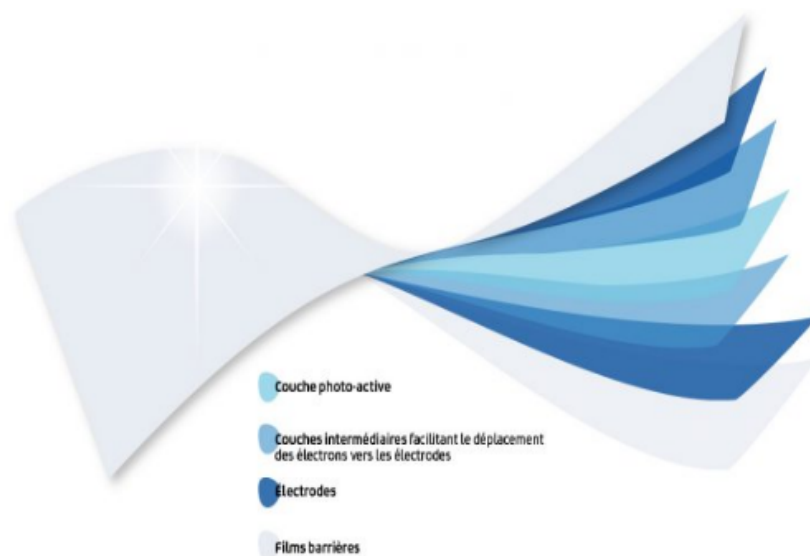


**Figure 8.8.- Échantillons des différentes dimensions des films.**

### 8.3.-Description du film photovoltaïque installé dans l'ICAM.

Le film photovoltaïque ASCA qui est installé dans le bâtiment principal de l'ICAM est caractérisé par l'enduction successive de différentes couches [28]. On peut compter un total de 7 couches distribuées de la suivante manière:

- Cinq couches fonctionnelles. Composées d'une couche de polymères photoactifs au cœur du dispositif, deux couches d'électrodes, l'une en partie supérieure de la couche photo-active, et l'autre en partie inférieure. En plus, deux couches intermédiaires sont ajoutées entre la couche photo-active et les couches d'électrodes facilitant le déplacement des électrons.
- Deux couches des films barrières. Elles encapsulent les couches fonctionnelles et les protègent des agressions extérieures telles que: l'oxygène, l'humidité, les rayons ultraviolets, les effets de la température, les dégradations mécaniques.



**Figure 8.9.-Disposition des couches d'un film ASCA installée à l'ICAM.**

Le comportement des modules photovoltaïques est étudié dans les conditions les plus proches de la réalité à l'aide d'un banc d'exposition en extérieur. Ces études sont aussi menées à l'aide d'enceintes climatiques permettant d'établir des niveaux de températures, de taux d'humidité et de luminosité spécifiques.

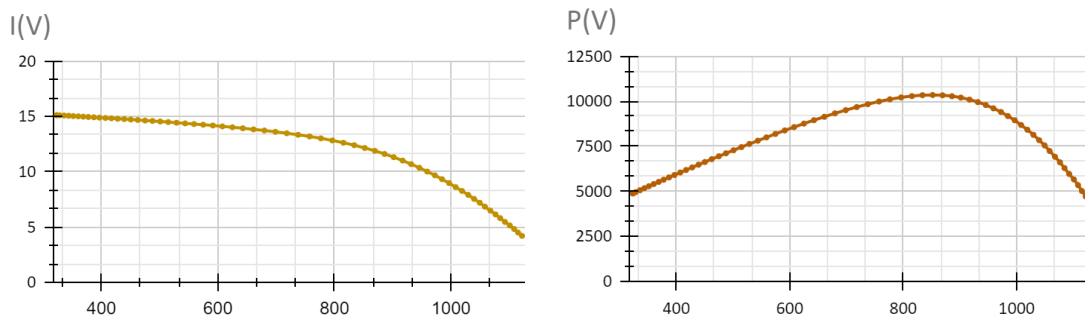
Chaque module étudié a une largeur de 0,285 m et une longueur de 2m, pourtant la surface d'un module est de 0,75 m<sup>2</sup>. Avec cette donnée on pourra facilement calculer la puissance lumineuse incidente qui dépendra de la surface et de la puissance lumineuse du moment.

## 9.- PRISE DE MESURES ET EXPÉRIMENTATION

Après l'installation des modules photovoltaïques dans le bâtiment principal de l'ICAM, on a procédé à une série de mesures pour analyser son fonctionnement et sa performance.

La première mesure a eu lieu le 22 avril 2021 à 15h00. En ce moment, le rayonnement solaire sur les panneaux était de  $690 \text{ W/m}^2$ , une température de  $18^\circ\text{C}$  et un angle d'inclinaison du soleil de  $55^\circ$ . Cet angle a été calculé dans un site web appelé [sunearthtools.com](http://sunearthtools.com) où nous pouvons mettre les coordonnées de l'ICAM ( $N46^\circ8'34,7712''$   $W1^\circ10'8,7276''$ ), la date et l'heure de la prise de mesures[31].

En plus, ces mesures ont été effectuées en connectant deux fils sur les bornes du module et en faisant varier la résistance de la charge, avec lesquelles on peut construire les courbes caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  (figure 9.1a et 9.1b).

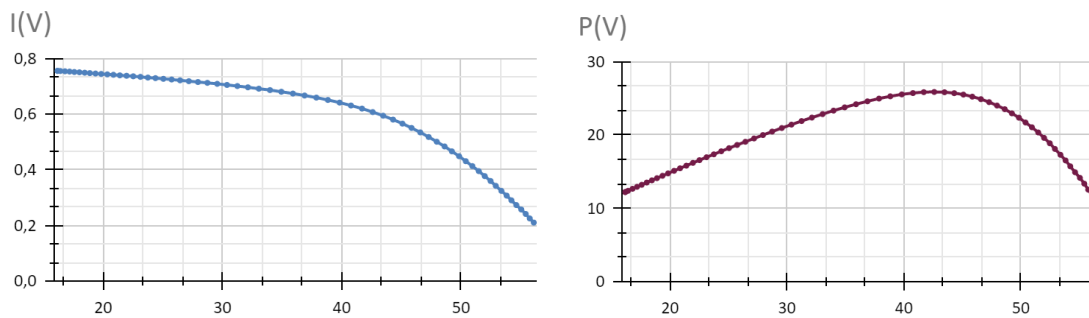


**Figure 9.1.- Représentation graphique des courbes caractéristiques d'un module ASCA à partir de données. a)  $I(V)$  et b)  $P(mW)$ .**

Ces mesures correspondent aux dimensions d'un module photovoltaïque, lequel est composé d'une série de cellules disposées dans une matrice  $20 \times 20$ . Par conséquent, les données obtenues correspondent à tout le module, c'est-à-dire, à une matrice de 20 lignes de cellules disposées en série, lesquelles sont en même temps disposées en parallèle.

Si nous appliquons par définition que le courant de la cellule sera le même que celui du module mais divisé par 20 et la tension de la cellule sera le même mais divisé par 20, nous pouvons facilement calculer le comportement d'une seule cellule d'un film ASCA. Pourtant, on pourra représenter les courbes caractéristiques d'une seule cellule.





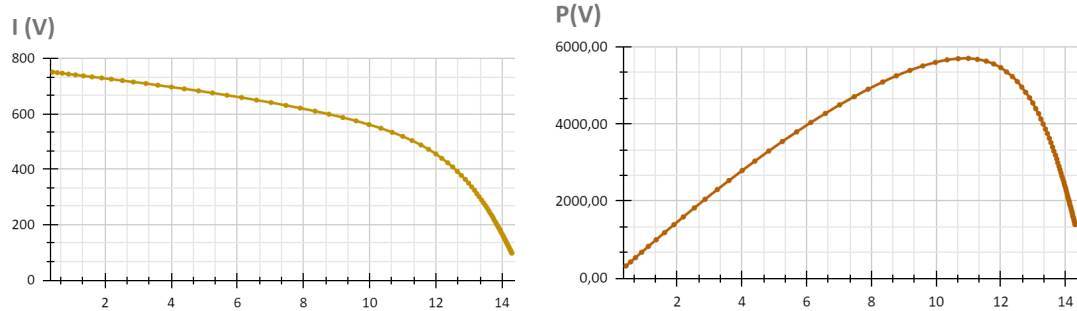
**Figure 9.2.- Représentation graphique de les courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque ASCA à partir des données prises à la main. a) I(V) b) P(V)**

Avec ces données calculées on peut souligner les points où la puissance est maximale:

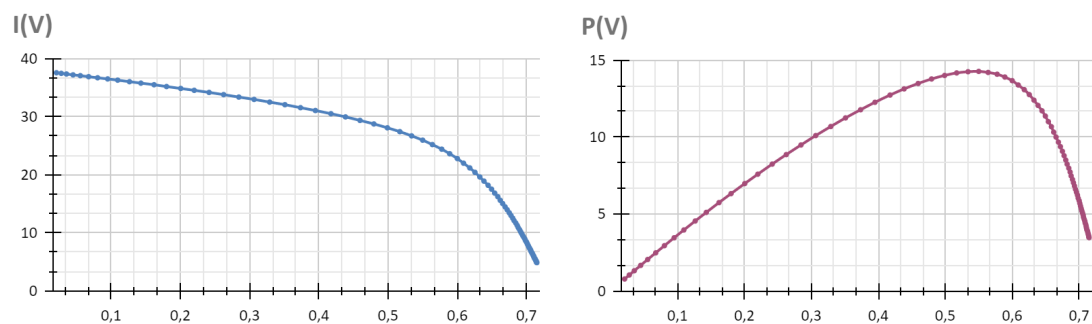
- Pour un module et avec les données obtenues, la puissance maximale a une valeur de 10.342'43 mW, et si on divise cette puissance par le cosinus de l'angle on obtient une puissance de 18.031'48 mW. Le point où la puissance maximale se trouve est (12'14,851'93).
- Pour une cellule et avec les données calculées, la puissance maximale a une valeur de 25,85 mW et en divisant par le cosinus de l'angle on a une puissance de 45'07 mW. Le point où la puissance est maximale est (0'607,42'6).

On peut calculer la puissance incidente qui sera de 225'59 W et en divisant la puissance obtenue on a un rendement de 4'58%.

Par la suite, une autre série de mesures a été effectuée le 14 juin de 2021 avec une puissance lumineuse plus forte que 920 W/m<sup>2</sup>, une température de 22°C et un angle d'inclinaison de 65°. Ainsi, on peut construire une autre fois les graphiques correspondant à les courbes caractéristiques de courant et de puissance tant du comportement de l'ensemble du module solaire et d'une seule cellule.



**Figure 9.3.- Représentation graphique des courbes caractéristiques d'un module ASCA à partir de données prises à la main. a) I(V) et b) P(mW).**



**Figure 9.4.- Représentation graphique de les courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque ASCA à partir des données prises à la main. a) I(V) b) P(V)**

Avec ces données calculées on peut souligner les points où la puissance est maximale pour cette puissance lumineuse donnée :

- Pour un module et avec les données obtenues, la puissance maximale a une valeur de 5.705'48 mW et en divisant par le cosinus de l'angle on a 13.500'32 mW. Le point où la puissance maximale se trouve est (11,518'68).
- Pour une cellule et avec les données calculées, la puissance maximale a une valeur de 14'2637 mW et en divisant par le cosinus de l'angle on a 33'75 mW. Le point où la puissance est maximale est (0'55, 25'934).

On peut calculer la puissance incidente qui sera de 221'62 W et en divisant la puissance obtenue on a un rendement de 2'57%.

Ensuite, nous devons choisir les données les plus appropriées pour faire la simulation. Le critère qui a été suivi a été d'obtenir une puissance plus grande, ce qui vraiment nous intéresse pour l'avenir.

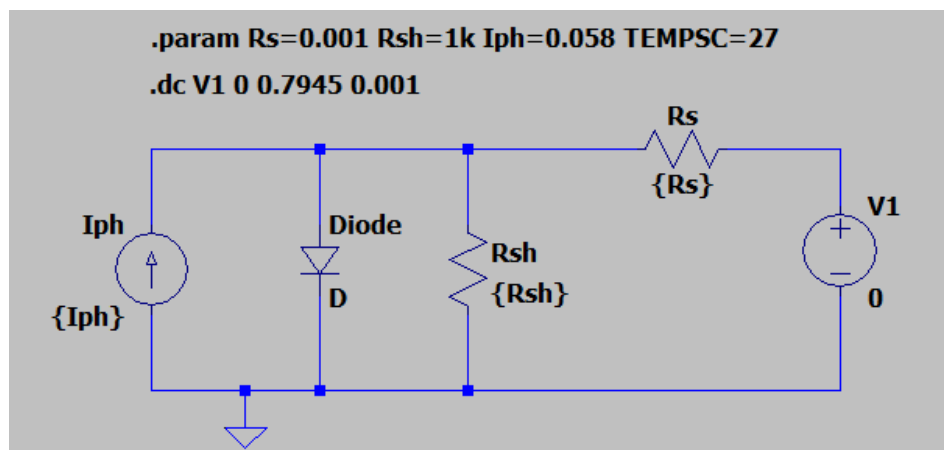
Même si nous avons plus de puissance lumineuse dans la deuxième prise de mesures, on obtient plus de puissance dans la première mesure en raison de l'angle d'inclinaison. En d'autres termes, la lumière frappe plus directement nos panneaux en avril. Ainsi, on a choisi cette prise de mesures pour faire les simulations avec LTSpice qu'on va montrer plus tard.

## 10.-SIMULATION AVEC LTSpice.

LTSpice s'agit d'un logiciel avec des performances élevées qui permet de représenter et de simuler des circuits électriques. Par conséquent, on a utilisé LTSpice pour faire des simulations avec différents modèles électriques que l'on montrera ci-dessous.

### 10.1.-Simulation du modèle électrique avec une diode par défaut.

Dans un premier temps, on a fait une simulation d'une seule cellule avec une modèle correspondant à la figure 7.1 qu'on avait déjà commenté et analysé[1].

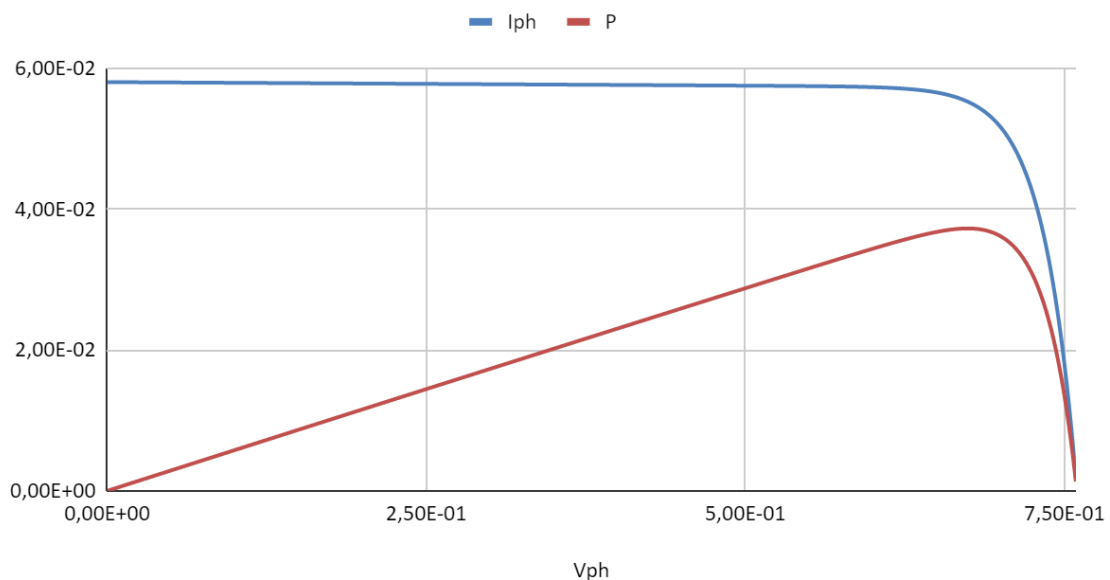


**Figure 10.1.- Schéma du première modèle de simulation sur LTSpice avec un diode.**

La figure ci-dessus montre le modèle électrique simulé dans le logiciel. Pour construire les courbes caractéristiques on a branché une source

de tension et en variant sa valeur on a pu faire la courbe I(V). En plus, on a établi les valeurs de chaque composant comme indiqué sur la figure avec la fonction ".param". Pour les valeurs de résistances on a choisi des valeurs hautes pour la résistances Rsh et des valeurs plus basses pour la résistance car les simulations des cellules photovoltaïques sont normalement effectuées avec des valeurs approximées à celles qu'on a utilisées. On a défini le courant photovoltaïque comme le courant de court circuit qu'on a obtenu sur la prise de mesures et on a fait varier la tension de 0 jusqu'à la tension de circuit ouvert.

I(V) et P(V)



**Figure 10.2.-Courbes caractéristique I(V) et P(V) du premier modèle électrique simulé.**

Nous pouvons extraire la puissance maximale au même temps que le point ( $V_{max}, I_{max}$ ) de la courbe caractéristique de la figure 10.2 . La puissance maximale s'agit de 37'23 mW et le MPP (Maximum Power Point) de (55'32, 673'1).

Cependant, ces valeurs ne correspondent pas aux mesures qu'on a prises. Cela est dû au fait que le logiciel LTSpice utilise une diode par défaut. Par conséquent, il est nécessaire de modifier les caractéristiques de la diode afin d'obtenir le modèle électrique plus similaire à la réalité.

## 10.2- Étude comparative des diodes optimales pour ajuster le circuit à la réalité.

Dans la bibliothèque LTSpice, il y a beaucoup de modèles de diodes avec des caractéristiques différentes. Après une série de nombreux tests, les diodes présentées ci-dessous sont celles qui, à mon avis, correspondent le mieux au modèle réel.

Nous avons utilisé les critères suivants pour identifier la bonne diode: on a comparé les courbes I(V) de chaque circuit avec des différentes diodes avec la courbe obtenue dans les mesures, laquelle qui a un taux d'erreur plus faible et qui a le MPP plus proche de notre modèle réel. Puis nous procédons à l'analyse de leur MPP, des caractéristiques et du comportement des courbes. Enfin, après cette étude comparative, nous choisirons celle qui s'adapte le mieux à notre modèle réel.

Tout d'abord, voici un tableau avec toutes les données fournies par LTSpice sur chaque modèle.

<b>Modèle</b>	<b>Is</b>	<b>Rs</b>	<b>N</b>	<b>Eg</b>	<b>Cjo</b>	<b>M</b>	<b>tt.</b>	<b>lave</b>	<b>Vpk</b>	<b>mfg</b>	<b>type</b>
ES1D	0.5u	25m	2	-	10.5p	0.4	15n	1	200	Vishay	silicon
RF1601NS2D	14.35 E-12	6.7789 E-3	0.964 81	0.92	271.16E -12	0.398 83	-	8	200	Rohm	Fast Recovery
RF2001NS2 D	181.15 E-12	5.7833 E-3	1.050 8	0.83	368.36 E-12	0.420 1	36.74 8E-9	10	200	Rohm	Fast Recovery

**Tableau 8.1.-Résumé des caractéristiques des diodes les plus optimales choisies.**

Avec:

Is= Le courant de saturation.

Rs= La résistance en série de la diode.

N= Le coefficient d'émission.

Eg= Energie d'activation.

Cjo= Capacité de jonction zéro-bia.

M= Coefficient de notation/pondération.

tt.= Temps de transit.

lave= Courant à la tension de claquage.

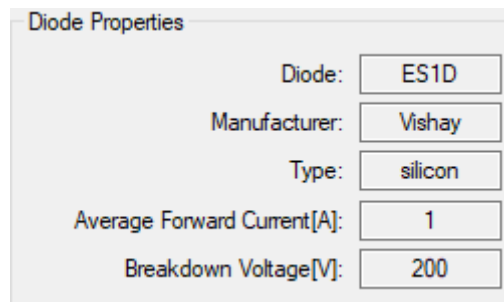
Vpk= Tension de rupture.  
mfg= Fabricant.  
type= Type de semiconducteur.

Les propriétés principales que ces modèles de diodes ont en commun sont:

- Un courant de saturation très petite, de l'ordre de  $10^{-12}$ .
- Une résistance en série environ 0.005 et 0.025.
- Une énergie d'activation d'entre 0'8 et 0'95.
- Un temps de transition de l'ordre de  $10^{-9}$  secondes.
- Une tension de rupture de 200 V.

### A) Diode ES1D.

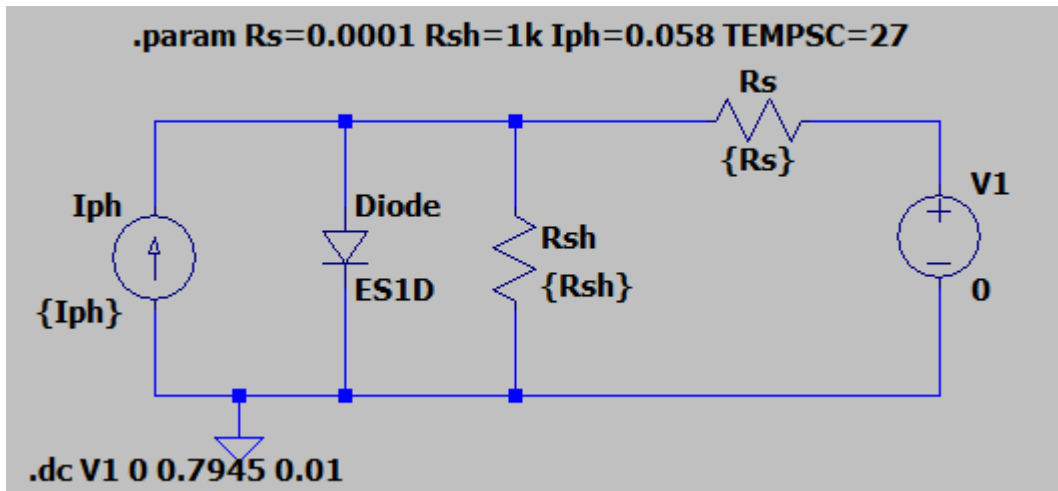
La première diode qui a répondu à nos critères est le modèle ES1D avec les caractéristiques suivantes:



Diode Properties	
Diode:	ES1D
Manufacturer:	Vishay
Type:	silicon
Average Forward Current[A]:	1
Breakdown Voltage[V]:	200

**Figure 10.3.-Capture d'écran des caractéristiques de la diode proportionnées par LTSpice.**

Nous pouvons souligner d'autres caractéristiques importantes telles que:

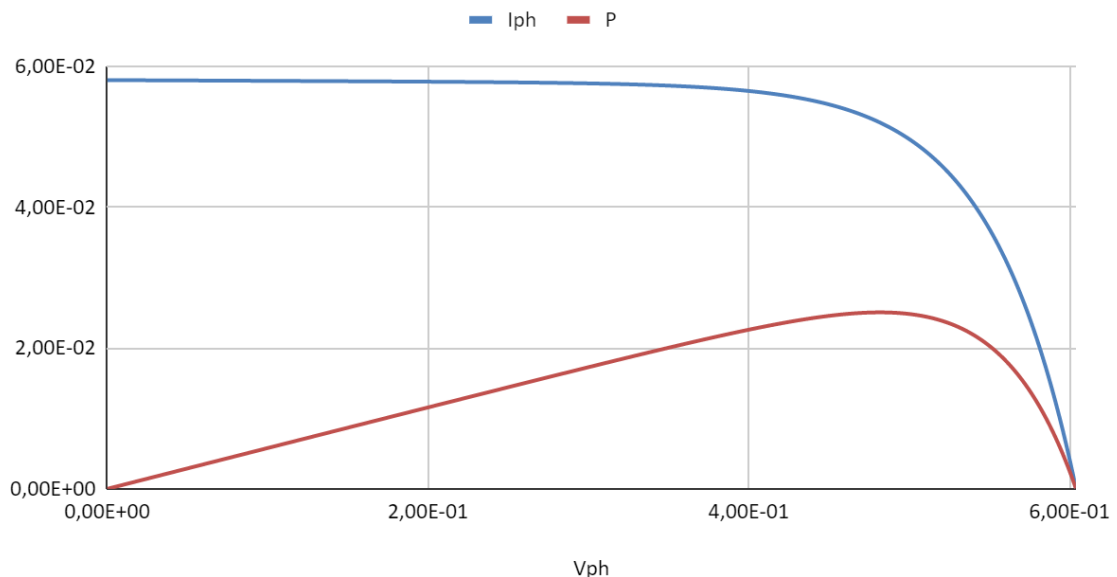


**Figure 10.4.- Schéma du modèle électrique avec la diode ES1D.**

On peut obtenir les suivantes données en regardant les courbes caractéristique:

- Pmax=25'043mW.
- Vmax=479'57mV.
- Imax=52'23mA.

I(V) et P(V)



**Figure 10.5.- Courbes caractéristiques I(V) P(V) du modèle électrique avec la diode ES1D.**

## B) Diode RF1601NS2D.

La suivante diode qui a répondu à nos critères est le modèle RF1601NS2D avec les caractéristiques suivantes:

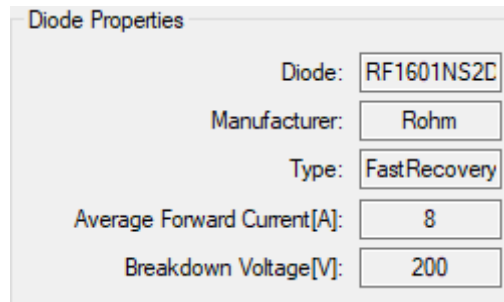


Figure 10.6.-Capture d'écran des caractéristiques de la diode proportionnées par LTSpice.

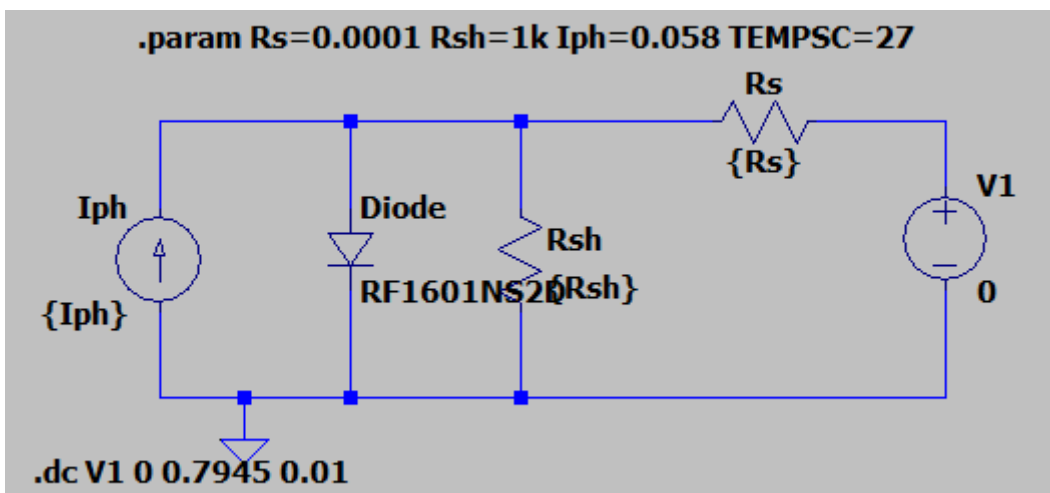


Figure 10.7.- Schéma du modèle électrique avec la diode RF1601NS2D.

On peut obtenir les suivantes données en regardant les courbes caractéristique:

- $P_{max}=26'1mW$ .
- $V_{max}=478'29mV$ .
- $I_{max}=54'56mA$ .



I(V) et P(V)

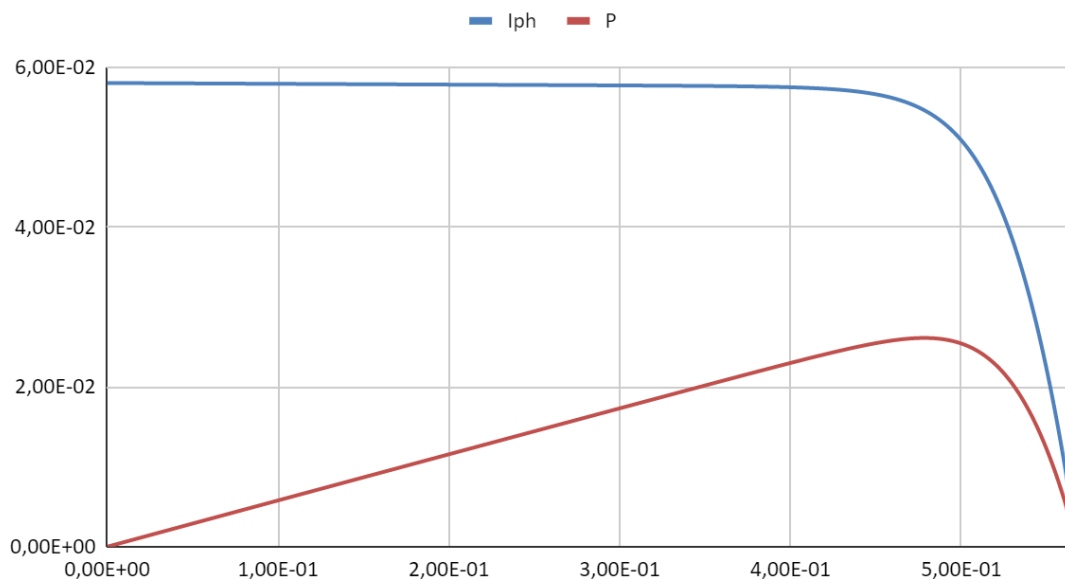


Figure 10.8.- Courbe caractéristiques de I(V) et P(V) du modèle électrique avec la diode RF1601NS2D.

### C) Diode RF2001NS2D.

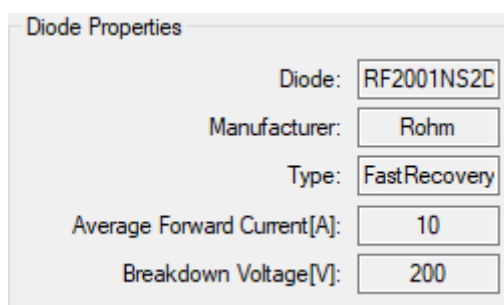
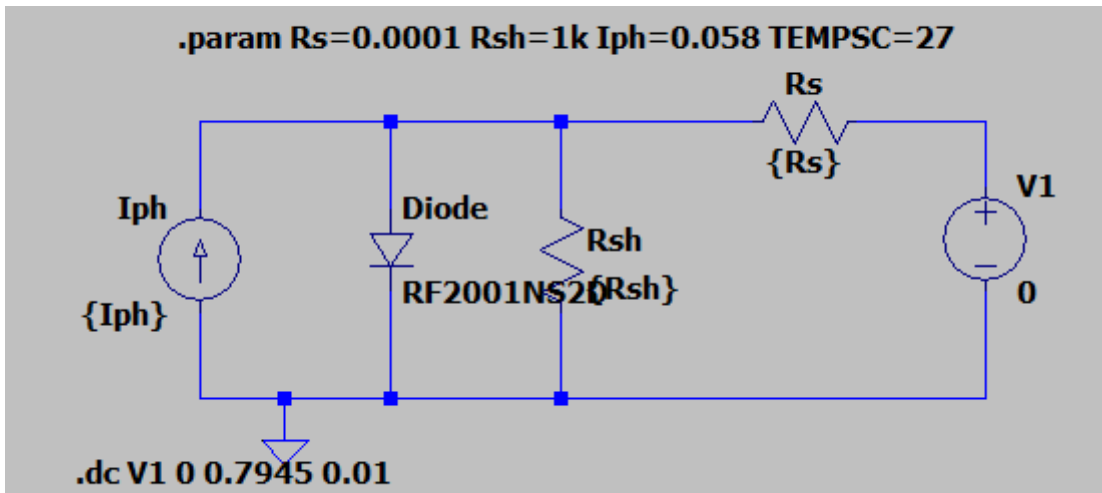


Figure 10.9.-Capture d'écran des caractéristiques de la diode proportionnées par LTSpice.

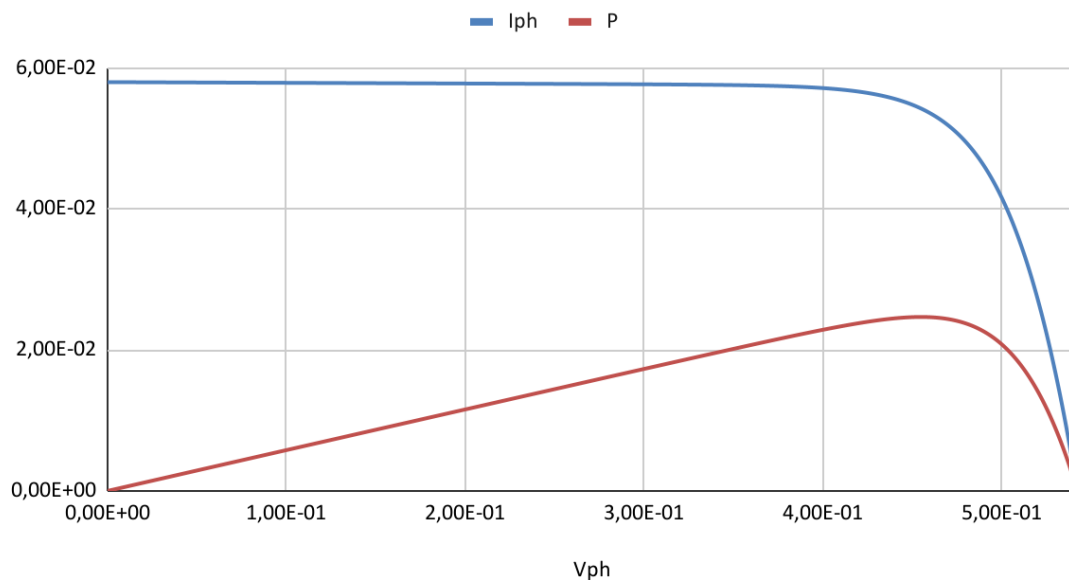


**Figure 10.10.- Schéma du modèle électrique avec la diode RF2001NS2D.**

On peut obtenir les suivantes données en regardant les courbes caractéristique:

- Pmax=24'65 mW.
- Vmax=454 mV.
- Imax=54'29 mA.

I(V) et P(V)



**Figure 10.11.- Courbe caractéristique P(V) du modèle électrique avec la diode RF2001NS2D.**

Dans le suivant tableau comparatif on peut voir les MPP de chaque modèle de diode:

	I <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>
ES1D	52'23	479'57	25'05
RF1601NS2D	54'56	478'29	26'095
RF2001NS2D	54'29	454	24'647

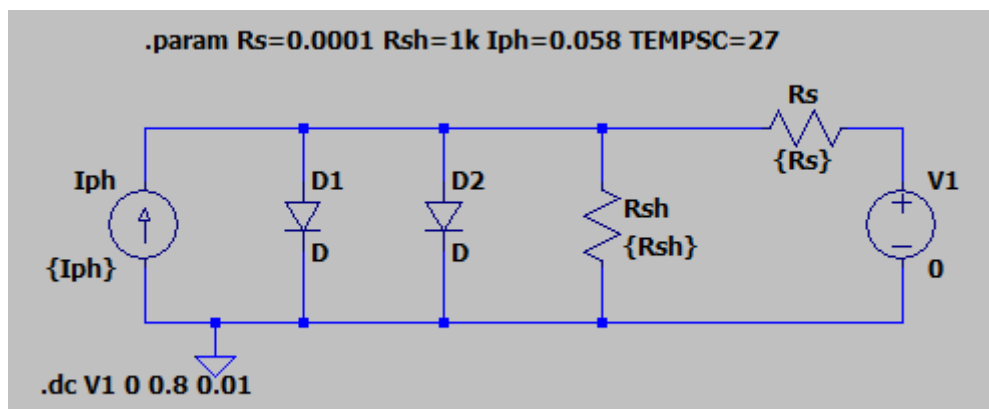
Dans ce cas, la diode qui s'adapte mieux à notre modèle réel est la diode RF1601NS2D.

### 10.3.- Modèle électrique avec deux diodes par défaut.

Après avoir lu plusieurs articles, on a considéré intéressant d'évaluer un modèle électrique composant deux diodes[1][5][32] comme on peut voir dans la figure 10.13. Le modèle contient deux diodes en parallèle avec la résistance R<sub>sh</sub> au contraire de le modèle antérieur qu'il avait seulement une diode. Selon les articles mentionnés ci-dessus, le modèle avec deux diodes est meilleur et peut correspondre plus étroitement au modèle réel mais on va vérifier si c'est vrai.

On a utilisé les mêmes critères que pour le modèle à deux diodes, c'est-à-dire, comparer les courbes caractéristiques et regarder la marge d'erreur.

Tout d'abord on a simulé le modèle électrique avec la diode par défaut pour voir quels résultats nous pouvons obtenir initialement.

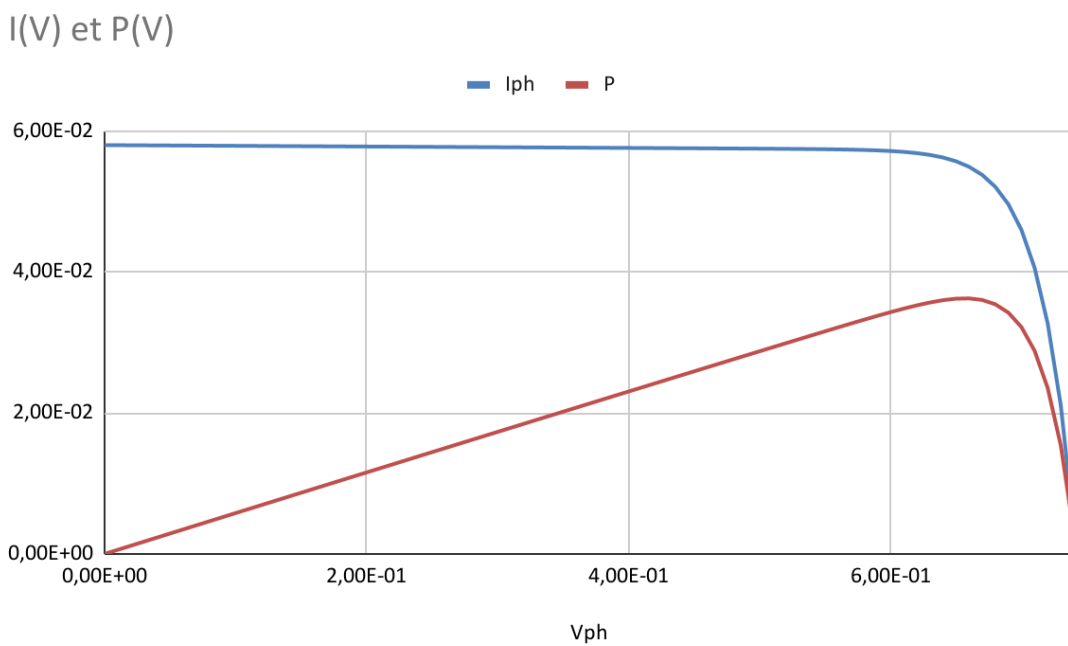


**Figure 10.12.- Schéma du modèle électrique avec le modèle avec deux diodes.**

On peut obtenir les suivantes données en regardant les courbes caractéristique:

- $P_{max}=36'25mW$ .
- $V_{max}=660'016mV$ .
- $I_{max}=54'46mA$ .

Les courbes caractéristiques de ce cas sont représentées dans les figures suivantes. Cependant, on peut voir que nous avons le même problème avec la diode. Ainsi, il faut que nous choisissons un autre modèle de diodes et dans ce cas on doit choisir deux en utilisant le même critère que dans la section précédente.



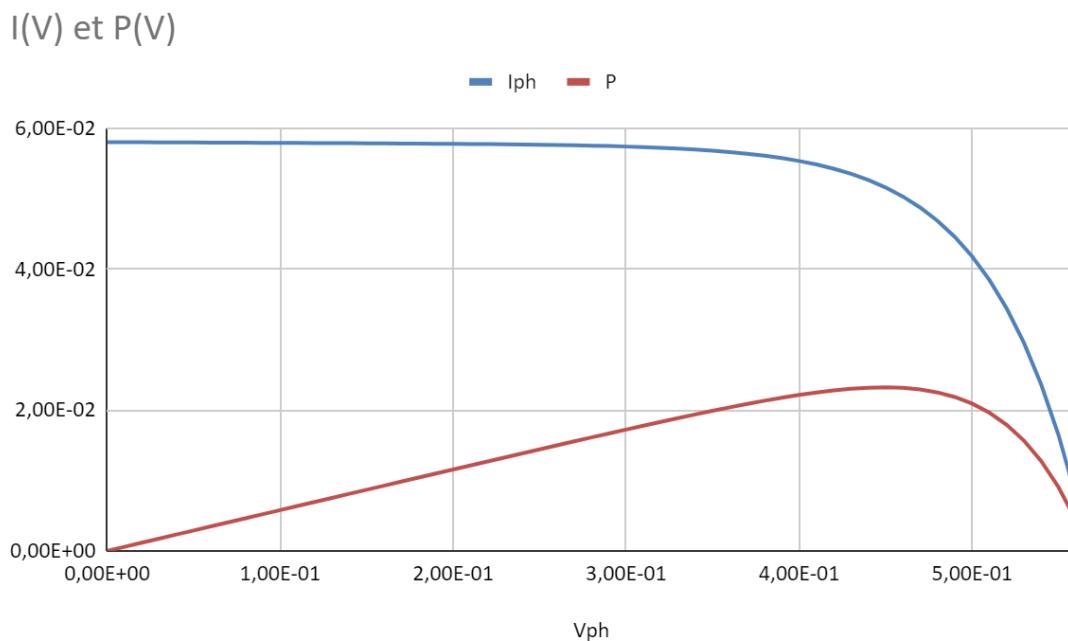
**Figure 10.13.- Courbe caractéristique P(V) du modèle électrique avec le modèle avec deux diodes.**

## 10.4.-Étude comparative pour sélectionner deux diodes pour le modèle proposé de deux diodes.

Nous avons essayé les mêmes modèles de diodes déjà choisis en analysant le modèle électrique avec un diode pour voir quelle est la performance dans le modèle de deux diodes.

### A) Diode ES1D.

En essayant la diode ES1D on va obtenir les caractéristiques suivantes courbes caractéristiques.



**Figure 10.14.- Courbes caractéristiques I(V) P(V) du modèle électrique avec la diode ES1D.**

Où on peut souligner les suivants paramètres caractéristiques:

$P_{max} = 23'2 \text{ mW}$

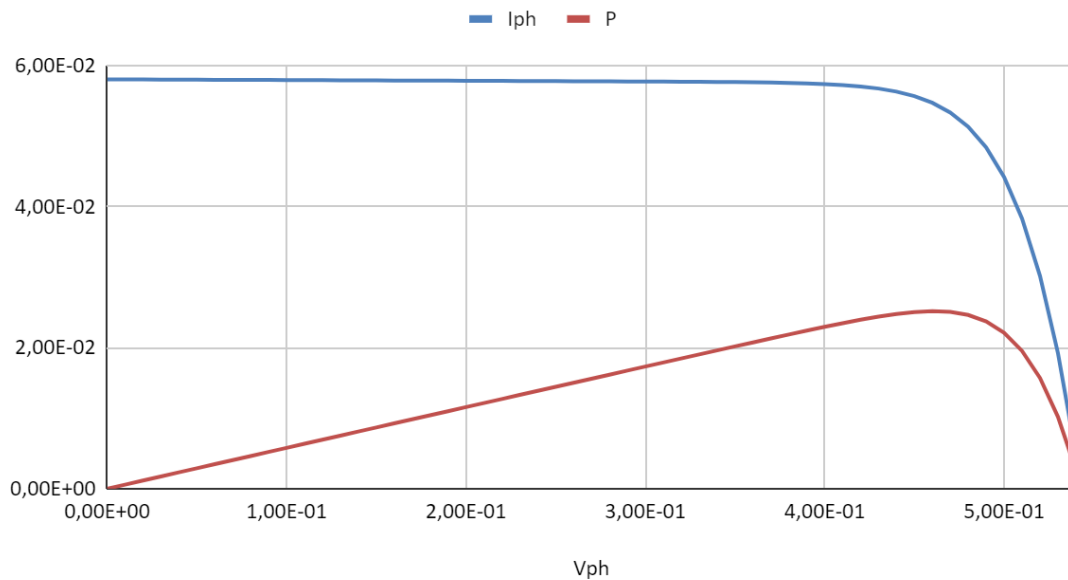
$V_{max} = 450'86 \text{ mV}$

$I_{max} = 51'45 \text{ mA}$

### B) Diode RF1601NS2D.

En essayant la diode RF1601NS2D on va obtenir les caractéristiques suivantes courbes caractéristiques.

I(V) et P(V)



**Figure 10.15.- Courbe caractéristiques de I(V) et P(V) du modèle électrique avec la diode RF1601NS2D.**

Où on peut souligner les suivants paramètres caractéristiques:

$P_{max} = 23'63 \text{ mW}$

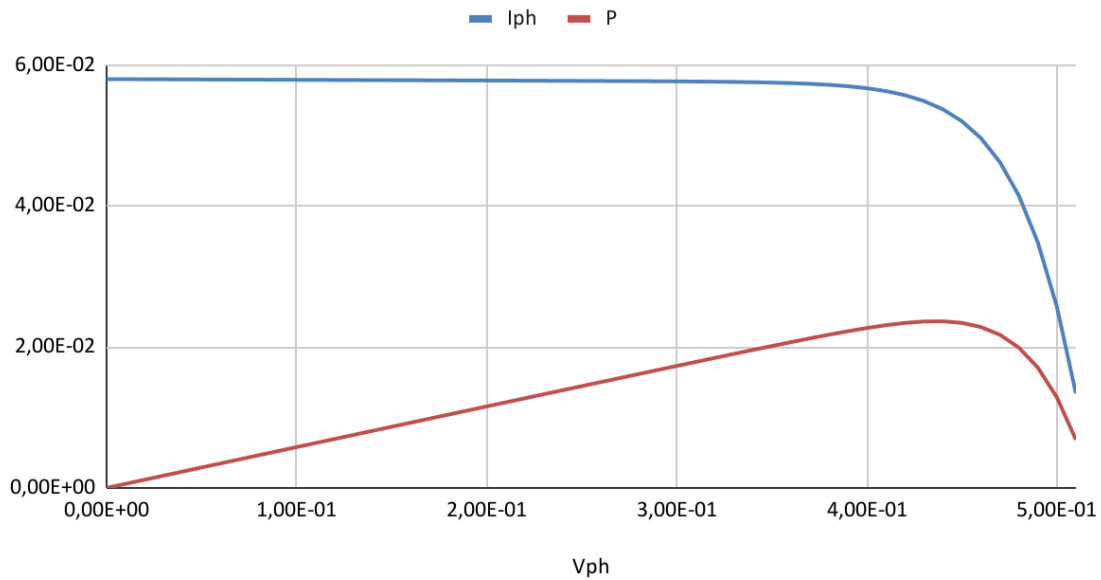
$V_{max} = 437'67 \text{ mV}$

$I_{max} = 53'993 \text{ mA}$

### **C) Diode RF2001NS2D.**

En essayant la diode RF2001NS2D on va obtenir les caractéristiques suivantes courbes caractéristiques.

I(V) et P(V)



**Figure 10.16.- Courbe caractéristique P(V) du modèle électrique avec la diode RF2001NS2D.**

Où on peut souligner les suivants paramètres caractéristiques:

$P_{max} = 25'14 \text{ mW}$   
 $V_{max} = 459'48 \text{ mV}$   
 $I_{max} = 54'73 \text{ mA}$

Dans ce tableau on peut regarder les résultats obtenus sur la simulation de la modèle avec deux diodes:

	$I_{max}$	$V_{max}$	$P_{max}$
ES1D	51'45	450'86	23'2
RF1601NS2D	53'993	437'67	23'63
RF2001NS2D	54'73	459'48	25'14

Dans ce cas, la diode qui s'adapte mieux est la diode RF2001NS2D en termes de puissance maximale.

## 10.5.- Conclusion

Comme on a pu le voir dans ce chapitre, il y a des différences entre les deux modèles essayés. Les deux modèles avec différents modèles de diodes montrent une performance correcte. Même si avec le modèle avec une diode on a obtenu un meilleur résultat, le modèle avec deux diodes présente un léger avantage. Il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau, c'est-à-dire, le courant circule plus facilement. En plus, on possède plus de paramètres qui nous permettront d'avoir plus de précision dans nos résultats.

Ce modèle peut être mieux optimisé si on possède une quantité suffisante de données expérimentales pour déterminer l'ensemble des paramètres et en utilisant l'aide de méthodes itératives.

## 11.-Optimisation MPPT. Méthode Observe & Perturb.

Les suiveurs solaires et les Maximum Power Point Trackers (MPPT) sont utilisés pour atteindre le point maximum que les modules solaires peuvent avoir[2].

Comme le soleil se déplace dans le ciel d'est en ouest, les radiations solaires accomplies par le panneau solaire varient continuellement, ce qui entraîne une dégradation des performances du panneau solaire; la cellule photovoltaïque commence à fonctionner en dessous de sa puissance maximale. De même, à des températures plus élevées, les performances du module solaire se dégradent. La variation de l'ensoleillement modifie tous les paramètres ( $P_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ) de la cellule solaire, comme le montrent les courbes caractéristiques de la cellule photovoltaïque.

Les suiveurs solaires sont utilisés pour orienter les modules photovoltaïques vers le soleil afin de maximiser le l'accouplement de l'irradiation solaire. Inversement, les performances des modules photovoltaïques sont toujours vulnérables aux variations de l'ensoleillement en raison de la saison des nuages. Le MPPT est utilisé pour permettre à la cellule photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale en ajustant correctement le rapport cyclique du convertisseur. Jusqu'à présent,



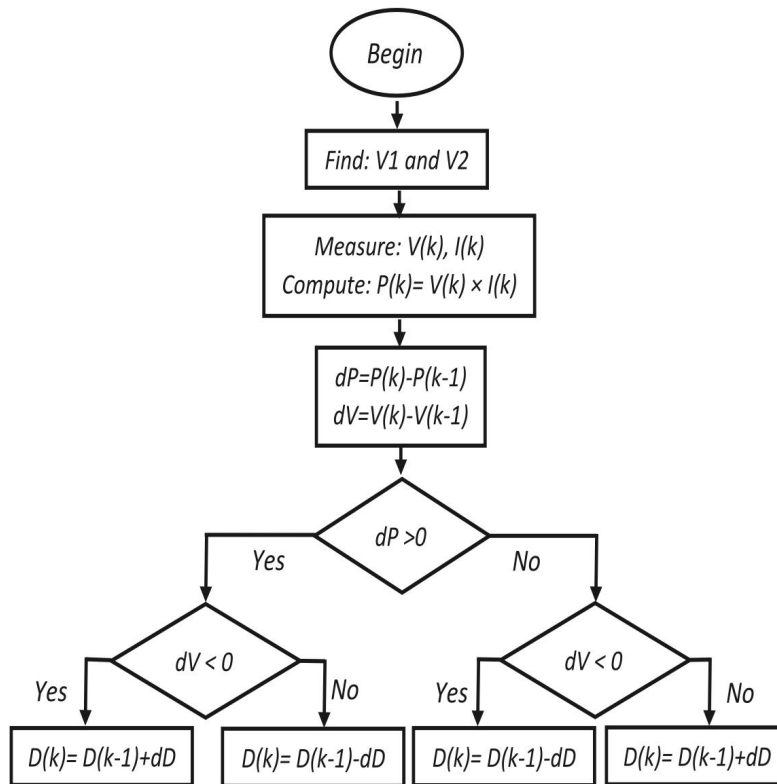
plusieurs algorithmes MPPT ont été mis en œuvre par les chercheurs dans divers articles.

Cette méthode se base en la comparaison de la pente de la courbe de puissance et détermine s'il faut incrémenter ou décrémenter le rapport cyclique. Les mots Perturb & Observe signifient essentiellement : il observe le niveau de tension et perturbe le voltage jusqu'à ce qu'il saisisse le point de puissance maximale.

### 11.1.-Principe de fonctionnement de la méthode P&O.

L'algorithme Perturb & Observe conventional c'est une processus continue de observation et perturbation jusqu'à ce que le point de fonctionnement converge vers le point de puissance maximale[30].

L'algorithme compare la puissance et les tensions du temps (K) avec l'échantillon à un temps (K-1) et prédit le temps d'approche de la MPP. Une petite perturbation de la tension modifie la puissance du panneau solaire si la modification de la puissance est positive, la perturbation de la tension se poursuit dans la même voie. Mais si la puissance delta est négative, cela indique que le MPP est loin et la perturbation est diminuée pour atteindre le MPP. L'ensemble de la courbe photovoltaïque est vérifié par de petites perturbations pour trouver le MPP qui augmente le temps de réponse de l'algorithme. En plus, si la perturbation augmente, il peut générer des oscillations en régime permanent.



**Figure 11.1.- Schéma du fonctionnement de l’algorithme P&O principal.**

Perturbation	Delta P	Resulting Perturbation
+ve	+ve	+ve
+ve	-ve	-ve
-ve	+ve	-ve
-ve	-ve	+ve

**Tableau 11.1.-Tableau de combinaisons de l’algorithme P&O.**

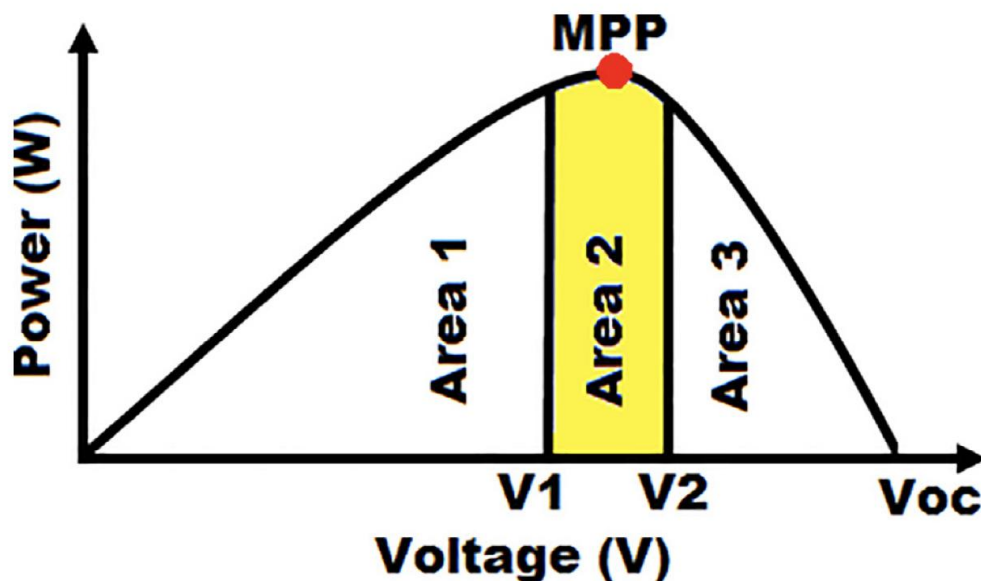
Le fonctionnement principal de l'algorithme est basé sur ceux décrits ci-dessus. Cependant, plusieurs modifications ont été proposées au fur et à mesure que des problèmes ont été rencontrés concernant le temps de réponse et les oscillations en régime permanent.

## 11.2.- Algorithme P&O avec des modifications.

Comme nous l'avons décrit précédemment, on se trouve avec des complications liées avec le temps de réponse et avec les oscillations en régime permanent. Ainsi, nous proposons un algorithme qui limite l'espace

de recherche à seulement un 10% de la courbe de puissance, ce qui réduit non seulement le temps de réponse mais aussi les oscillations.

De cette manière, on peut diviser la courbe en trois zones (Figure 11.2) puisque la tension correspondant à la puissance maximale est d'environ un 76% de la tension correspondante au circuit ouvert.



**Figure 11.2.-Courbe caractéristique de la puissance en fonction du voltage divisé en trois zones.**

Comme nous pouvons le voir dans le tableau, les zones 1 et 3 contiennent l'espace de recherche qui ne sera pas inclus. Pourtant, on se concentrera dans le zone 2, qui contient le MPP et qui représente un 10% de la cuve photovoltaïque. Cette partie de la graphique commence par la valeur qui correspond à 70% de la tension Voc et finit par la valeur qui correspond à 80% de Voc, nous appellerons ces valeurs V1 et V2 respectivement. Nous allons faire la recherche dans cet extrait de la graphique pour réussir à avoir une diminution du temps de réponse et d'oscillations au même temps que nous recherchons le point maximale. Le but de ce nouvel algorithme est de trouver la zone 2, qui contiendra le MPP.

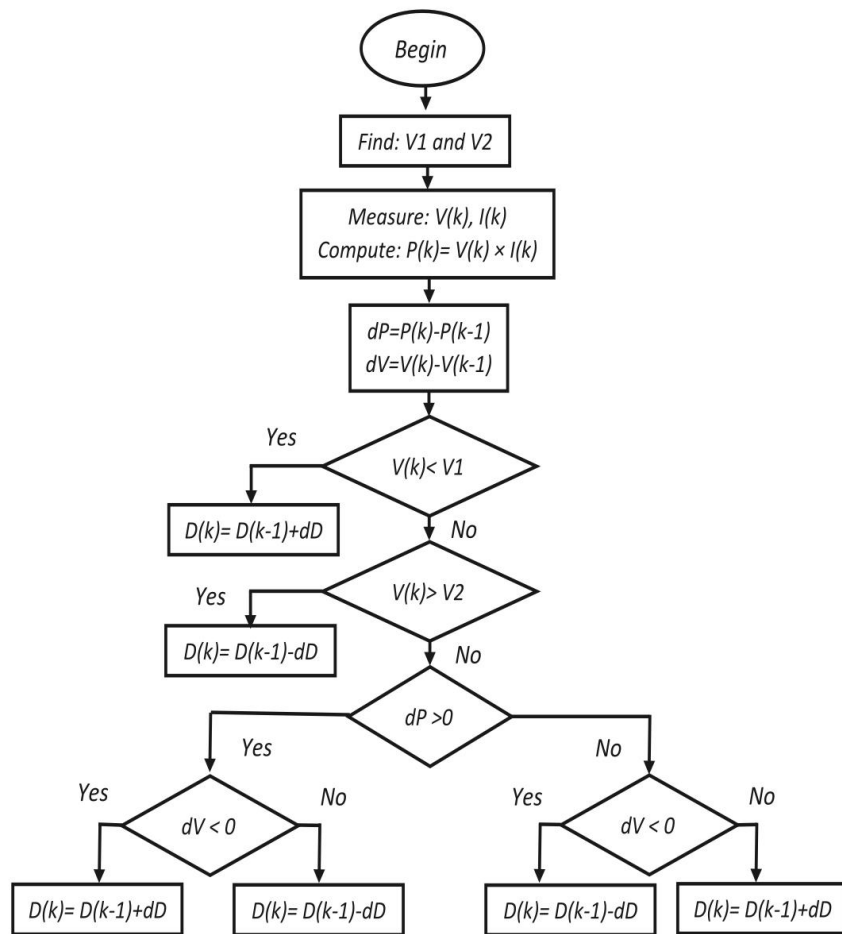
	Starting (% of Voc)	Ending (% of Voc)	Total area (% of Voc)
Area 1	0	70	70
Area 2	70	80	10
Area 3	80	100	20

## **Tableau 11.2.-Tableau descriptif de chaque zone de la courbe caractéristique de la puissance.**

Nous allons maintenant expliquer comment fonctionne cette nouvelle modification à l'aide du schéma de la figure et d'une série d'étapes:

1. Dans un premier temps, l'algorithme mesure le voltage, le courant et obtient la puissance par la multiplication de ces deux données. En plus il calcule la variation de puissance et de voltage, qui sera utilisé postérieurement.
2. Dans un deuxième temps, l'algorithme vérifie si le voltage mesuré est plus petit que  $V1$ . Si cette affirmation est vraie, on se déplace à droite dans la courbe.
3. Sinon, on vérifie si le voltage mesuré est plus grand que  $V2$ . Si cette affirmation est vraie, on se déplace à gauche dans la courbe.
4. Lorsque le voltage ne soit pas supérieur à  $V2$ , on vérifie si la variation de puissance est positive ou négative et on se trouve avec 4 cas:
  - A. La variation de puissance est positive et la variation de tension est négative. Dans ce cas, il faut se déplacer à droite dans la courbe.
  - B. La variation de puissance est positive et la variation de tension est positive. Dans ce cas, il faut se déplacer à gauche dans la courbe.
  - C. La variation de puissance est négative et la variation de tension est négative. Dans ce cas, il faut se déplacer à gauche dans la courbe.
  - D. La variation de puissance est négative et la variation de tension est positive. Dans ce cas, il faut se déplacer à droite dans la courbe.
5. Avec quelques perturbations, on peut obtenir facilement le point de puissance maximale et rester dans ce point.

Avec cette modification on peut facilement trouver le MPP dans des conditions constantes. Toutefois, si celle-ci change, il suffira d'une série d'itérations pour atteindre le point le plus élevé et le maintenir lorsque l'éclairement change.



**Figure 11.3.-Schéma du fonctionnement de l’algorithme en concentrant la recherche sur la zone 2.**

Le code correspondant à l’algorithme P&O à utiliser pour la simulation a été ajouté en annexe. Ce code suit la même structure que le schéma expliqué précédemment traduit en langage C.

### 11.3.-Résultats des mesures.

Le 28 juin de 2021 nous avons fait deux simulations pour tester le premier code qui se trouve dans l’annexe, lequel ne contient pas la modification expliquée dans la partie antérieure du chapitre.

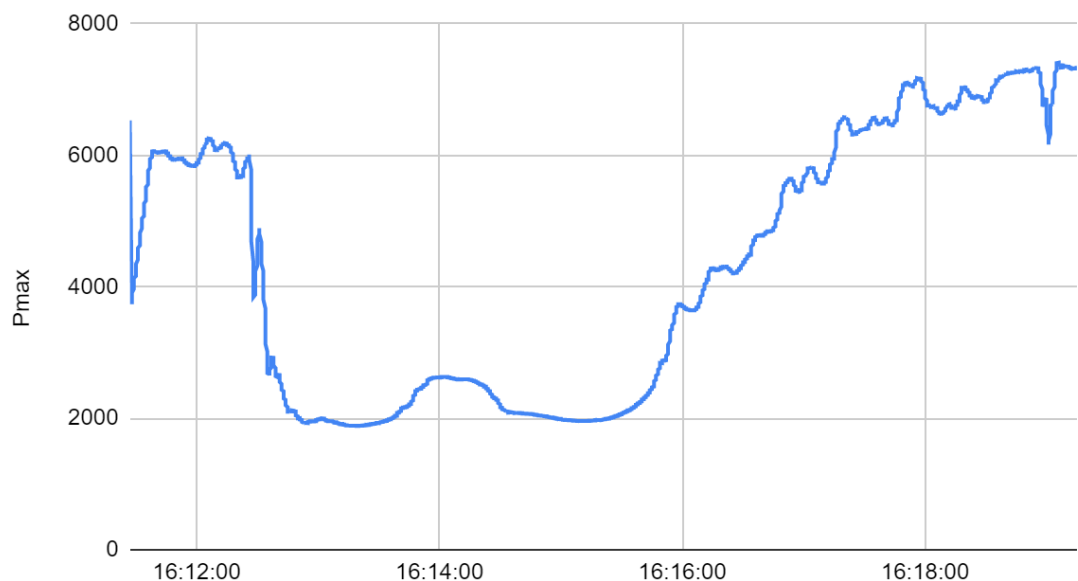
Dans cette simulation la puissance lumineuse était d’environ 650 W/m<sup>2</sup> et nous avons obtenu un courant de court-circuit de 0,82 A et une tension de circuit ouvert de 15 V pour tout le module, qui correspond à les

données qu'on a déjà prises avant. Cependant, on verra dans cette partie du chapitre quels résultats on a obtenu dans les simulations de l'algorithme MPPT et quelles conclusions nous pouvons tirer.

La première simulation à été réalisée entre les 16h11 et les 16h19, où il y avait une puissance lumineuse haute, c'est-à-dire, il n'y avait pas de nuages et le soleil brillait avec peu d'interruption sur le module. C'est important de remarquer que le MPPT a tracé une puissance maximale de 7 W dans tout le module.

Comme nous pouvons le voir dans les courbes tracées sur Excel, la puissance maximale varie selon le temps. En plus, le point de puissance maximale passe par différents quadrants au fur et à mesure que la courbe évolue dans le temps, comme il se montre.

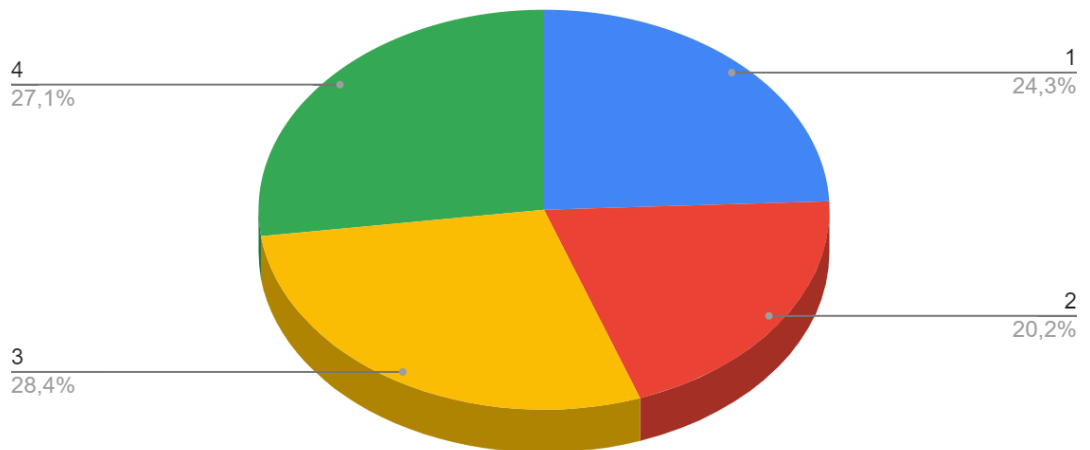
Pmax en fonction du temps



**Figure 11.4.- Graphique qui montre l'évolution de la puissance maximale en fonction du temps de la première simulation.**

Dans ce cas, on peut voir que nous avons atteint une puissance minimale de plus ou moins 2W dans tout le module et on arrive à une puissance de 7W.

## Proportionalité des quadrants

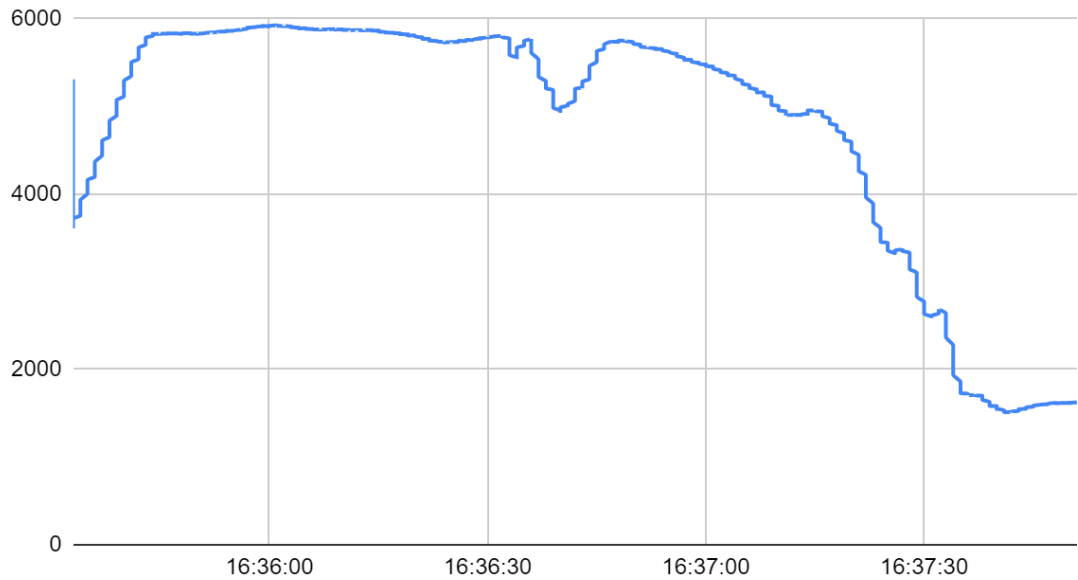


**Figure 11.5.- Graphique à secteurs qui montre la proportionnalité des quadrants où le point de puissance maximale se trouve de la première simulation.**

Dans la figure 11.5. nous pouvons voir comment est la proportionnalité des quadrants où la puissance maximale se trouve et conclure que ces valeurs sont très équilibrées, c'est-à-dire, il n'y a pas un quadrant spécifique de la courbe où le MPP se trouve.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une autre simulation de 16h35 à 16h37 et nous avons obtenu les mêmes types de graphiques que dans la première simulation. La puissance lumineuse moyenne dans ce cas est un peu plus basse que l'antérieur parce qu'il avait un peu de nuage.

Pmax en fonction du temps



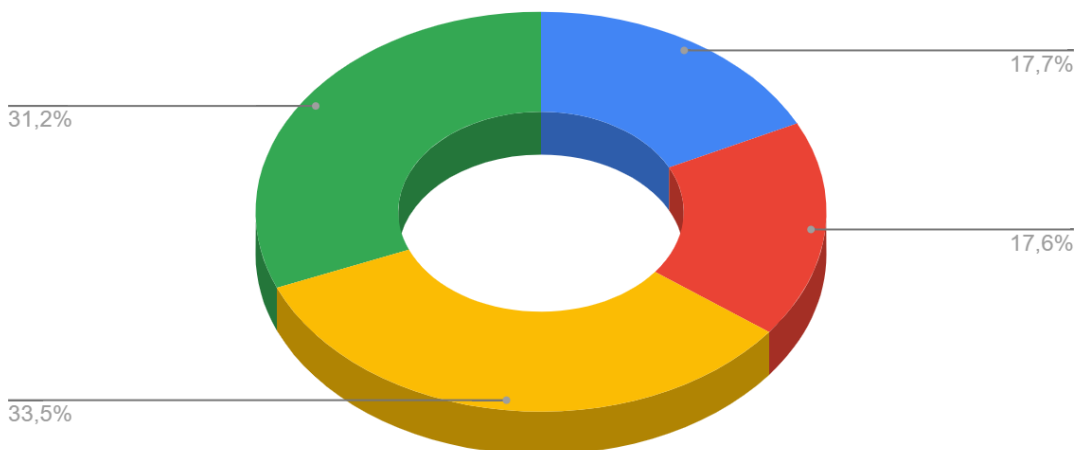
**Figure 11.6.- Graphique qui montre l'évolution de la puissance maximale en fonction du temps de la deuxième simulation.**

Dans la figure ci-dessus on peut souligner que la puissance maximale plus grande qu'on a trouvé dans ces deux minutes est plus ou moins de 6W et on n'arrive pas à 7W comme le cas antérieur où la puissance moyenne était un peu plus haute.

Comme on peut le voir dans la figure 11.7, la distribution des quadrants où le MPP se trouve est plus irrégulière parce que la simulation a eu lieu seulement pendant deux minutes.



## Proportionalité des quadrants



**Figure 11.7.- Graphique à secteurs qui montre la proportionnalité des quadrants où le point de puissance maximale se trouve de la deuxième simulation.**

### 11.4.- Conclusion et propositions pour les futurs chercheurs.

Il faut dire que la mesure exacte de la puissance lumineuse est très compliquée à mesurer parce qu'elle est en constante augmentation et diminution. Ce qui peut être vraiment intéressant, c'est d'obtenir un graphique du point de puissance maximale en fonction du rayonnement solaire. Pour cela, nous pouvons connecter un capteur de luminosité près du panneau solaire et mesurer le rendement pendant une journée. En même temps, nous pouvons exécuter l'algorithme MPPT et faire un graphique du point de puissance maximale en fonction de la puissance lumineuse à un moment donné.

Si nous faisons cela pendant plusieurs jours et à différentes périodes de l'année, nous pouvons voir pour quel type de conditions nous obtenons une puissance maximale. En outre, il serait pratique de mesurer d'autres types de paramètres, tels que la température, qui fait également varier la courbe caractéristique, comme nous l'avons vu au chapitre 7.3.

Pour conclure, il faudra à mes yeux tester le code avec les modifications pour voir s'il y existe plus ou moins d'oscillations. Et pour obtenir

les valeurs de V1 et V2 il faut essayer différents pourcentages correspondants à la valeur de Vco. Comme par exemple, une valeur de V1 du 50% de la tension Voc et une valeur de V2 du 90% de la tension Voc. Et à fur et à mesure que nous varions ces valeurs nous pourrions trouver plus facilement la zone où se trouve le point de puissance maximale

## 12.-Annexes

### ANNEXE 1.- Tableau comparatif des différentes générations de panneaux solaires.

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
1er génération				
<i>Silicium monocristallin</i>	24,7%	22,7%	12-20%	Production industrielle
<i>Silicium polycristallin</i>	20,3%	16,2%	11-15%	Production industrielle
2e génération				
<i>Silicium amorphe</i>	13,4%	10,4%	5-9%	Production industrielle
<i>Silicium cristallin en couche mince</i>	-	9,4%	7%	Production industrielle
<i>CIS</i>	19,3%	13,5%	9-11%	Production industrielle
<i>CdTe</i>	16,7%	-	6-9%	Production industrielle
3e génération				
<i>Cellule organique</i>	5,7%	-	-	Au stade de la recherche
<i>Cellule Grätzel</i>	11%	8,4%	-	Au stade de la recherche
<i>Cellules multi-jonctions</i>	39%	25-30%	-	Au stade de la recherche,, production

				exclusivement pour applications spatiales.
--	--	--	--	--

## ANNEXE II.- QUALITÉS DE LA TECHNOLOGIE ASCA.

Chaque composant a été sélectionné strictement pour que ce type de films ait des qualités aussi avantageuses que celles qu'on va numéroter ci-dessous.

- Optimisation de l'utilisation des ressources disponibles. Le film ASCA utilise la troisième et dernière génération de cellules photovoltaïques à base de polymères organiques. Ces cellules sont produites à partir de solutions liquides enduites en couches très fines sur un film mince.
- Sans composants rares ou toxiques. ARMOR garantit ainsi que toutes les substances toxiques et/ou cancérigènes soient exclues de la composition du film ASCA.
- Issu d'un procédé bas carbone. Il suffit de quelques mois pour produire une quantité d'énergie équivalente à celle qui a été nécessaire à sa production.
- 100% revalorisable. Les films ASCA ont la possibilité d'être valorisés en fin de vie selon un processus de revalorisation thermique CSR (Combustible Solide de Récupération).

## ANNEXE III.- Codes des algorithmes en langage C.

```
// beginning of your own MPPT
Vk = boost_busVoltage_V;
Pk = boost_power_mW;

Delta_P = Pk - Pk_m1;
Delta_V = Vk - Vk_m1;

Duty = 100;

if ( Delta_P > 0 ) {
  if ( Delta_V < 0 ) { // quadrant 1
    Num_quadrant = 1;
    Duty = Duty_m1 + Delta_duty;
  } else { // quadrant 2
```

```

    Num_quadrant = 2;
    Duty = Duty_m1 - Delta_duty;
}
} else {
    if ( Delta_V < 0 ) { // quadrant 3
        Num_quadrant = 3;
        Duty = Duty_m1 - Delta_duty;
    } else { // quadrant 4
        Num_quadrant = 4;
        Duty = Duty_m1 + Delta_duty;
    }
}

Pk_m1 = Pk;
Vk_m1 = Vk;
Duty_m1 = Duty;

if (Duty < 0) Duty = 0;

alpha_mppt = Duty;

// end of your own MPPT

```

## 13.-Références

- [1]CHEKNANE Ali, HILAL Hikmat S., FAYÇAL Djeflal, BENYOUCEF Boumediène, CHARLES Jean-Pierre « An equivalent circuit approach to organic solar modelling », *In Microelectronics Journal* 39, mars 2008, pp 1173-1180.
- [2]KAMRAN Muhammad, MUDASSAR Muhammad, FAZAL Muhammad Rayyan, ASGHAR Muhammad Usman, BILAL Muhammad, ASGHAR Rohail, « Implementation of improved Perturb & Observe MPPT technique with confined search space for standalone photovoltaic system », *In Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2018, 2-9.
- [3]EL KARKRI Anass, EL MALKI Zakaria, BOUACHRINE Mohammed, SEREIN-SPIRAU Françoise, SOTIROPOULOS Jean-Marc, « Characterization and simulation study of organic solar cells based donor-acceptor (D- $\pi$ -A) molecular materials », *In RSC Advances*, 2020, 18816-18823.
- [4]LILLIDEAL Mathilde R., MEDFORD Andrew J., MADSEN V. Morten, NORMAN Kion, KREBS Frederik C., « The effect of post-processing treatments on inflection points in current-voltage curves of roll-to-roll processed polymer photovoltaics », *In Solar Energy Materials & Solar Cells*, June 2020, pp 2018-2032.

- [5] B. MAZHARI, « An improved solar cell circuit model for organic solar cells », **In** *Solar Energy & Solar Cells*, 2006, 1021-1033.
- [6] MOLITON André, NUNZI Jean-Michel, « How to model the behaviour of organic photovoltaic cells », **In** *Polymer International*, 2006, 583-600.
- [7] RAMALINGAM Kakkan, INDULKAR Chandrasen, « Solar Energy and Photovoltaic Technology », **In** *Distributed Generation Systems*, 2017, 69-148.
- [8] FUSELLA Michael A., LIN YunHui L., RAND Barry P., « Organic photovoltaics (OPVs): Device Physics », **In** *Handbook of Organic Materials for Electronic and Photonic Devices*, 2019, 665-694.
- [9] KING D.L, BOYSON, W.E, KRATOCHVIL J.E, « Photovoltaic Array Performance Model », **In** *Sandia National Laboratories Report SAND*, 2004, 2004-3535.
- [10] KAZMERSKI S., « Photovoltaics: a review of cell and module technologies. », **In** *Renewable and Sustainable Energy Rev. (1-2)*, 1997, 71-170.
- [11] LASNIER F., ANG T.G., *Photovoltaic Engineering Handbook*, Adam Higler, Princeton, NJ, 258-297.
- [12] LORENZO E., « Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems », **In** *Artes Gráficas Gala, S.L., Madrid, Spain*, 1994.
- [13] NELSON J., « Organic photovoltaic films », **In** *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci 6 (1)*, 2002, 87-95.
- [14] KAMELIA Helaki, « Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque: Étude Comparative », **In** *Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'UMMTO (Tizi-Ouzou)*, 2012, 31-73.
- [15] GREENHAM N.C., Peng X., ALIVISATOS A.P., « Charge separation and transport in conjugated-polymer/semiconductor-nanocrystal composites studied by photoluminescence quenching and photoconductivity », **In** *Physical Review B 54 (24)*, 1996, 17628-17644.
- [16] PETRITSCH Klaus, « Organic solar cell architectures. PhD Thesis », **In** *Graz University of Technology*, 2000.
- [17] PRINCE M.B., « Silicon solar energy converters », **In** *Journal of Applied Physics 26 (5)*, 1955, 534-540.
- [18] RAPPAPORT Paul, « The photovoltaic effect and its utilization », **In** *RCA Review 20*, 1959, 373-397.
- [19] RITTNER Edmund S., « An improved theory for silicon p-n junctions in solar cells », **In** *Journal of Energy 1*, 1977, p-9.
- [20] WYSOCKI Joseph J., RAPPAPORT Paul, « Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion », **In** *Journal of Applied Physics 31*, 1960, 571-578.
- [21] BAYOD-RÚJULA Ángel Antonio, « Solar Photovoltaics », **In** *Solar Hydrogen Production*, 2019, 237-295.

- [22]MALLIARAS G.G., « Photovoltaics Devices from Organic Semiconductors », **In Encyclopedia of Materials**, 2001, 6981-6986.
- [23]WGJHM van Sark, « Design and Components of Photovoltaics Systems », **In Comprehensive Renewable Energy, Volume 1**, 2012, 679-695.
- [24]ELTAWIL M.A, ZHAO Z., « Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems- A review », **In Renewable and Sustainable Energy Reviews 14**, 2010, 112-129.
- [25]MARION B., « A method for modelling the current-voltage curve of a PV module for outdoor conditions », **In Progress in photovoltaics: Research and Applications 10**, 2002, 205-214.
- [26]BEYER H.G., BETCKE J. DREWS A., « Identification of a general model for the MPP performance of PV-modules for the application in a procedure or the performance check of grid connected systems », **In Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, 2004, 3073-3076.
- [27]Green M.A., EMERY K., KING D.L., « Solar cell efficiency tables », **In Progress in Photovoltaics Research and Applications 17**, 2009, 85-94.
- [28]<https://www.asca.com/cellule-solaire-souple-transparente/>
- [29]  
<https://www.asca.com/realisations/asca-structures/projet-restore-des-demonstrateurs-solaires-asca-sur-le-campus-de-licam/>
- [30]VIJAY Muni, « Comparative Analysis of Perturb and Observe Method and Current Based Method », **In Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication**, 2019, 1012-1016.
- [31] <https://www.sunearthtools.com/>
- [32]BELAOUT ABDESSLAM Fateh Krim, ABDERRAZAK ARABI Mouloud Ayad, « Comparaison entre les Modèles à une Seule Diode et Bishop de la Cellule Solaire », **In Advanced MPPT techniques for renewable energy systems**, 2016.
- [33]AHMED BEHALIL Mohcène, BOUAKKA Khayreddine, « Étude et comparaison des différentes configurations des panneaux photovoltaïques sous l'effet de l'ombrage partiel », **In Université Badji Mokhtar Annaba**, 2018-2019.
- [34]CHOVET A., MASSON P., « Physique des semi-conducteurs », **In École polytechnique Universitaire Marseille**, 2004-2005.