

## II.1-Introduction

L'utilisation des cellules solaires comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Cependant, les coûts élevés de l'expérimentation justifient l'utilisation de la simulation qui constitue une bonne perspective. Dans ce chapitre, nous présentons le modèle électrique utilisé pour notre étude, ainsi que l'outil de simulation (simulink Matlab).

## II.2-Modélisation d'une cellule photovoltaïque

### II.2.1- Cellule photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure(II.1) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

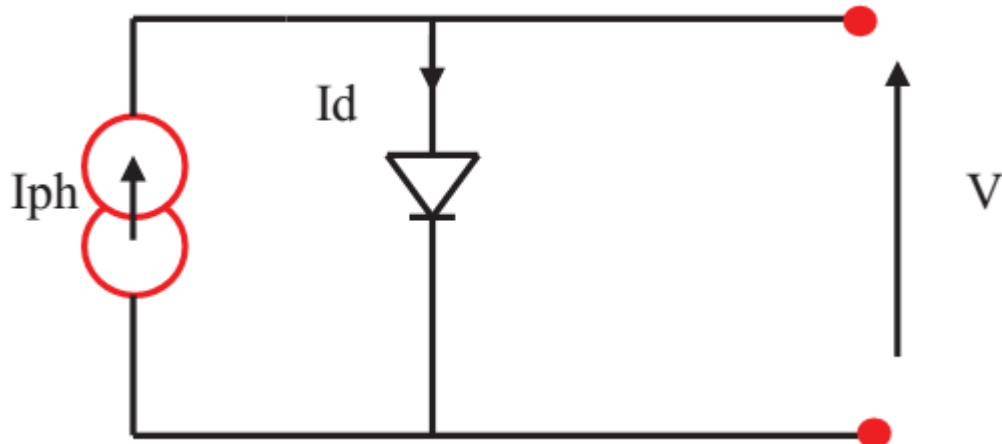


Figure (II.1) : Modèle de la cellule Photovoltaïque idéal [15].

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :  $V = V_d$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec:

$I_0$ : Le courant de saturation inverse de la diode.

$V_d$ : la tension au borne de diode

$V_t = KT/q$  potentielle thermique Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

### II.2.2- Cellule photovoltaïque réel

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_{sh}$ .

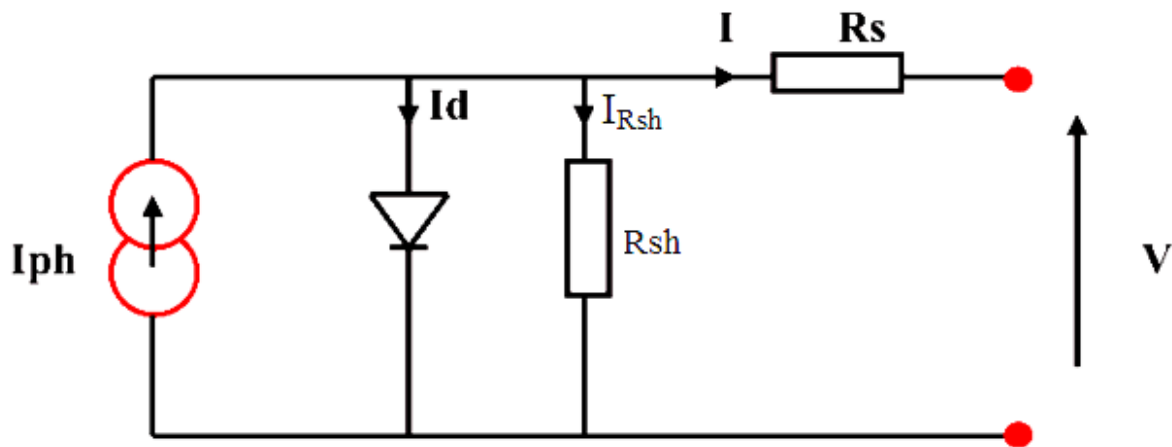


Figure (II-2) : Modèle de la cellule photovoltaïque réel [15].

Donc on a:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (\text{II.4})$$

$$I_{Rsh} = \frac{V + R_s I}{V_t} \quad (\text{II.5})$$

$$I_d = I_0 \left( \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

Avec:

$I$ : Le courant fourni par la cellule

$$I_{ph} = I_{sc} \left( \frac{G}{1000} \right): \text{Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).} \quad (II.7)$$

$I_0$ : Le courant de saturation de la diode.

$K$ : constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  joule/Kelvin).

$q$ : charge d'électron  $= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ .

$n$ : Le facteur de qualité de diode.

$T$ : La température de cellule en kelvin.

Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{V_t} \quad (II.8)$$

Les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication.  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_{sh}$  caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction.

### II.3-Regroupement des cellules

#### a) Regroupement en série

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série permet d'augmenter la tension du module photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules.

$$V_{coNS} = N_s \cdot V_{co} \quad \text{et} \quad I_{ccNP} = I_{cc} \quad (II.9)$$

$V_{coNS}$ : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{ccNP}$ : courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

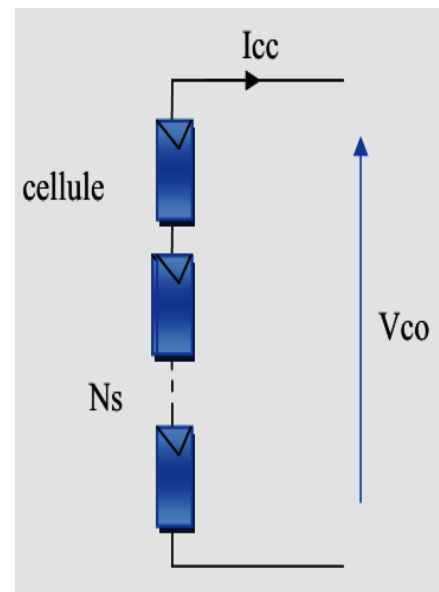
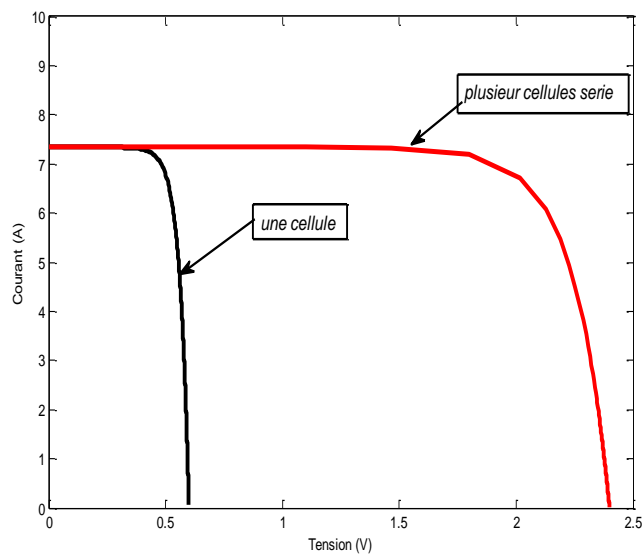


Figure (II.3) : Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série [22].

### b) Regroupement en parallèle :

Une association parallèle de (NP) cellule est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

Avec :

$$I_{ccNP} = NP \cdot I_{cc} \quad (II.10)$$

Et :  $V_{co} = V_{coNP}$

$I_{ccNP}$ : la somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle

$V_{coNP}$ : tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle

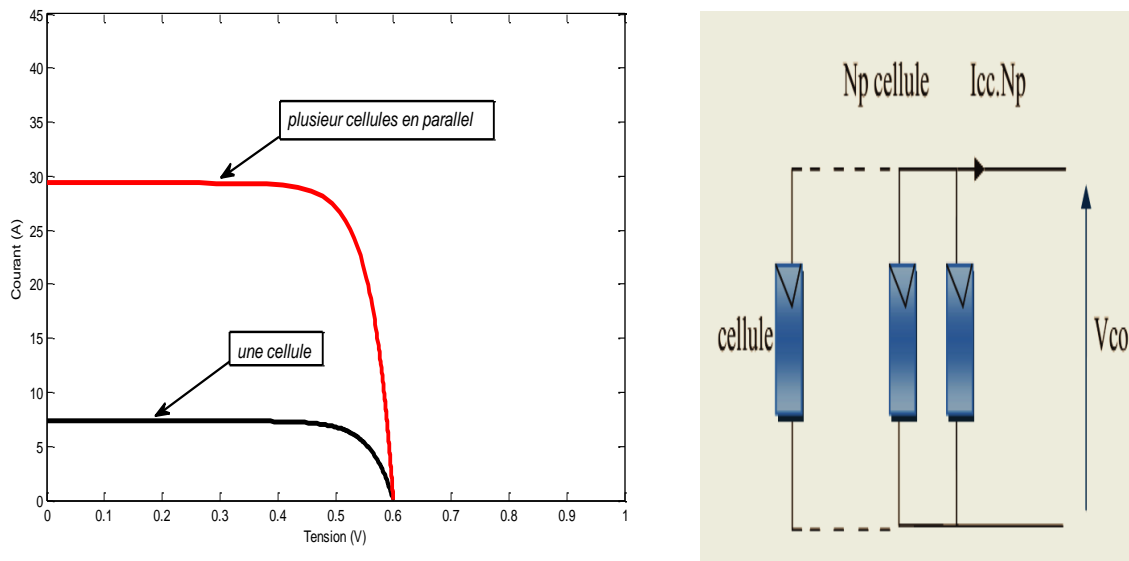


Figure (II.4) : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle [22].

### c) Regroupement série - parallèle

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

## II.4-Modélisation d'un module photovoltaïque

Dans la pratique, les cellules solaire sont associées électriquement en différentes combinaisons (série, parallèle, série -parallèle) qui permettent d'obtenir des valeurs de courant et de tension nécessaires pour une application déterminée. L'ensemble des cellules, connexion, protection, support .....etc. constitue ce que l'on appelle Le module Photovoltaïque.

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire peut s'exprimer par l'équation usuelle suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.11})$$

$I_{ph}$ : le courant photo-généré.

$I_0$  : le courant d'obscurité.

$R_s$  : la résistance série.

$R_{sh}$  : la résistance shunt

$$V_t = \frac{mKT}{q} \quad (\text{pour } m=1, V_t(300K) = 25mV) \quad (II.12)$$

Le schéma du circuit équivalent correspondent a l'équation

$$I = I_{ph} - I_0 - I_{Rsh} \quad (II.13)$$

**a)Caractéristique d'un module PV :**

$$I_{MO} = I N_P \quad (II.14)$$

$$V_{MO} = V N_S \quad (II.15)$$

$I_{MO}$ : le courant de module.

$V_{MO}$ : la tension de module.

$N_S$ : nombre des cellules associe série.

$N_P$ : nombre des cellules associe parallèles.

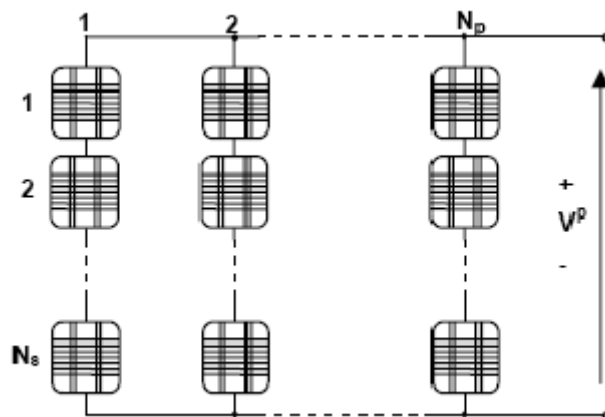


Figure (II.5) : Représentation d'un module photovoltaïque [22].

A partir les équations (II-11) (II-14) (II-15) on a :

$$I = (I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V_{MO}/N_s + I.R_s/N_p}{V_t}\right) - 1 \right) - \left( \frac{V_{MO}/N_s + I.R_s/N_p}{R_{sh}} \right) - N_p) \quad (II.16)$$

### b. Expression utile

$$I = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) \quad (II.17)$$

En circuit-ouvert:

$$V_{OC} = V_t \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0}\right) \quad (II.18)$$

Et :

$$I_0 = \exp\left(\frac{V_{OC}}{V_t}\right) \quad (II.19)$$

Remplacent (II-19) dans (II-17) :

$$I = I_{SC} \exp\left(\frac{V - V_{OC} + R_s I}{V_t}\right) \quad (II.20)$$

A partir l'équation (II.20) le détermination des paramètres nécessaire :

$$I_{SCMO} = I_{SC} N_P \quad (II.21)$$

$$V_{OCMO} = V_{OC} N_S \quad (II.22)$$

$$R_{SMO} = R_s N_S / N_P \quad (II.23)$$

Donc:

$$I_{MO} = I_{SCG} \left( 1 - \exp\left(\frac{V_{MO} - V_{OCG} + R_{SMO} I}{N_S V_t}\right) \right) \quad (II.24)$$

**c. Détermination de la puissance**

La puissance produite par une cellule solaire a un point de fonctionnement s'écrit :

$$P = V.I \quad (\text{II.25})$$

Pour le calcul de PPM en remplaçant (II.20) dans (II.25) :

$$P = V[I_{SC} - (1 - \exp(\frac{V - V_{oc} + R_s.I}{V_t}))] \quad (\text{II.26})$$

**d. Rendement énergétique**

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule  $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$  et la puissance solaire incidente. Il est donné par [15]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max}.V_{max}}{P_{inc}} \quad (\text{II.27})$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

**e. Facteur de forme**

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$  il est défini par [15]:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}.V_{oc}} = \frac{I_{opt}.V_{opt}}{I_{cc}.V_{oc}} \quad (\text{II.28})$$



## II.5- Pertes fondamentales

### II.5.1 -Pertes par photons de grande longueur d'onde

Si chaque photon incident permettait d'injecter un électron dans le circuit électrique, les dispositifs photovoltaïques seraient très efficaces.

La première limitation vient de la longueur d'onde du rayonnement incident, qui doit être assez faible. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap",  $E_g$ . Ainsi, avec un gap de 1.14 eV, le silicium monocristallin n'absorbe que les photons de longueur d'onde inférieure à 1100 nm [23].

Tous les photons de longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne pourront pas générer de paire électron/trou donc seront perdus.

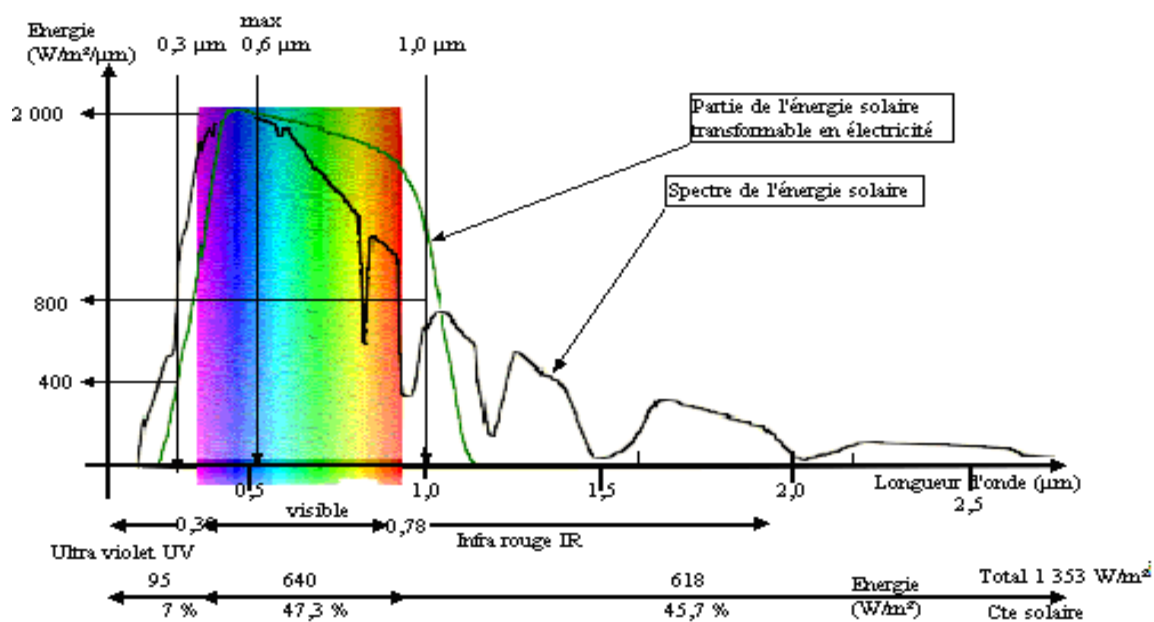


Figure (II-6) : Réponse spectrale d'une cellule PV au silicium comparée au rayonnement solaire [24].

Si nous définissons le flux monochromatique  $N_0(\lambda)$  comme le nombre de photons incident par unité de surface

Pour une source poly chromatique sera l'intégrale [25]:

$$N_t = \int_0^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda \quad (\text{II.29})$$

Le nombre de photons qui ont une énergie supérieur à  $E_g$  ou bien le nombre de photons absorbés est donné par la formule suivante [25]:

$$N_a = \int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda) d\lambda \quad (\text{II.30})$$

Est le nombre de photons perdus ou le nombre de photons ayant une énergie inférieure à  $E_g$  est :

$$N_p = N_t - N_a = N_t - \int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_c}^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda \quad (\text{II.31})$$

$$N_p = \int_{\lambda_c}^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda \quad (\text{II.32})$$

Donc le taux de pertes par photons de grande longueur d'onde du spectre solaire est donné par la relation suivant [25]:

$$\tau_p = \int_{\lambda_c}^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda \quad (\text{II.33})$$

### II.5.2- Pertes par énergie excédentaire des photons

Un photon génère seulement une paire électron-trou .le reste de l'énergie supérieure à la largeur de bande interdite .est principalement dissipé en chaleur.

La puissance optique absorbée par la cellule est transformée d'une part en énergie électrique, d'autre part en énergie thermique .si on néglige les phénomènes de recombinaison, l'énergie thermique résulte uniquement de la thermalisation des porteurs c'est-à-dire de l'énergie excédentaire de chaque photon par rapport au gap du matériau.

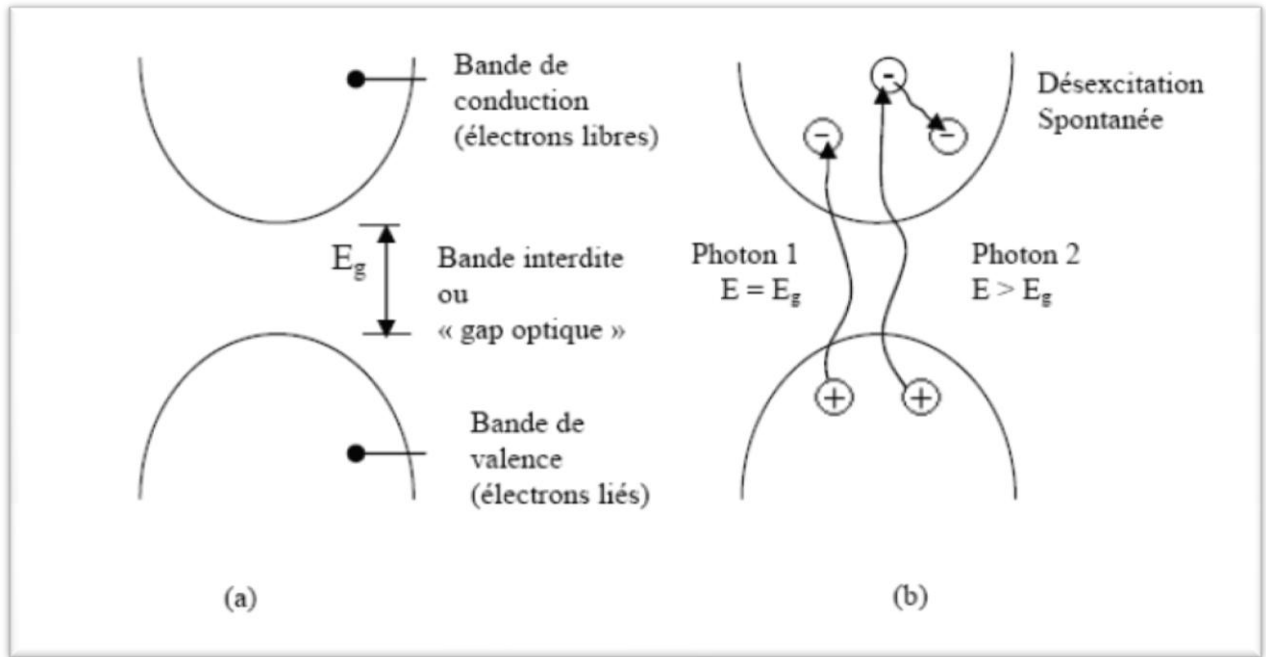


Figure (II-7) : Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur

a)- Dans l'obscurité. b)- Sous illumination [14].

La puissance perdue par énergie excédentaire des photons est donnée par [25]:

$$P_{th} = \int_0^{\lambda_c} (E - E_g) N_0(\lambda) d\lambda \quad (II-34)$$

$$P_{th} = \int_0^{\lambda_c} E \cdot N_0(\lambda) d\lambda - E_g \int_0^{\lambda_c} E \cdot N_0(\lambda) d\lambda \quad (II-35)$$

Le taux des pertes par énergie excédentaire des photons est donné par [25]:

$$\tau_p = \frac{\int_0^{\lambda_c} (E - E_g) N_0(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda} \quad (II-36)$$

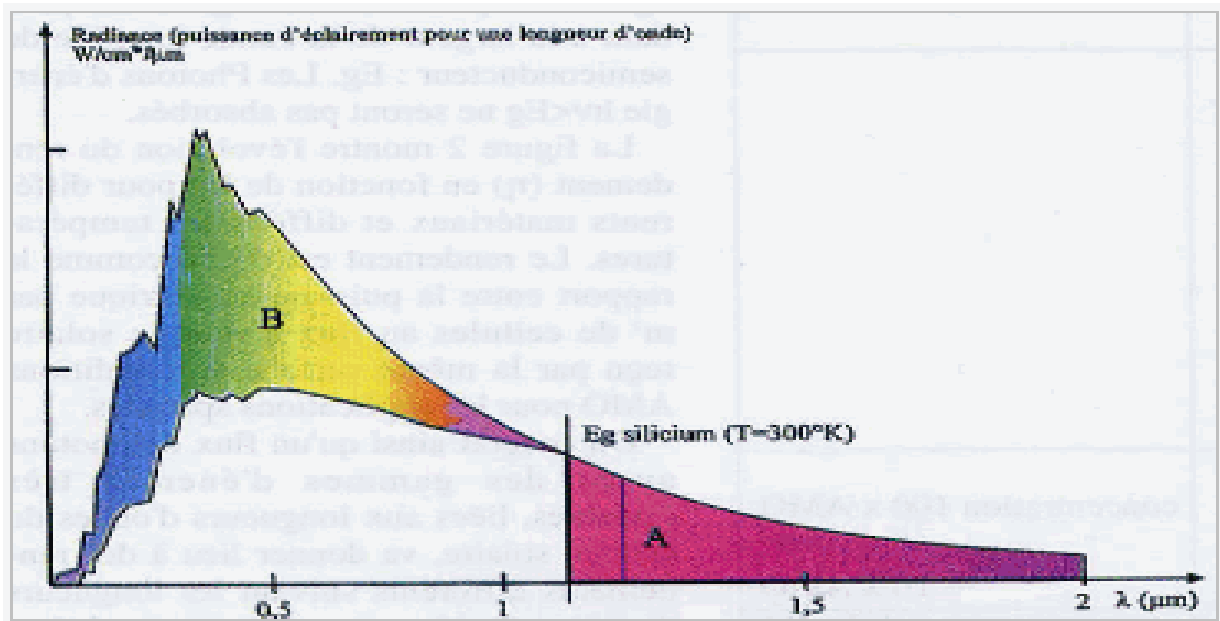


Figure (II-8) : L'exploitation du spectre solaire hors atmosphère

par une photopile au silicium [8].

Ce schéma montre l'exploitation du spectre solaire hors atmosphère par une photopile au silicium. La zone A correspond à l'énergie perdue par les photons non absorbés (environ 23,5 %). La zone B correspond à l'excès d'énergie, non utilisée, par les photons d'énergie supérieure à  $E_g$  (environ 33 %) [8].

### II.5.3- Facteur de tension

La tension maximale aux bornes de la cellule ( $V_0$ ) ne pourra pas dépasser la tension de gap  $E_g/q$ . De plus, en raison des recombinaisons Auger,  $V_0$  ne pourra dépasser 0,65 V pour le silicium, sauf dans le cas de cellules très minces ( $V_0=0,72$  V pour une cellule de 20  $\mu\text{m}$ ) [26]. On définit un facteur de tension [27]:

$$\eta_v = q \cdot \frac{V_{oc}}{E_g} \quad (\text{II-37})$$

Pour une cellule au Si, le facteur de tension introduit une perte de 40% [25].

## II.6-Pertes technologiques

### II.6.1-Réflexion

Le phénomène de la réflexion est l'un des problèmes qui impose la meilleure conversion d'énergie. Ces pertes affectent principalement le courant de court circuit de la pile solaire. Généralement, la lumière se perd en deux formes, soit par réflexion, soit par transmission. Dans une structure photovoltaïque les trois niveaux suivants de la réflexion sont responsables des pertes optiques [14]:

- 1) Réflexion par les contacts ohmiques.
- 2) Réflexion par la surface avant du semi-conducteur.
- 3) Réflexion par la couche arrière (BSR).

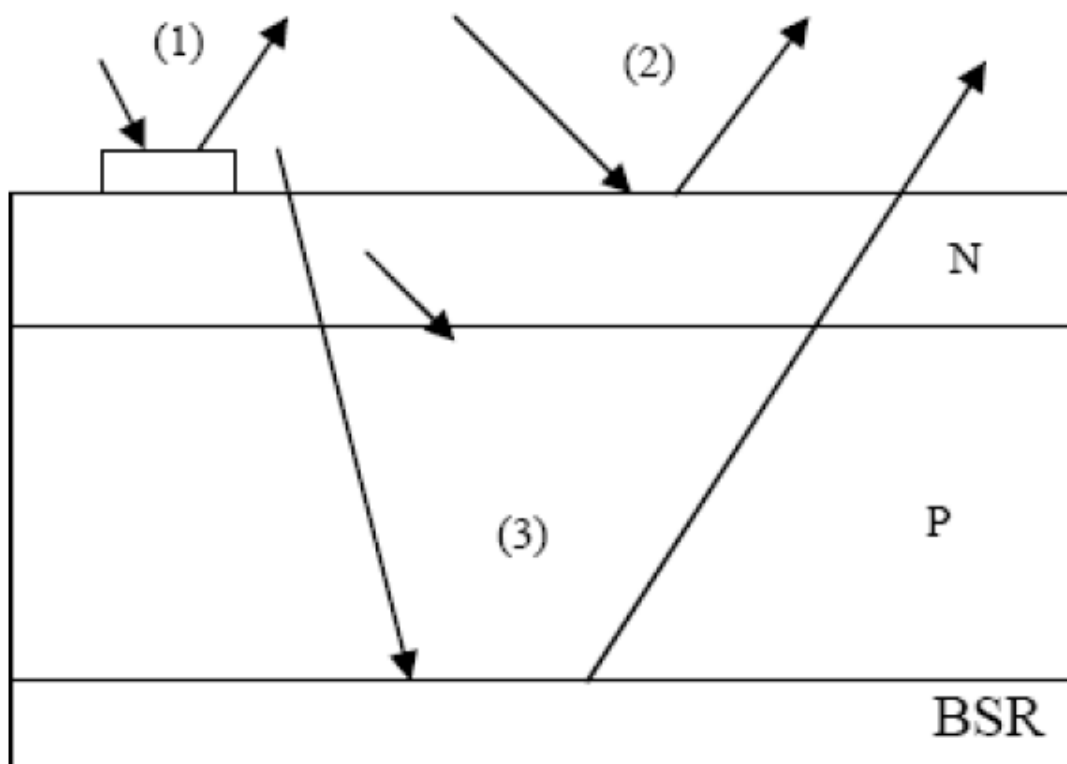


Figure (II-9) : les trois niveaux de la réflexion [14].

Quant à la réflexion, elle dépend avant tout des indices de réflexion des matériaux traversés. Plus la différence d'indice est élevée de part et d'autre d'une surface plus elle est réfléchissante.

Le taux de réflexion s'écrit [28]:  $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$  (II-38)

Donc du silicium brut ( $n=3.75$  à  $\lambda=0.6\mu\text{m}$ ) en contact avec l'air ( $n=1$ ) réfléchit 33% de la lumière qu'il reçoit. Il n'est pas envisageable de perdre un tiers du flux lumineux juste pour cette raison [29]:

Si  $I$  est l'intensité du rayonnement,  $h\nu$  l'énergie des photons, le flux de photons est donné par :

$$\phi_0 = \frac{I \left( \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right)}{h\nu (\text{J})} \quad (\text{II-39})$$

Soit en exprimant la longueur d'onde en micromètre [30].

$$\phi_0 = \frac{I \left( \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right) \cdot \lambda (\mu\text{m})}{1.24 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} \quad (\text{II-40})$$

Le flux de photons pénétrant dans la cellule est :

$$\phi_0 \cdot (1-R) \quad (\text{II-41})$$

Où  $R$  est le coefficient de réflexion, pour le silicium  $R=0.302$  à  $25^\circ\text{C}$  [31].

$$\phi_0 \cdot (1-R) = 0.698 \phi_0 \quad (\text{II-42})$$

La perte est donnée par :

$$\tau = \phi_0 - 0.698 \phi_0 = 0.302 \phi_0 \quad (\text{II-43})$$

Pour le Si sans traitement anti-réfléchissant cette perte est estimée à 30%.

### II.6.2-Absorption partielle due à l'épaisseur limitée de la cellule

Une partie des photons traversent la cellule sans créer de paire électron-trou. Donc ils seront perdus .La transmission de la lumière est inexistante pour les cellules au silicium cristallin car elles sont suffisamment épaisses.

Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie subit une loi exponentielle décroissante, car la part qui reste à absorber diminue au fur et à mesure que l'on pénètre dans la matière. Si  $E_{inc}$  est l'énergie incidente, l'énergie restante à la profondeur  $d$  s'écrit [14] :

$$E = E_{inc} \exp(-\alpha d) \quad (II-44)$$

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incident .il s'exprime en  $cm^{-1}$  , avec l'épaisseur  $d$  exprime en cm ,pour le Silicium cristallin( $\alpha=4.5 \cdot 10^3 cm^{-1}$  a la longueur d'onde  $\lambda=0.59\mu m$ )

Les pertes dues à Absorption partielle due à l'épaisseur de la cellule est donnée par [14]:

$$P_X = E_{inc} - E_X \quad (II-45)$$

$$P_X = E_{inc} - E_{inc} \exp(-\alpha d) \quad (II-46)$$

$$P_X = E_{inc} (1 - \exp(-\alpha d)) \quad (II-47)$$

Et le taux de perte est [22]:

$$\tau_X = \frac{E_{inc}(1 - \exp(-\alpha d))}{E_{inc}} = 1 - \exp(-\alpha d) \quad (II-48)$$

L'épaisseur de silicium nécessaire pour absorber 90% du spectre solaire doit être de  $100 \mu m$  [32].

**II.7-Paramètres de simulation**

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Eclairement	$G=1000\text{ W/m}^2$	Resistance parallèle	$R_{sh}=1000\ \Omega$	Coefficient de réfraction	$R=0.3$
Température ambiante	$T=298\text{ K}$	Longueur d'onde	$\lambda=0.58\ \mu\text{m}$	Coefficient d'absorption	$\alpha=2,78\text{ cm}^{-1}$
Resistance série	$R_s=0.6\ \Omega$	Facteur d'idéalité	$n=1$	Surface de cellule	$S=10\text{ cm}^2$
Constante de Planck	$h=6,626 \cdot 10^{-34}\text{ (Js)}$	Constante de Boltzmann	$K=1,38 \cdot 10^{-23}\text{ (J/K)}$	Epaisseur de cellule	$x=100\ \mu\text{m}$
Energie de gap	$E_g=1.12\text{ (eV)}$	Vitesse de lumière	$C=3 \cdot 10^8$	Courant de court circuit	$I_{sc}=3.45\text{ A}$
Tension de circuit ouvert	$V_{co}=0.6\text{ V}$				

Tableau (II.1) : paramètres de simulation



## II.8-Logiciel de simulation

Simulink est un environnement de simulation multi domaine et de conception par modélisation destiné aux systèmes dynamiques et embarqués. Il fournit un environnement graphique interactif et un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs qui nous permettrons de concevoir, simuler, mettre en oeuvre et tester différents systèmes in stationnaires (en particulier dans le domaine des communications, des contrôles, du traitement des signaux, du traitement vidéo et du traitement de l'image).

Des produits complémentaires enrichissent le logiciel Simulink pour l'étendre à plusieurs domaines de modélisation, ainsi que pour fournir les outils nécessaires aux tâches de conception, de mise en oeuvre, de vérification et de validation. Simulink est intégré dans MATLAB, ce qui assure un accès immédiat à une gamme complète d'outils qui nous permettrons de développer des algorithmes, d'analyser et de visualiser les simulations, de créer des scripts de traitement par lots, de personnaliser l'environnement de modélisation et de définir les données des signaux, des paramètres et des tests.

## II.9-Simulation d'une cellule PV sous Simulink

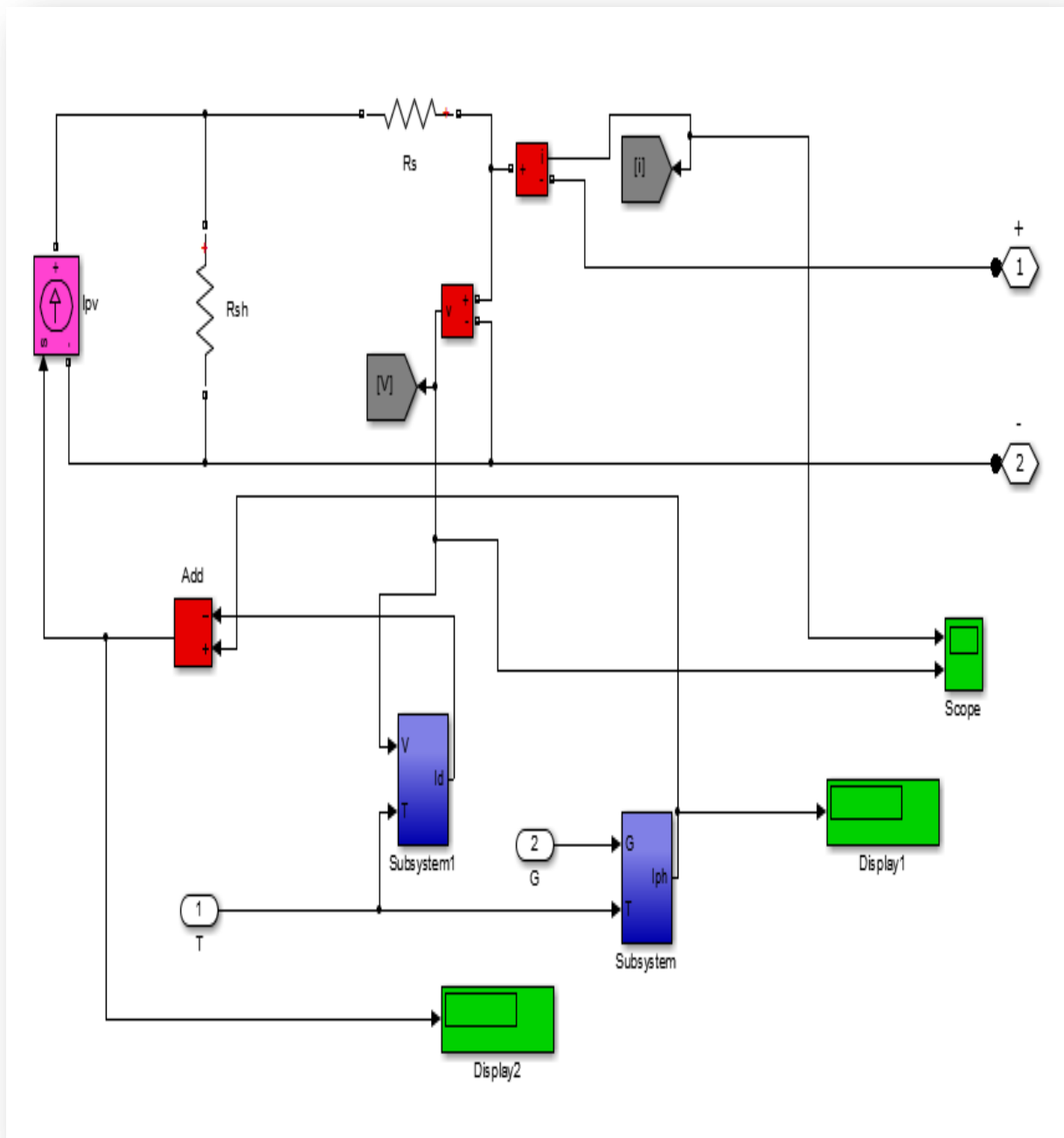


Figure (II.10) : Modèle d'une cellule sous Simulink

## II.10-Simulation d'un module PV sous Simulink

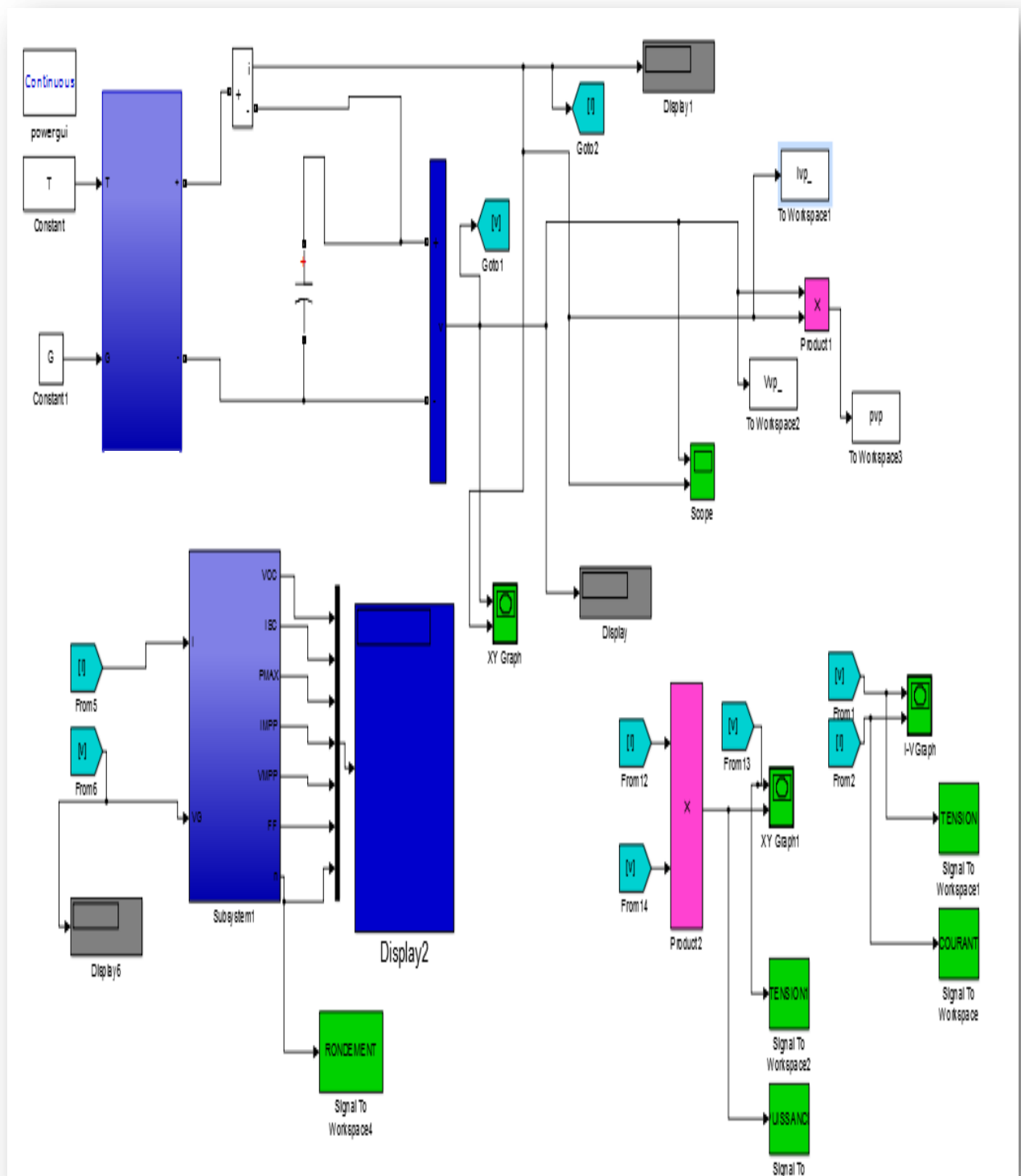


Figure (II.11) : Modélisation des paramètres caractéristiques d'un module PV sous Simulink

**II.9-Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle électrique à une seule diode dont le but est de pouvoir tracer les caractéristiques et l'effet des pertes sur le rendement d'un module photovoltaïque. Ces tracés seront présentés dans le chapitre suivant.