## Chapitre 3. Physique de la cellule solaire photovoltaïque

### I. Matériaux semi-conducteurs à l'équilibre thermodynamique

A l'équilibre thermodynamique, la densité des porteurs libres d'un semi-conducteur dopé par $N_D$ atomes donneurs (supposés tous ionisés) est déterminée par 2 lois fondamentales:

- la loi d'action de masse: Le produit *n.p* des concentrations des électrons et des trous dans un SC quelconque (intrinsèque ou extrinsèque) à l'équilibre est indépendant des concentrations $N_D$ et $N_A$. Il ne dépend que de la température. Ainsi $n.p = n_i^2 = f(T)$

Pour le silicium, la loi de variation $n_i(T)$ est donnée par la formule pratique suivante:

$$n_i(T) = 3{,}8T^{3/2}\exp(-7000/T)$$

- la neutralité électrique de l'échantillon (la somme algébrique des charges est nulle):

$-q.n+q.p+q.N_D=0$

| | | |
|---|---|---|
| $n_n = N_D$ | Porteurs **majoritaires** | $(cm^{-3})$ |
| $p_n = n_i^2/N_D$ | Porteurs **minoritaires** | $(cm^{-3})$ |

Plus un semi-conducteur est dopé N, plus la différence entre la densité des porteurs majoritaires négatifs et la densité des porteurs minoritaires positifs (trous) est importante. La densité des porteurs négatifs est constante et égale à la densité des atomes d'impuretés. Ce mode de fonctionnement est appelé "régime d'épuisement des donneurs.

$-q.n + q.p - q.N_A = 0$

| | | |
|---|---|---|
| $p_p = N_A$ | Porteurs majoritaires | $(cm^{-3})$ |
| $n_p = n_i^2/N_A$ | Porteurs minoritaires | $(cm^{-3})$ |

Plus un semi-conducteur est dopé P, plus la différence entre la densité des porteurs majoritaires positifs (trous) et la densité des porteurs minoritaires négatifs est importante .

- La densité des trous est constante et égale à la densité des atomes d'impuretés .
- Ce mode de fonctionnement est appelé "régime d'épuisement des accepteurs."

De manière générale on écrit:

$$\rho = q \times (p + N_D - n - N_A) = 0$$

ρ désignant la densité de charge électrique et q la charge de l'électron. Par suite on peut écrire:

$$p + N_D - n - N_A = 0, \text{ soit } n - p = N_D \cdot$$

## II. Semi-conducteurs hors équilibre

Dans les situations hors d'équilibre, il est intéressant de décomposer les concentrations en deux termes : les concentrations d'équilibre désignées par $n_0$ et $p_0$, les écarts par rapport à cet équilibre notés $\Delta n$ et $\Delta p$. Nous écrirons ainsi les concentrations sous la forme générale suivante:

$$n = n_0 + \Delta n$$
$$p = p_0 + \Delta p$$

### II.1. Condition de quasi-neutralité électrique:

Hors d'équilibre, la densité de charge devient:

$$\rho = q \times (p_0 + \Delta p + N_D - n_0 - \Delta n - N_A)$$

Qu'on peut transformer ainsi:

$$\rho = q \times, (p_0 + N_D - n_0 - N_A) + q \times (\Delta p - \Delta n)$$

Le premier terme, qui correspond à la situation d'équilibre, est nul. Quant au second, si les concentrations en excès $\Delta p$ et $\Delta n$ sont telles que : $\Delta p \approx \Delta n$, on peut continuer à supposer $\rho = 0$.
Cette condition, désignée sous le nom de condition de quasi-neutralité électrique, est toujours vérifiée.

### II.2. Conséquence sur la loi d'action de masse

Si la condition de neutralité électrique est préservée pour un SC hors d'équilibre, il n'en est plus de même pour la loi d'action de masse. En effet, si la concentration en électrons croît ou décroît, la concentration en trous doit croître (respectivement décroître) de la même valeur pour satisfaire à la condition de quasi-neutralité électrique. Par suite, le produit np varie par rapport à sa valeur à l'équilibre : il augmente ou diminue selon le signe de $\Delta n$ ou $\Delta p$.
La valeur de la différence $n.p - n_i^2$ traduit donc l'écart par rapport à cet équilibre.

### II.3. Génération-recombinaison

Un semi-conducteur ne peut rester indéfiniment en état de déséquilibre. Un ensemble de processus connus sous le nom de processus de génération-recombinaison vont donc prendre naissance pour ramener ce semi-conducteur à l'équilibre. Ainsi, un semi-conducteur qui présente un déficit important de porteurs par rapport à son état d'équilibre, va créer des porteurs en grand nombre, alors qu'un semi-conducteur qui présente au contraire des porteurs en excès va tout faire pour les faire disparaître. Ces processus, qui concernent les électrons et les trous, sont modélisés au niveau macroscopique par:

- un taux de génération G qui traduit le nombre de porteurs crée par unité de volume et de temps ,

•	un taux de recombinaison R qui traduit le nombre de porteurs disparaissant dans les mêmes conditions.

On utilise parfois un taux global de génération recombinaison U = G − R.

Les processus de génération au sein d'un semi-conducteur sont multiples. Ils peuvent résulter:

- d'une injection via le mécanisme de diffusion
- d'une excitation optique
- du mécanisme d'ionisation par impact

**II.4. Durée de vie des porteurs et longueur de diffusion**

Des transitions d'un état à l'autre se produisent sans cesse même s'il y a un équilibre thermodynamique dans un semi-conducteur, cet équilibre traduit le résultat global de générations et recombinaisons dans les différentes bandes d'énergie.

À l'équilibre, il y a autant de création que de disparitions de porteurs. Si, localement, pour une raison quelconque (éclairement, bombardement ionisant...) le nombre de disparitions va s'écarter du nombre de créations, un retour à l'équilibre s'effectue selon une loi exponentielle:

$$n - n_0 = (n - n_0)_{t=t_0} . e^{-t/\tau_n}$$

$\tau_n$ est la durée de vie des électrons dans le cristal. C'est le temps moyen d'existence d'un électron en excès. Cette durée de vie dépend des impuretés, des défauts cristallins...

Ordre de grandeur: $10^{-9}$ s < $\tau_n$ < $10^{-3}$ s

La concentration des porteurs le long de l'axe de diffusion évolue exponentiellement

$$n - n_0 = (n_{x=0} - n_0) e^{-x/L_n} \quad \text{et} \quad p - p_0 = (p_{x=0} - p_0) e^{-x/L_p}$$

avec $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ et $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

$L_n$ et $L_P$ sont la longueur de diffusion des électrons et celle des trous. Un champ électrique superposé augmenterait ou diminuerait ces longueurs de diffusion, selon qu'il accélérerait ou freinerait les porteurs.

**II.5. Phénomènes de transport**

Dans un semi-conducteur un courant électrique est favorisé par deux types de porteurs: les électrons et les trous.

**a) Courants de dérive-Conductivité**

Les porteurs ont une vitesse thermique moyenne, orientée dans toutes les directions de l'espace qui est légèrement modifiée en imposant une direction statistique préférentielle par la présence du champ électrique. La densité de courant d'électrons s'exprime de façon la plus simple par :

$$\vec{j}_n = (-q).n.\vec{v}_n$$

$\vec{v}_n$, vitesse moyenne des électrons,
$\vec{j}_n$, densité de courant exprimée en général en Ampères par $cm^2$.

Pour les faibles champs électriques, on peut écrire:

$$|\vec{v}| = \mu_n.|\vec{E}|$$

$\mu_n$ est la mobilité des électrons. Ainsi:

$$\boxed{\vec{j}_n = qn\mu_n.\vec{E}}$$

De façon tout à fait analogue, il est possible de définir la densité de courant de trous :

$$\boxed{\vec{j}_p = qp\mu_p.\vec{E}}$$

$\mu_P$ est la mobilité des trous.

Ces deux densités de courant sont en fait des courants de dérive dans le champ électrique. La densité de courant totale est donc la somme des deux densités de courant.

$$\vec{j}_{dér} = \vec{j}_n + \vec{j}_p$$

$$\vec{j}_{dér} = qn\mu_n\vec{E} + qp\mu_p\vec{E}$$

$$\boxed{\vec{j}_{dér} = \left(qn\mu_n + qp\mu_p\right)\vec{E} = \sigma\vec{E}}$$

Si on applique une tension V aux bornes de l'échantillon, on observe donc un courant qui correspond à une conductivité σ donnée par : $\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$

**b) Courant de diffusion**

En considérant macroscopiquement la diffusion des électrons et des trous, leur déplacement est équivalent à un courant. Nous pouvons ainsi exprimer les densités de courant des électrons et des trous en multipliant le flux des porteurs par la charge élémentaire, négative pour les électrons et positive pour les trous (F= - J/q).

Pour les électrons la densité de courant s'exprime par :

$$\boxed{j_n = +\ qD_n\ \frac{dn}{dx}}$$ (modèle unidimentionnel)

$D_n$ est le coefficient de diffusion des électrons.

Pour les trous la densité de courant s'exprime par :

$$\boxed{j_p = -\,qD_p\,\frac{dp}{dx}}$$ (modèle unidimentionnel)

$D_p$ est le coefficient de diffusion des trous.

**c) Densités de courant totales dans un semiconducteur (modèle unidimentionnel)**

$$\boxed{j_n = +\,qD_n\,\frac{dn}{dx} + qn\mu_n.E}$$

$$\boxed{j_p = -\,qD_p\,\frac{dp}{dx} + qp\mu_p.E}$$

$$\boxed{j = j_n + j_p}$$

**III. Equations de continuité**

Dans un semi-conducteur, hors équilibre thermodynamique, nous pouvons déterminer dans un modèle unidimensionnel, en un point, le taux de variation de la concentration des porteurs (électrons et trous) en fonction du temps. Dans l'élément de volume d'épaisseur dx, représenté figure III.1, si le flux entrant F(x) est supérieur au flux sortant F(x+dx), la concentration de porteurs augmente. De plus, dans cet élément de volume, il est possible de générer des paires de porteurs par des photons, de taux de génération $G_L$, ou d'en faire disparaître sur place par recombinaison, de taux R.

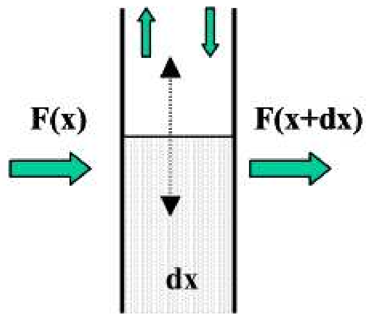


**Figure III.1**: Principe de variation de concentration dans un élément de volume décrivant l'équation de continuité.

Ainsi, l'expression générale de la variation de flux d'une espèce donnée est la suivante :

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{variation de concentration}} = -\underbrace{\left(\frac{dF}{dx}\right)}_{\text{variation de flux}} + \underbrace{G_L}_{\text{génération}} - \underbrace{R}_{\text{taux de recombinaison}}$$

Sachant que pour les électrons, $J_n = -qF_n$ et que pour les trous, $Jp = +qF_p$ , on en déduit les équations de continuité pour les électrons et pour les trous en remplaçant R par son expression en fonction de $\tau_n$ pour les électrons et $\tau_p$ pour les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = + \frac{1}{q}\left(\frac{dJ_n}{dx}\right) + G_L - \frac{n - n_{po}}{\tau_n}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{q}\left(\frac{dJ_p}{dx}\right) + G_L - \frac{p - p_{no}}{\tau p}$$

En remplaçant $J_n$ et $J_p$ par leurs expressions, nous obtenons :

*Equation de continuité pour les électrons*

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t} = + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x}(n\xi) + G_L - \frac{n - n_{po}}{\tau_n}}$$

*Equation de continuité pour les trous*

$$\boxed{\frac{\partial p}{\partial t} = + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial}{\partial x}(p\xi) + G_L - \frac{p - p_{no}}{\tau_p}}$$

**IV. Equation de Poisson**

Dans un semi-conducteur, l'équation de Poisson, issue des équations de Maxwell, reste valable. Nous nous limiterons au modèle unidimensionnel:

$$\boxed{\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_o}}$$

**concentration de charge en C/cm³**

**permittivité du semiconducteur en F/cm**

**Laplacien en V/cm²**

$\rho = q(p - n + N_D^{+} - N_A^{-})$