

**République Algérienne Démocratique Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique**  
**Université Ibn Khaldoun Tiaret**

**FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCE DE L'INGENIEUR**  
**DEPARTEMENT SCIENCE DE LA MATIERE**

**PROJET DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME**  
**MASTER EN ENERGIE SOLAIRE**

Présenté par :

**BENCHOHRA MOHAMED MOSTEFA**

**THEME**

**Extraction Des Paramètres D'une Cellule Solaire Eclairée**  
**(Sous illumination)**

**Soutenu le : 28/09/2011**

**Devant le jury:**

|                            |                               |                  |
|----------------------------|-------------------------------|------------------|
| <b>Mr Benrabah Bedhiaf</b> | Maître de conférence classe B | <b>Président</b> |
| <b>Mr Beldhal Chiekh</b>   | Maître de conférence classe A | <b>Examineur</b> |
| <b>Mr Allaoui Tayeb</b>    | Maître de conférence classe A | <b>Examineur</b> |
| <b>Mr Nasri djilalli</b>   | Maître de conférence classe B | <b>Encadreur</b> |

Promotion 2011

# **Remerciements**

**Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire de l'électronique de puissance du département de génie électrique de l'université de Tiaret.**

**Nous sommes très reconnaissants au département pour le soutien matériel nécessaire à la réalisation de ce travail.**

**On tient à remercier sincèrement:**

**Mr.D.Nasri, qui a encadré et suivi mon travail, ses compétences et son esprit critique ont été pour nous un soutien certain pour la réalisation de ce travail, qu'il soit assuré de notre très profonde reconnaissance pour la grande disponibilité et les entretiens constructifs qui ont accompagné notre travail.**

**Tous les enseignants du département qui nous a aidés durant ma formation.**

# Sommaire

## Introduction générale

### Chapitre I: Le Semi-conducteurs

|   |    |
|---|----|
| I.1. INTRODUCTION.....                                  | 04 |
| I.2. Conduction Electrique.....                         | 07 |
| I.3. Structure Des Semi-Conducteurs.....                | 07 |
| I.4. Conduction Par Electron Et Par Trou.....           | 10 |
| I.5. Semi-Conducteurs Dopes Ou Extrinsèques.....        | 10 |
| I.5.1. Dopage De Type N.....                            | 11 |
| I.5.2. Dopage De Type P.....                            | 12 |
| I.5.3. Bandes D'énergie Des Semi-Conducteurs Dopes..... | 12 |
| I.6. La Jonction P-N.....                               | 13 |
| I.6.1. Jonction Non Polarisée.....                      | 13 |
| I.6.2. Jonction P-N Polarisée En Inverse.....           | 14 |
| I.6.3. Jonction P-N Polarisée En Direct.....            | 14 |
| I.7. Caractéristiques Courant-Tension.....              | 15 |
| I.7.1. Caractéristique directe .....                    | 15 |
| I.7.2. Caractéristique Inverse .....                    | 16 |
| I.8. Claquage Inverse Zener.....                        | 17 |
| I.9. Limites d'utilisation des diodes.....              | 17 |

### Chapitre II : La cellule photovoltaïque

|  |    |
|--|----|
| II.1. Notions Préliminaires Sur Le Rayonnement Solaire.....          | 19 |
| II.2. Principe De Fonctionnement D'une Cellule Photovoltaïque.....   | 19 |
| II.3. L'interaction Photon/Semi-Conducteur.....                      | 21 |
| II.4. Fonctionnement D'une Cellule Photovoltaïque.....               | 21 |
| II.5. Les différents types des cellules solaires.....                | 25 |
| II.5.1. Les cellules mono- cristallines.....                         | 25 |
| II.5.2. Les cellules poly-cristallines.....                          | 25 |
| II.5.3. Les cellules amorphes.....                                   | 25 |
| II.6. Caractéristique D'une Cellule Solaire.....                     | 26 |
| II.7. Circuit Electrique Equivalent D'une Cellule Solaire.....       | 28 |
| II.8. Caractéristiques Electriques D'une Cellule Photovoltaïque..... | 30 |
| II.8.1. Courant De Court-Circuit $I_{CC}$ .....                      | 30 |

|   |    |
|---|----|
| II.8.2. Tension En Circuit Ouvert $V_{co}$ .....                            | 30 |
| II.8.3. Puissance Maximal D'une Cellule Solaire.....                        | 31 |
| II.8.4. Facteur De Forme FF.....  | 31 |
| II.8.5. Rendement $\eta$ .....  | 32 |
| II.9. Les zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque..... | 33 |
| II.10. Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$ .....  | 34 |
| a) Influence de l'éclairement.....  | 34 |
| b) Influence de la température.....   | 35 |
| c) Influence de la résistance série.....                                    | 37 |
| d) Influence de la résistance shunt.....                                    | 38 |
| e) Influence de facteur de qualité.....                                     | 40 |
| II.11. Groupement Des Cellules Solaires.....                                | 41 |
| II.11.1. Groupement Parallèle Des Cellules Solaires .....                   | 41 |
| II.11.2. Groupement Série Des Cellules Solaires.....                        | 43 |
| II.11.3. Groupement Mixte Des Cellules Solaires.....                        | 45 |
| II.12. Manipulations Réaliser.....  | 46 |
| II.12.1. Matériels Utilisé .....  | 46 |
| Manipulation 01(l'influence de l'éclairement).....                          | 46 |
| Manipulation 02(les différent groupements des cellules solaire).....        | 49 |

### Chapitre III : Méthode D'estimation Des Paramètres D'une Cellule PV

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 52 |
| III.1. Les Méthodes Utilisé Pour L'extraction Des Paramètres D'une Cellule PV..... | 52 |
| III.2. La Méthode De Bissection Des Trois Points.....                              | 54 |
| III.3. Méthode Des Cinq Points.....  | 58 |

### Chapitre IV : Résultat De Simulation

|  |    |
|--|----|
| III.4.Résultats de simulation.....       | 61 |
| III.4.1. [8] cellule.....                | 61 |
| III.4.2. [1] une cellule.....            | 62 |
| III.4.3. [2] deux cellules en série..... | 63 |
| III.5.Conclusion.....                    | 63 |
| Conclusion générale.....                 | 65 |
| Références Bibliographiques.....         | 66 |
| Annexe.....                              | 67 |

### INTRODUCTION

L'énergie solaire est l'énergie renouvelable par excellence. Respectueuse de l'environnement, elle présente de nombreux avantages spécifiques en raison notamment de l'épuisement prévisible des ressources d'énergies fossiles et de la montée des problèmes liés à la dégradation de l'environnement.

Mais, pour des raisons à la fois techniques et économiques, cette nouvelle source d'énergie électrique a tardé à s'imposer en dehors du domaine spatial. Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux de faible puissance faisant appel aux montres, calculatrices, balises radio et pompes, réfrigérateur solaire.

Plusieurs problèmes de recherche doivent être résolus pour amener ces systèmes au degré de maturité suffisant et en faire des produits industriels à part entière qui pourraient aussi être comparés à des systèmes (grand public).

Dans ce cadre, l'énergie photovoltaïque (PV) bien que connue depuis de nombreuses années pour pouvoir être une source d'énergie électrique ayant de grandes possibilités pouvant aller de quelques milliwatts au mégawatt, ne se développe pas dans de grandes proportions.

Les problèmes qui restent à résoudre concernent autant le matériau de conversion qui reste cher que la chaîne de conversion électrique qui présente beaucoup de pertes par une non optimisation et souvent une utilisation inappropriée de convertisseurs statiques. [1]

Sur la partie système de conversion lui-même, les recherches se résument en deux points :

- Le développement d'un modèle mathématique exacte qui représente la cellule photovoltaïque réelle, et qui reflète l'influence des différentes conditions atmosphériques sur les paramètres de la cellule solaire.

- Le développement d'une méthode d'optimisation efficace qui est apte de déterminer le point de puissance maximale de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule pour n'importe quelle condition d'éclairement et de la température, et quel que soit la nature de changement de ces conditions rapide ou lent.

Sur la partie matériaux, beaucoup d'équipes de recherche travaillent depuis de nombreuses années pour obtenir :

- des rendements élevés associés à des prix de réalisation bas et une tenue des performances en vieillissement sur des durées importantes (10 à 30 ans).
- La réduction de la surface du convertisseur par l'utilisation de système de concentration du rayonnement solaire. .

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire se consacré sur des cellules monocristalline

L'objectif de ce mémoire est l'étude et l'évaluation des paramètres d'une cellule solaire, il nous a parus utile du point de vue méthodologie de commencer d'abord par quelques notions sur le semi-conducteur. Dans cet objectif, ce travail est abordé selon les chapitres suivants :

- Dans un **premier chapitre**, nous rappelons quelques notions fondamentales nécessaires des semi-conducteurs. Puis, nous montrons les différentes polarisations de la jonction Pn.
- Le **deuxième chapitre** est consacré aux cellule photovoltaïque ; qui contient dans la première partie le Principe De Fonctionnement D'une Cellule Photovoltaïque la caractéristique de la cellule photovoltaïque, l'influence de certains paramètres sur la caractéristique courante tension de la cellule solaire, ainsi une manipulation concernant l'influence de l'éclairement et les différentes groupements des cellules solaire.
- Puis au **chapitre trois**, nous présentons la modélisation de la cellule solaire ainsi les méthodes d'extraction des paramètres d'une cellule PV.
- Et nous complétons notre travail avec un **chapitre quatre**, qui contient la simulation des deux méthodes utilisées.

# Chapitre I

## Le Semi-conducteur

## I.1. INTRODUCTION

Actuellement les technologies de circuits intégrés utilisent encore le silicium comme matériau semi-conducteur de base. Le silicium étant un matériau semi-conducteur de largeur de bande interdite moyenne s'adapte bien aux contraintes imposées par les applications à des températures normales, soit de 0 à 100°C. A de plus hautes températures, la performance des technologies sur le silicium se dégrade progressivement.

Le silicium fut découvert en 1824 par J.J. Berzelius à Stockholm, en Suède. C'est, après le carbone, l'élément le plus abondant de la terre, la répartition étant de 277.000 ppm. On le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres. Le silicium est obtenu en réduisant la silice (le sable, SiO<sub>2</sub>) par le carbone. Une fusion en zone subséquente donne un élément plus pur pour des applications nécessitant un silicium de haute pureté (par exemple les semi-conducteurs). [2]

Les semi-conducteurs (germanium et silicium) possèdent 4 électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent à la 4<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique des éléments. Il est possible de les produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10<sup>11</sup> atomes de semi-conducteur): on parle alors de S.C. intrinsèque. [3]

Le germanium est découvert par le savant allemand Clemens Winkler le 6 février 1886, il peut être trouvé à beaucoup d'endroits, mais en concentrations faibles. Le germanium a servi de substrat semi-conducteur jusqu'à ce que le silicium prenne sa place, vers les années 1970. Aujourd'hui il n'est plus utilisé que dans le domaine des hautes fréquences, et pour la réalisation de diodes à faible chute (0,3 V environ, application en détection). [4]

## I.2. Conduction Electrique

Dans le modèle classique, un corps est isolant s'il ne contient pas d'électrons mobiles. Dans un conducteur, des électrons sont peu liés aux noyaux et peuvent se déplacer dans le réseau cristallin.

Si  $n$  est la densité des électrons libres,  $v$  leur vitesse moyenne, dans une barre de longueur  $L$ , de section  $S$  avec une tension  $V$  entre les extrémités, la densité de courant  $J = I/S$  est égale à  $J = n.e.v$ .



La vitesse des électrons est proportionnelle à la force à laquelle ils sont soumis donc au champ électrique  $E = V/L$ . Si  $\mu$  désigne la mobilité, on a :  $V = \mu.E$

$$J = n.e.\mu.E = \sigma.E = E/\rho$$

Le modèle classique a été remplacé par le modèle quantique des bandes d'énergie. Dans l'atome isolé les électrons occupent des niveaux d'énergie discrets. Dans un cristal, par suite des interactions entre les atomes, ces niveaux discrets s'élargissent et les électrons occupent des **bandes d'énergie permises** séparées par des **bandes interdites**. La répartition des électrons dans les niveaux obéit aux lois de la thermodynamique statistique. Au zéro absolu, seuls sont peuplés les niveaux de plus basse énergie.

Dans les **isolants**, les bandes d'énergie les plus faibles sont entièrement pleines. La hauteur de la bande interdite est grande ( $\approx 5$  eV). Il n'y a pas de niveaux d'énergie accessibles et pas de conduction. Par exemple, la résistivité du diamant est  $\rho = 1.10^{12} \Omega.m$  et celle du mica varie entre  $10^{10} \Omega.m$  et  $10^{15} \Omega.m$ .

Dans les **conducteurs**, la dernière bande occupée est partiellement remplie : il existe beaucoup de niveaux disponibles et la conduction est grande. Pour des métaux bons conducteurs, on obtient :

$$\rho_{Ag} = 1,6.10^{-8} \Omega.m ; \quad \rho_{Cu} = 1,7.10^{-8} \Omega.m ; \quad \rho_{Al} = 2,8.10^{-8} \Omega.m$$

Pour les **semi-conducteurs**, le taux de remplissage de la dernière bande occupée est soit très faible soit très important. La hauteur de la bande interdite est faible ( $\approx 1$  eV). La conduction est faible et varie beaucoup avec la température. Pour le silicium et le germanium, on mesure à 300 K :

$$\rho_{Si} = 2400 \Omega.m ; \quad \rho_{Ge} = 0,5 \Omega.m$$

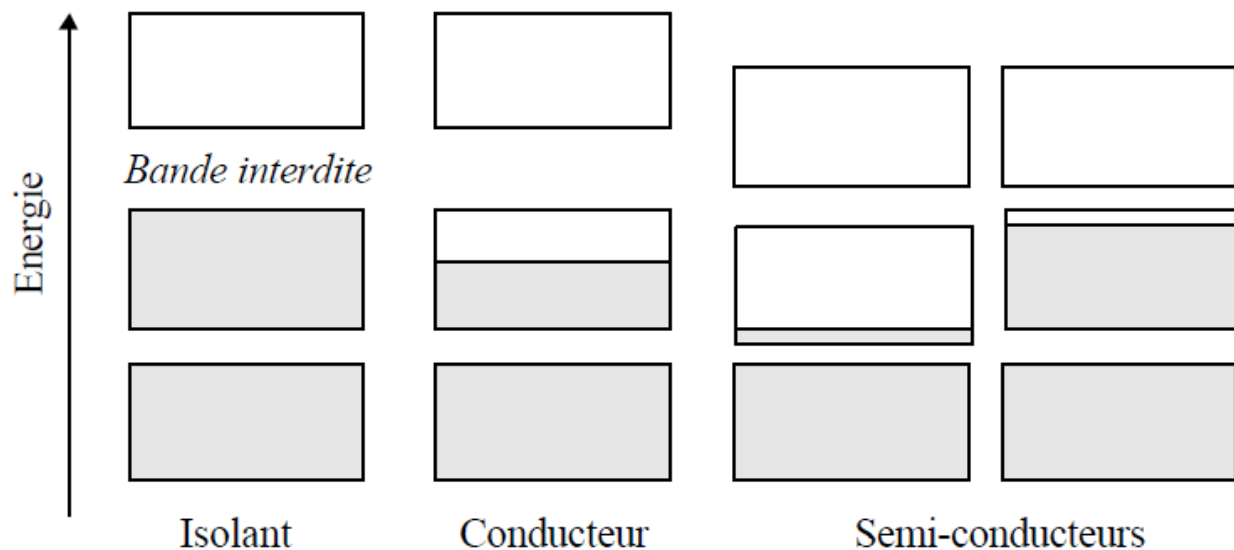


Fig. 1

### I.3. Structure Des Semi-Conducteurs

La structure du silicium et du germanium est la même que celle du diamant (cubique Fd3m). Chaque atome est lié à 4 voisins placés aux sommets d'un tétraèdre par une liaison covalente : Ces éléments sont « tétravalents ».

La figure 3 correspond à une représentation sur un plan de la structure. Les traits figurent les électrons de valence.

La théorie des bandes appliquée aux semi-conducteurs amène à considérer une **bande de valence** entièrement pleine qui est séparée d'une **bande de conduction** par une **bande interdite** distante de l'énergie  $\Delta E$ .

Si on apporte une énergie thermique ou lumineuse suffisante à un électron, il peut passer de la bande de valence à la bande de conduction avec une probabilité P proportionnelle à :

$$P \propto \exp(-\Delta E / kT)$$

$\Delta E$  est l'écart en énergie séparant les deux bandes. T la température absolue.

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  est la constante de Boltzmann.

Pour  $T = 300 \text{ K}$ ,  $kT = 0,0025 \text{ eV}$

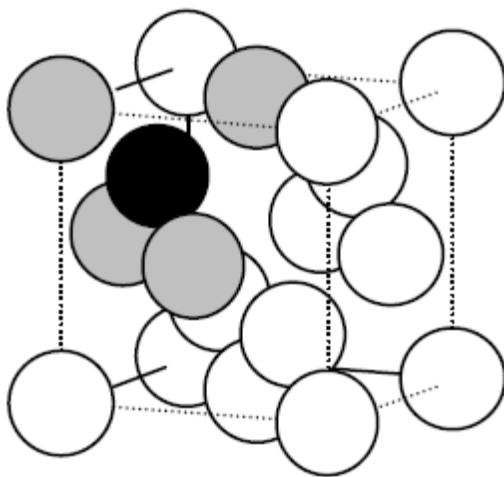


Fig. 2 **Diamant**

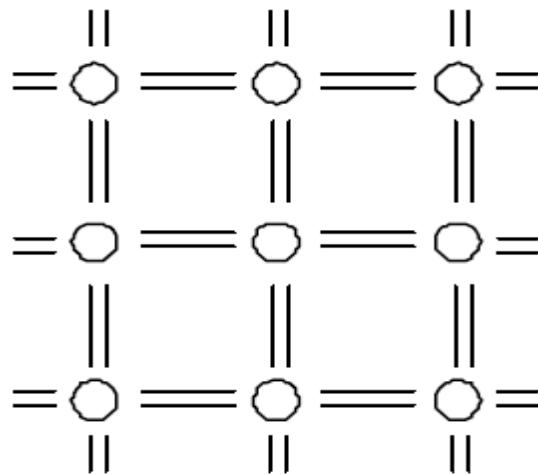


Fig 3

Diamant  $\Delta E = 7 \text{ eV}$  ; Silicium  $\Delta E = 1,12 \text{ eV}$  ; Germanium  $\Delta E = 0,7 \text{ eV}$ .

Dans un semi-conducteur,  $\Delta E$  est assez faible pour autoriser, à température ambiante, le passage d'un petit nombre d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. [5]

### I.4. Conduction Par Electron Et Par Trou

Si une liaison de valence est brisée (agitation thermique, photon ...) l'électron devient mobile : il laisse un excès de charge positive le « **trou** » (symbolisé par un + dans un carré).

Cette lacune va être comblée par un électron voisin libéré par agitation thermique et qui va à son tour laisser un trou : ceux-ci semblent se déplacer dans le réseau. Aux électrons (masse positive, charge négative) correspondent des trous (masse négative, charge positive).

Le déplacement des trous étant un processus à deux étapes, leur mobilité dans le réseau est plus faible que celle des électrons.

Trous et électrons constituent les **porteurs libres intrinsèques** dont le nombre est fonction de la température. La neutralité électrique du matériau impose que les trous et les électrons soient en nombres identiques ( $n_i$  et  $p_i$ ).

Pour le silicium pur à 300 K, on mesure :  $n_i = p_i = 1,5 \cdot 10^{10} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Ce nombre est très faible si on le compare au nombre des atomes.

Toujours pour le silicium pur à 300 K, les mobilités sont :

$$\mu_n = 12 \cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \text{ et } \mu_p = 5 \cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}.$$

La conductivité intrinsèque du matériau  $\sigma = e(n_i \cdot \mu_n + p_i \cdot \mu_p)$  est très faible.

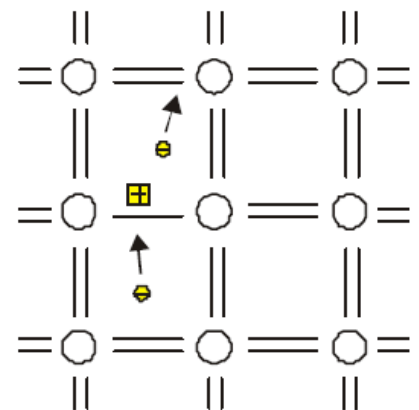


Fig. 4

### I.5. Semi-Conducteurs Dopés Ou Extrinsèques

Dans un matériau pur, on introduit des impuretés par dopage. Pour que celui-ci soit contrôlable, il faut que le degré de pureté initial global soit supérieur au taux du dopage. Les taux de dopage utilisés sont de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-11}$ .

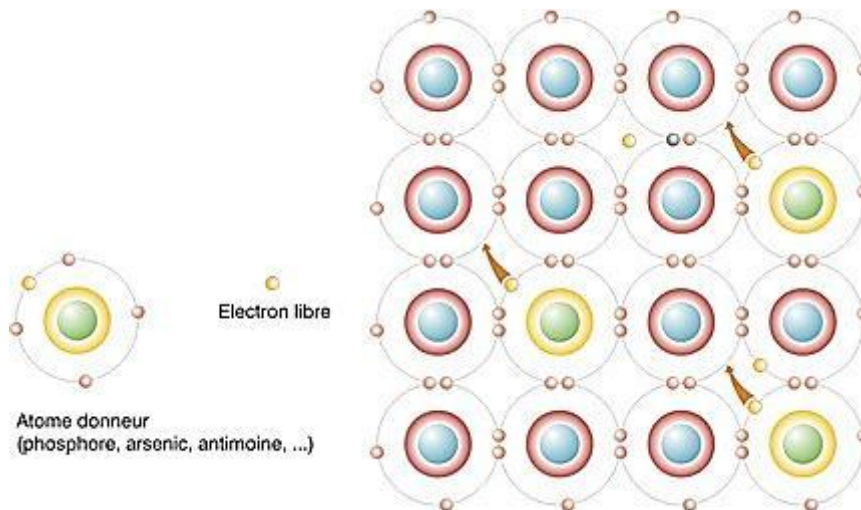
Une mole de silicium (28 g) correspond à  $6,023 \cdot 10^{23}$  atomes et la densité du silicium est voisine de  $7 : 1 \text{ cm}^3$  de silicium contient donc environ  $1,5 \cdot 10^{23}$  atomes. Avec un taux de dopage de l'ordre  $10^{-10}$ , il y a environ  $1,5 \cdot 10^{13}$  atomes d'impureté par  $\text{cm}^3$ .

### I.5.1. Dopage De Type N

On introduit dans la matrice de silicium des atomes d'impuretés *pentavalents* tels que le phosphore P, l'arsenic As et l'antimoine Sb.

Chaque atome d'impureté amène un électron de valence supplémentaire. Cet électron est peu lié au noyau ( $E \approx 0,01$  eV) et passe aisément dans la bande de conduction. La conductivité du matériau (conductivité **extrinsèque**) devient à cause du taux de dopage, très supérieure à celle du matériau pur. Les atomes pentavalents ou *donneurs* deviennent des ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction.

Les données numériques précédentes montrent que le nombre des électrons dans le matériau, fonction du taux de dopage, est supérieur au nombre des trous, fonction de la température, d'un facteur supérieur à 103. La conduction dite de **type N** (négative) est assurée par des électrons. **Les électrons sont les porteurs majoritaires.**



**I.5.2. Dopage De Type P**

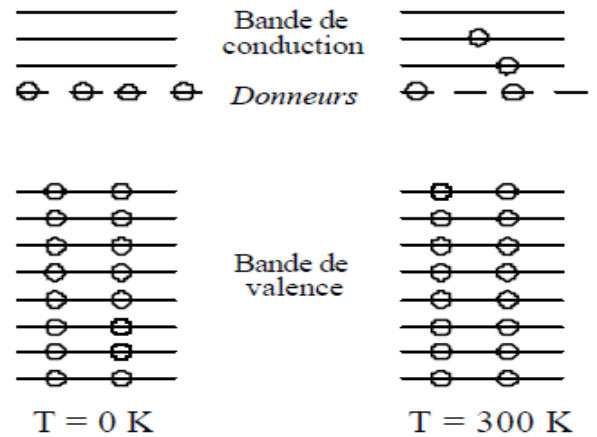
On introduit dans le réseau une impureté *trivalente* : bore B, aluminium Al, gallium Ga, indium In. Il manque à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4 liaisons avec les atomes de silicium voisins. Un faible apport d'énergie ( $\approx 0,05$  eV) suffit pour qu'un électron d'un silicium voisin soit capté par l'impureté : il y a formation d'un **trou** peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents (*accepteurs*) deviennent des ions négatifs par capture d'un électron. Compte tenu des taux de dopage, ces trous sont beaucoup plus nombreux que les porteurs intrinsèques du cristal pur.

La conduction de **type P** (positive) est assurée par des trous. **Les trous sont les porteurs majoritaires.**

**I.5.3. Bandes D'énergie Des Semi-Conducteurs Dopes**

**Type N**

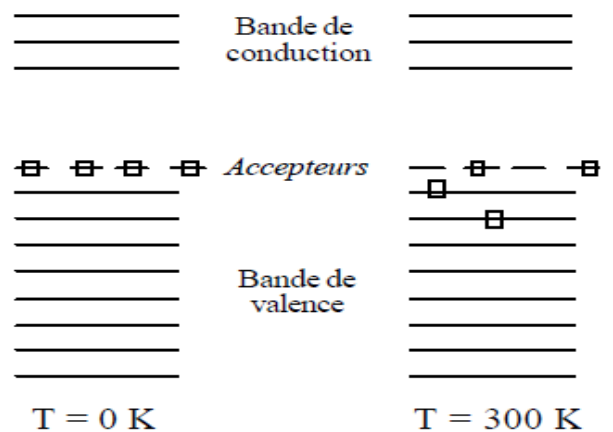
Les atomes de pentavalents (donneurs) introduisent des charges positives dans le réseau, charges qui attirent les électrons en créant ainsi de nouveaux niveaux dont l'énergie est légèrement inférieure à ceux de la bande de conduction du matériau pur. Si on élève la température, ces électrons peuvent passer dans la bande de conduction.



**Fig.6**

**Type P**

Les atomes de trivalents (accepteurs), introduisent des trous dans la bande de valence. Si on élève la température, ces trous se comportent comme des charges positives libres.



**Fig.7**

**I.6. La Jonction P-N**

**I.6.1. Jonction Non Polarisée**

Une jonction est constituée par la réunion de deux morceaux de semi-conducteurs dopés P et N (jonction P-N). Les connexions avec le milieu extérieur sont réalisées par des contacts métalliques.

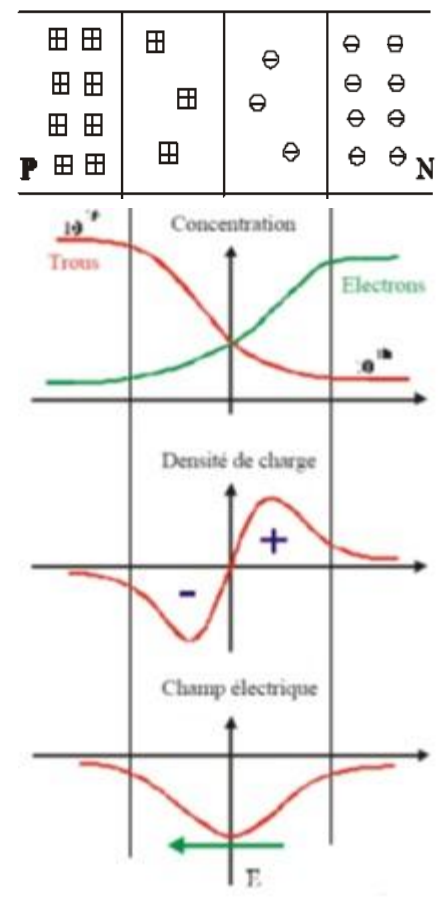
Par construction, les jonctions entre métal et semi-conducteur sont purement ohmiques (non redresseuses). En pratique, on part d'une plaque de silicium dopée N sur laquelle on crée en général par diffusion une zone dopée P. On sait donner à la zone de séparation entre les deux matériaux nommée la zone de transition, une épaisseur très faible (typiquement 0,5  $\mu\text{m}$ ). Dans cette zone, les taux de dopages et donc le nombre de porteurs libres varient avec la distance.

Dans la zone P les porteurs majoritaires sont les trous. Les atomes accepteurs constituent un réseau d'ions négatifs. De même dans la zone N les porteurs majoritaires sont les électrons. Les atomes donneurs constituent un réseau d'ions positifs.

Les trous ont tendance à gagner la zone N où ils se recombinent avec des électrons. De même des électrons de la zone N vont combler des trous de la zone P.

Dans la zone de transition existe une charge d'espace due aux charges non compensées des noyaux des impuretés. En l'absence d'une polarisation externe, existe un **champ électrique interne** qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires mais qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la jonction une barrière de potentiel dont la hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs.

**Les porteurs minoritaires induisent le courant de diffusion ; les porteurs majoritaires créent le courant de saturation.** En l'absence de polarisation, ces deux courants sont égaux.



**Fig.8**

La diode se comporte comme un condensateur dont le pôle - est la zone P et le pôle + est la zone N. La zone de transition ne contenant pas de porteurs mobiles constitue le diélectrique de ce condensateur.

### I.6.2. Jonction P-N Polarisée En Inverse

Dans cette situation, le champ électrique externe créé par le générateur de f.e.m.  $V_{inv}$  s'ajoute au champ interne de la jonction : la hauteur de la barrière de potentiel augmente. On montre que l'épaisseur  $d$  de la zone de transition est proportionnelle à  $\sqrt{V_{inv}}$ .

Seul un courant de minoritaires est possible à travers la jonction. C'est le **courant inverse ou courant de fuite**.

A température ambiante, ce courant est très faible (100 nA). Comme il dépend du nombre des minoritaires, il est fonction de la température : pour le silicium, il est négligeable en dessous de 110°C mais il devient si important au-dessus de 175°C qu'il interdit le fonctionnement de la jonction en diode. Pour le germanium le fonctionnement est impossible au-dessus de 85°C.

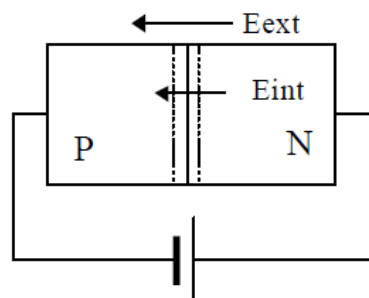


Fig.9

### I.6.3. Jonction P-N Polarisée En Direct

Dans cette situation le champ externe créé par le générateur s'oppose au champ interne. Dès que le champ externe dépasse le champ interne, un courant des majoritaires s'établit à travers la jonction. [5]

Il existe pour une jonction P-N une **tension de seuil** qui est caractéristique du matériau :

$$\text{Si} : V_s \approx 0,55 \text{ V}$$

$$\text{Ge} : V_s \approx 0,15 \text{ V}$$

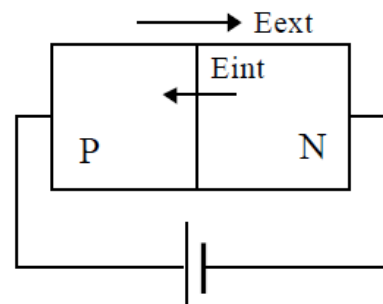


Fig.10

### I.7. Caractéristiques Courant-Tension

#### I.7.1. Caractéristique directe :

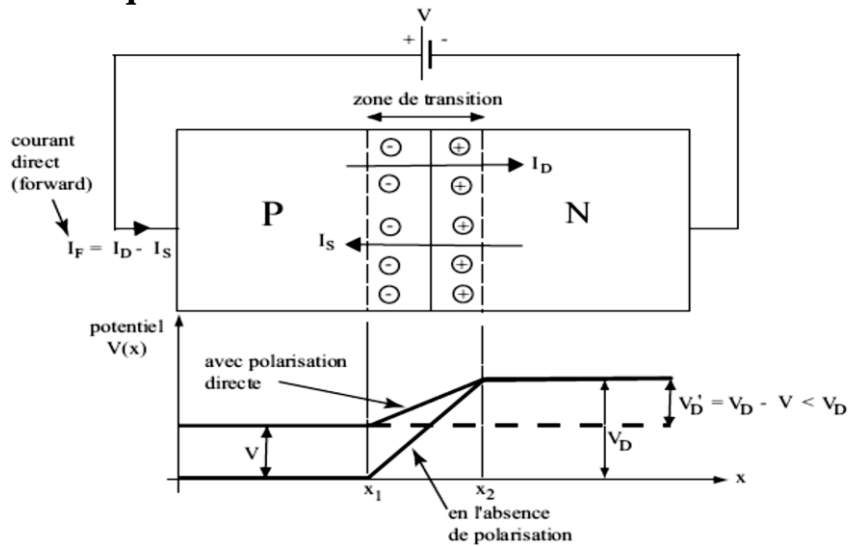


Fig.11: polarisation en direct

Le générateur de la tension  $V$  augmente le potentiel de la région p, la barrière de potentiel devient  $V_D' = V_D - V < V_D$  un plus grand nombre de majoritaires est capable de traverser la zone de transition : il leur suffit d'une énergie plus faible  $E \geq e \cdot (V_D - V)$  au lieu de  $(e \cdot V_D)$ . [6]

Le courant de diffusion  $I_D$  augmente et devient très supérieur au courant de saturation  $I_S$ . La relation entre  $I_D$  et  $I_S$  est.

$$I_D = I_S \cdot \exp\left(\frac{e \cdot V_D}{K \cdot T}\right) \quad 1.1$$

Avec :

- $[e] = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ .
- $[K] = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  (constante de Boltzmann).
- $[T]$ : température absolue (en k).

Le courant direct  $I_F = I_D - I_S$  devient:

$$I_F = I_S \left[ \exp\left(\frac{e \cdot V_D}{K \cdot T}\right) - 1 \right] \approx I_D \quad 1.2$$

Donc: 
$$I_D = I_S \left[ \exp\left(\frac{e \cdot V_D}{K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad 1.3$$



I.7.2. Caractéristique Inverse :

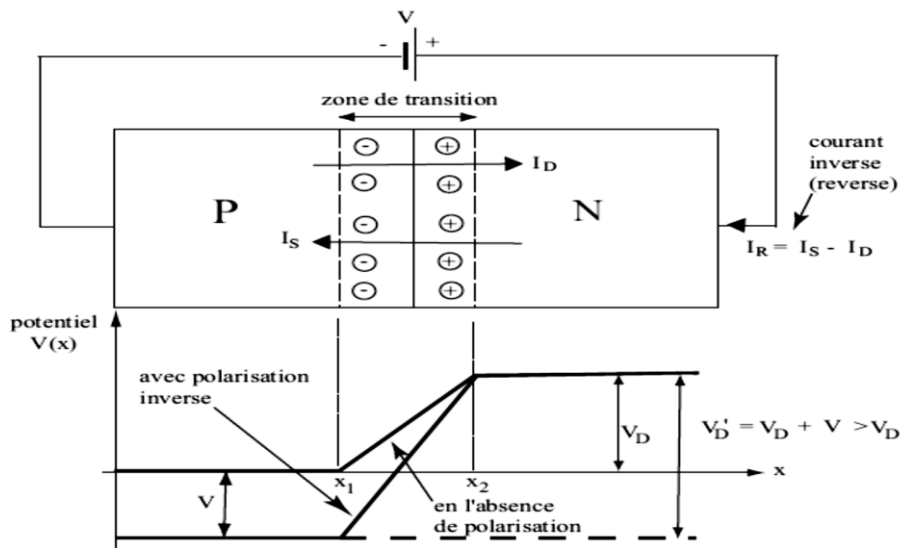


Fig.12 : polarisation en inverse

Le générateur entraîne une diminution du potentiel de région P la barrière de potentiel devient  $V_D' = (V_D + V) > V_D$  les majoritaire ne peuvent plus franchir la zone de transition car il leur faut une énergie trop importante  $E \geq e \cdot (V + V_D) \cdot I_D \approx 0$  et  $I_R = I_S - I_D \approx I_S$  la jonction PN ne conduit pas en sens inverse car  $I_S$  est très faible ( $\approx 1 \mu A$ ).

On en déduit la caractéristique "courant/tension "de la jonction.

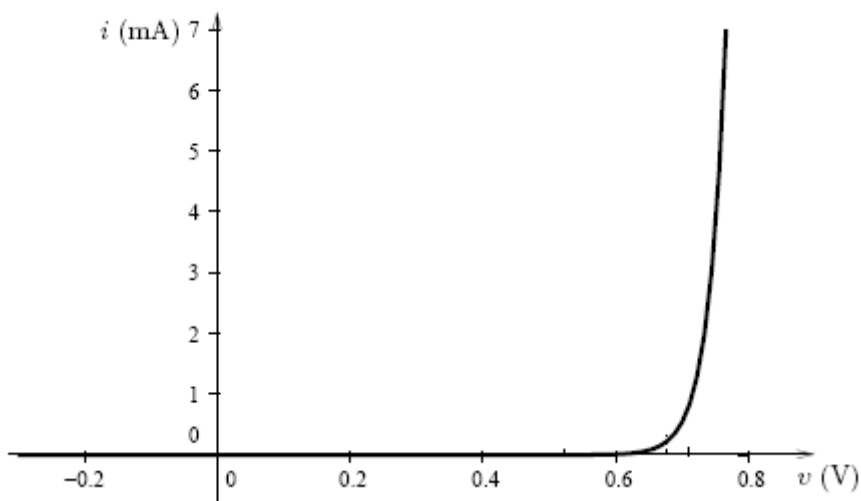


Fig.13: caractéristique courant tension.

### I.8. Claquage Inverse Zener

Pour des diodes très fortement dopées et dont la zone de transition est très mince, le champ électrique peut provoquer la rupture directe de liaisons covalentes et le passage d'électrons de la bande de valence dans la bande de conduction. Pour des champs de l'ordre de  $2.10^7 \text{ V.cm}^{-1}$ , la tension de claquage est de l'ordre de 6 V pour des diodes très dopées. Le courant inverse croît alors brutalement. L'effet est *réversible et non destructif*. La jonction présente après le claquage une résistance dynamique très faible. Les diodes Zener ont un dopage important et en agissant sur l'épaisseur de la zone de transition, on peut ajuster la valeur de la tension (dite tension de Zener) au-delà de laquelle se produit le claquage entre 3 V et 200 V.

### I.9. Limites d'utilisation des diodes

La **puissance** dissipée dans une diode est égale au produit  $I.V_{AK}$ . L'échauffement correspondant produit par l'effet Joule ne doit pas amener la température de la jonction au-dessus d'une valeur limite, fonction de la nature du matériau, afin que le courant inverse ne dépasse pas des valeurs inacceptables. Pour le silicium cette température est de l'ordre de  $185^\circ\text{C}$ .

La **tension inverse** doit rester inférieure à la tension de claquage. Les diodes de redressement sont peu dopées pour avoir une bonne tenue en inverse.

Le **courant direct** maximum admissible est conditionné par la puissance maximum que peut dissiper la diode. Selon la surface de la jonction, le courant direct admissible peut varier entre quelques milliampères pour une diode de signal et quelques dizaines d'ampères pour une diode de puissance.

# Chapitre II

## La cellule photovoltaïque

## INTRODUCTION

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales, et les paramètres qui influencent à la cellule PV simulée avec Matlab. Puis nous aborderons à des manipulations qui permettent de vérifier l'influence de l'éclairement et de faire les différents groupements des cellules solaires.

### II.1. Notions Préliminaires Sur Le Rayonnement Solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil. La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5  $\mu\text{m}$  pour une puissance d'environ 60 MW/m<sup>2</sup>, soit un total de 9,5.10<sup>25</sup> W. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairement moyen dans l'année de 1,36 kW/m<sup>2</sup> hors [7] atmosphère.

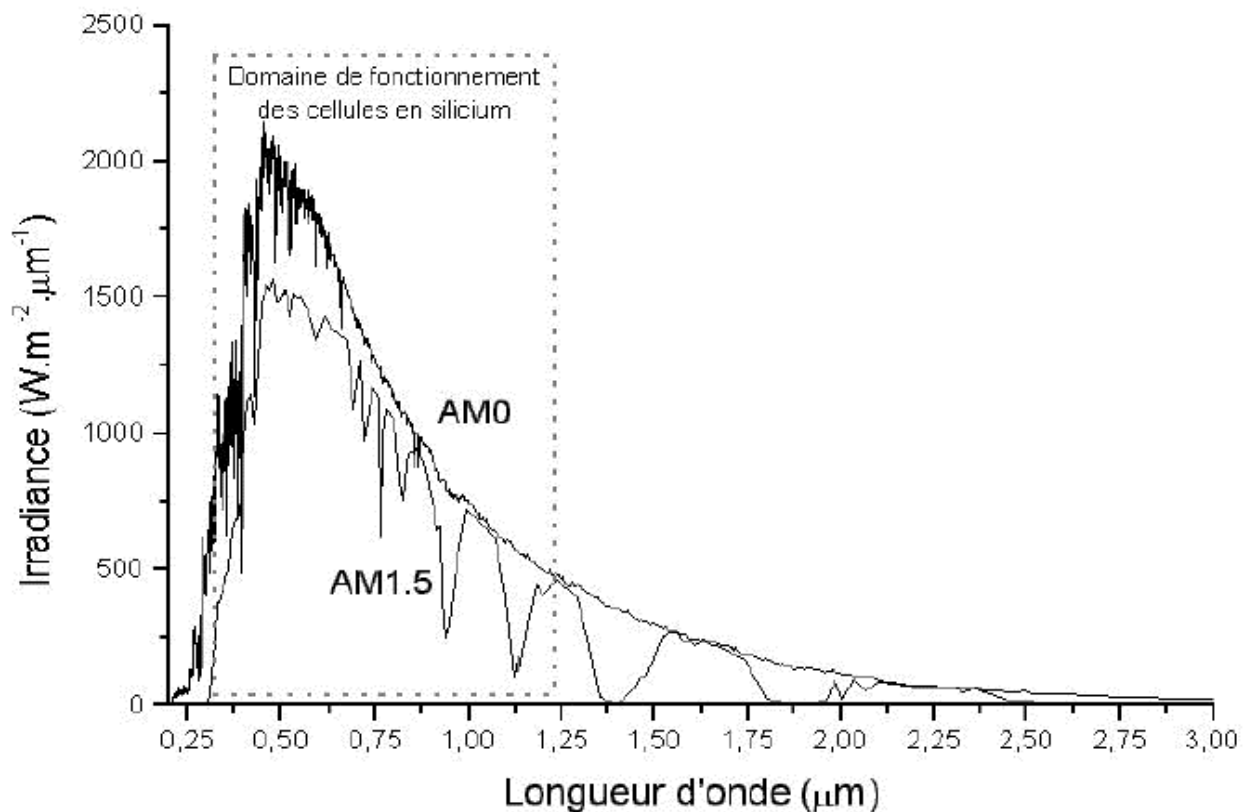
Cette irradiance est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison. Des gaz comme l'ozone (O<sub>3</sub>), pour des longueurs d'ondes inférieures à 0,3  $\mu\text{m}$ , le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), pour les infrarouges au-dessus de 2  $\mu\text{m}$ , absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des «trous» dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente. Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation,  $\theta=0^\circ$ ,  $AM=1$  : la notation utilisée est  $AM1$ .  $AM0$  correspond à l'irradiance hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est  $AM1.5G$ ,  $G$  signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à  $AM1.5D$  qui ne tient compte que des directes.  $AM1.5G$  donne une irradiance de  $970 \text{ W/m}^2$ , mais a été arrondi à  $1 \text{ kW/m}^2$ . L'intensité  $I_D$  reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante :

$$I_D = 1,353 \cdot (0,7^{AM})^{0,678}$$

Avec  $I_D$  en  $\text{kW/m}^2$ , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres  $AM0$  et  $AM1.5$  sont représentés sur la **Fig.14**.



**Fig.14** : Représentation graphique des spectres  $AM0$  et  $AM1.5$  d'après. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence. [8]

Il apparaît que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre  $AM$  ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques, et de l'altitude du lieu. La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire :

Les ensoleillements moyens sur l'année peuvent atteindre 7 kWh/m<sup>2</sup>/jour dans le nord de l'Australie et au Botswana. En Europe occidentale, la puissance se situe autour de 3 kWh/m<sup>2</sup>/jour pour les pays comme l'Espagne, à moins de 1 kWh/m<sup>2</sup>/jour pour le sud de la Suède. La France est soumise à une moyenne annuelle comprise entre 1,5 et 3 kWh/m<sup>2</sup>/jour selon les régions. [8]

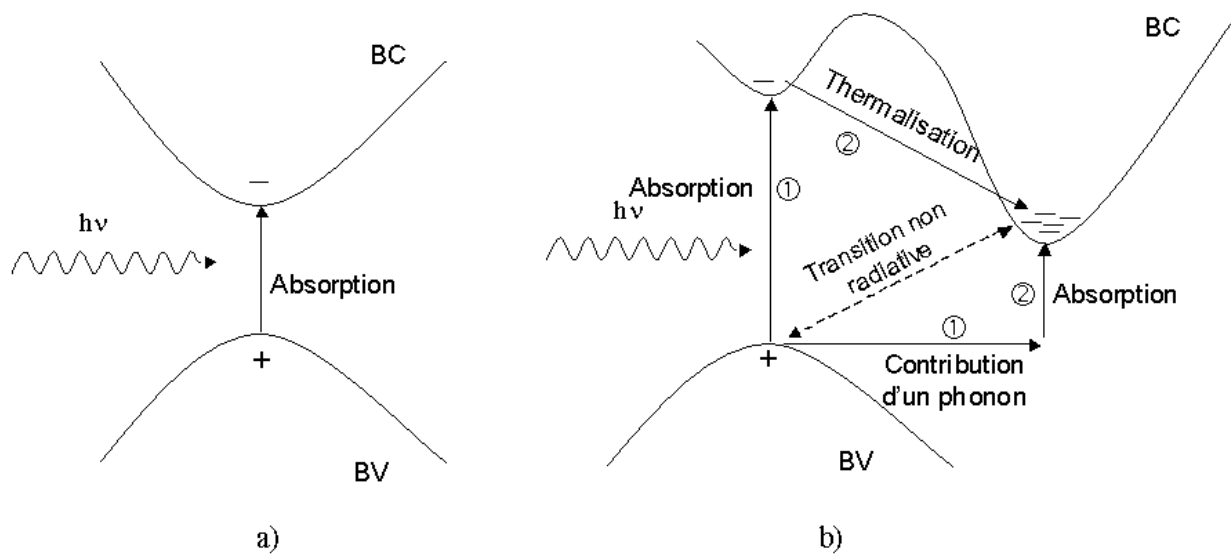
## II.2. Principe De Fonctionnement D'une Cellule Photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839 : il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5%. Nous présentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons.

## II.3. L'interaction Photon/Semi-Conducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou *gap*, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure I-2 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des *k*, il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (Fig.15 (a)).

Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (Fig15(b)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm).

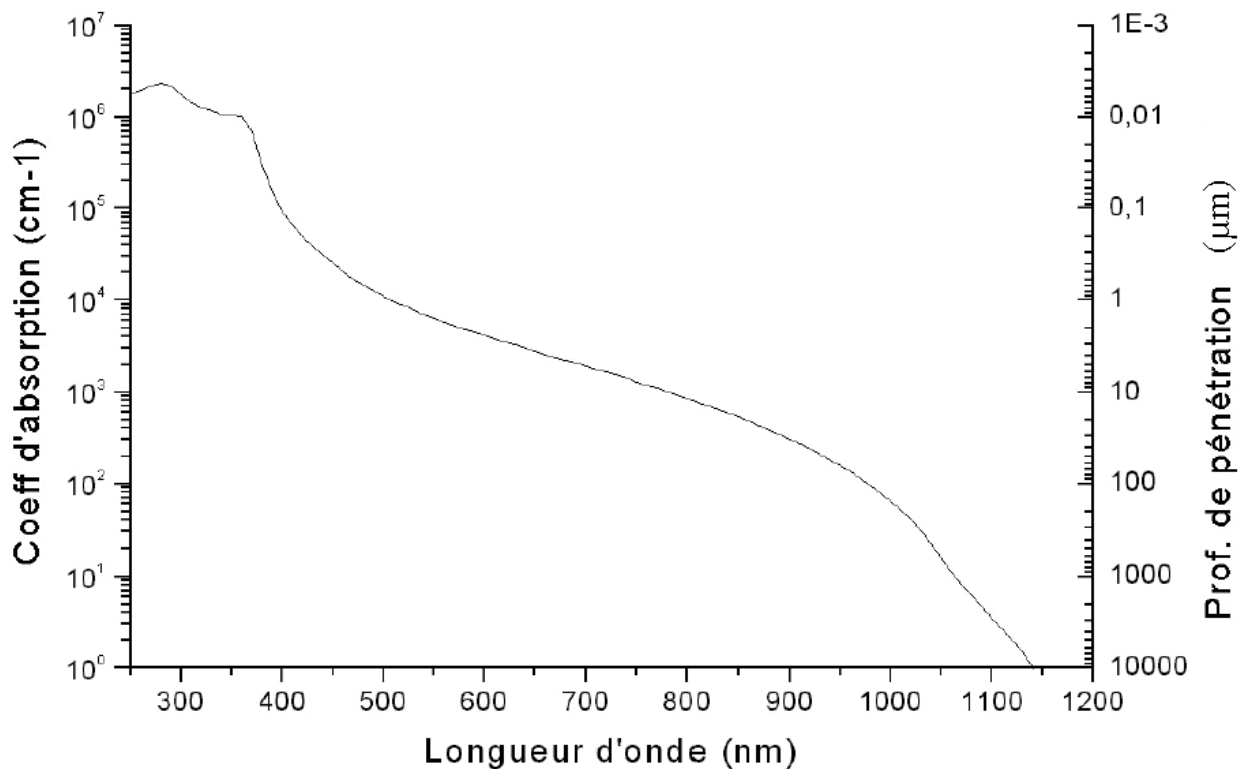


**Fig.15** : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.

Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect (d'après [9]).

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde.

La Fig.16 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.



**Fig.16 :** Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde, d'après [7].

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photogénérés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

#### II.4. Fonctionnement D'une Cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

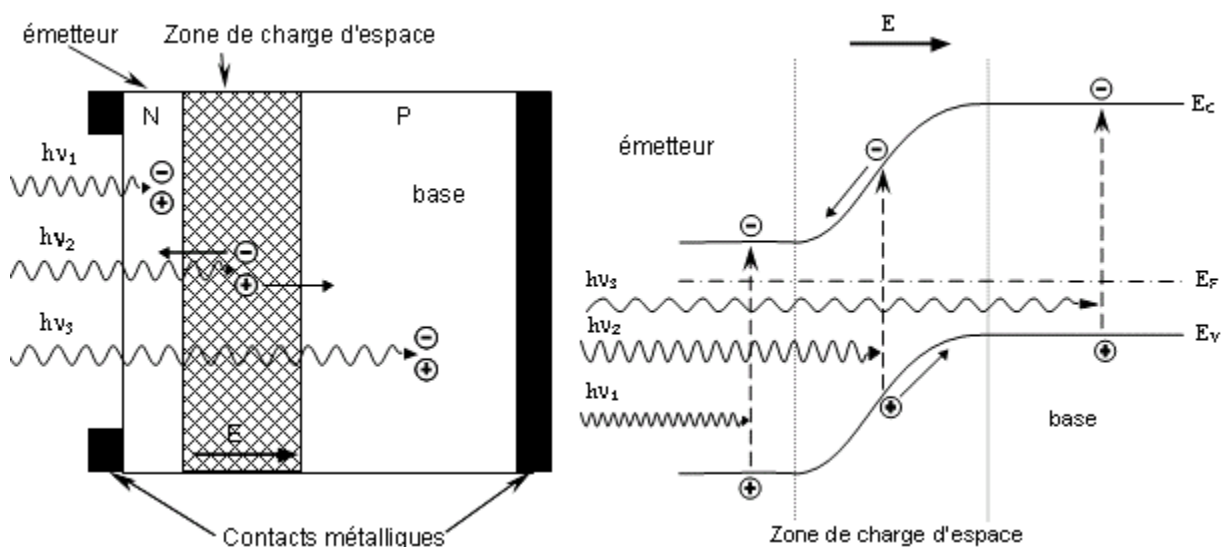
- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.



Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les schottky peuvent également être utilisées.

**Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Fig.17 :**



**Fig.17 :** Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photos porteuses auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo courant de diffusion ;
- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photo courant de génération.

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

## II.5. Les différents types des cellules solaires:

Il existe trois types principaux de cellules :

### II.5.1. Les cellules mono- cristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients:

- Première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en labo.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

### II.5.2. Les cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Les cellules poly- cristallines est caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20 % en labo.

### II.5.3. Les cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

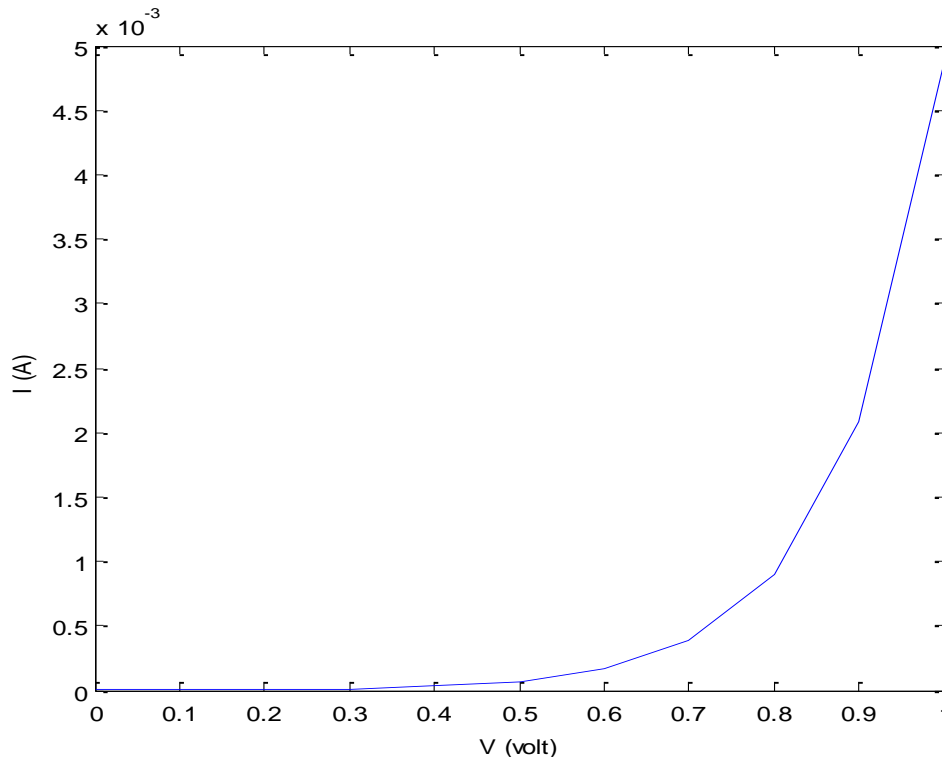
Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire.

## II.6. Caractéristique D'une Cellule Solaire:

Si l'on polarise une cellule solaire dans les conditions obscures la caractéristique d'une cellule solaire non éclairée est celle d'une diode. On obtient la caractéristique  $I_{OBS}=f(V)$  à partir de l'équation 1.3 avec ( $I_D=I_{OBS}$ ).



**Fig.18 :** caractéristique d'une cellule solaire non éclairée

En présence d'un éclairage, cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant  $I_{cc}$  (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en  $V_{CO}$  (tension maximale de circuit ouvert). Les photons incidents créent des porteurs dans la zone N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo porteurs auront un comportement différent suivant la région:

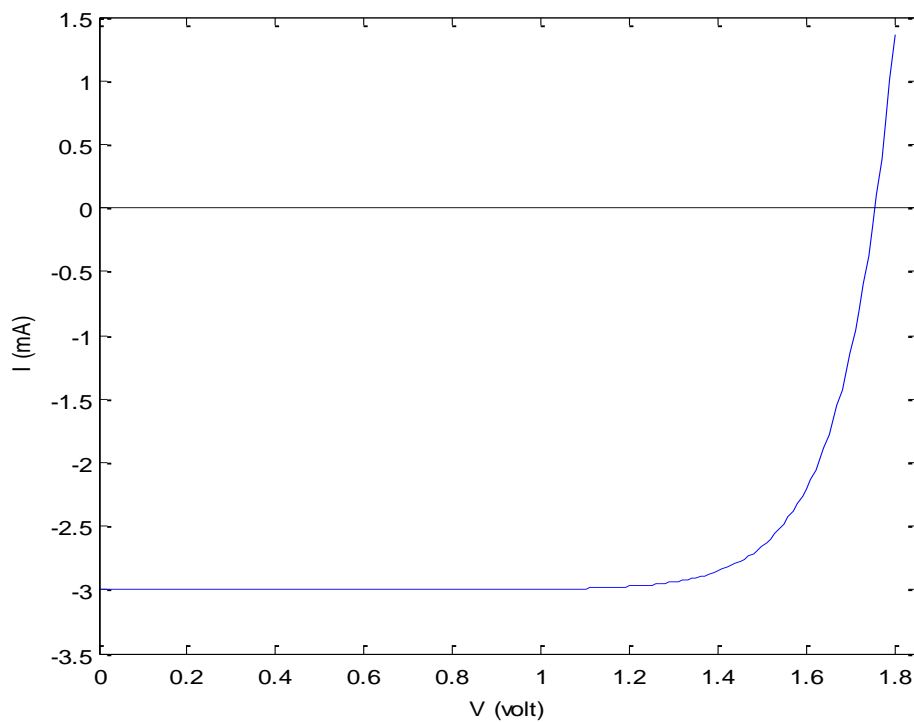
- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) ou ils seront majoritaires. On aura un photo courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons /trou créées par photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P trous et électrons deviennent alors majoritaires on aura un photo courant de génération.

Ces deux contribution ajoutent pour donner un photo courant résultant  $I_{ph}$  et qui participe au courant total selon la relation 2.1.

$$I = ID - I_{ph} \quad 2.1$$

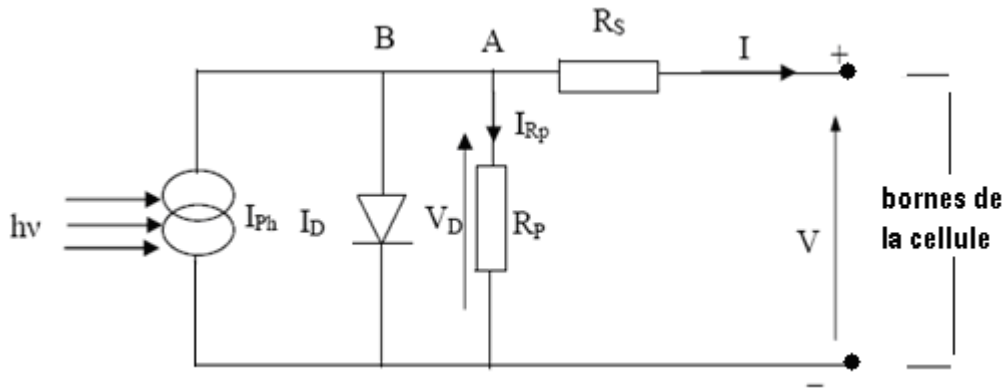
$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{e.VD}{K.T}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad 2.2$$

A partir de cette équation et à l'aide d'un programme MATLAB. On peut trouver les caractéristiques d'une cellule solaire sous éclairement d'après la figure ci-dessus :



**Fig.19** : caractéristique simulé d'une cellule solaire éclairée

**II.7. Circuit Electrique Equivalent D'une Cellule Solaire :**



**Fig.20 :** circuit électrique équivalent d’une cellule solaire sous éclairnement

Une cellule photovoltaïque se comporte comme le circuit de la **Fig.20** et s’analyse de façon usuelle. Ce circuit comprend une source de courant constante  $I_{ph}$ . Branché à ce générateur on a une diode et une résistance  $R_p$ . On retrouve également une autre résistance  $R_s$ , qui est la résistance du semi-conducteur et des électrodes de la cellule. Le courant qui passe dans la diode  $I_D$  est régi par l’équation de Ebers-Moll :

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{e \cdot V_D}{K \cdot T}\right) - 1 \right] \tag{2.2.1}$$

Où  $I_s$  : est le courant de saturation,  $e$  : est la charge de l’électron,  $k$  : la constante de Boltzmann et  $T$  : la température absolue.

La performance d’une cellule solaire est limitée par influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances ( $R_s$  et  $R_p$ ).

$R_s$  : résistance série, due essentiellement aux pertes par effet Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteur, ainsi qu’aux mauvais contacts (semi-conducteur, électrodes). Elle s’exprime par:

$$R_s = \rho \cdot \frac{L}{S_g} + R_m \tag{2.2.2}$$

Avec :

$\rho$  : La résistivité de la grille.

$L$  : La longueur de la grille.

[Sg] : Section des grilles collectrices.

[R<sub>m</sub>]: Résistance propre du matériau, sa valeur est faible (< 2\_ pour les cellules au silicium).

[R<sub>p</sub>] : résistance parallèle, dite "Shunt", provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la Jonction. Si on branche une résistance [R<sub>C</sub>] aux bornes de la cellule photovoltaïque comme à la Fig.21, on ferme le circuit on obtient :

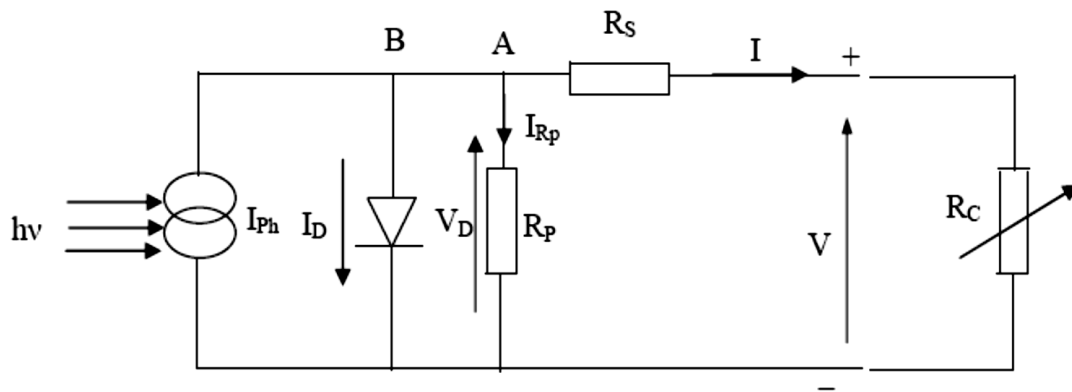


Fig.21 : branchement une résistance R<sub>C</sub>

Appliquant la loi de Kirchoff aux nœuds A, B :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad 2.3$$

Le courant I débit par la cellule est la somme algébrique de trois courant: I<sub>ph</sub>: photo courant indépendant de V ; I<sub>Rp</sub> Courant traversant, si R<sub>p</sub> est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension :

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad 2.4$$

Car:

$$V_D = R_p I_{Rp} = V + R_s I \quad 2.5$$

[I<sub>d</sub>]: courant de diode, il s'écrit sous la forme :

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{eV_D}{K T}\right) - 1 \right] \quad 2.6$$

Remplaçant dans [1] les équations [3] et [4], l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{e(V + R_s I)}{K.T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad 2.7$$

## II.8. Caractéristiques Electriques D'une Cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion  $[\eta]$ , une tension à circuit ouvert  $[V_{OC}]$  ; un courant de court-circuit et un facteur de forme FF .les caractéristique courant tension sont utilisées pour déterminer ces paramètres.

### II.8.1. Courant De Court-Circuit $I_{CC}$ :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en pendant  $V=0$  dans le schéma équivalent).

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation 2.7:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{e.R_s.I_{cc}}{K.T}\right) - 1 \right] - \frac{R_s.I_{cc}}{R_p} \quad 2.8$$

Tenant compte de l'effet des résistances  $R_s$  et  $R_p$ , le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

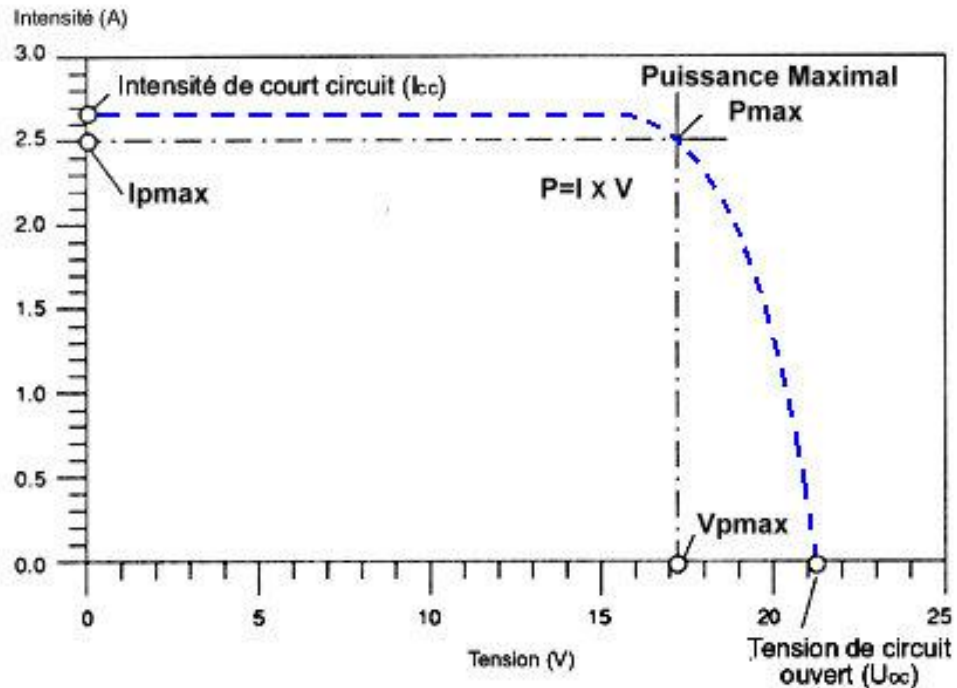
### II.8.2. Tension En Circuit Ouvert $V_{co}$ :

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation 2.7:

$$0 = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{e.V_{co}}{K.T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_p} \quad 2.9$$

$[V_{co}]$  augment quand  $I_s$  diminue, elle ne dépend que de la nature du cristal et de la jonction.

**II.8.3. Puissance Maximal D'une Cellule Solaire:**



**Fig.22 : Puissance maximale**

La cellule débite un maximum de puissance à la charge quand de le produit [V.I] est maximum si  $V_{Pmax}$  et  $I_{Pmax}$  sont la tension et le courant pour lesquels en maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de côté  $V_{Pmax}$  et  $I_{Pmax}$  qu'on peut inscrire sous la courbe I [V] de la figure ci-dessus.

**II.8.4. Facteur De Forme FF:**

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la Puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad 2.10$$



**II.8.5. Rendement  $\eta$  :**

Le rendement [ $\eta$ ] des cellules photovoltaïque désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente [ $P_{IN}$ ].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad 2.11$$

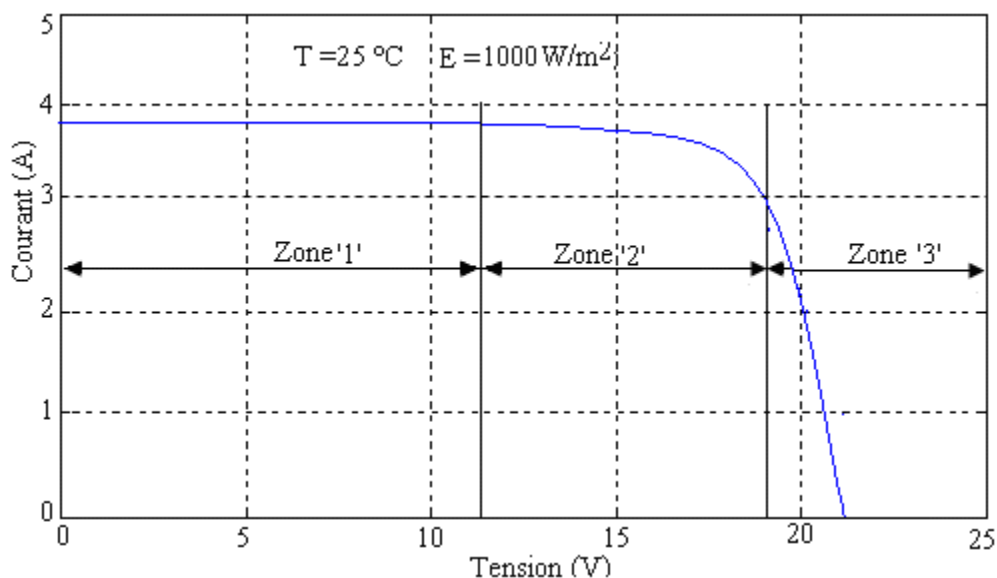
### II.9. Les zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque:

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe  $I = f(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La **Fig.23** représente trois zones essentielles : [10]

**a) La zone (1) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**b) La zone (2) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

**c) La zone (3):** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.



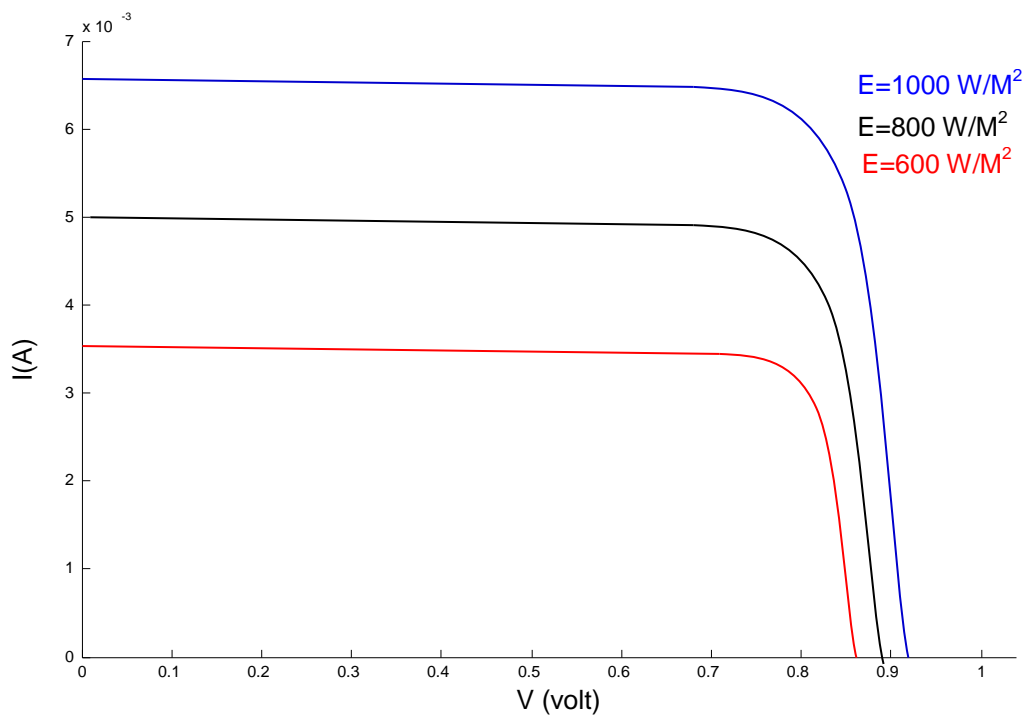
**Fig.23 :** Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

**II.10. Les paramètres qui influent sur la caractéristique  $I = f(V)$  :****a) Influence de l'éclairement**

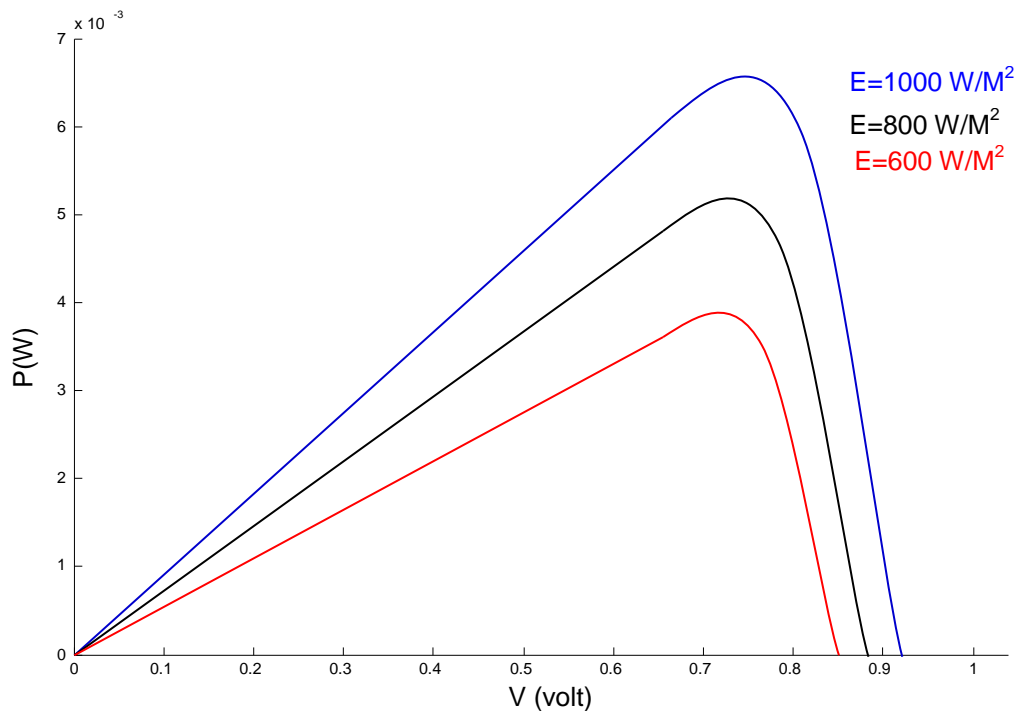
La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit.

Les **Fig.24.25** représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. [10]

On remarque que la tension  $V_{max}$  correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_{max}$  qui augmente fortement avec l'éclairement.



**Fig.24 :** Influence de l'éclairement sur le module  $i=f(v)$  ( $T=25^\circ$ )



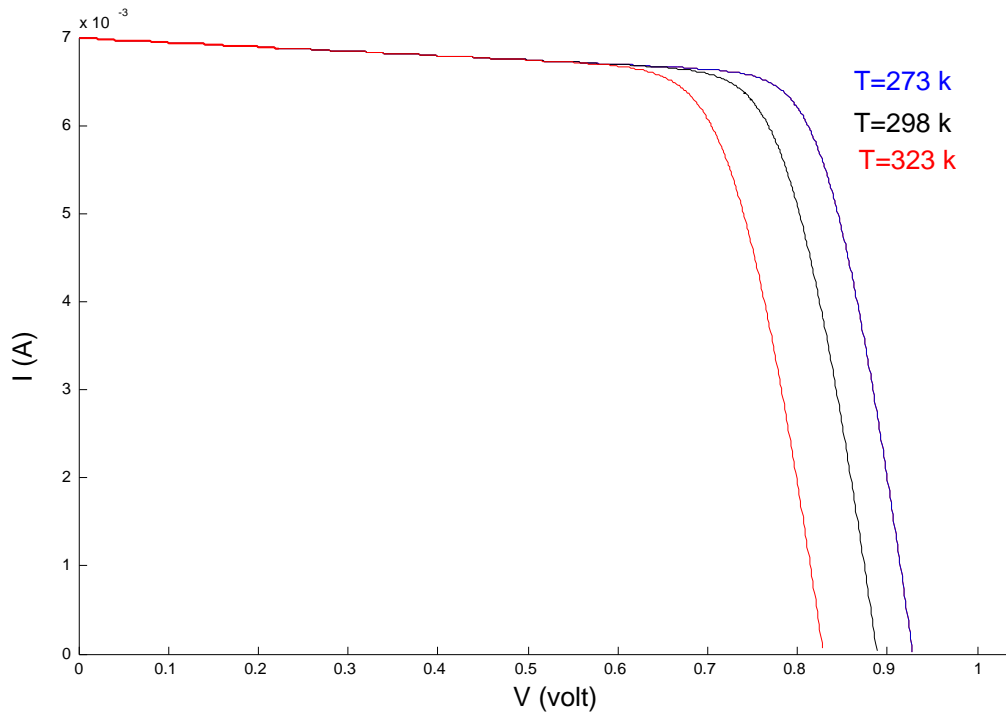
**Fig.25 :** Influence de l'éclairement sur le module  $p=f(v)$  ( $T=25^\circ$ )

### b) Influence de la température :

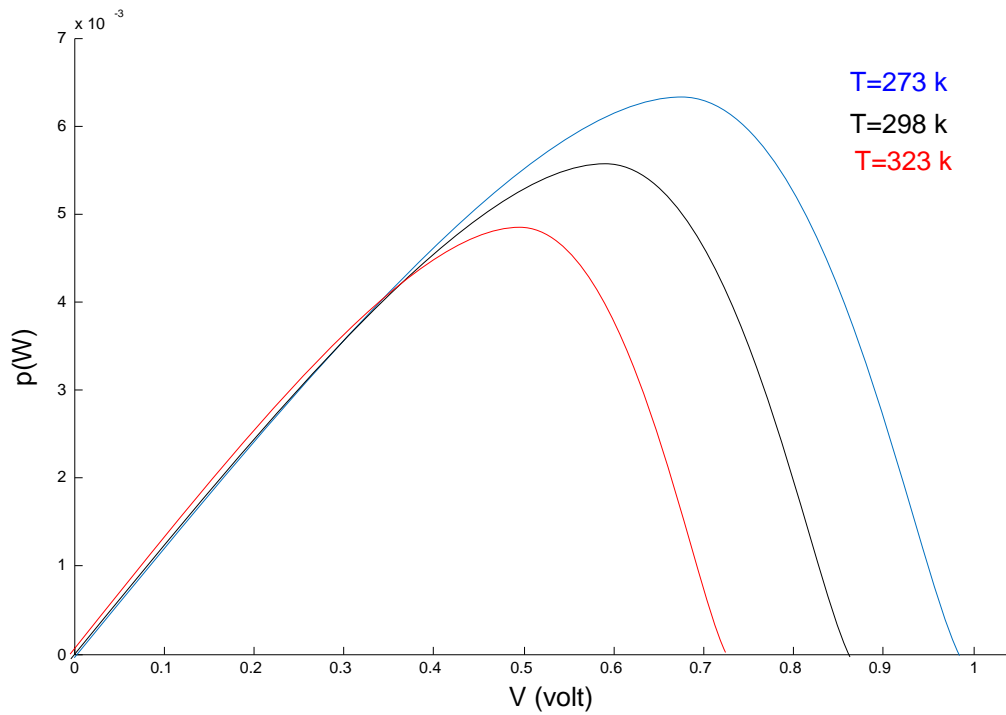
La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

Les **Fig.26.27** représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, à un éclairement et constante.

On remarque que L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.



**Fig.26 :** Influence de la température sur le module  $i=f(v)$

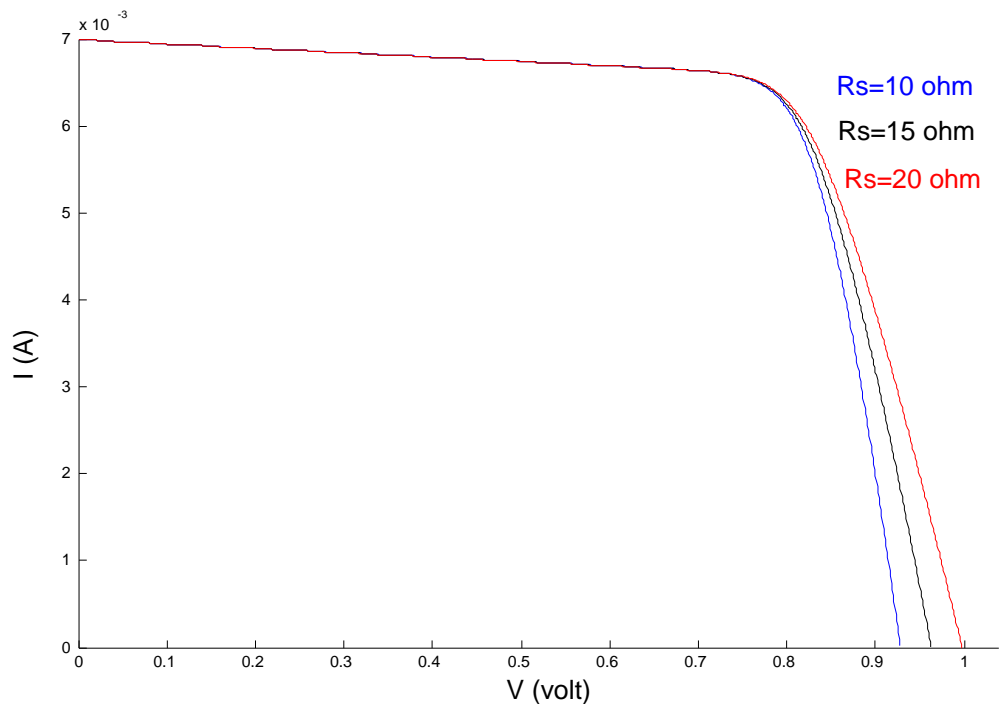


**Fig.27 :** Influence de la température sur le module  $p=(v)$

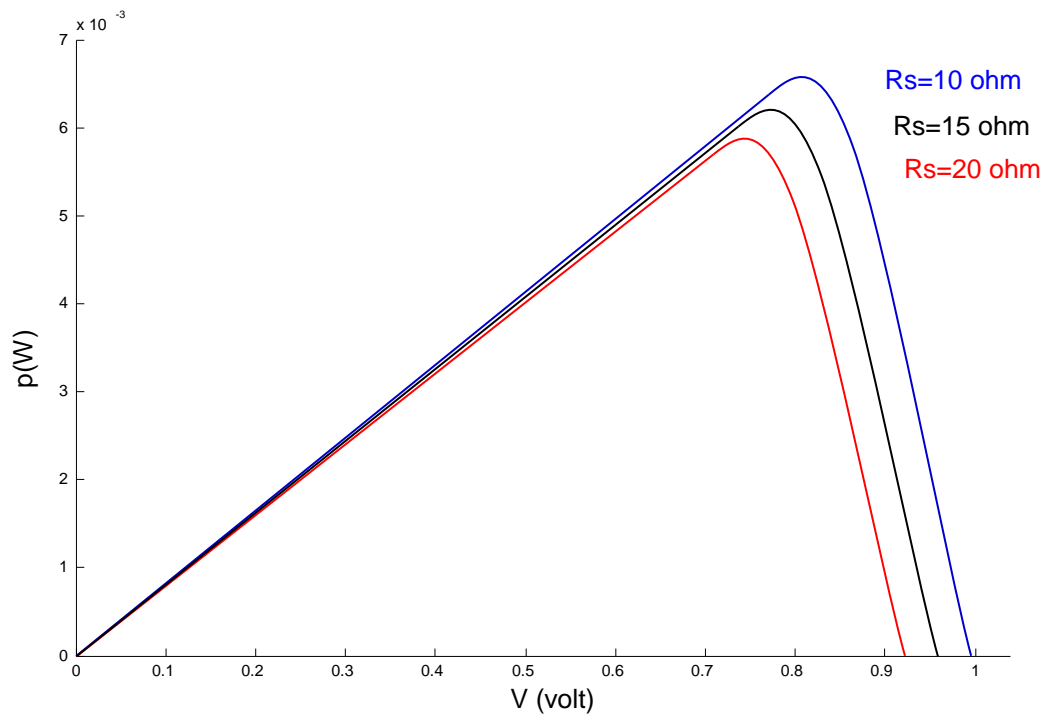
**c) Influence de la résistance série :**

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [10]

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone de la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit. **Fig.28.29**



**Fig.28** : L'influence de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique  $i=f(V)$

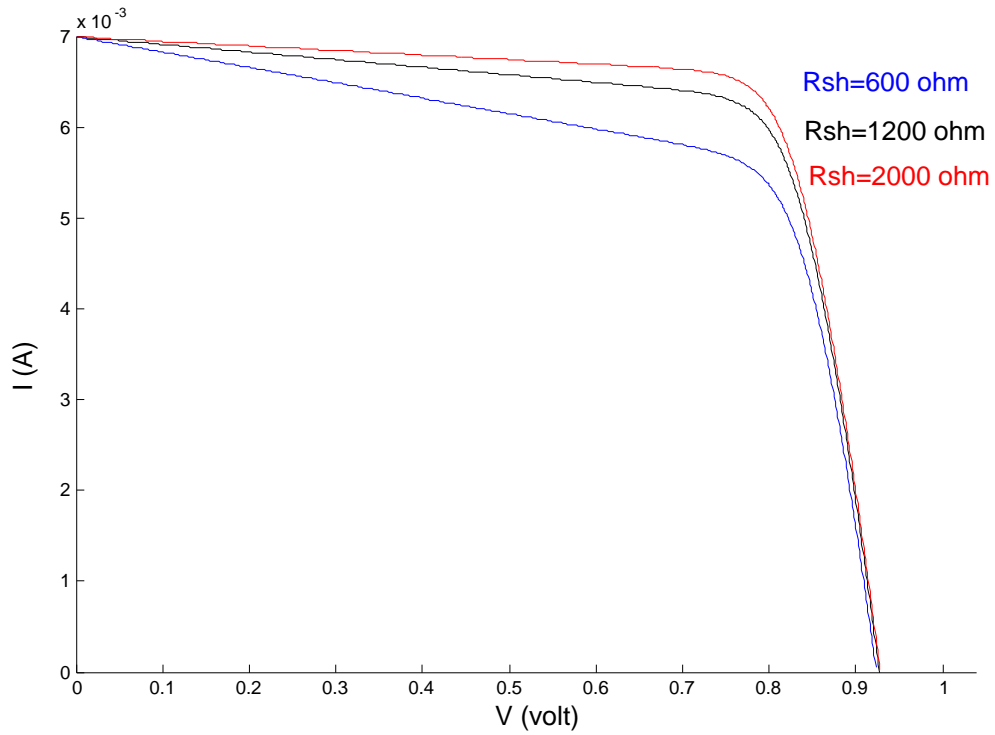


**Fig.29** : L'influence de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique  $p=f(V)$

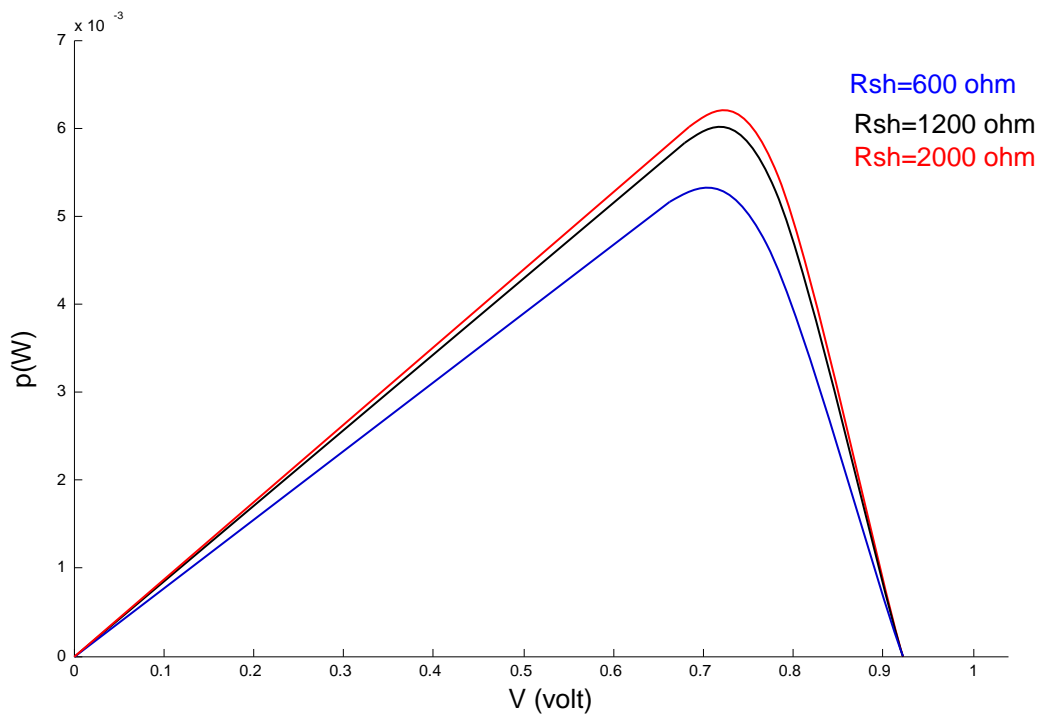
#### **d) Influence de la résistance shunt :**

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile.

En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant.



**Fig.30 :** L'influence de la résistance shunt  $R_{sh}$  sur la caractéristique  $I=f(V)$

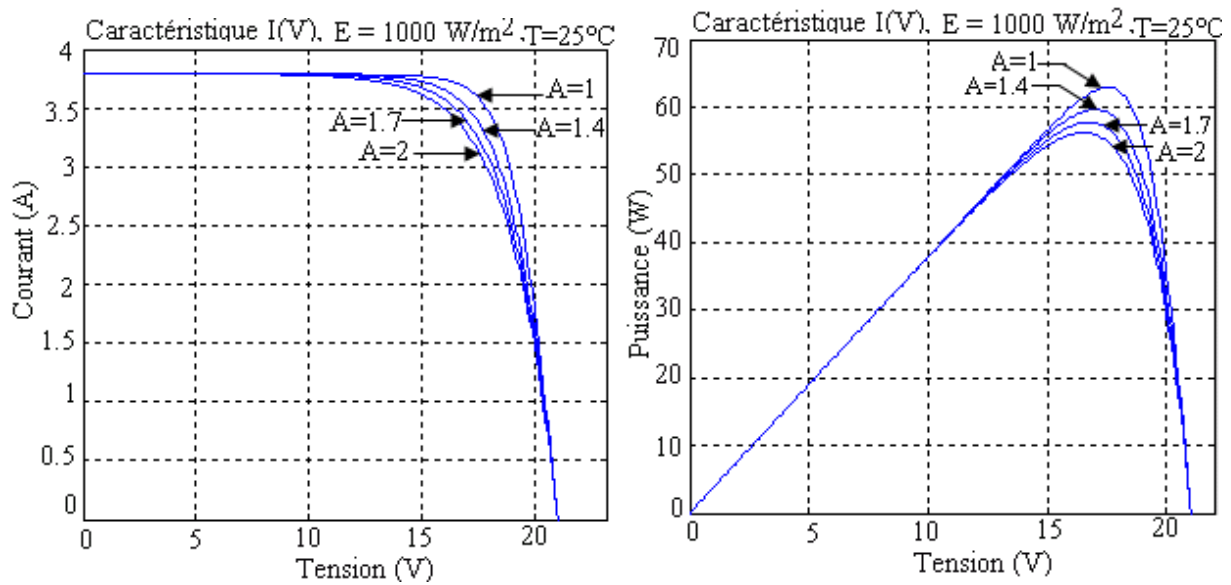


**Fig.31 :** L'influence de la résistance shunt  $R_{sh}$  sur la caractéristique  $p=f(V)$



**e) Influence de facteur de qualité :**

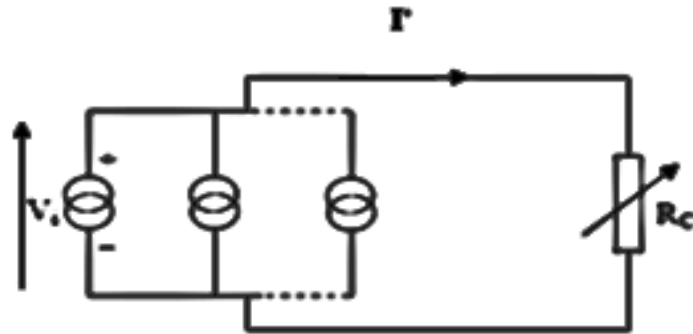
L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.



**Fig.32 :** L'influence de facteur de qualité A sur la caractéristique I=f(V)

**II.11. Groupement Des Cellules Solaires:**

**II.11.1. Groupement Parallèle Des Cellules Solaires :**



**Fig.33 :** Branchement en parallèle de m cellules identiques.

Si on connecte [m] cellules identiques en parallèle, la tension sera toujours la même, le courant et la puissance seront multipliés par le nombre de cellules [m]:

$$V=V' \quad \text{et} \quad I' = \sum_{i=1}^n I_i = m \cdot I_i \tag{2.12}$$

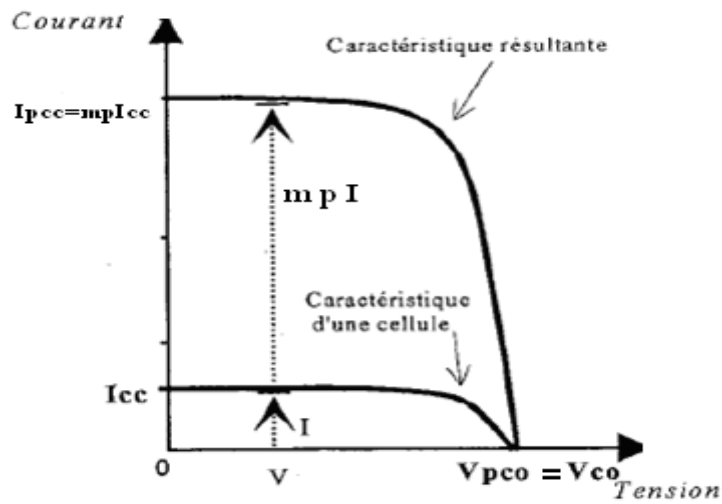
D’où la puissance sera :

$$P' = m \cdot V_i \cdot I_i = m \cdot P \tag{2.13}$$

La caractéristique de [m] cellules groupées en parallèle est donnée par l'équation suivante:

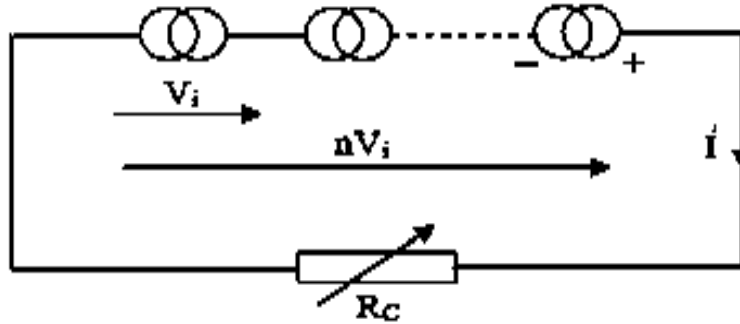
$$I' = m \cdot I_{ph} - m \cdot I_s \left[ \exp\left(\frac{e(V'+R_s' \cdot I')}{K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V'+R_s' \cdot I'}{R_p'} \tag{2.14}$$

Si les [m] cellules ne sont pas identiques, la tension en circuit ouvert sera plus petite des [m] cellules et le courant de court-circuit du système sera alors la somme de courants de court-circuit.



**Fig.34** caractéristiques (I-V) m cellules en parallèles.

**II.11.2. Groupement Série Des Cellules Solaires:**



**Fig.35 :** Branchement en série de n cellules identiques.

Pour [n] cellules identiques, la tension V' et le courant I' fournis à la charge R<sub>C</sub> sont:

$$I=I' \quad \text{et} \quad V' = \sum_{i=1}^n V_i = n.V_i \quad 2.15$$

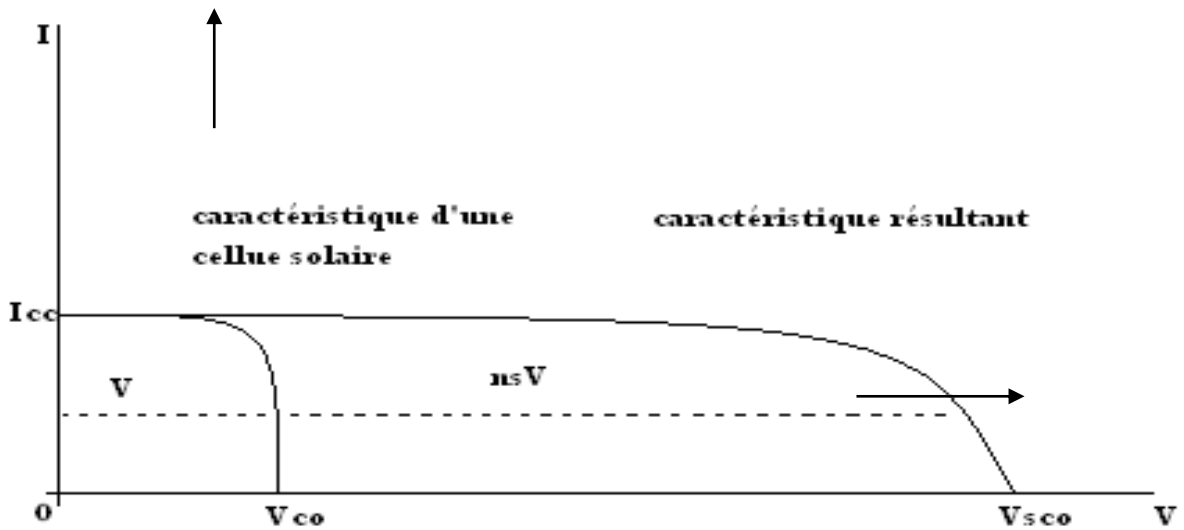
Donc on peut écrire la puissance :

$$P' = n.V_i.I_i = n.P \quad 2.16$$

La caractéristique de [n] cellules groupées en série est donnée par l'équation suivante :

$$I' = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{e(V'+R_s'I')}{n.K.T}\right) - 1 \right] - \frac{V'+R_s'I'}{R_p'} \quad 2.17$$

Avec:  $R_{S'} = n. R_S$  et  $R_{P'} = n. R_P$  2.18



**Fig.35 :** caractéristique (I-V) n cellule en série.

Si une ou plusieurs cellules non identique sont introduites dans branchement en série, le courant le plus faible généré par les [n] cellules sera imposé à l'ensemble ; la tension du système sera la somme des [n] tension pour les mêmes conditions d'éclairement et de température.

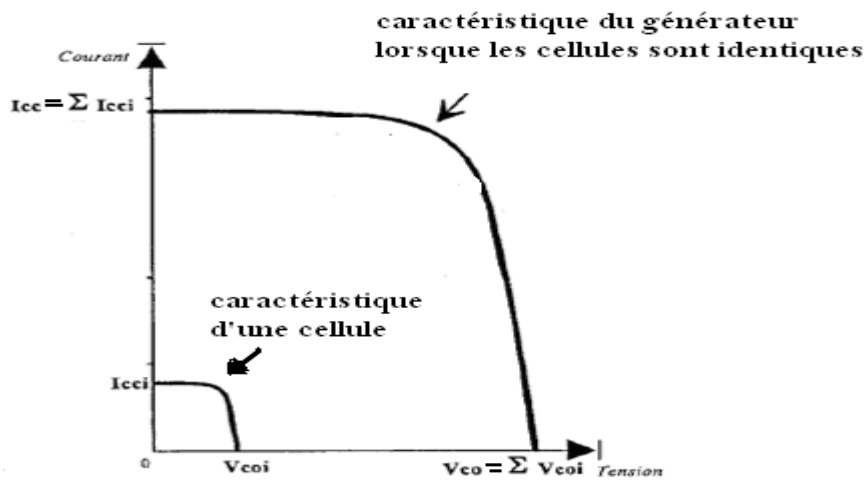
**II.11.3. Groupement Mixte Des Cellules Solaires:**

Le groupement mixte (série parallèle) permet d'augmenter le courant et la tension du système. Si on combine [m] branche parallèle et [n] cellules série chaque branche on aura :

$$V'=n \cdot V, I'=m \cdot I \quad \text{et} \quad P' = m.n.V.I = m.n.P \quad 2.19$$

L'équation caractéristique du système est donnée par l'équation suivante:

$$I' = m.I_{ph} - m.I_s \left[ \exp\left(\frac{e(m.V' + n.R_s'.I')}{n.m.K.T}\right) - 1 \right] - \frac{m.V' + n.R_s'.I'}{m.n.R_p'} \quad 2.20$$



**Fig.35 :** caractéristique (I-V) (n x m).

La caractéristique électrique globale **courant/tension** d'un générateur photovoltaïque se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristique des  $[n_s]$  ;  $[m_p]$  cellules élémentaire identiques qui le composent par deux affinités de rapport parallèlement à l'axe des tension et de rapport  $[n_p]$  parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure si dessus,  $[n_s]$  et  $[m_p]$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

## II.12. Manipulations Réalisée:

Le but de cette manipulation consiste à vérifier les caractéristiques des cellules solaires qu'on a vues précédemment.

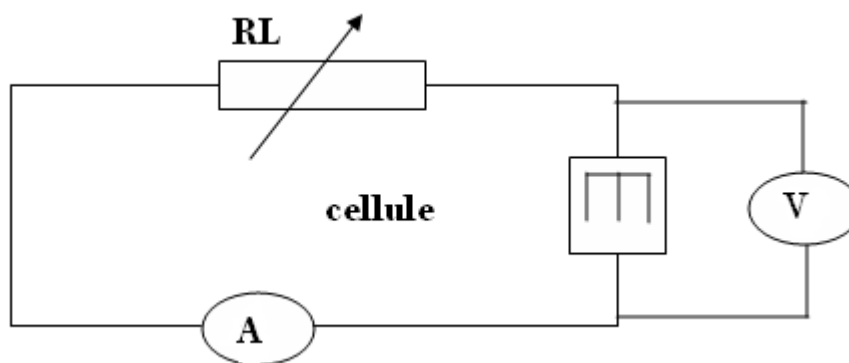
### II.12.1. Matériel Utilisé :

Ampoule, Cellules solaire, Ampèremètre, Voltmètre, Fils conducteurs, un Générateur, un Support gradué.

### Manipulation 01:

Cette manipulation permet d'étudier la caractéristique de la cellule solaire ainsi l'influence de l'éclairement sur la cellule solaire.

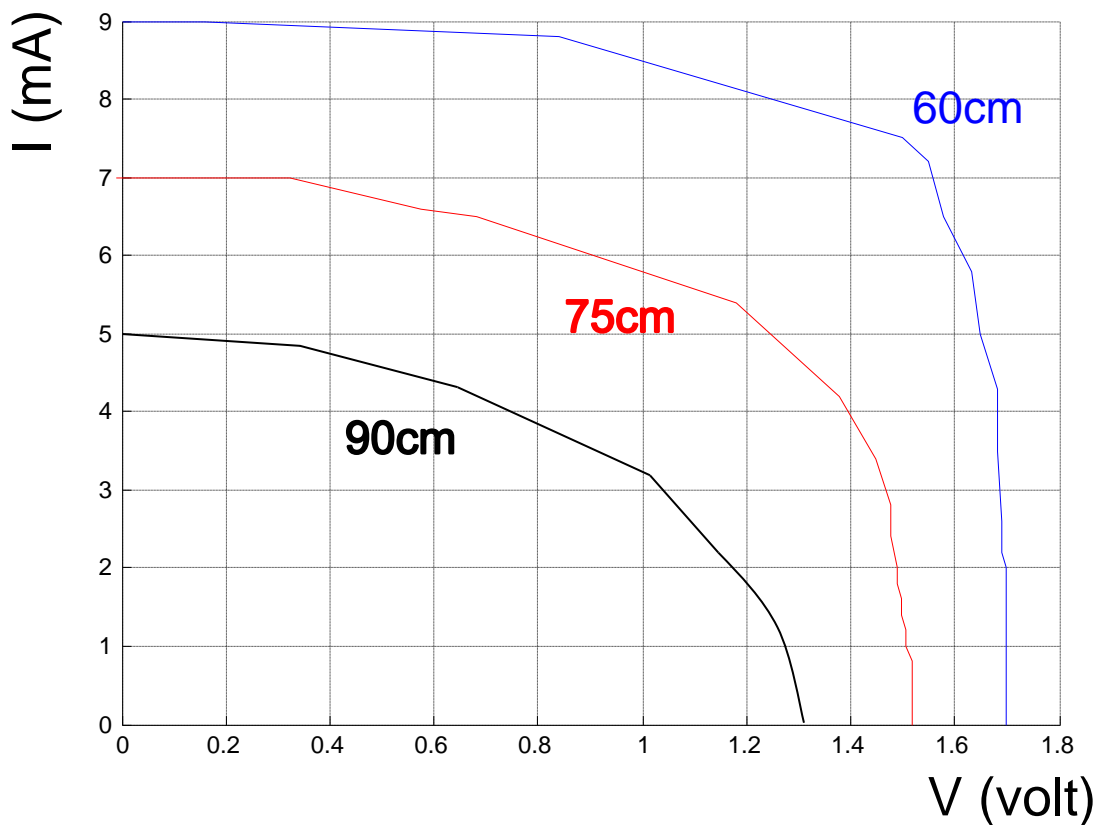
En utilise dans cette expérience un panneau avec quatre cellules photovoltaïques. Ces cellules sont éclairées avec une lampe de 100 watt placé à 90cm puis 75cm puis 60cm des cellules (on prend l'intensité de la lampe ou hasard mai elle reste constante pour toutes les manipulations).



**Fig.35** : montages de l'expérience

Ici en effectue le montage de la **Fig.35**. [V] est un voltmètre. [A] est un ampèremètre .il faut d'abord ajuster le zéros sur le voltmètre et l'Ampèremètre ensuite on fait varier  $R_L$  (une boîte de résistance variable) et on note le courant I et la tension aux bornes des cellules photovoltaïque on répète cette manipulation pour les trois distance 90cm 75cm et 60cm, et les valeurs obtenues sont illustrées dans les tableaux [voir l'annexe].

Les mesures obtenues dans les deux tableaux permettent de tracer la caractéristique de la cellule solaire dans les trois cas [90cm 75cm et 60cm] **Fig.36**

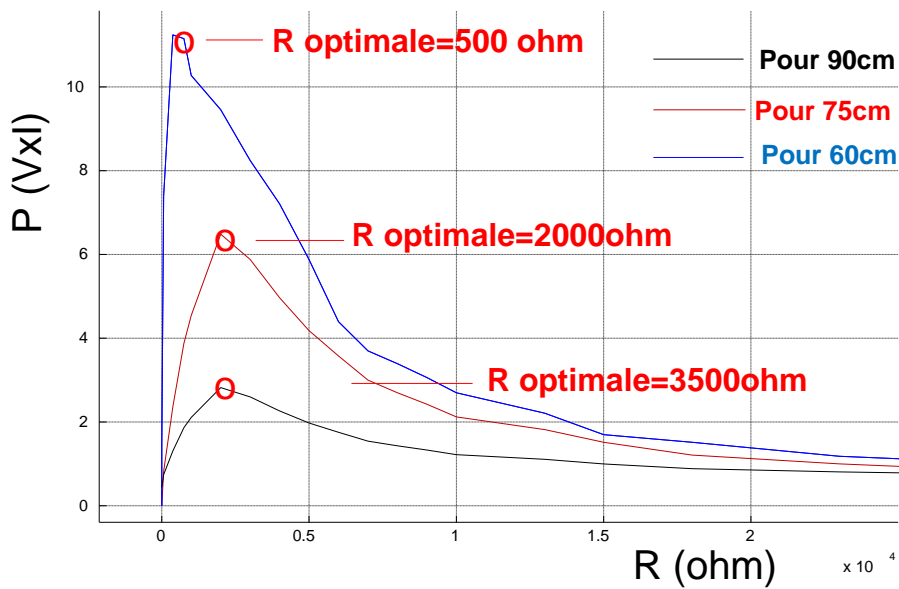


**Fig.36** : la caractéristique de la cellule solaire dans les trois cas (90cm 75cm et 60cm)



L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par déplacement de la caractéristique  $I=f(V)$  suivant l'axe des courants.

Le croisement du courant de court circuit est beaucoup plus importante que celui de la tension à circuit ouvert.



**Fig.37 : Point Optimale**

Utilisation optimale d'une cellule, détermination du MPPT (Maximum Power Point Tracking)  
 De la caractéristique courant-tension on peut déduire la caractéristique de la puissance électrique générée par la cellule en fonction de la résistance. Il existe une valeur de photo courant correspondant à une tension aux bornes de la cellule pour laquelle cette puissance électrique générée est optimum Ce point s'appelle le MPPT (Maximum Power Point Tracking).

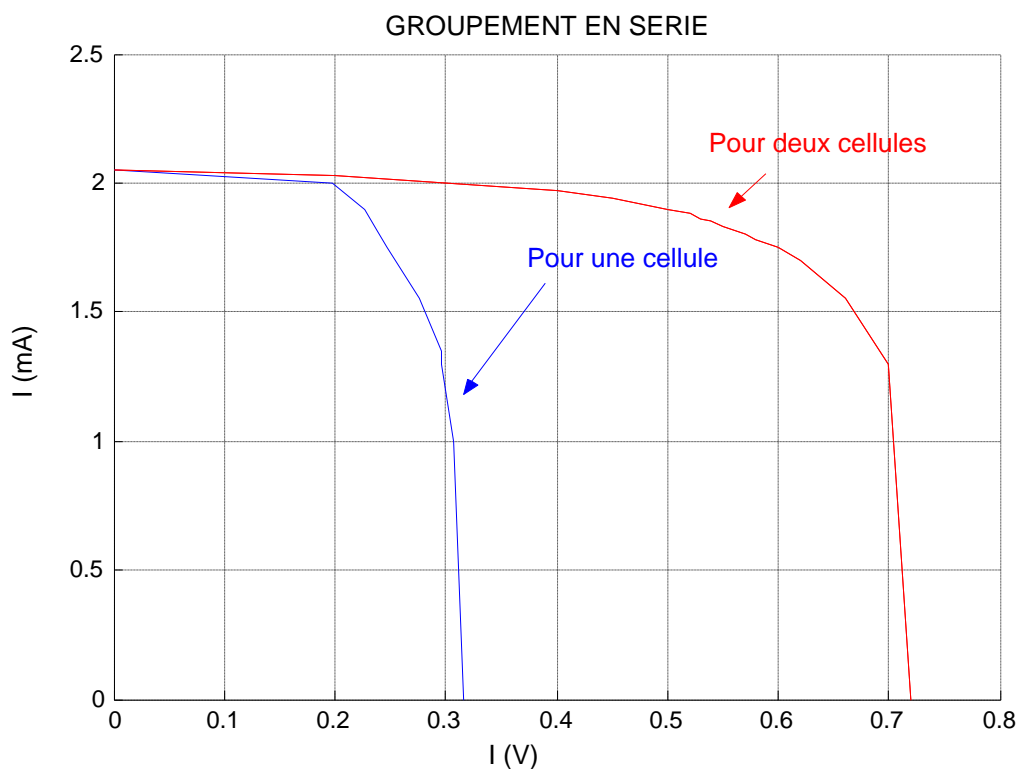
**Manipulation 02:**

Cette manipulation permet d'étudier les caractéristiques pour les différents groupements des cellules solaires.

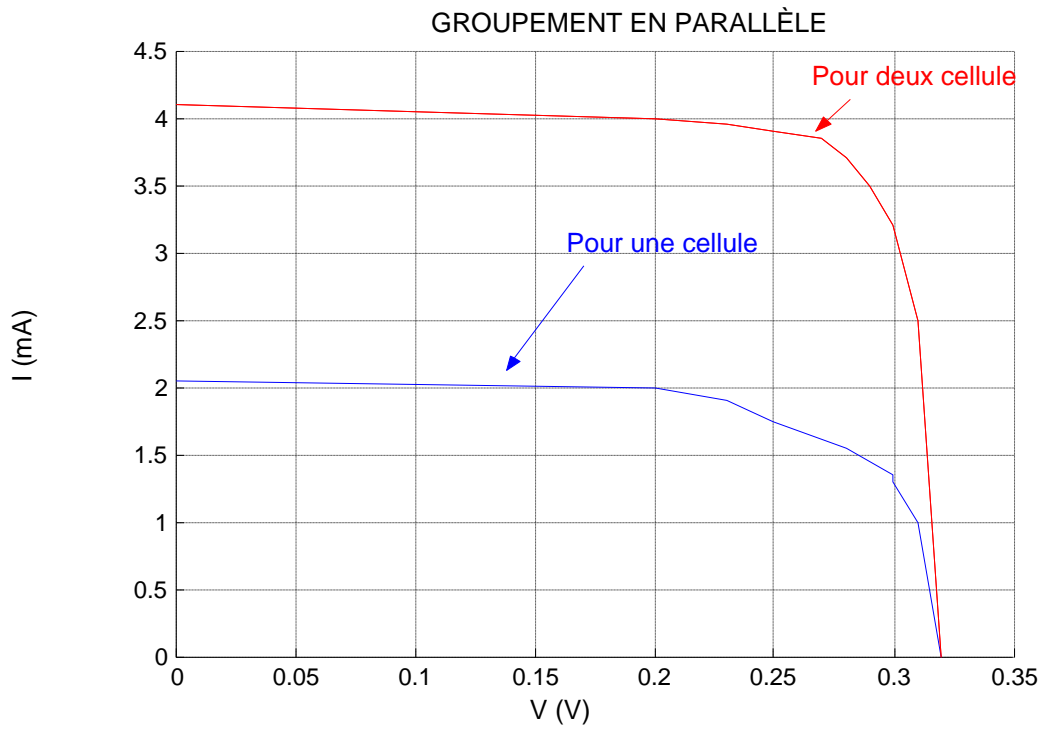
Dans ce cas on fait la même chose qu'à l'expérience précédant sauf que cette fois on fait des mesures sur une cellule puis deux cellules branchées en série et on répète pour les cellules branchées en parallèle.

Les valeurs obtenues sont illustrées dans les tableaux (voir l'annexe).

Les mesures obtenues permettent de tracer les caractéristiques de la cellule solaire dans les deux cas.

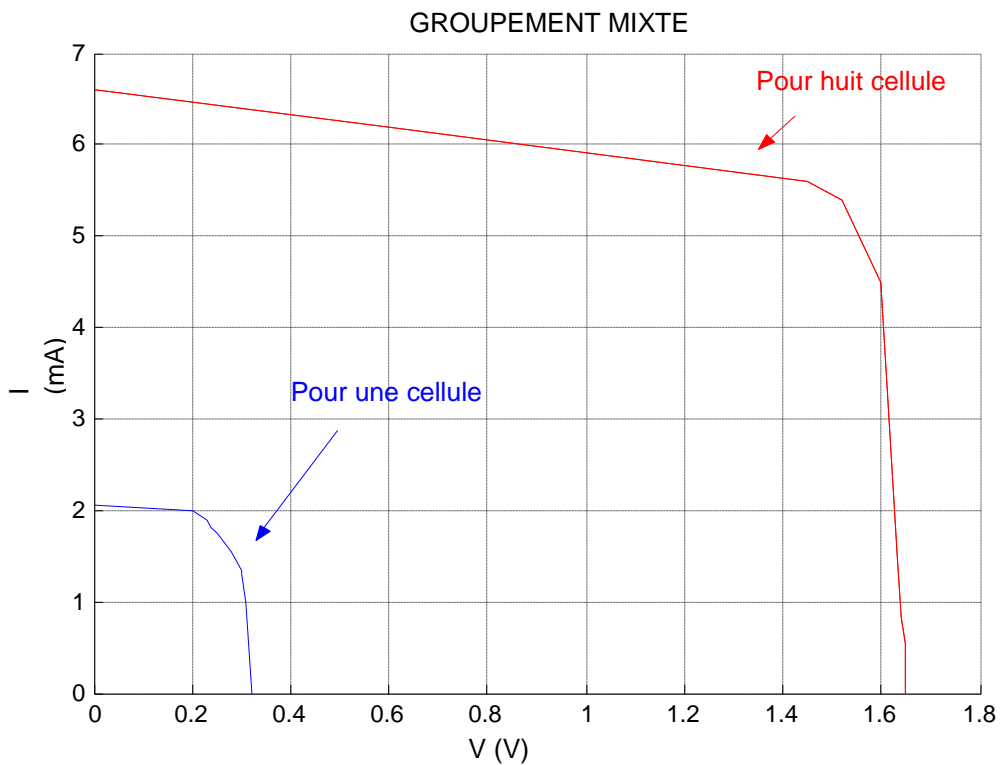


**Fig.38** : caractéristique (I-V) d'une cellule et deux cellules en série.



**Fig.39** : Caractéristique (I-V) d'une cellule et deux cellules en parallèle.

Pour groupement mixte des cellules solaire [huit cellules], on peut représenter les tableaux [voir l'annexe ] Les mesures obtenues permettent de tracer la caractéristique au-dessous.



**Fig.40** : caractéristique (I-V) d'une cellule et (4 x2) cellules.

# Chapitre III

## Méthode D'estimation Des Paramètres D'une Cellule PV

## **Introduction :**

Les caractéristiques de la cellule PV ont une importance vitale pour le contrôle de qualité et évaluation de la performance des cellules solaires donc la connaissance exacte des paramètres d'une cellule solaire à partir de la caractéristique mesurée (I.V) dépend de la méthode utilisée.

### **III.1. Les Méthodes Utilisés Pour L'extraction Des Paramètres D'une Cellule PV :**

Plusieurs méthodes mathématiques ont été proposées pour extraire ces paramètres cela décrit le modèle électrique non linéaire de la cellule solaire. Ces paramètres sont habituellement le courant de la saturation, la résistance série, la résistance parallèle, et le photo courant. [11]

**Bryant et Clew** ont appliqué la technique de moindre carré avec la Guass-Newtonien pour déterminer l'équation de la cellule solaire. Cette procédure d'optimisation exige des valeurs raisonnables pour les paramètres comme un point de départ Si le point de départ est loin de la solution optimale, la procédure itérative ne peut pas converger à la solution optimale ou peut diverger même. [12]

**Braunstein** étudie une autre technique avec la méthode Guass-Seidel. Se reporter à leur article, cette méthode a une bonne convergence d'itérations à la solution, mais le processus convergent est un peu lent. [13]

**P. Rodrigues** arrive à extraire les paramètres des systèmes photovoltaïques (PV) grâce à l'utilisation des modèles électriques à simple et ou double exponentielles. L'objectif de la méthode proposée est l'extraction des paramètres directement à partir des courbes mesurées appliquant la Méthode de région de confiance ou méthode des 5 points pour résoudre un système d'équations  $f(x_i)$ . Avec  $n$  variables  $x_i$  sont les photo courant (ISP), la saturation inverse ( $I_o$ ), le facteur d'idéalité ( $A_i$ ), la résistance série ( $R_s$ ) et la résistance de shunt ( $r_{sh}$ ).

Cette méthode permet de rapprocher les courbes IV en utilisant les paramètres calculés. Alors, elle fournit une analyse statistique des erreurs à partir des courbes obtenue de manière à évaluer la faisabilité de la méthode. [14]

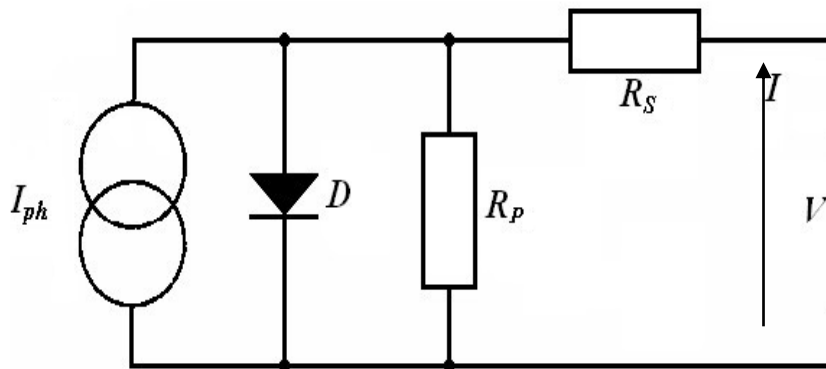
L'Institut Asiatique de Technologie (AIT) a proposé une simple méthode. Cette méthode exige beaucoup d'information au sujet du comportement cellulaire solaire. Malheureusement, quelques-uns de l'information exigée, tel que le facteur de la perfection, n'est pas complètement su en avance dans la plupart des cas.

La méthode de la solution est basée sur la méthode des moindres carrés et est accompli par le Newton-Raphson.

Dans ce chapitre, nous présentons une nouvelle approche pour estimer les paramètres d'une cellule solaire. Ces paramètres sont donnés par la connaissance de trois points de fonctionnement, court-circuit, circuit ouvert, et puissance maximale d'où son appellation méthode des trois points.

Pour modeler la cellule solaire, un des deux modèles standard: le modèle d'une diode ou le modèle de deux diodes ont été utilisée pour décrire les caractéristiques électriques de cellule solaire. Chaque modèle établit des relations pour évaluer le courant et le voltage d'après l'irradiante et la température appliquées.

Dans ce travail, on utilise le modèle a un exponentiel montré dans la figure **Fig.41**.



**Fig.41** : le modèle un exponentiel

La relation entre voltage  $V$  et courant  $I$ , pour le modèle une exponentiel, est donnée par l'équation suivante:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{e(V + R_s I)}{K.T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad 3.1$$

### III.2. La Méthode Des Trois Points:

Nous rappelons que le modèle a un exponentiel est non linéaire et implicite. Ses paramètres sont donnés de la connaissance de trois points du fonctionnement: court-circuit, circuit ouvert, et puissance maximale. Dans la première étape, l'approche adoptée intéresse la résolution du système d'équations qui constitue les trois points d'exploitation pour écrire tous les paramètres modèles d'après la résistance séries. Deuxièmement, nous faisons une résolution itérative au point d'exploitation optimal en utilisant la méthode de bisection pour calculer la valeur de la résistance série aussi bien que les paramètres modèle.

Avis qu'une attention particulière doit être considérée pour le choix correct des valeurs de base. Depuis le choix inadéquat des derniers aura comme conséquence la divergence de l'algorithme. Pour la résistance série  $R_S$ , nous supposons qu'initialement c'est nul:

$$R_{S0} = 0$$

Cela autorise seulement le lancement de l'algorithme du calcul les paramètres  $I_{PH}$ ,  $I_S$ ,  $R_S$  et  $R_P$ . Si ces paramètres sont sus, nous pouvons déterminer à partir d'équation (6) le courant  $I$  de la collection PV d'après le voltage  $V$ .

Habituellement, les trois points d'exploitation donnés par le fabricant de la collection PV sont:

#### Point du circuit Ouvert:

$$I = 0 \quad \text{Et} \quad V = V_{oc} \quad 3.2$$

$$0 = I_{Ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{e.V_{co}}{K.T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_p} \quad 3.3$$

**Point du court-circuit:**

$$I = I_{cc} \quad \text{et} \quad V = 0 \quad 3.4$$

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{e \cdot R_s \cdot I_{cc}}{K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_p} \quad 3.5$$

**Point du fonctionnement optimal (à puissance maximum):**

$$I_{op} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{e(V_{op} + R_s \cdot I_{op})}{K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op}}{R_p} \quad 3.6$$

Dans la forme compacte et après quelques développements, nous pouvons écrire en prenant en considération les derniers trois points de fonctionnement le système suivant:

$$\begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_s \\ R_p^{-1} \end{bmatrix} = [M]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{cc} \\ I_{op} \end{bmatrix} \quad 3.7$$

La matrice M est en rapport avec  $R_s$ ,  $V_{OC}$ ,  $I_{CC}$ ,  $V_{OP}$  et  $I_{OP}$ , et il est donné par:

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & -c & -V_{oc} \\ 1 & -B & -R_s \cdot I_{cc} \\ 1 & -A & -V_{op} - R_s \cdot I_{op} \end{bmatrix} \quad 3.8$$

Où A, B et C sont exprimés respectivement par les équations suivantes:

$$A = \exp\left(\frac{q(V_{op} + R_s \cdot I_{op})}{k \cdot T}\right) - 1 \quad 3.9$$



$$B = \exp\left(\frac{q.Rs.Icc}{k.T}\right) - 1 \quad 3.10$$

$$C = \exp\left(\frac{q.Voc}{k.T}\right) - 1 \quad 3.11$$

Substituer l'inverse de la matrice M dans l'équation [3.7], nous pouvons écrire:

$$\begin{aligned} I_{ph} &= \frac{Voc.Icc.A - Voc.Iop.B - Vop.Icc.C}{\det_M} & \mathbf{(a)} \\ I_s &= \frac{Voc.Icc - Voc.Iop - Vop.Icc}{\det_M} & \mathbf{(b)} \\ R_p^{-1} &= \frac{Icc.A - Iop.B - (Icc - Iop)C}{\det_M} & \mathbf{(c)} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} I_{ph} \\ I_s \\ R_p^{-1} \end{aligned}} \right\} 3.12$$

Avec:

$$\det_M = (Voc - Rs.Icc)A + (-Voc + Vop + Rs.Iop)B + (-VOP + Rs(Icc - Iop))C$$

Pour calculer la valeur de RS, nous devons utiliser une autre équation. Le dernier est obtenu de la dérivé de puissance. Pour un point d'exploitation optimal, les PV rangent travail à sa puissance maximale et donc la puissance dérivée à ce point est nulle.

À ce point, nous pouvons écrire:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \left. \frac{dI}{dV} \right|_{Vop} = -\frac{Iop}{Vop} \quad 3.13$$

D'équation [3.1], le dérivé de courant peut être exprimé :

$$\frac{dI}{dV} = -\left(R_s + \left(\frac{q \cdot I_s}{k \cdot T} \cdot \exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{k \cdot T}\right) + \frac{1}{R_p}\right)^{-1}\right)^{-1} \quad 3.14$$

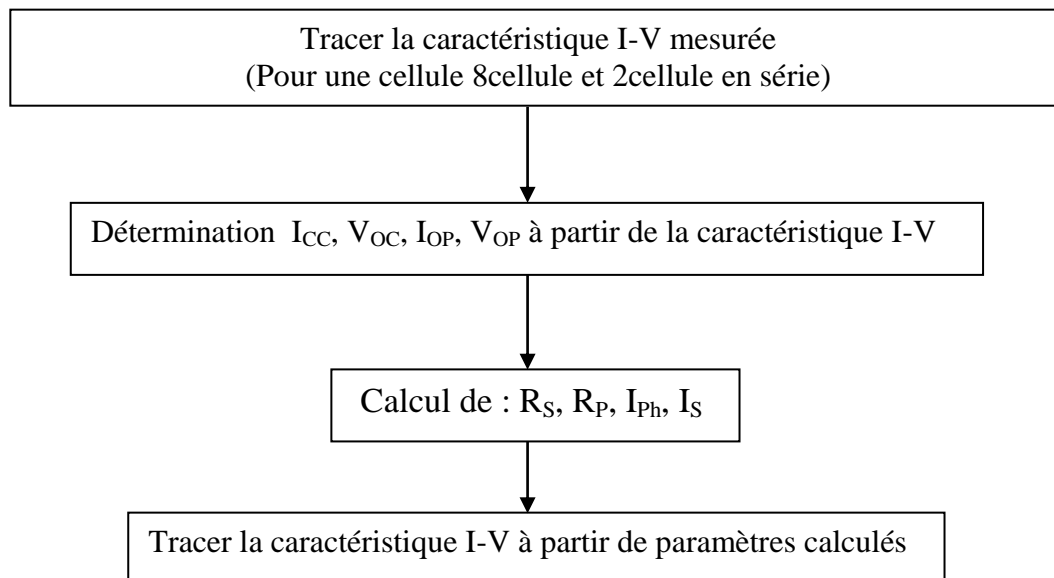
Substituer cette équation dans [3.13], nous définissons la fonction f comme suit:

$$f = I_{op} - (V_{op} - R_s \cdot I_{op}) \left(\frac{q \cdot I_s}{k \cdot T} \cdot \exp\left(\frac{q(V_{op} + R_s \cdot I_{op})}{k \cdot T}\right) + \frac{1}{R_p}\right) = 0$$

La méthode de bisection est utilisée pour résoudre l'équation  $f(R_s)=0$ .

Une fois la valeur de  $R_s$  solution de l'équation les autres paramètres sont calculés facilement en utilisant les relations (a, b, c)

Pour mieux illustrer la démarche de calcul nous avons développé l'algorithme suivant:



### III.3 méthode des cinq points

Cette méthode a été décrite par **P. Rodrigues** [14] il a choisie cinq points de la caractéristique  $I=f(V)$  de la manière suivante :

- P1:  $(V_1, I_1) = (0, I_{sc})$  courant de court-circuit
- P2:  $(V_2, I_2) = (0.3V_{oc}, I_{0.3V_{oc}})$  le point de la tension a 30% de la tension du circuit ouvert.
- P3:  $(V_3, I_3) = (V_{max}, I_{max})$  le point de la puissance maximale.
- P4:  $(V_4, I_4) = (0.9V_{oc}, I_{0.9V_{oc}})$  le point de la tension a 90% de la tension du circuit ouvert.
- P5:  $(V_5, I_5) = (V_{oc}, 0)$  le point de la tension du court-circuit.

En introduisant ces points dans l'équation du model de la cellule solaire :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 f_1(x) = x_1 - x_2 \left( e^{\lambda \left( \frac{V_1 + I_1 x_4}{x_3} \right)} - 1 \right) - \frac{V_1 + I_1 x_4}{x_5} - I_1 \\
 f_2(x) = x_1 - x_2 \left( e^{\lambda \left( \frac{V_2 + I_2 x_4}{x_3} \right)} - 1 \right) - \frac{V_2 + I_2 x_4}{x_5} - I_2 \\
 f_3(x) = x_1 - x_2 \left( e^{\lambda \left( \frac{V_3 + I_3 x_4}{x_3} \right)} - 1 \right) - \frac{V_3 + I_3 x_4}{x_5} - I_3 \\
 f_4(x) = x_1 - x_2 \left( e^{\lambda \left( \frac{V_4 + I_4 x_4}{x_3} \right)} - 1 \right) - \frac{V_4 + I_4 x_4}{x_5} - I_4 \\
 f_5(x) = x_1 - x_2 \left( e^{\lambda \left( \frac{V_5 + I_5 x_4}{x_3} \right)} - 1 \right) - \frac{V_5 + I_5 x_4}{x_5} - I_5
 \end{array} \right. \quad . \quad 3.13$$

On obtient un système d'équation à cinq inconnus

$$x_1 = I_{ph} \quad , \quad x_2 = I_0 \quad , \quad x_3 = A_i \quad , \quad x_4 = R_s \quad , \quad x_5 = R_{sh}..$$

Ce système non linéaire peut être résolu par la méthode de **newton raphson** comme il a été bien expliqué dans la référence [14]

Ainsi, la solution des systèmes se fait en appliquant ces (5) équations. Par ailleurs, on a utilisé les paramètres montrés dans (3.14) et (3.15)

$$g_k = \nabla f(x_k) = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} \end{vmatrix} \quad 3.14$$

Avec  $x_1 = I_{ph}$  ,  $x_2 = I_{o1}$  ,  $x_3 = I_{o2}$  ,  $x_4 = R_s$  et  $x_5 = R_{sh}$

Donc on peut écrire ces paramètres dans la matrice jacobéenne pour déduire la solution.

$$B_k = \nabla^2 f(x_k) = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 f_1}{\partial x_1^2} & \frac{\partial f_1 \partial f_2}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1 \partial f_5}{\partial x_1 \partial x_5} \\ \frac{\partial f_2 \partial f_1}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f_2}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial f_2 \partial f_5}{\partial x_2 \partial x_5} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_5 \partial f_1}{\partial x_5 \partial x_1} & \frac{\partial f_5 \partial f_2}{\partial x_5 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f_5}{\partial x_5^2} \end{vmatrix} \quad 3.15$$

Une autre méthode simple, consiste à utiliser MATLAB pour résoudre ce type des problèmes

# Chapitre IV

## Résultat De Simulation

### IV.1. Résultats de la méthode des trois points

#### IV.1.1. Pour [8] Cellules:

En a utiliser la méthode décrite précédemment on a déterminé les paramètres d'une cellule solaire à partir de la caractéristique I-V sous l'extraction.

La courbe de la figure [41] montre la concordance entre le modèle calculé et celui mesuré et qui à donne les résultats dans le Tableau III.1 :

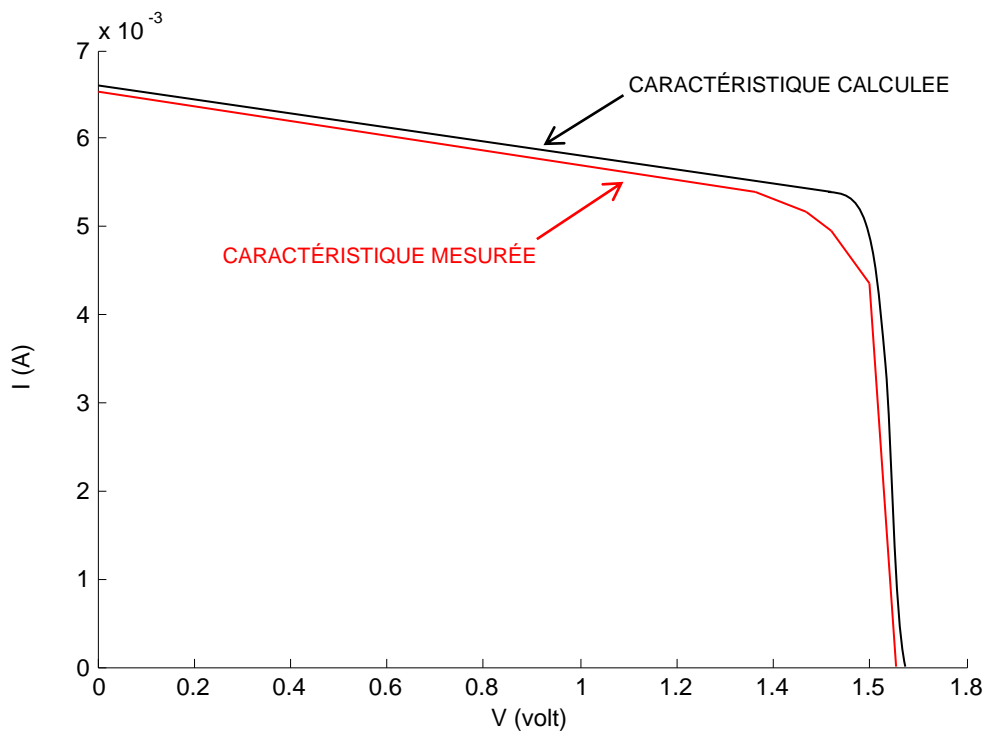


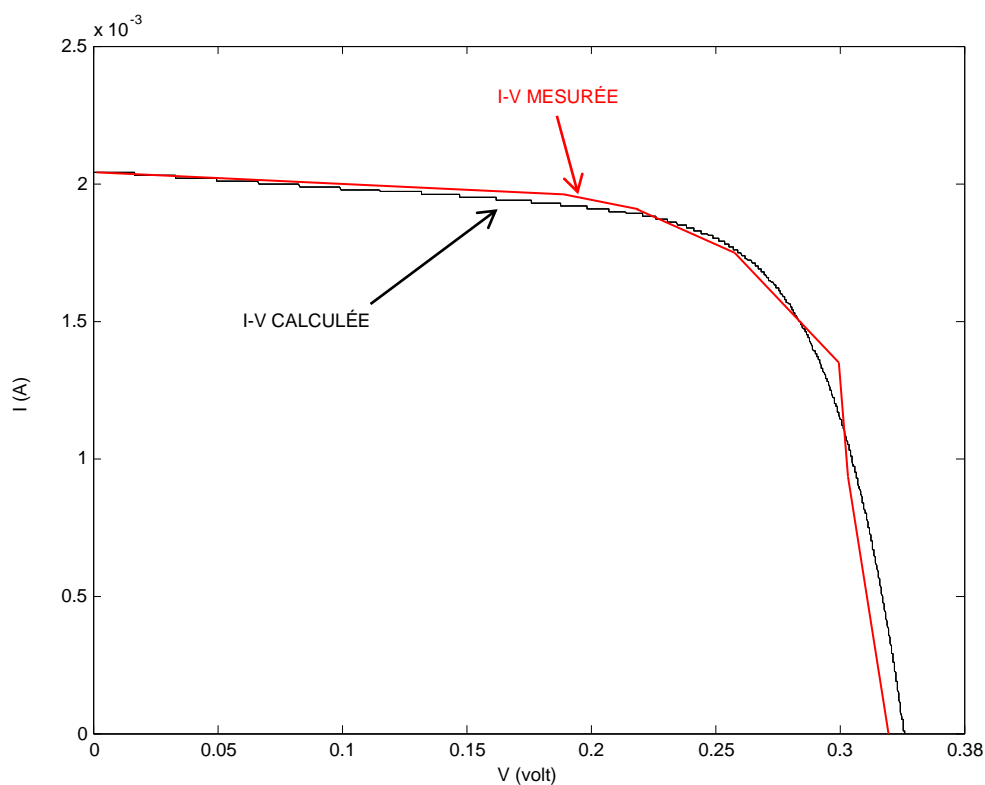
Fig.41 : caractéristique (I-V) mesurée et calculée pour (4 x 2) cellules

|                  |                    |                    |              |              |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|
| Valeurs mesurées | $I_{CC}$ [A]       | $V_{OC}$ [V]       | $I_{OP}$ [A] | $V_{OP}$ [V] |
|                  | 0.0065             | 1.61               | 0.0055       | 1.48         |
| Valeurs calculé  | $R_P$ [ $\Omega$ ] | $R_S$ [ $\Omega$ ] | $I_{ph}$ [A] | $I_S$ [A]    |
|                  | 1320               | 3.9                | 0.0065       | $2.e^{-33}$  |

Tableau III.1

### IV.1.2. Pour Une Cellule:

La figure [42] montre la caractéristique I-V obtenue même résultats pour une cellule sur le **Tableau III. 2** :



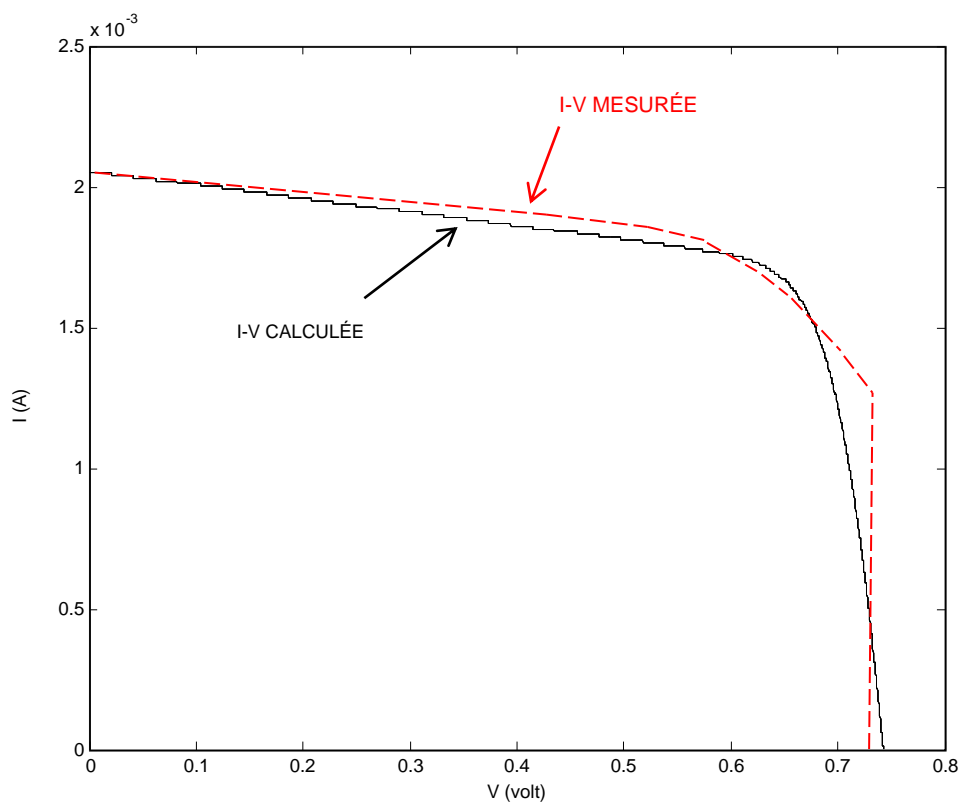
**Fig.42** : caractéristiques (I - V) mesurée et calculée pour une cellule

|                  |                    |                    |              |              |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|
| Valeurs mesurées | $I_{CC}$ [A]       | $V_{OC}$ [V]       | $I_{OP}$ [A] | $V_{OP}$ [V] |
|                  | 0.002              | 0.33               | 0.0018       | 0.26         |
| Valeurs calculé  | $R_P$ [ $\Omega$ ] | $R_S$ [ $\Omega$ ] | $I_{PH}$ [A] | $I_S$ [A]    |
|                  | 1642               | 6                  | 0.0022       | $2.e^{-9}$   |

**Tableau III. 2**

**IV.1.3. Deux cellules en série:**

La figure 43 montre les mêmes résultats précédents, la concordance entre les valeurs calculés et mesurés indiqué sur le Tableaux III. 3:



**Fig.43 :** caractéristiques (I - V) mesurée et calculée pour deux cellules en série

|                  |                    |                    |              |              |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|
| Valeurs mesurées | $I_{CC}$ [A]       | $V_{OC}$ [V]       | $I_{OP}$ [A] | $V_{OP}$ [V] |
|                  | 0.0021             | 0.73               | 0.0017       | 0.63         |
| Valeurs calculé  | $R_P$ [ $\Omega$ ] | $R_S$ [ $\Omega$ ] | $I_{PH}$ [A] | $I_S$ [A]    |
|                  | 2085               | 11                 | 0.0023       | $2.e^{-17}$  |

**Tableaux III. 3**



**IV.5. Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation avec du comportement électrique d'une cellule solaire avec la méthode des trois points.

Nous avons développé un algorithme pour estimer les paramètres du modèle à une exponentiel de la collection photovoltaïque. Ces paramètres sont identifiés à partir de la connaissance des trois points du fonctionnement donnée par le fabricant. Les résultats obtenue par cette méthode ont été comparé directement avec les résultats expérimentales. La convergence de la vitesse de la solution fournie par l'algorithme développé dépend du choix de la valeur de base de RS et l'erreur admissible.

Les résultats de la simulation ont montré l'efficacité de l'algorithme développé pour calculer les paramètres modèles, et la possibilité de visualiser le comportement électrique de cellule solaire

## Conclusion Générale

---

Le travail entrepris dans ce mémoire porté sur l'extraction des paramètres d'une cellule solaire à partir de la caractéristique  $i=f(v)$  d'une cellule éclairée en utilisant la méthode des trois points pour le modèle à une exponentielle.

Les résultats obtenus sont valides en reproduisant la caractéristique mesurée en utilisant les paramètres calculés de cette cellule en effet l'écart est très faible entre les caractéristiques mesurée et calculée.

On a présenté aussi une étude théorique de la méthode des cinq points qui n'a pas été mise en œuvre.

Ce travail peut être amélioré en améliorant le modèle (modèle à 2 exponentielles) en utilisant la méthode des cinq points.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] Z. FOUJIL, «étude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque».2009.
- [2] <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/Silicium.html>
- [3] <http://membres.lycos.fr/procession/electronique/smcd06.pdf>
- [4] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Germanium>
- [5] [http://ressources.univlemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02bis/cours\\_elec/semicon.pdf](http://ressources.univlemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02bis/cours_elec/semicon.pdf).
- [6] B.mokhtar B.ridha «Évaluation des paramètres d'une cellule solaire à partir de caractéristique I-V».2008.
- [7] RAP C., Ombre passagère sur le photovoltaïque, le Journal du Photovoltaïque n°1, 2009, pp. 12-17.
- [8] J. ZHAO, M.A. GREEN, Optimized antireflection coatings for high-efficiency solar cells, IEEE Trans. Elect. Dev., Vol. 38, N°8, 1991, pp.1925-1934.
- [9] D.J.AIKEN, Antireflection coating design for series interconnected multijunction solar cells, Prog. Photovolt. Res. Appl., N°8, 2000, pp. 563-570.
- [10] B.ABDELMALEK «Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque» 2008
- [11] <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F9792%2F30878%2F01431886.pdf%3Farnumber%3D1431886&authDecision=-203>
- [12] [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19810065637\\_1981065637.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19810065637_1981065637.pdf)
- [13] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001374807790050X>
- [14] <http://www.icrepq.com/icrepq'11/380-rodriques.pdf>

# ANNEXE

---

## Paramètre influençant sur la cellule photovoltaïque :

### 1. Les valeurs prise pour simulée le phénomène de l'influence de la résistance série [ $R_s$ ]

- ❖ [ $R_p$ ]=2000  $\Omega$ .
- ❖ [ $I_s$ ]=  $10^{-18}$  A.
- ❖ [ $T$ ]= 273 k.
- ❖ [ $I_{ph}$ ]=0.007 A.

### 2. Les valeurs prise pour simulée le phénomène de l'influence de la résistance shunt [ $R_p$ ]

- ❖ [ $R_s$ ]=10  $\Omega$ .
- ❖ [ $I_s$ ]=  $10^{-18}$  A.
- ❖ [ $T$ ]=273 k.
- ❖ [ $I_{ph}$ ]=0.007 A.

### 3. Les valeurs prise pour simulée le phénomène de l'influence de la température

- ❖ [ $R_s$ ]=10 ohm
- ❖ [ $R_p$ ]=2000 ohm

# ANNEXE

## MANIPULATIONS

### Manipulation 1:

#### Pour 90cm:

|                |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R(k $\Omega$ ) | 0 | 0.1  | 0.4  | 0.8  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| V(vol)         | 0 | 0.08 | 0.15 | 0.24 | 0.4  | 0.7  | 0.9  | 1.10 | 1.15 | 1.15 |
| I(mA)          | 5 | 5    | 4.8  | 4.5  | 4.4  | 3.6  | 3.2  | 2.7  | 2.1  | 1.8  |
| P(VxI)         | 0 | 0.4  | 0.72 | 1.08 | 1.76 | 2.52 | 2.88 | 2.97 | 2.41 | 2.07 |

|                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |          |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| R(k $\Omega$ ) | 7    | 8    | 9    | 10   | 13   | 15   | 18   | 23   | 43   | $\infty$ |
| V(vol)         | 1.17 | 1.17 | 1.18 | 1.18 | 1.19 | 1.19 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20     |
| I(mA)          | 1.5  | 1.2  | 1.0  | 0.8  | 0.6  | 0.35 | 0.30 | 0.23 | 0.1  | 0        |
| P(VxI)         | 1.75 | 1.40 | 1.18 | 0.94 | 0.71 | 0.41 | 0.36 | 0.27 | 0.12 | 0.00     |

#### Pour 75cm:

|                |   |      |      |      |      |      |      |      |     |     |
|----------------|---|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| R(k $\Omega$ ) | 0 | 0.1  | 0.4  | 0.8  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5   | 6   |
| V(vol)         | 0 | 0.12 | 0.34 | 0.59 | 0.7  | 1.2  | 1.4  | 1.47 | 1.5 | 1.5 |
| I(mA)          | 7 | 7    | 7    | 6.6  | 6.5  | 5.4  | 4.2  | 3.4  | 2.8 | 2.4 |
| P(VxI)         | 0 | 0.84 | 2.38 | 3.89 | 4.55 | 6.48 | 5.88 | 4.99 | 4.2 | 3.6 |

|                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |          |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| R(k $\Omega$ ) | 7    | 8    | 9    | 10   | 13   | 15   | 18   | 23   | 43   | $\infty$ |
| V(vol)         | 1.51 | 1.51 | 1.52 | 1.52 | 1.53 | 1.53 | 1.54 | 1.54 | 1.54 | 1.54     |
| I(mA)          | 2    | 1.8  | 1.6  | 1.4  | 1.2  | 1    | 0.8  | 0.65 | 0.35 | 0        |
| P(VxI)         | 3.02 | 2.71 | 2.43 | 2.12 | 1.83 | 1.53 | 1.23 | 1.00 | 0.53 | 0.00     |

# ANNEXE

---

## Pour 60cm:

|                |   |      |       |       |       |      |      |      |      |
|----------------|---|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| R(k $\Omega$ ) | 0 | 0.1  | 0.4   | 0.8   | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    |
| V(vol)         | 0 | 0.84 | 1.5   | 1.55  | 1.58  | 1.63 | 1.65 | 1.68 | 1.68 |
| I(mA)          | 9 | 8.8  | 7.5   | 7.2   | 6.5   | 5.8  | 5    | 4.3  | 3.5  |
| P(VxI)         | 0 | 7.39 | 11.25 | 11.16 | 10.27 | 9.45 | 8.25 | 7.22 | 5.88 |

|                |      |      |     |      |      |      |     |      |      |      |          |
|----------------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|----------|
| R(k $\Omega$ ) | 6    | 7    | 8   | 9    | 10   | 13   | 15  | 18   | 23   | 43   | $\infty$ |
| V(vol)         | 1.69 | 1.69 | 1.7 | 1.7  | 1.7  | 1.7  | 1.7 | 1.7  | 1.7  | 1.7  | 1.7      |
| I(mA)          | 2.6  | 2.2  | 2   | 1.8  | 1.6  | 1.3  | 1   | 0.9  | 0.7  | 0.4  | 0        |
| P(VxI)         | 4.39 | 3.71 | 3.4 | 3.06 | 2.72 | 2.21 | 1.7 | 1.53 | 1.19 | 0.68 | 0        |

## Manipulation 2:

### Pour une cellule:

|                |      |     |      |       |       |      |      |      |     |      |          |
|----------------|------|-----|------|-------|-------|------|------|------|-----|------|----------|
| R(k $\Omega$ ) | 0    | 0.1 | 0.3  | 0.5   | 0.9   | 1.2  | 3    | 4    | 5   | 8    | $\infty$ |
| V(volt)        | 0    | 0.2 | 0.23 | 0.245 | 0.255 | 0.27 | 0.28 | 0.3  | 0.3 | 0.31 | 0.32     |
| I(mA)          | 2.05 | 2   | 1.9  | 1.82  | 1.75  | 1.65 | 1.55 | 1.35 | 1.3 | 1    | 0        |

### Pour deux cellules en séries:

|                |      |      |      |      |     |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| R(k $\Omega$ ) | 0    | 0.1  | 0.3  | 0.5  | 0.8 | 1.2  | 1.4  | 1.7  |
| V(volt)        | 0    | 0.2  | 0.4  | 0.45 | 0.5 | 0.52 | 0.53 | 0.54 |
| I(mA)          | 2.05 | 2.01 | 1.95 | 1.92 | 1.9 | 1.88 | 1.86 | 1.85 |

|                |      |      |      |      |      |      |     |          |
|----------------|------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| R(k $\Omega$ ) | 1.9  | 2    | 3    | 5    | 6    | 7    | 8   | $\infty$ |
| V(volt)        | 0.55 | 0.57 | 0.58 | 0.6  | 0.62 | 0.66 | 0.7 | 0.72     |
| I(mA)          | 1.83 | 1.8  | 1.78 | 1.75 | 1.7  | 1.55 | 1.3 | 0        |

# ANNEXE

---

## **Pour deux cellules en parallèles:**

|                |     |      |     |      |      |      |      |      |      |      |          |
|----------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| R(k $\Omega$ ) | 0   | 0.1  | 0.3 | 0.5  | 0.9  | 1.2  | 3    | 4    | 5    | 8    | $\infty$ |
| V(volt)        | 0   | 0.1  | 0.2 | 0.23 | 0.25 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.31 | 0.32     |
| I(mA)          | 4.1 | 4.05 | 4   | 3.95 | 3.9  | 3.85 | 3.7  | 3.5  | 3.2  | 2.5  | 0        |

## **Pour groupement mixte des cellules solaire (huit cellules):**

|                |     |     |      |      |     |      |      |      |      |      |          |
|----------------|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|----------|
| R(k $\Omega$ ) | 0   | 0.1 | 0.3  | 0.5  | 0.9 | 1.2  | 3    | 4    | 5    | 8    | $\infty$ |
| V(volt)        | 0   | 0.6 | 1.45 | 1.52 | 1.6 | 1.63 | 1.64 | 1.65 | 1.65 | 1.65 | 1.65     |
| I(mA)          | 6.6 | 6.2 | 5.6  | 5.4  | 4.5 | 1.5  | 0.82 | 0.55 | 0.45 | 0.34 | 0        |