

CHAPITRE II :

DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIMALE DE LA BASE D'UNE PHOTOPILE À JONCTION VERTICALE SÉRIE

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, la détermination de l'épaisseur optimale de la base, conduisant à un courant de court-circuit important, d'une photopile à jonction verticale série sera proposée. Une représentation de la photopile au silicium monocristallin à jonction verticale série sous éclairage polychromatique sera donnée en premier lieu. La base de la photopile étant la région générant la plus grande partie du photocourant sera l'objet de notre étude car, elle est le siège de phénomènes de génération, de diffusion et de recombinaison des porteurs photogénérés. L'expression de la densité des porteurs minoritaires sera établie à partir de la résolution de l'équation de continuité. Ensuite, le profil de la densité de porteurs minoritaires en excès en fonction de l'épaisseur de la base, pour différents valeurs du nombre de soleil n et pour différentes vitesses de recombinaison à la jonction S_f , sera tracé. Après cela, l'expression de la densité de photocourant sera établie. Son profil, en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du nombre de soleil n , de l'épaisseur H de la base et du coefficient de diffusion, sera aussi étudié. Enfin, nous allons établir l'expression de la vitesse de recombinaison de la face arrière à partir du photocourant pour une grande valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f) correspondant au mode de fonctionnement de court-circuit de la photopile au silicium à jonction verticale série. Cela nous permettra, par la suite, de déterminer l'épaisseur optimale de la base par la méthode de l'intersection des courbes des vitesses de recombinaison à la face arrière des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du coefficient de diffusion. Et une corrélation mathématique entre cette épaisseur optimale et le coefficient de diffusion sera établie.

II.2. PRESENTATION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA PHOTOPILE A JONCTION VERTICALE SERIE

II.2.1. Présentation de la photopile

La photopile à jonction verticale est conçue de telle sorte que l'éclairage incident est parallèle au plan de la zone de charge d'espace (ZCE). La structure d'une photopile à jonction verticale série, de type n^+-p-p^+ , en régime statique, sous éclairage polychromatique, est représentée par la figure 1 :

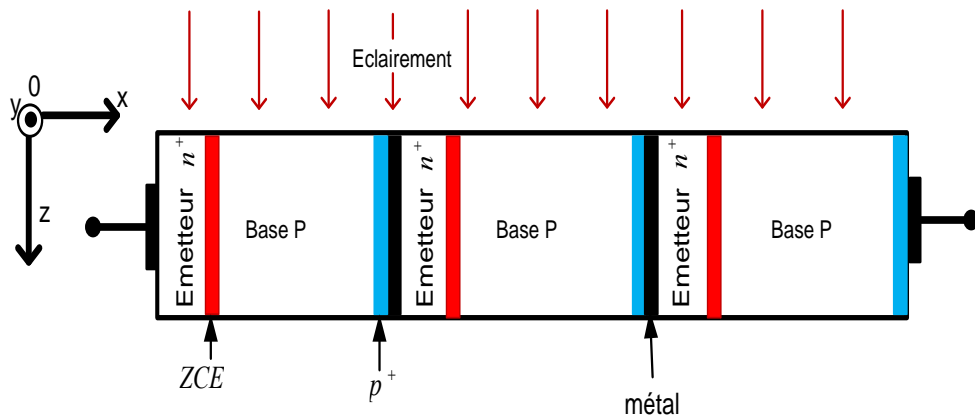


Figure1 : Schéma d'une photopile à jonction verticale série

La figure 2 représente le schéma d'une cellule de la photopile à jonction verticale série sous éclairement polychromatique:

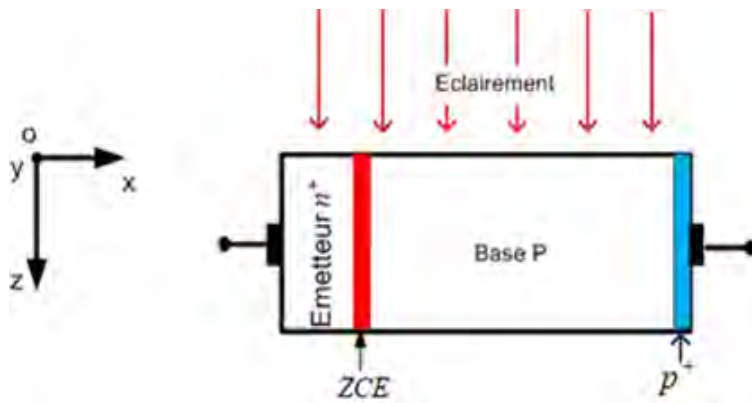


Figure2 : Schéma d'une cellule de la photopile à jonction verticale série

Une cellule, de la photopile à jonction verticale série, est composée principalement de :

➤ **L'émetteur de type n^+ :**

L'épaisseur est faible (0.5 à $1\mu\text{m}$), elle est fortement dopée en atomes donneurs (10^{17} à 10^{19} atomes par cm^3) et recouverte d'une grille métallique qui permet de collecter les charges électriques photocréées.

➤ **La base de type p :**

Cette partie est relativement peu dopée (10^{15} à 10^{17} atomes par cm^3) en atomes accepteurs. Mais son épaisseur est beaucoup plus importante que celle de l'émetteur. Etant de type p, cette partie de la structure présente un défaut d'électrons (porteurs minoritaires). L'étude caractéristique de la cellule portera essentiellement sur cette partie qui est la zone de prédominance des phénomènes d'absorption, de génération, de recombinaison et de diffusion.

➤ **La jonction émetteur-base (Zone de Charge d'Espace) :**

Entre les deux zones du semi-conducteur dopés différemment (émetteur de type n et la base de type p), il existe une jonction où règne un champ électrique très intense. Ce champ permet la séparation des paires électron-trou qui arrivent à la jonction.

Ainsi, un rayon lumineux, possédant une énergie suffisante, arrivant à la cellule, peut pénétrer dans la photopile et provoquer l'apparition d'une tension électrique autour de la jonction.

➤ **Le Back Surface Field (BSF), de type P^+ :**

C'est la zone située en face arrière de la base; elle est surdopée en atomes accepteurs (10^{17} à 10^{19} atomes par cm^3) par rapport à la base. Cela induit l'existence d'un champ électrique arrière permettant de renvoyer, les porteurs minoritaires générés près de la face arrière, vers l'interface émetteur-base.

II.2.2. Principe de fonctionnement [1,2]

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 (lorsqu'une énergie lumineuse frappe la cellule solaire, les électrons se détachent des atomes du matériau semi-conducteur);
- Collecte de particules photogénérées dans le dispositif.

II.3. Etude de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base

Lorsque la photopile est éclairée, différents processus de génération, de recombinaison et de la diffusion de porteurs minoritaires en excès se déroulent dans la base. L'ensemble de ces processus peut se traduire par une équation dite équation de continuité.

II.3.1. Taux de génération des porteurs minoritaires

La transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique au moyen d'une photopile passe par une absorption d'abord de photons ayant une énergie suffisante à celui du gap et par une création ensuite de paires électron-trous. Cette génération de paires électron-trous est intimement liée au taux d'absorption de la lumière et de la composition du spectre solaire. En tenant compte de la somme des contributions provenant de chaque longueur d'onde du spectre solaire, ce taux de génération est donné par l'équation (II.1)

$$G(z) = n \cdot \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \exp(-b_i \cdot z) \quad (\text{II.1})$$

- n est appelé nombre de soleil liant la puissance incidente réelle à la puissance de référence pour un spectre solaire donné. Ce terme permet de connaître les conditions d'éclairement de la photopile.
- z est la profondeur dans la base
- Les coefficients a_i et b_i tiennent compte des valeurs tabulées du rayonnement solaire et de dépendance du coefficient d'absorption du silicium avec la longueur l'onde [II-3].
- Pour un éclairement se faisant sous AM 1.5 donné, ces valeurs sont:
 $a_1 = 6,13 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; $a_2 = 0,54 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; $a_3 = 0,0991 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$;
 $b_1 = 6630 \text{ cm}^{-1}$; $b_2 = 10^3 \text{ cm}^{-1}$; $b_3 = 130 \text{ cm}^{-1}$

II.3.2. Equation de continuité

En régime statique et sous éclairement polychromatique, l'équation de continuité, d'une photopile au silicium monocristallin à jonction verticale série, est de la forme :

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial^2 x} - \frac{\delta(x)}{L} = - \frac{G(z)}{D} \quad (\text{II-2})$$

- $\delta(x)$ est la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base.

- $L = \sqrt{D \cdot \tau}$ est longueur de diffusion des porteurs minoritaires en excès dans la base.
Elle représente la distance moyenne parcourue par les porteurs minoritaires en excès dans la base avant leur recombinaison.
- τ est la durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans la base.
- D est le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires en excès dans la base.

II.3.3. Résolution de l'équation de continuité

II.3.3.1. Résolution de l'équation sans second membre

L'expression de l'équation sans second membre est donnée par l'équation (II.3).

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial^2 x} - \frac{\delta(x)}{L} = 0 \quad (\text{II.3})$$

L'équation caractéristique est de cette équation (II.2) est donnée par l'équation (II.3) :

$$r^2 - \frac{1}{L^2} = 0 \quad (\text{II.4})$$

Cette équation (II.3) admet deux racines distinctes r_1 et r_2 données par les équations (II.5) et (II.6) :

$$r_1 = -\frac{1}{L} \quad (\text{II.5})$$

$$r_2 = +\frac{1}{L} \quad (\text{II.6})$$

La solution, de l'équation sans second membre (II.2), peut se mettre sous la forme:

$$\delta(x)_1 = A(Sf, Sb, z) \cdot ch\left(\frac{x}{L}\right) + B(Sf, Sb, z) \cdot sh\left(\frac{x}{L}\right) \quad (\text{II.7})$$

II.3.3.2. Résolution de l'équation avec second membre

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial^2 x} - \frac{\delta(x)}{L} = -\frac{G(z)}{D} \quad (\text{II.8})$$

La solution particulière de cette équation est de la forme :

$$\delta(z)_2 = \sum_{i=1}^3 K \cdot \exp(-b_i \cdot z) \quad (\text{II.9})$$

En injectant cette solution dans l'équation (II.2), on trouve la valeur de K qui vaut :

$$K = \frac{L^2 \cdot a_i}{D} \quad (\text{II.10})$$

Ainsi, la solution générale de l'équation (II.2) est donnée par :

$$\delta(x, z) = A(Sf, Sb, z) \cdot \cosh\left(\frac{x}{L(B)}\right) + B(Sf, Sb, z) \cdot \sinh\left(\frac{x}{L}\right) + \frac{L^2 \cdot G(z)}{D} \quad (\text{II.11})$$

$A(Sf, Sb, z)$ et $B(Sf, Sb, z)$ sont déterminées à partir des conditions aux limites.

II.3.4. Conditions aux limites

Les porteurs minoritaires de charges en excès se recombinent aux interfaces, les conditions aux limites tenant compte de cela sont données par les expressions suivantes [II-4].

➤ A la jonction ($x=0$) :

$$\left. \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{Sf \cdot \delta(x, z)}{D} \right|_{x=0} \quad (\text{II.12})$$

➤ A la face arrière ($x=H$) :

$$\left. \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x} \right|_{x=H} = - \left. \frac{Sb \cdot \delta(x, z)}{D} \right|_{x=H} \quad (\text{II.13})$$

Sf et Sb sont respectivement les vitesses de recombinaison du porteur minoritaire en excès à la jonction et à la surface arrière. La vitesse de recombinaison Sf reflète la vitesse de passage du porteur de charge à la jonction, afin de participer au photocourant. Il est ensuite imposé par la charge externe qui fixe le point de fonctionnement de la cellule solaire [II-5] [II-6] [II-7]. Il a une composante intrinsèque, qui représente les pertes de porteurs associées à la résistance de shunt dans le modèle équivalent électrique de cellule solaire [II-8] [II-9] [II-10]. L'excès de vitesse de recombinaison de porteurs minoritaires Sb sur la surface arrière est associé à la présence de la couche p+, qui génère un champ électrique pour renvoyer le porteur de charge vers la jonction [II-11].

Les expressions $A(Sf, Sb, z)$ et $B(Sf, Sb, z)$ sont données par les équations (II.14) et (II.15):

$$A(Sf, Sb, z) = - \frac{\left(Sf \cdot D \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) + Sf \cdot L \cdot Sb \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) + D \cdot Sb \right) \cdot (L^3 \cdot G(z))}{D^2 \cdot L \cdot (Sb + Sf) \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) + (D \cdot L^2 \cdot Sf \cdot Sb + D^3) \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (\text{II.14})$$

$$B(Sf, Sb, z) = - \frac{\left(D \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot Sb \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) - L \cdot Sb \right) \cdot (Sf \cdot L^3 \cdot G(z))}{D^2 \cdot L \cdot (Sb + Sf) \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) + (D \cdot L^2 \cdot Sf \cdot Sb + D^3) \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (\text{II.15})$$

II.4 Profil de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base pour différentes valeurs de vitesse de recombinaison à la jonction

Le profil de la densité de porteurs de charges minoritaires en excès dans la base en fonction de l'épaisseur x pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction est représenté à la figure II-3.

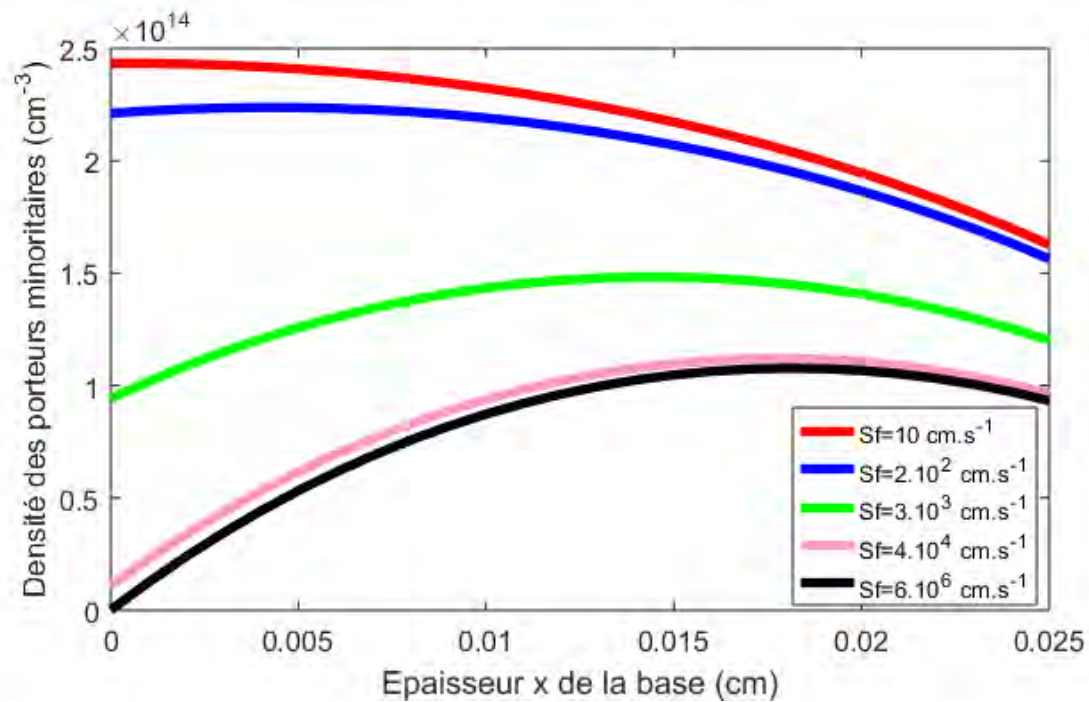


Figure II-3: Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x ($n=1$; $H=0.025$ cm ; $\tau=10^{-5}$ s ; $D=36$; $\mu=1350$ cm².V⁻¹.s⁻¹)

Pour une valeur donnée de la vitesse de recombinaison à la jonction, la densité des porteurs minoritaires diminue en fonction de l'épaisseur de la base .On observe trois régions :

Dans une région proche de la jonction où le gradient de la densité des porteurs minoritaires est positif pour des valeurs de $Sf \geq 10^4$ cm.s⁻¹. Cela correspond à la traversée de la jonction par les porteurs photogénérés pour participer à la production de photocourant .Le gradient de la densité des porteurs minoritaires est nul pour des valeurs de $Sf \leq 10^2$ cm.s⁻¹ : il y a blocage de porteurs à la jonction.

Dans une deuxième région correspondant au maximum de la densité des porteurs de charges en excès où le gradient des porteurs minoritaires est nul.

Dans une troisième région où le gradient de la densité des porteurs minoritaires est négatif.

On remarque que plus on va en profondeur, plus la densité des porteurs minoritaires devient faible. Cela découle du fait que les porteurs situés dans cette zone ne disposent pas d'assez d'énergie pour remonter à la jonction pour participer à la production d'électricité.

On constate aussi que, la densité des porteurs minoritaire est maximale pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction.

II-5 Le profil de la densité de porteurs de charges minoritaires en excès dans la base en fonction de l'épaisseur x pour différents nombres de soleil est représenté à la figure II-4 et II-5:

II-5-1 En circuit ouvert :

La figure II-4 représente les différentes courbes de variation de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour quatre valeurs du nombre de soleil n en circuit ouvert.

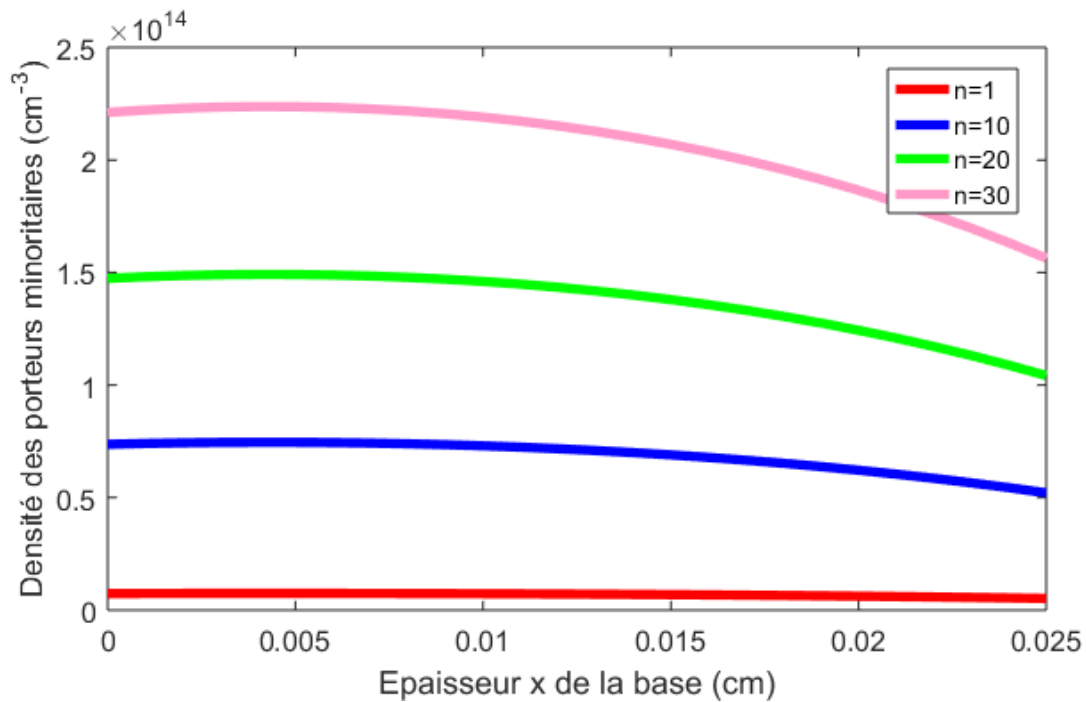


Figure II-4: Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x ($S_f=10 \text{ cm/s}$; $H=0.025 \text{ cm}$; $\tau=10^{-5} \text{ s}$; $D=36$; $z=0.017 \text{ cm}$; $\mu=1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

La densité des porteurs minoritaires diminue en fonction de l'épaisseur pour un nombre de soleil donné. On remarque que trois zones :

La première zone où le gradient de la densité des porteurs minoritaires est nul à la jonction correspondant aux faibles valeurs de l'épaisseur de la base. Notre photopile est en situation de circuit ouvert. La deuxième zone où la densité des porteurs minoritaires décroît progressivement lorsque l'épaisseur de la base augmente.

La troisième zone où le gradient de la densité des porteurs minoritaires est négatif à la face arrière de la base : il y a stockage de porteur. Ainsi, les porteurs situés dans cette zone ne disposent pas d'assez d'énergie pour remonter à la jonction pour participer à la production de photocourant.

La densité des porteurs, à la jonction, augmente avec le nombre de soleil. Cette augmentation s'explique par le fait que plus la lumière s'intensifie, plus le nombre de porteurs photogénérés dans la base devient important.

II-5-2 En court-circuit :

La figure II-5 représente les courbes de variation de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différents valeurs du nombre de soleil n en court-circuit.

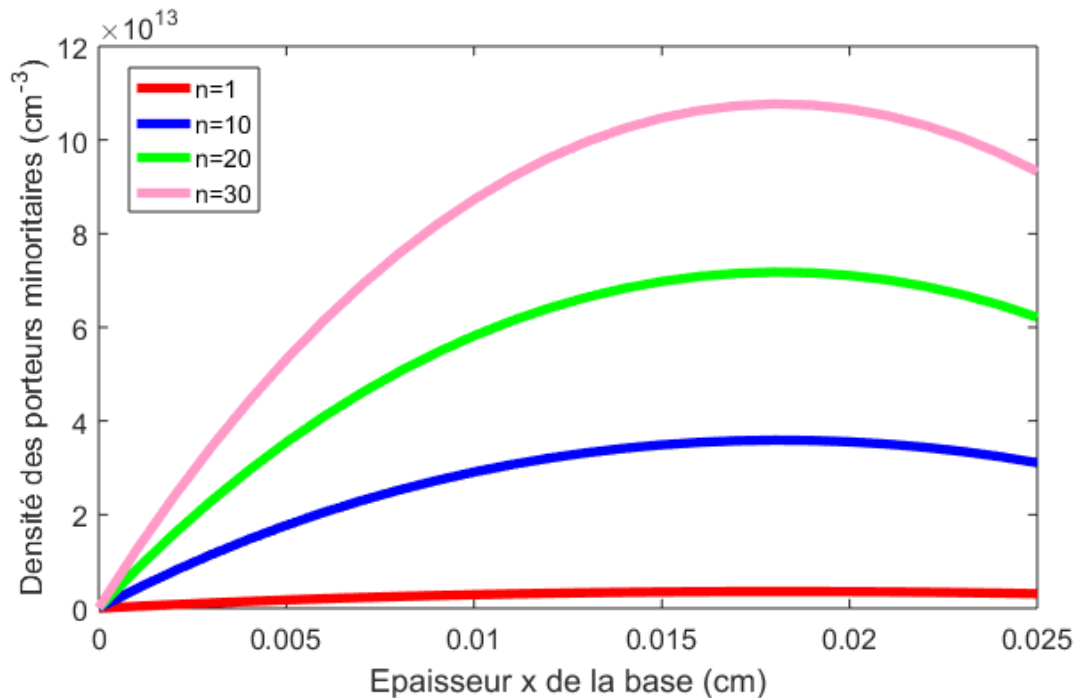


Figure II-5: Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x ($S_f=6.10^6$ cm/s ; $H=0.025$ cm ; $\tau=10^{-5}$ s ; $D=36$; $S_{b1}=F(H, L, D)$; $z=0.017$ cm ; $\mu=1350$ cm².V⁻¹.s⁻¹)

La densité des porteurs minoritaires augmentent lorsque l'épaisseur de la base augment pour une valeur donnée du nombre de soleil. On observe trois paliers :

Le premier palier correspond à $x=0$ où le gradient des porteurs minoritaires est positif, ceci correspond à la traversée de la jonction par les porteurs de charges photogénérés dans la base : la photopile est en mode court-circuit

Le deuxième palier où le gradient de la densité des porteurs est nul : il n'y a pas de traversée de porteurs photogénérés.

Le troisième palier ($x=H$) où le gradient est négatif correspond au blocage des porteurs de charges photogénérés dans la base à la face arrière car il ne dispose pas assez d'énergie leur permettant de remonter vers l'interface émetteur base.

On constate aussi que la densité des porteurs à la jonction augmente avec le nombre de soleil.