

# Chapitre 4

## Résultats et discussion

### 4.1. Introduction :

La caractéristique capacité en fonction de la tension d'une diode est un outil très utilisé pour la caractérisation (tension de déplétion, la concentration effective...).

Dans ce travail, on a fait une étude comparative par simulation de la variation de la tension de déplétion des détecteurs  $p^+ n^- n^+$  et  $n^+ p^- p^+$  après irradiation. La figure 4.1 montre un exemple d'un résultat expérimental de la variation de la tension de déplétion et la densité effective de dopage en fonction de la fluence dans les structures  $n^+ p^- p^+$  et  $p^+ n^- n^+$ .

Le changement de la tension de déplétion des détecteurs, après irradiation, a été expliqué par une apparente inversion du type de la région active (n vers p ou p vers n) [32].

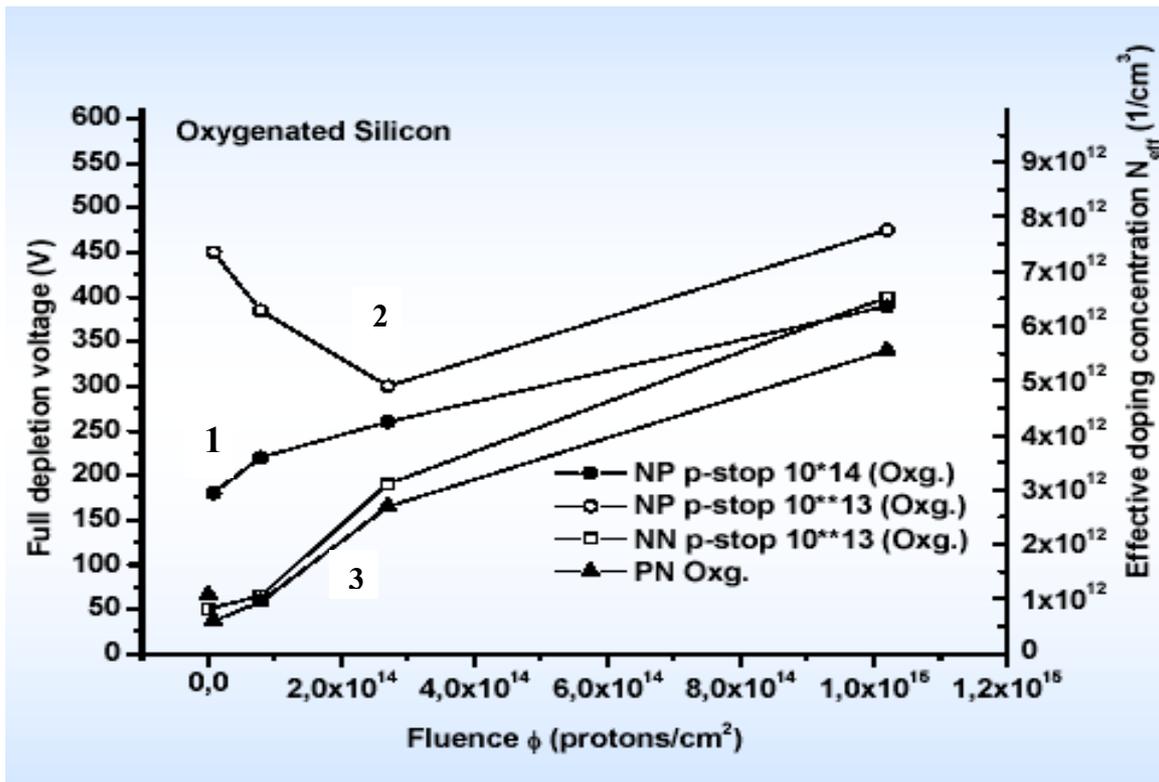


Figure 4.1 : La concentration effective de dopage  $N_{\text{eff}}$  et la tension de déplétion  $V_{\text{dep}}$  en fonction de la fluence pour les structures : (1) NP p-stop (la structure  $n^+ p^- p^+$  où la concentration de  $p^+$  est  $10^{14} \text{cm}^{-3}$ ), (2) NP p-stop (la structure  $n^+ p^- p^+$  où la concentration de  $p^+$  est  $10^{13} \text{cm}^{-3}$ ) et (3)  $p^+ n^- n^+$  d'après la référence [33].

La concentration effective dans la structure  $p^+ n^- n^+$  diminue pour les faibles fluences (inférieur à  $10^{13} \text{protons/cm}^2$ ), puis augmente. Mais dans la structure  $n^+ p^- p^+$ , la variation des deux paramètres dépend de la densité de la région  $p^+$ . Ils augmentent monotonement avec la fluence si la densité est faible mais ils ont la même forme que dans la structure  $p^+ n^- n^+$  si la densité est plus élevée [33].

Dans notre simulation on a essayé d'expliquer ces différences et de tirer des conclusions.

## 4.2. Les structures étudiées :

Les structures étudiées sont des jonctions  $p^+ n^- n^+$  et  $n^+ p^- p^+$  au silicium, ils ont les mêmes valeurs de dopages des différentes régions (région active, contacts). L'épaisseur ( $d$ ) est d'ordre  $280\mu\text{m}$  et la section ( $s$ ) est  $1\text{mm}^2$ . La figure 4.2 représente les paramètres des structures.

En général les détecteurs typiques utilisés dans la physique de particules utilisent un bloc de silicium comme région active dopé par un donneur ou accepteur avec un dopage de  $N_D=10^{12}$  atomes/ $\text{cm}^3$  ou  $N_A=10^{12}$  atomes/ $\text{cm}^3$ . Les deux électrodes (collecteurs) sont dopés à la même densité ; dans notre cas  $N_A=N_D=10^{18}$  atomes/ $\text{cm}^3$ .

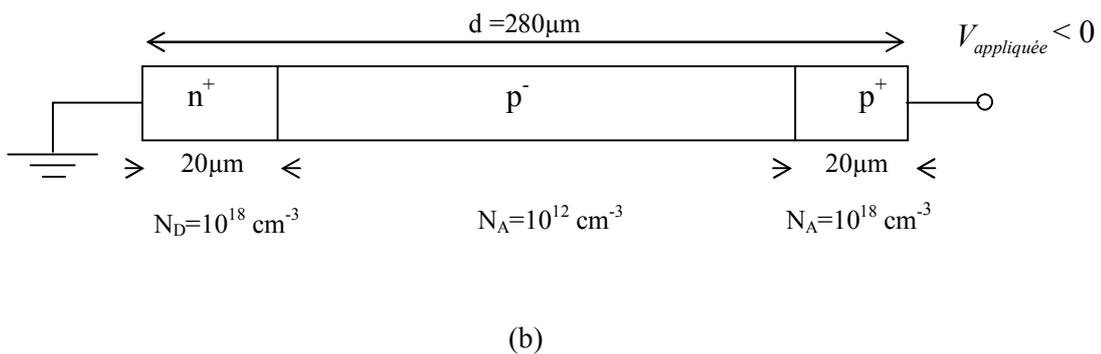
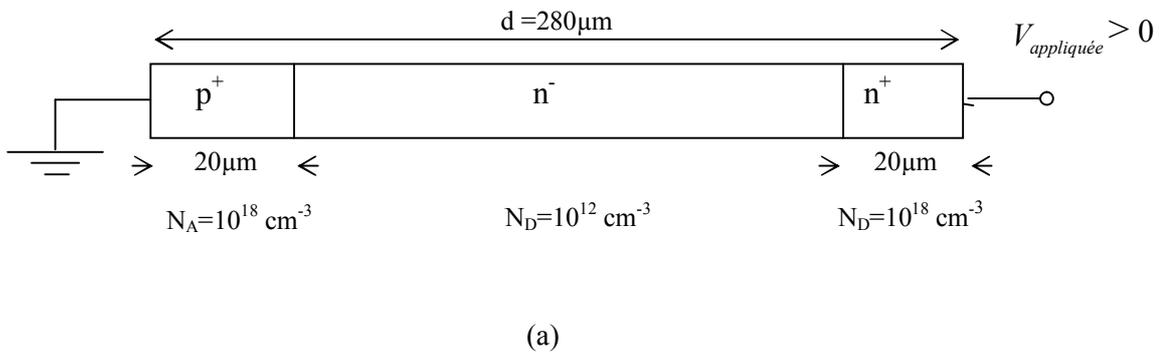
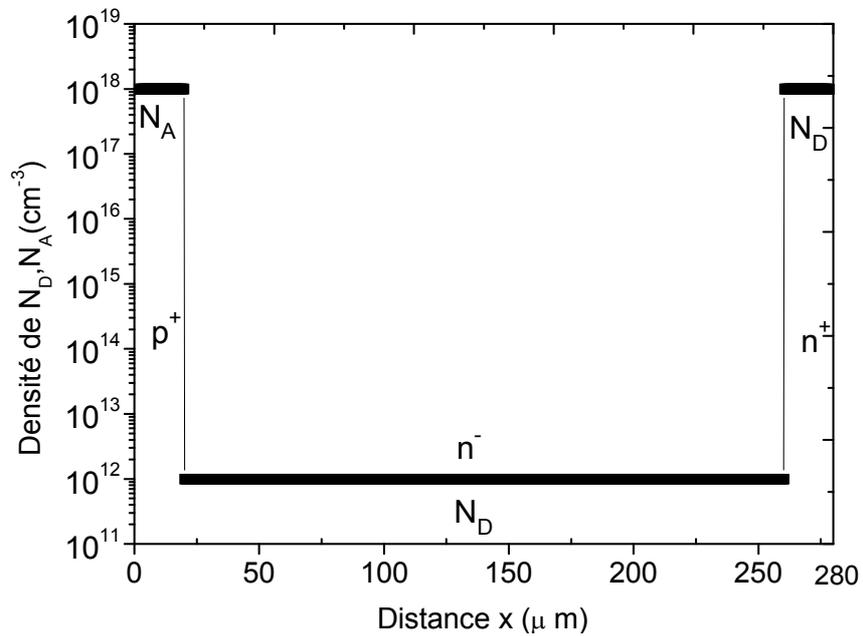
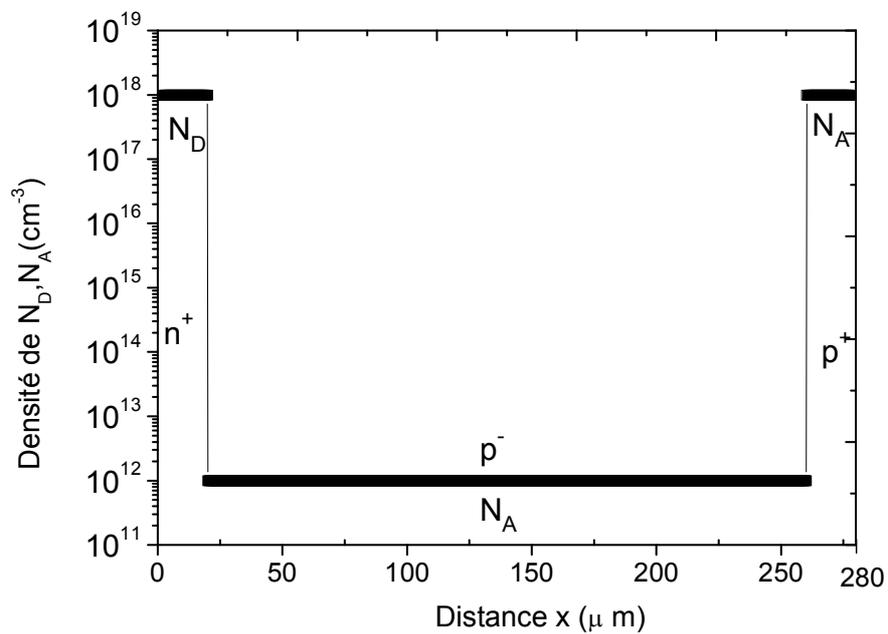


Figure .4.2 : Représentation des paramètres des structures étudiées : a)  $p^+ n^- n^+$  et b)  $n^+ p^- p^+$ .

Donc les profils de dopage sont montrés dans la figure 4.3



(a)



(b)

Figure 4.3 : Les profils de dopage des structures étudiées : a)  $p^+ n^- n^+$ , b)  $n^+ p^- p^+$ .

### 4.3. Calcul des caractéristiques capacité-tension :

On va étudier et calculer les caractéristiques C-V des structures  $p^+ n^- n^+$  et  $n^+ p^- p^+$  sous l'effet d'irradiation.

#### 4.3.1. L'irradiation et les défauts:

Dans le calcul des caractéristiques capacité-tension, la fluence est inclut dans les équations de transport (chapitre 2) à partir de la densité des défauts créés. La densité est proportionnelle avec la fluence. La constante de proportionnalité est le taux d'introduction des défauts (relations 2.26 et 2.27).

Le taux d'introduction des centres de recombinaisons n'est pas bien précis dans les travaux expérimentaux. Donc, on prend trois cas:

- 1-  $\alpha = \beta$  ; le taux d'introduction du piège égale à ce du centre de recombinaison
- 2-  $\alpha > \beta$  ; le taux d'introduction du piège est supérieur à ce du centre de recombinaison
- 3-  $\alpha < \beta$  ; le taux d'introduction du piège est inférieur à ce du centre de recombinaison

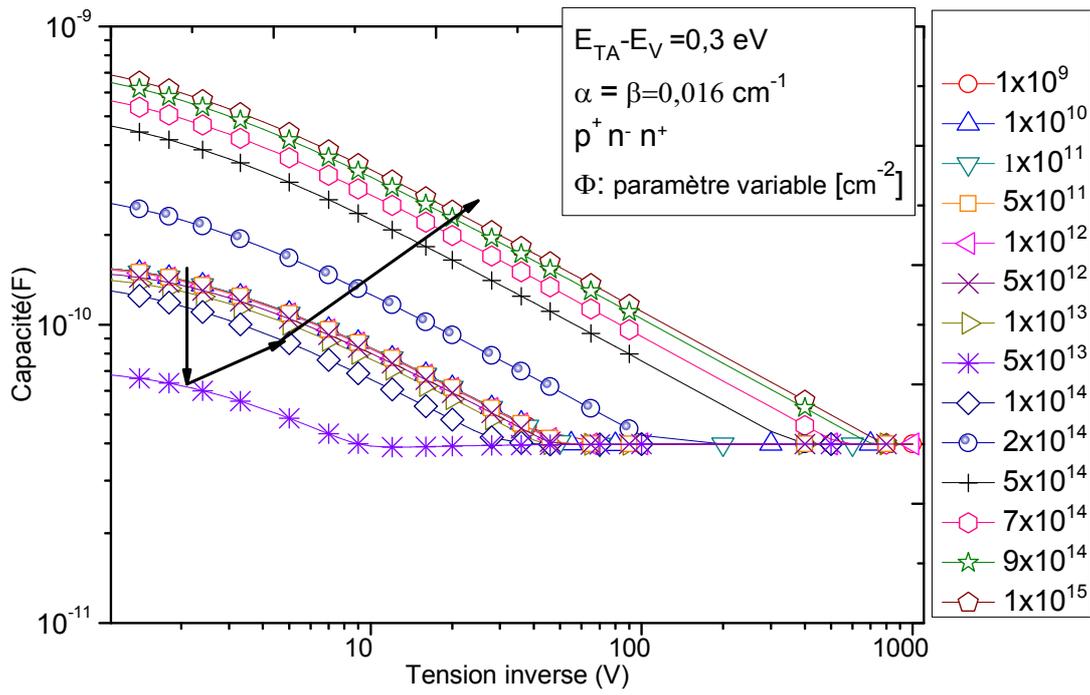
Pour la structure  $p^+ n^- n^+$ , une valeur typique de  $\beta$  est égal à  $0.016 \text{ cm}^{-1}$ , si le piège crée est un accepteur ou donneur. Pour la structure  $n^+ p^- p^+$ , une valeur typique de  $\beta$  est de  $0.011 \text{ cm}^{-1}$  si le piège crée est un accepteur, mais si le piège crée est un donneur  $\beta$  est de  $0.016 \text{ cm}^{-1}$  [33].

#### 4.3.2. L'effet du piège accepteur peu profond et centre de recombinaison:

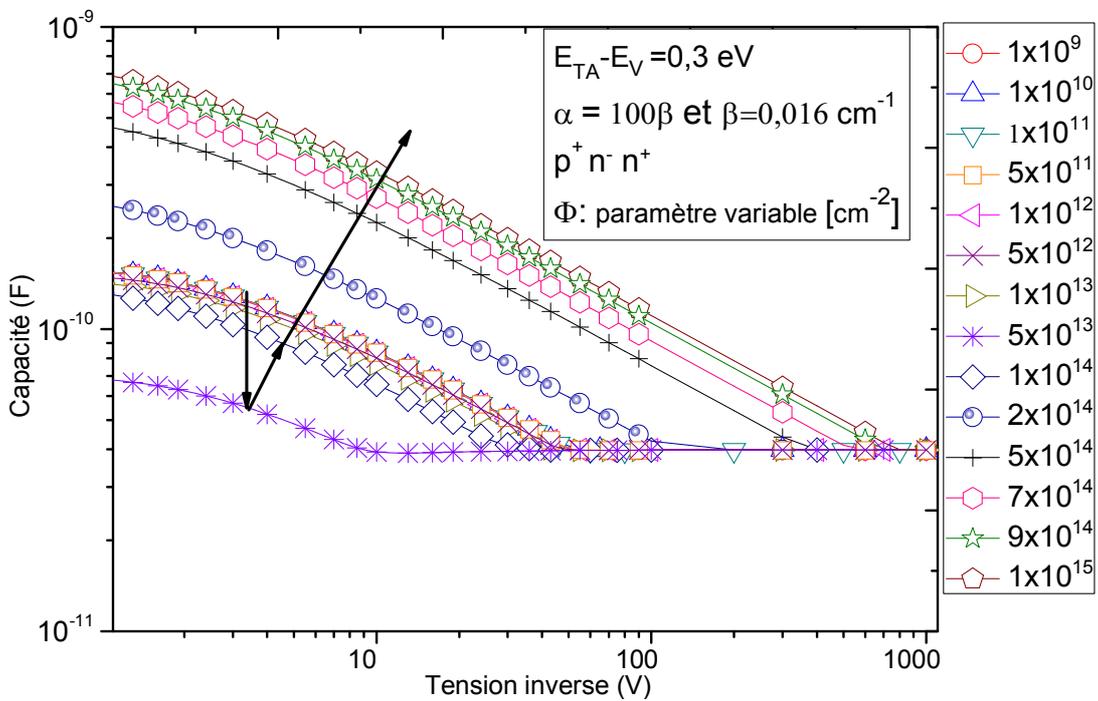
Les pièges accepteurs créés par l'irradiation ont un niveau de 0.3 eV dans le gap d'énergie à partir de la bande de valence ( $E_{TA} - E_V = 0.3 \text{ eV}$ ). Les centres de recombinaison sont au milieu de la bande interdite.

##### 4.3.2.1. La structure $p^+ n^- n^+$ :

Les caractéristiques capacité tension pour différentes fluences et du taux d'introduction sont présentées dans la figure 4.4.



(a)



(b)

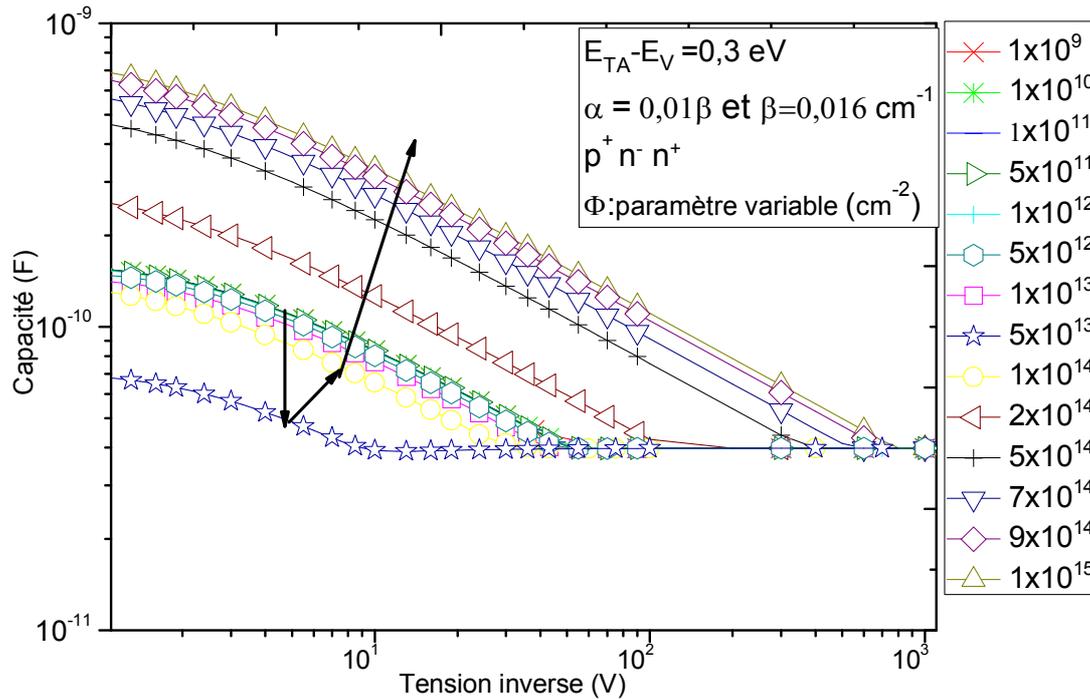


Figure 4.4 : Les caractéristiques  $C(V)$  de la structure  $p^+ n^- n^+$  pour différentes fluences d'irradiation avec le niveau d'énergie du piège accepteur  $E_{TA}-E_V=0.3$  eV pour, (a)  $\alpha = \beta$ , (b)  $\alpha = 100\beta$  et (c)  $\alpha = 0.01\beta$ .

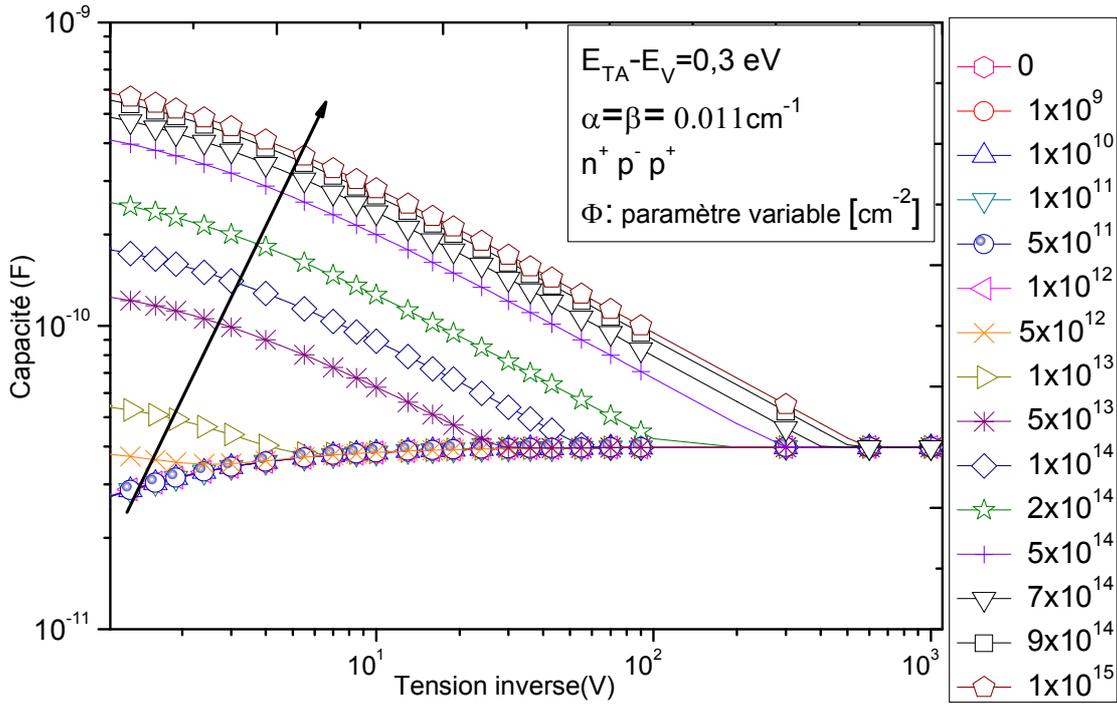
On remarque que la capacité diminue avec l'augmentation de la densité de fluence, au dessous d'une valeur de  $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . Puis elle augmente avec l'augmentation de la fluence.

La capacité en chaque valeur de densité de la fluence, ne change pas avec la valeur de rapport de taux d'introduction des pièges accepteurs et centres de recombinaison ( $\beta/\alpha$ ).

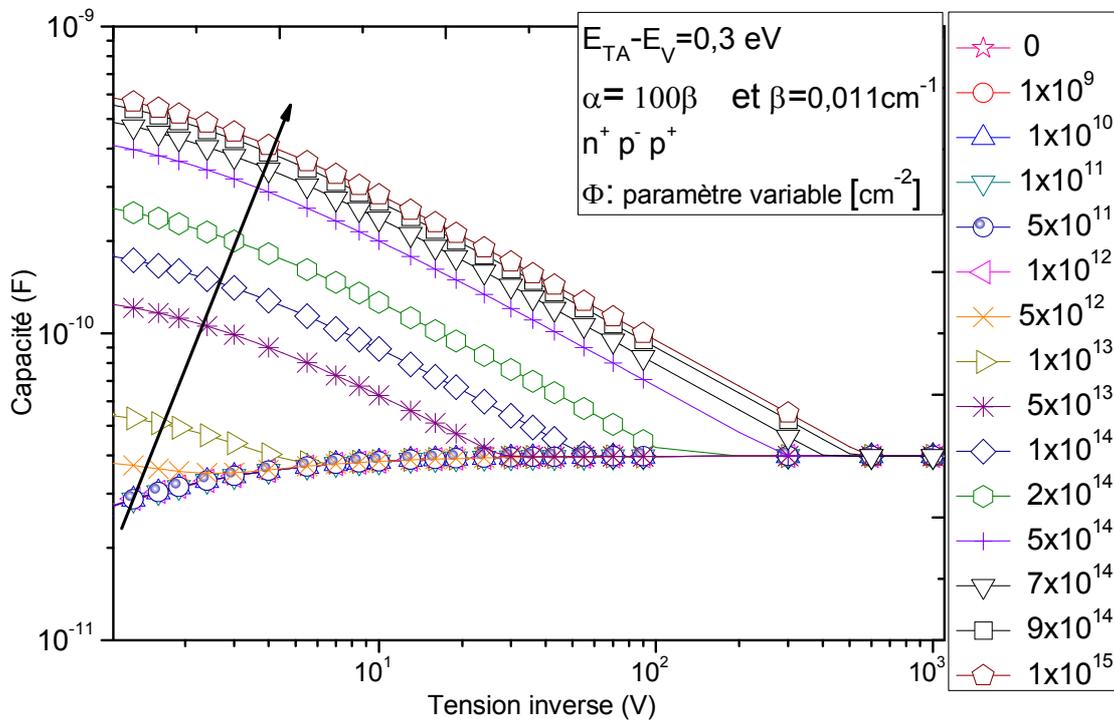
Donc, on peut dire que l'effet des centres de recombinaison sur la capacité est très faible par rapport à l'effet des pièges accepteur.

#### 4.3.2.2. La structure $n^+ p^- p^+$ :

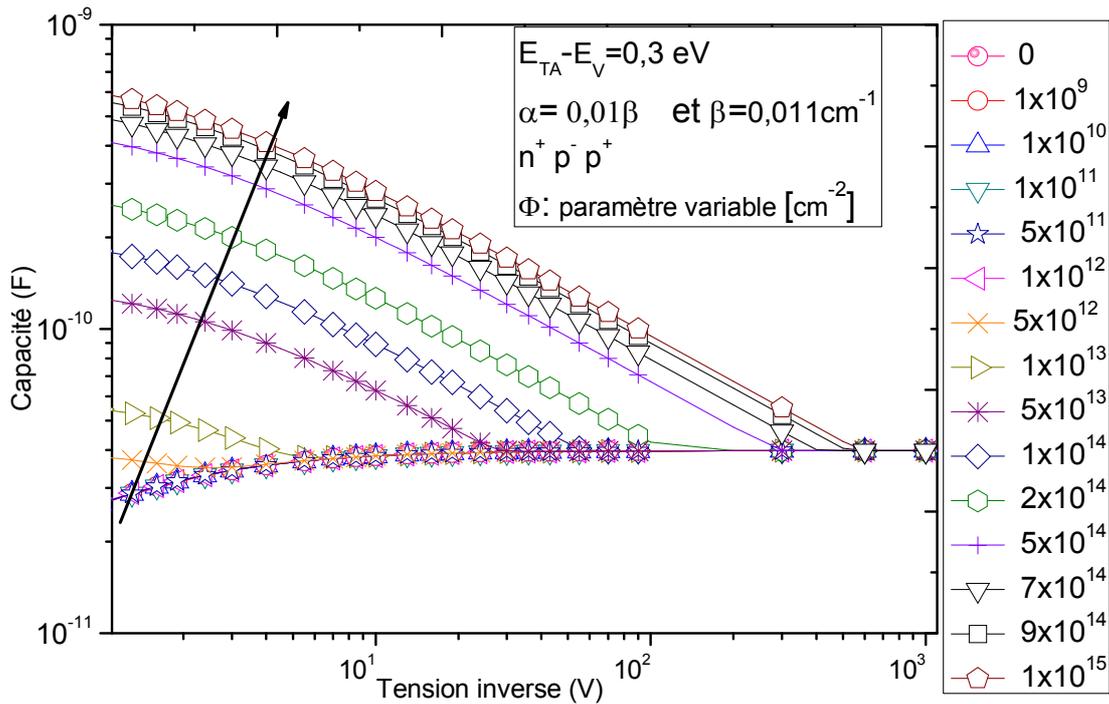
La figure 4.5 représente les caractéristiques capacité-tension pour différentes fluences et du taux d'introduction



(a)



(b)



(c)

Figure 4.5 : Les caractéristiques  $C(V)$  de la structure  $n^+ p^- p^+$  pour différentes fluences d'irradiation avec le niveau d'énergie du piège accepteur  $E_{TA}-E_V=0.3$  eV pour, (a)  $\alpha=\beta$ , (b)  $\alpha=100\beta$  et (c)  $\alpha=0.01\beta$ .

On remarque que la capacité augmente avec l'augmentation de la fluence. On voit la même chose pour la structure  $n^+ p^- p^+$  tel que l'effet des centres de génération –recombinaison est faible sur la capacité.

#### 4.3.2.3. Discussion:

Pour pouvoir expliquer la variation de la capacité de la structure  $p^+ n^- n^+$  et l'augmentation dans la capacité de la structure  $n^+ p^- p^+$  alors il est nécessaire de représenter les distributions des porteurs  $n$  et  $p$  avec la densité du piège accepteur (ou la fluence) comme paramètre. Pour  $E_{TA}-E_V=0.3$  eV.

#### La structure $p^+ n^- n^+$ :

Les densités des électrons et trous dans la structure  $p^+ n^- n^+$ , pour une tension inverse de 1V sont représentées dans la figure 4.6 pour différentes fluences.

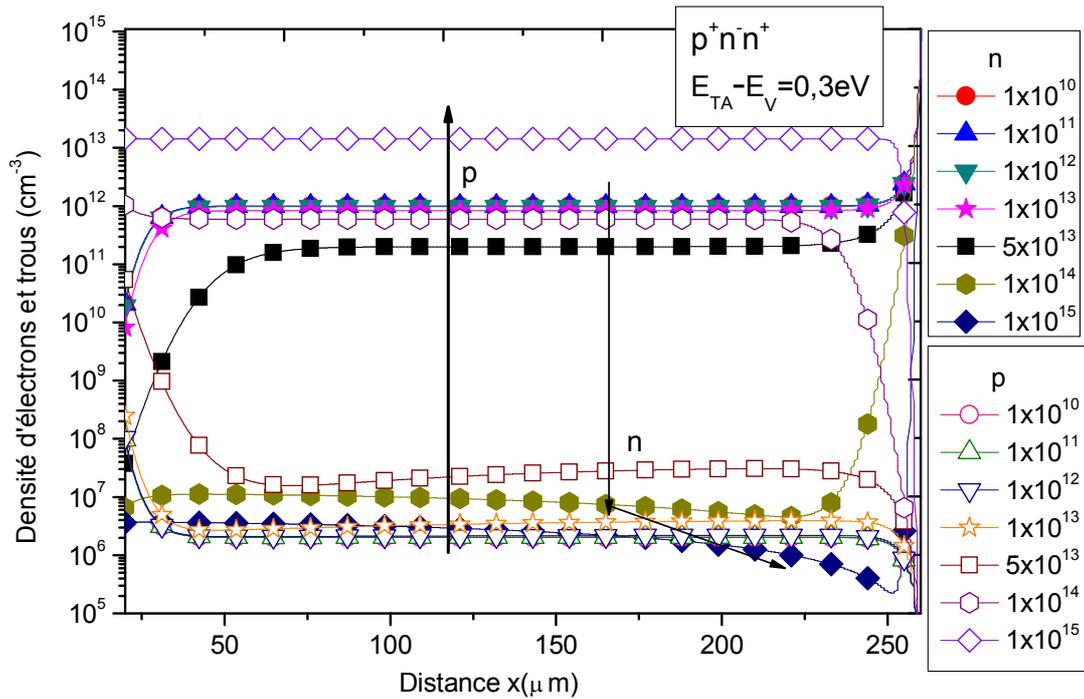


Figure 4.6 : Distribution des électrons et trous pour la structure  $p^+ n^- n^+$  et pour différentes densités de fluence d'irradiation avec  $V = -1\text{ V}$  et  $E_{TA} - E_V = 0.3\text{ eV}$ .

La densité de trous augmente avec l'augmentation de la fluence, ce qui augmente la densité des pièges accepteurs ( $N_{TA}$ ). Ces derniers s'ionisent et génèrent plus de trous. Les électrons diminuent à cause de l'augmentation de la densité des trous générés par les pièges accepteurs. Donc la zone active (initialement de type n) devient de moins en moins de type n, donc la densité effective du dopage diminue. La capacité se diminue avec l'augmentation de la fluence, au-delà d'une valeur de  $5 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}$  de la fluence, la densité des trous devient plus élevée que celle des électrons, ce qui implique que la zone active devient de type p. Ceci induit une augmentation de la densité effective de dopage. Donc la capacité augmente. On a donc un cas d'inversion du type de la région active qui sera plus détaillé lorsque la tension de déplétion et la densité effective sont extraites de la caractéristique capacité-tension.

### b) La structure $n^+ p^- p^+$ :

On va représenter, dans la figure (4.7) les densités des électrons et des trous dans la structure  $n^+ p^- p^+$  pour une tension inverse et pour des différentes fluences.

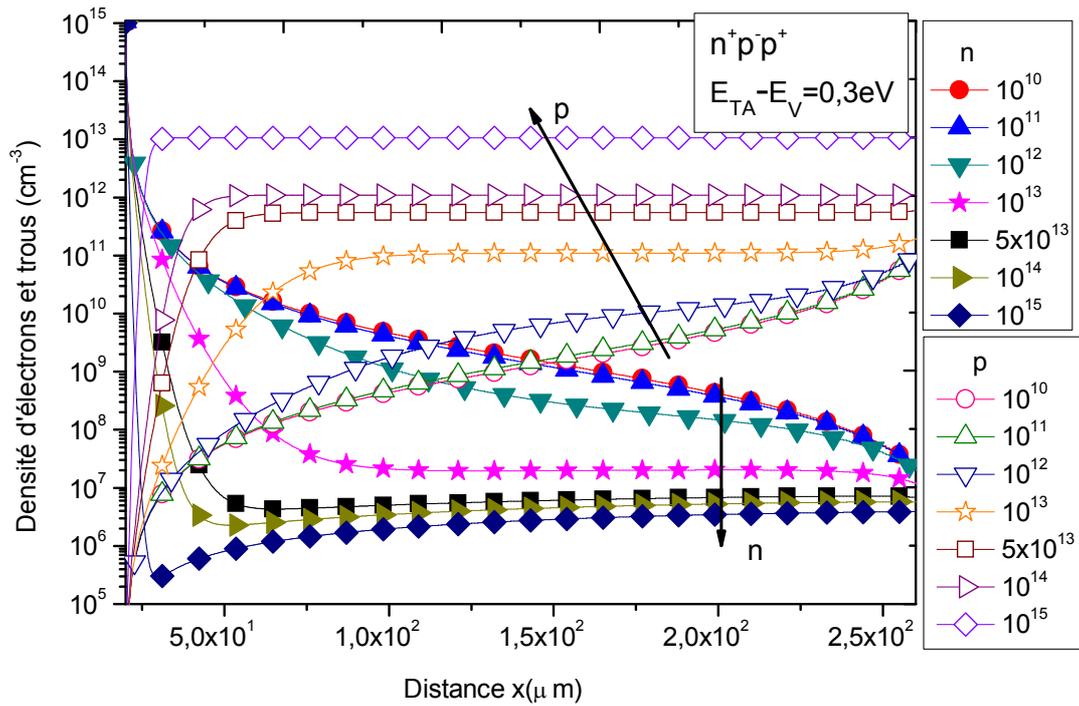


Figure 4.7 : Distribution des électrons et trous pour la structure  $n^+p^-p^+$  et pour différentes densités de fluence d'irradiation avec  $V=-1V$  et  $E_{TA}-E_V=0.3eV$ .

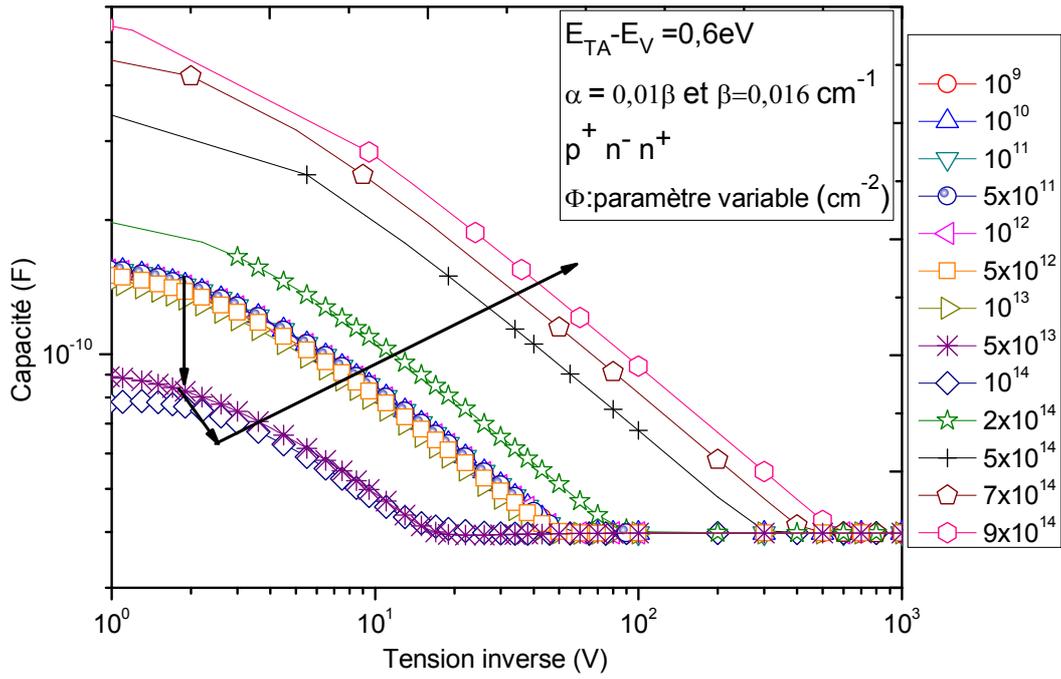
La figure 4.7 représente que la densité de trous augmente avec la fluence ce qui donne une augmentation de la densité des pièges ( $N_{TA}$ ). Ces derniers s'ionisent et génèrent plus de trous. Les électrons diminuent à cause de l'augmentation de la densité des trous générés par les pièges accepteurs. Donc, la zone active (initialement de type p) devient fortement de type p.

### 4.3.3. L'effet du piège accepteur plus profond et centre de recombinaison:

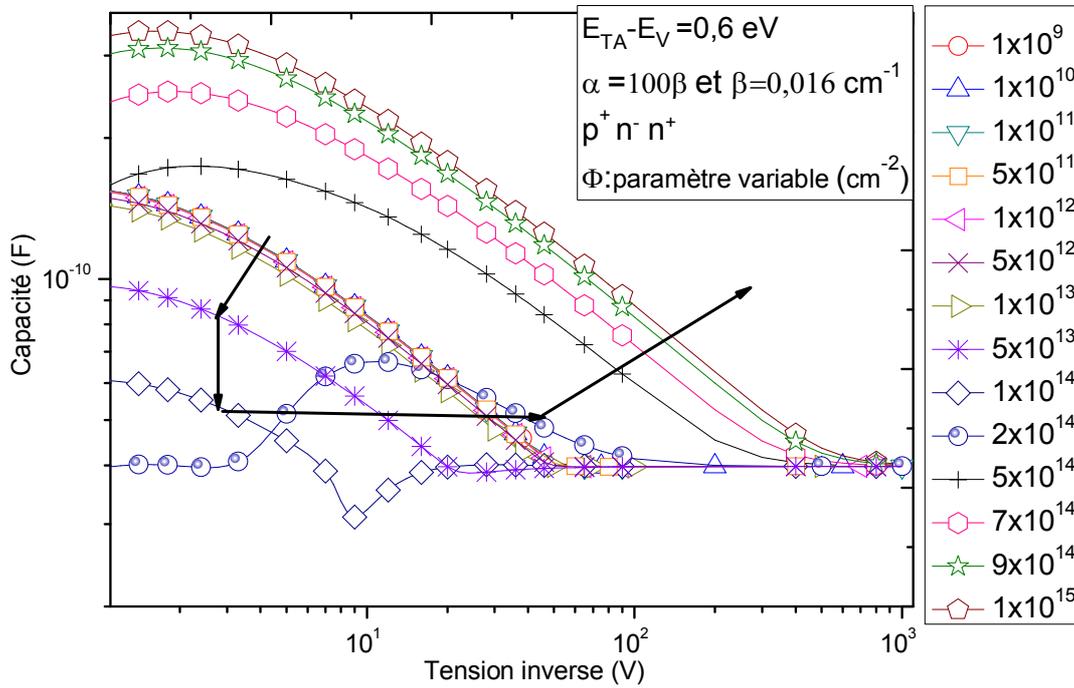
Dans cette schéma on suppose que les pièges accepteurs créés par l'irradiation ont un niveau de 0.6 eV dans le gap d'énergie à partir de la bande de valence ( $E_{TA} - E_V=0.6eV$ ), c'est-à-dire qu'ils sont très profonds.

#### 4.3.3.1. La structure $p^+n^-n^+$ :

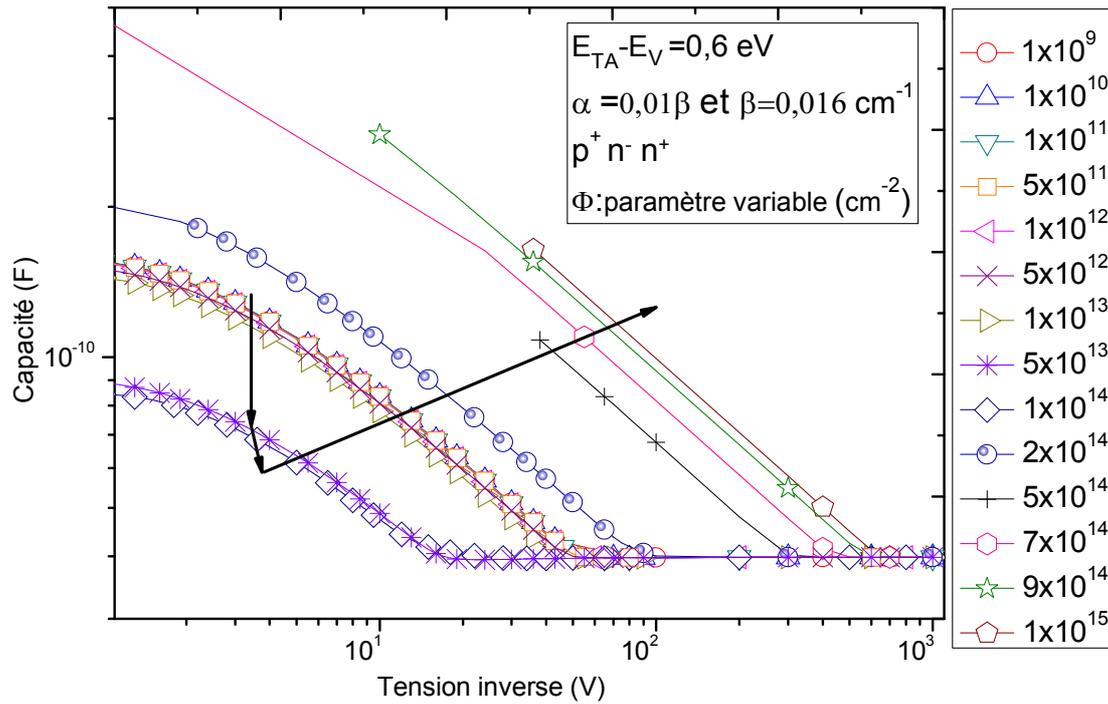
La figure 4.8 présente la variation de la caractéristique C-V en fonction de la fluence, pour la structure  $p^+n^-n^+$ .



(a)



(b)



(c)

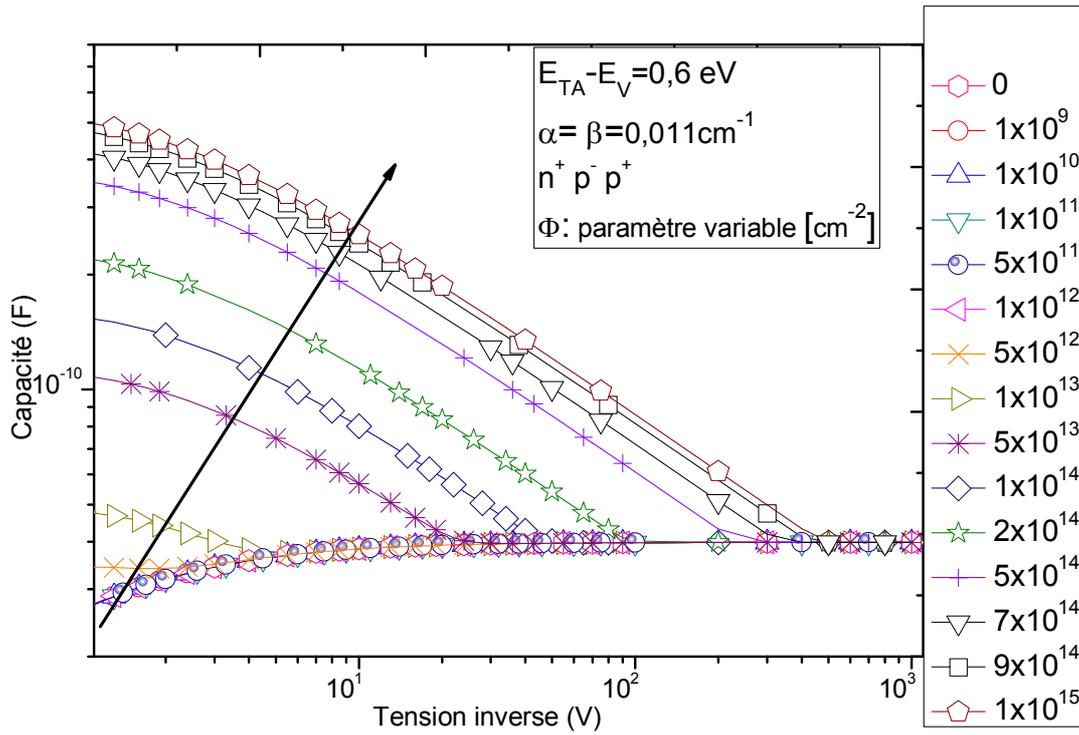
Figure 4.8 : Les caractéristiques  $C(V)$  de la structure  $p^+ n^- n^+$  pour différentes fluences d'irradiation avec le niveau d'énergie du piège accepteur  $E_{TA}-E_V=0.6$  eV pour, (a)  $\alpha = \beta$ , (b)  $\alpha = 100\beta$  et (c)  $\alpha = 0.01\beta$ .

La première observation est que pour les trois cas ( $\alpha=\beta$ ,  $\alpha=100\beta$  et  $\alpha=0.01\beta$ ) on voit que la capacité diminue avec l'augmentation de la fluence, pour les faibles fluences ( $\leq 10^{14}$   $\text{cm}^{-2}$ ) puis elle commence à augmenter avec l'augmentation de la fluence.

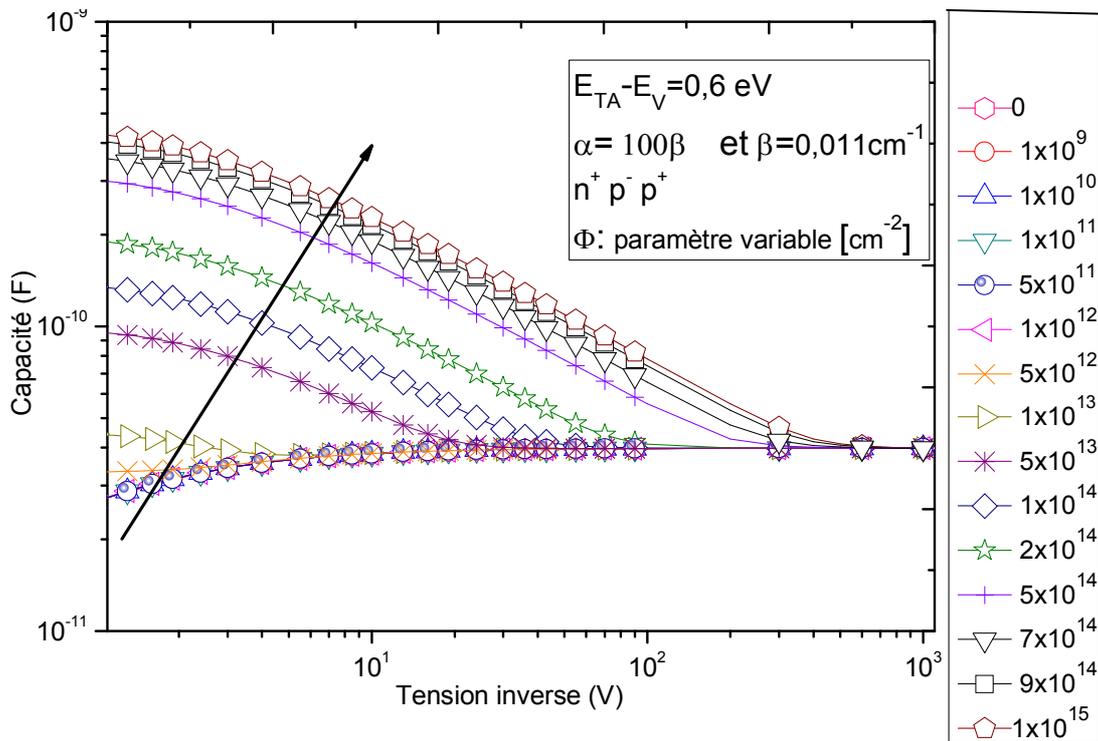
La deuxième observation est que la forme des courbes est totalement différente pour le cas  $\alpha=100\beta$  (le taux d'introduction des centres g-r est supérieur à ce des pièges). Donc, dans le cas d'un piège accepteur profond, les centres g-r sont un effet important (le contraire pour le piège moins profond)

#### 4.3.3.2. La structure $n^+ p^- p^+$ :

Dans la structure  $n^+ p^- p^+$ , la capacité en fonction de la tension pour différentes fluences et du taux d'introduction sont présentes dans la figure 4.9.



(a)



(b)

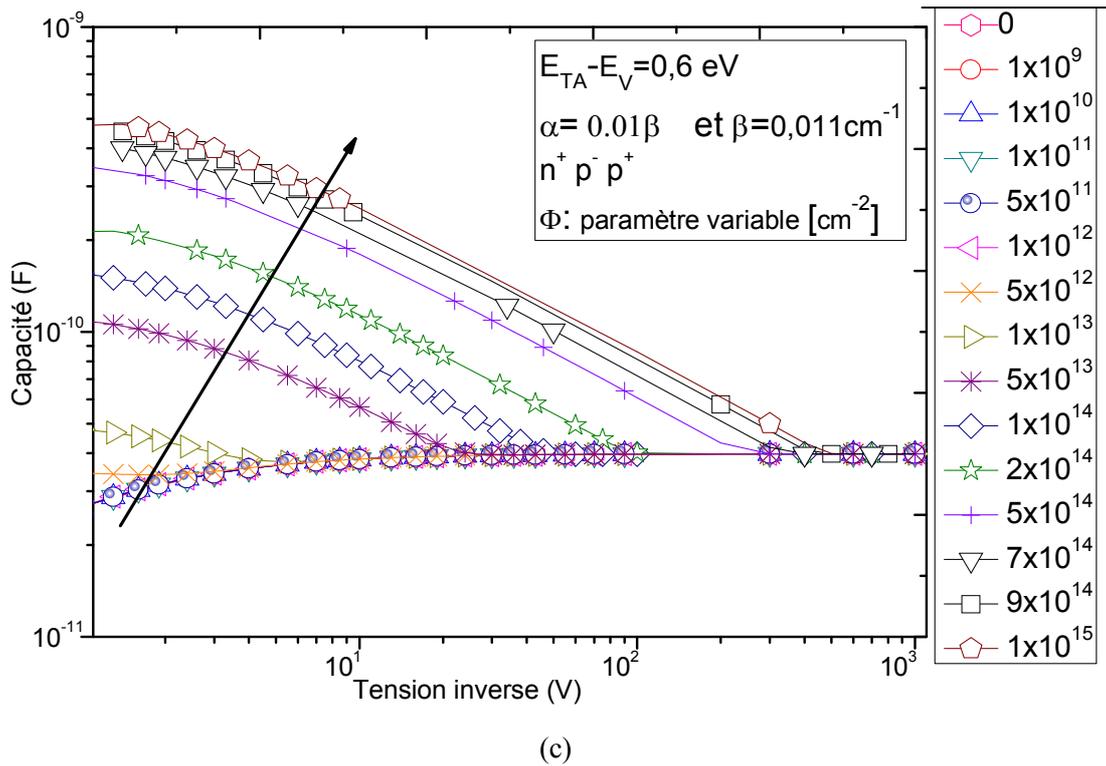


Figure 4.9 : Les caractéristiques  $C(V)$  de la structure  $n^+ p^- p^+$  pour différentes fluences d'irradiation avec le niveau d'énergie du piège accepteur  $E_{TA}-E_V=0.6\text{eV}$  pour, (a)  $\alpha = \beta$ , (b)  $\alpha = 100\beta$  et (c)  $\alpha = 0.01\beta$  (c).

Dans les trois cas on voit que la capacité augmente avec l'augmentation de la fluence mais d'une façon différente. La variation de la capacité est plus importante dans le cas où ( $\alpha > \beta$ ) (le taux d'introduction des centres g-r est supérieur à ce des pièges) ce qui va influencer sur la tension de déplétion.

#### 4.3.3.3. Discussion:

La représentation de la distribution des électrons et trous permet d'expliquer les courbes de la capacité pour les deux structures  $p^+ n^- n^+$  et  $n^+ p^- p^+$ :

##### a) La structure $p^+ n^- n^+$ :

Les distributions des électrons et trous dans la structure  $p^+ n^- n^+$  sont présentées dans

la figure 4.10 pour différentes fluences à une tension inverse de 1V en supposant que le piège créée est à un niveau de 0.6 eV au dessus de la bande de valence.

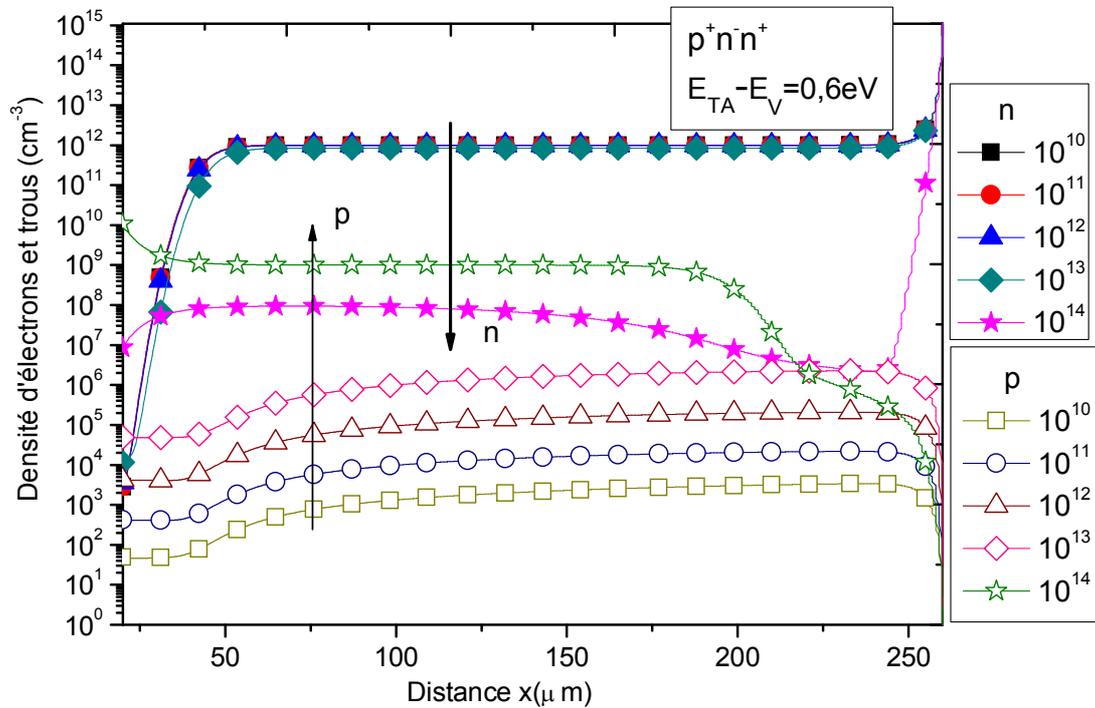


Figure 4.10 : Distribution des électrons et trous pour la structure  $p^+n^-n^+$  et pour différentes densités de fluence d'irradiation avec  $V=-1V$  et  $E_{TA}-E_V=0.6 eV$ .

Le piège accepteur plus profond (0.6 eV) génère des trous moins que le piège accepteur peu profond (0.3 eV), parce que l'ionisation de ce dernier est plus élevée.

Pour une tension inverse -1V (Figure 4.10), la densité des trous augmente au moment où les électrons diminuent à cause de l'augmentation de la densité des centres g-r.

Ce qui traduit à une diminution dans la capacité puis une augmentation pour des fluences inférieures et supérieures à  $10^{14} cm^{-2}$  respectivement.

### b) La structure $n^+p^-p^+$ :

On va représenter, dans la figure 4.11 les distributions des électrons et trous dans la structure  $n^+p^-p^+$  pour différentes fluences à une tension inverse de 1V en supposant que le piège créée est à un niveau de 0.6 eV au dessus de la bande de valence.

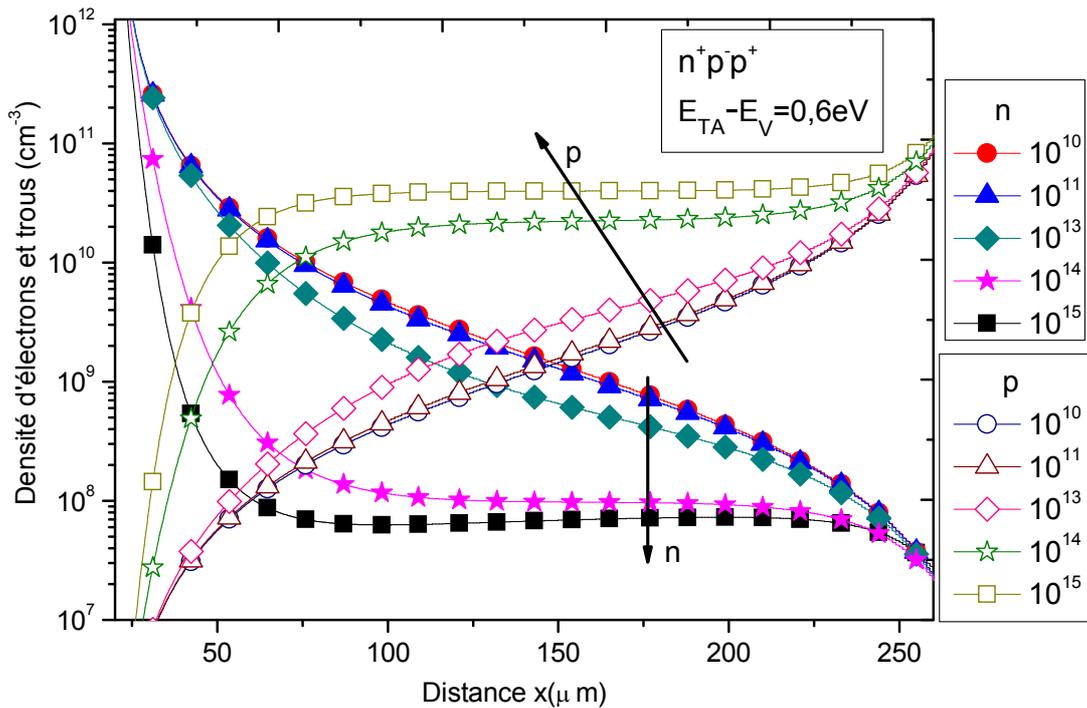


Figure 4.11 : Distribution des électrons et trous pour la structure  $n^+p^-p^+$  et pour différentes densités de fluence d'irradiation avec  $V=-1V$  et  $E_{TA}-E_V=0.6eV$ .

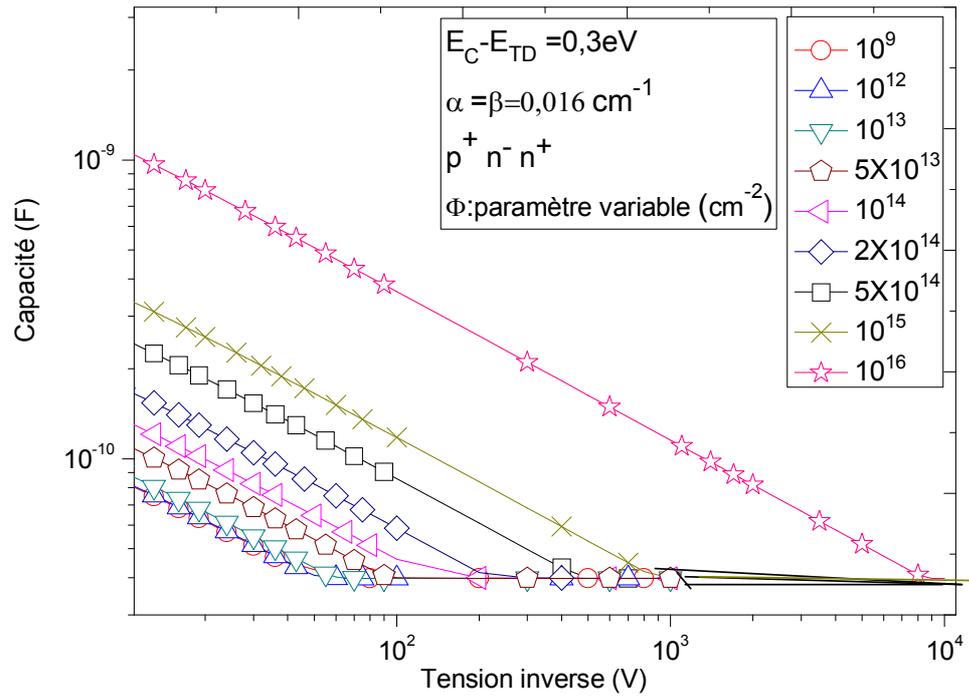
Pour une tension inverse 1V (figure 4.11), la densité des trous augmente au moment où les électrons diminuent à cause de l'augmentation de la densité des centres g-r. Ce qui traduit à une augmentation dans la capacité.

#### 4.3.1.2. L'effet du piège donneur et centre de recombinaison:

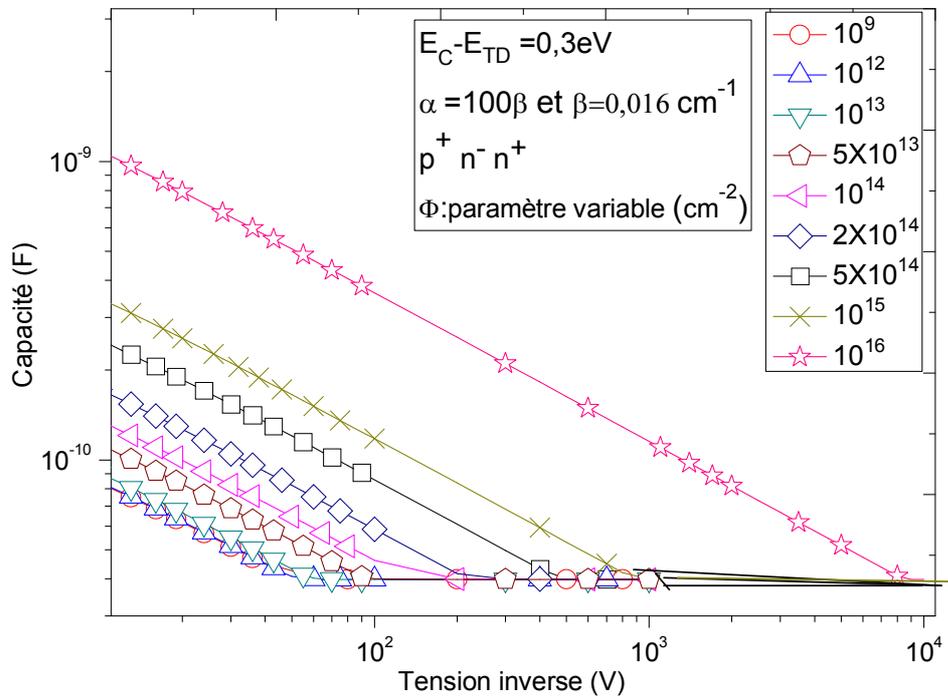
Dans cette section on suppose que le piège créé est un donneur situé à un niveau de 0.3 eV dans le gap d'énergie à partir de la bande de conduction ( $E_C - E_{TD}=0.3$  eV),

#### 4.3.4.1. la structure $p^+ n^- n^+$ :

Les caractéristiques capacité tension pour différentes fluences et taux d'introduction sont présentées dans la figure 4.12.



(a)



(b)

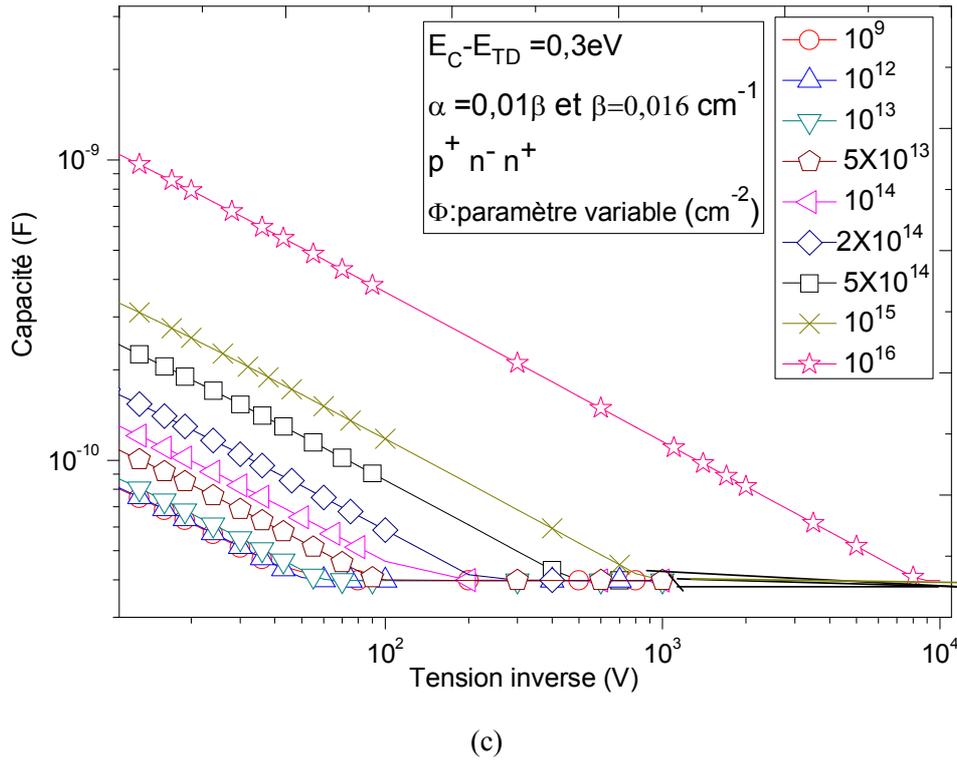


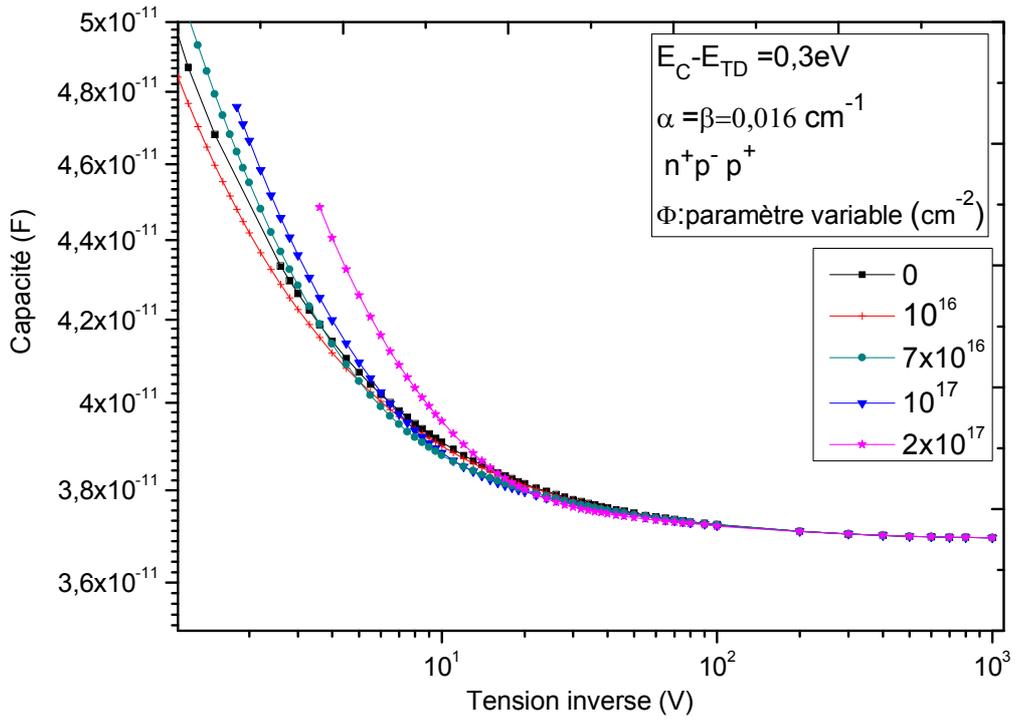
Figure 4.12 : La caractéristiques  $C(V)$  de la structure  $p^+ n^- n^+$  pour différentes fluences d'irradiation avec le niveau d'énergie de piège donneur  $E_C - E_{TD} = 0.3$  eV pour, (a)  $\alpha = \beta$ , (b)  $\alpha = 100\beta$  et (c)  $\alpha = 0.01\beta$ .

On voit dans les trois cas que la capacité augmente avec l'augmentation de la fluence.

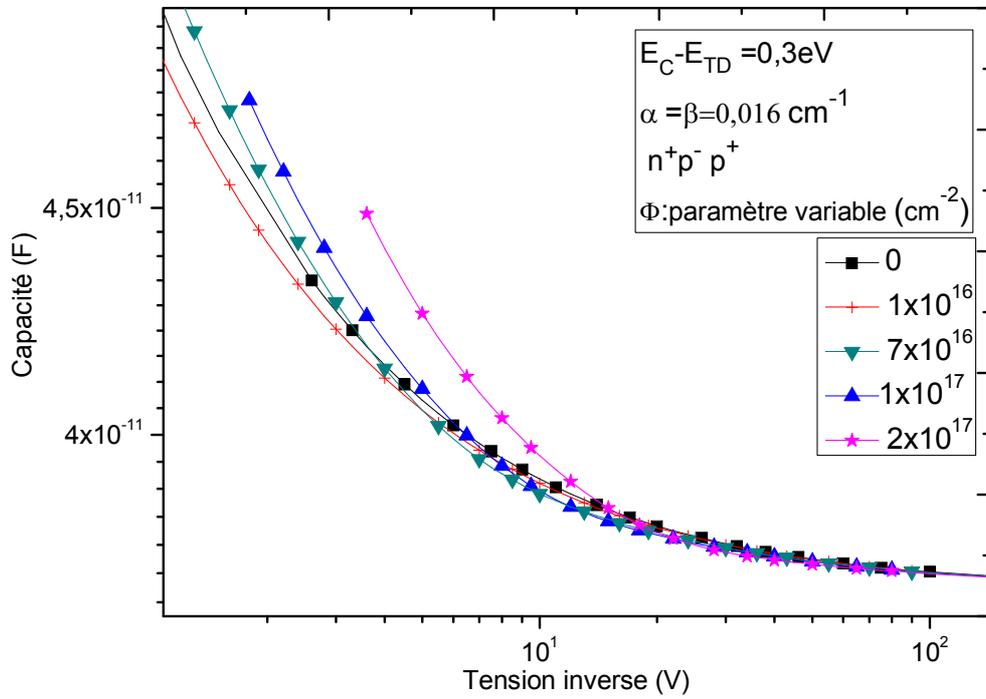
On remarque que l'effet des centres de g-r est négligeable par rapport à l'effet des pièges donneur sur la capacité

#### 4.3.4.2. La structure $n^+ p^- p^+$ :

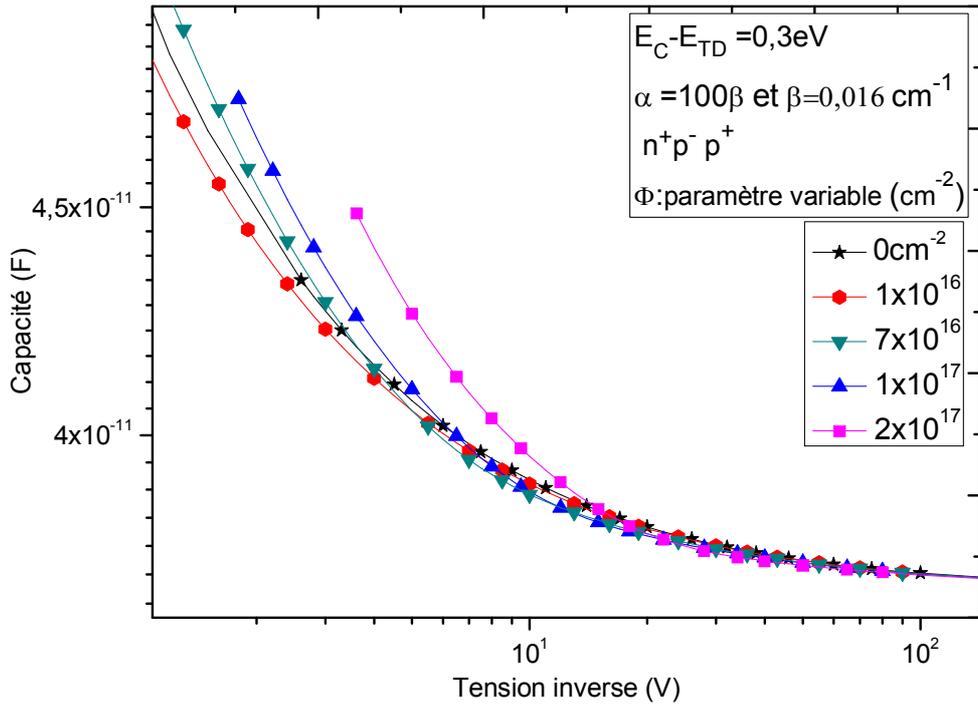
Dans la structure  $n^+ p^- p^+$ , la capacité en fonction de la tension pour différentes fluences et du taux d'introduction sont présentes dans la figure 4.13.



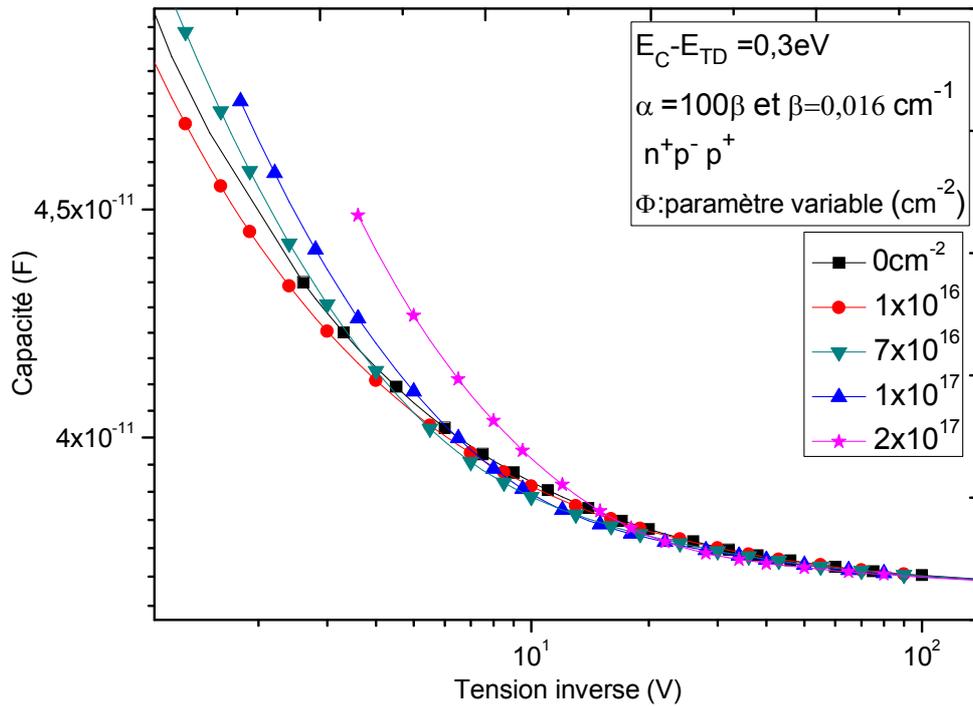
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.13: Les caractéristiques  $C(V)$  de la structure  $n^+p^-p^+$  pour différentes fluences d'irradiation avec le niveau d'énergie du piège donneur  $E_C - E_{TD} = 0.3 \text{ eV}$  pour, (a)  $\alpha = \beta$ , (b)  $\alpha = 100\beta$  et (c)  $\alpha = 0.01\beta$  (d). (b) est l'agrandissement d'une zone dans la figure (a)

On voit que la capacité diminue avec l'augmentation de la densité de fluence, jusqu'à la valeur ( $1.10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) puis augmente avec l'augmentation de la fluence. Ceci est très important puisque la valeur nécessaire pour obtenir une inversion est très élevée. Ceci est une première indication que cette structure est plus dure.

La capacité en chaque valeur de densité de fluence, ne change pas avec la valeur du rapport du taux d'introduction des pièges donneur et centres de recombinaison ( $\beta/\alpha$ ).

Donc on peut dire que le centre de recombinaison sur la capacité est très faible par rapport à l'effet du piège donneur.

#### **4.3.4.3. Discussion :**

Pour pouvoir expliquer le comportement de la capacité en fonction de la fluence, les densités des électrons et trous dans la structure sont présentés dans les figures 4.14 et 4.15 en fonction de la fluence pour les structures  $p^+ n^- n^+$  et  $n^+ p^- p^+$  respectivement.

##### **a) La structure $p^+ n^- n^+$ :**

Les densités des électrons et trous dans la structure  $p^+ n^- n^+$ , pour une tension inverse de 1V sont représentées dans la figure 4.14 pour différentes fluences, en supposant que le piège crée est à un niveau de 0.3 eV au dessous de la bande de conduction.

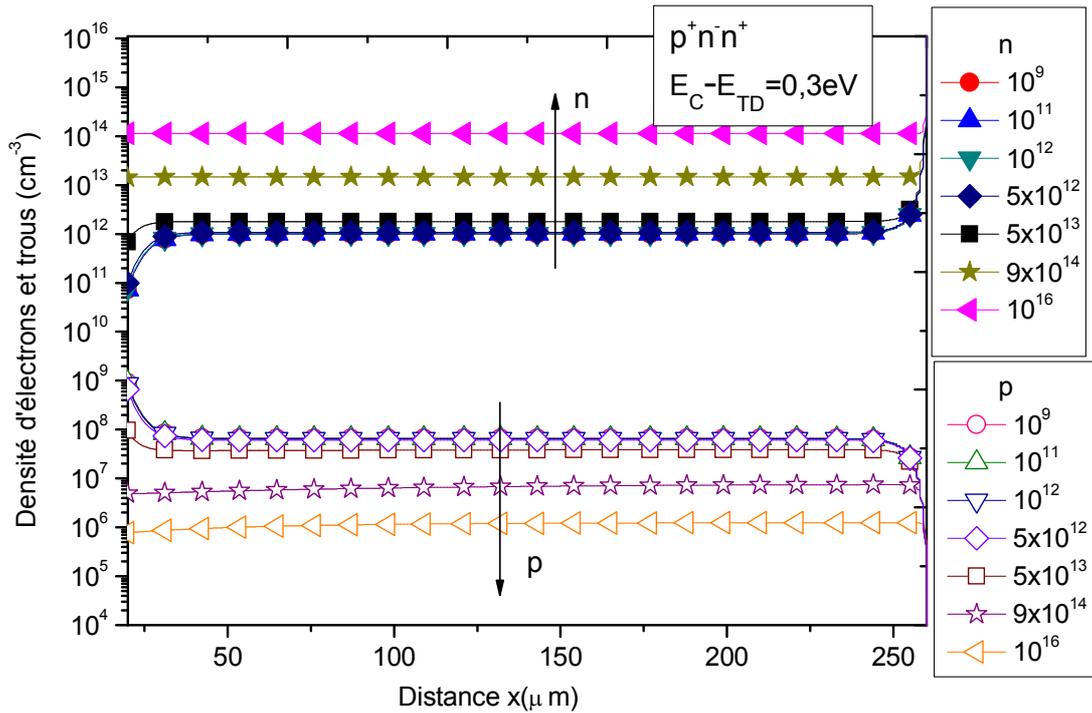


Figure 4.14 : Distribution des électrons et trous pour la structure  $p^+ n^- n^+$  pour différentes densités de fluence d'irradiation avec  $V=-1V$  et  $E_C - E_{TD}=0,3eV$ .

Dans cette structure ; dont la région active, l'effet d'irradiation est d'augmenter la densité des pièges donneurs. Les pièges donneurs augmentent en s'ionisant, la densité des électrons. Ceci rend la région active de plus en plus de type n donc la densité effective augmente et donc la capacité augmente.

### b) La structure $n^+ p^- p^+$ :

Les distributions des électrons et trous dans la structure  $n^+ p^- p^+$  sont présentées dans la figure 4.15 pour différentes fluences à une tension inverse de 1V en supposant que le piège créé est à un niveau de 0.3 eV au dessous de la bande de conduction.

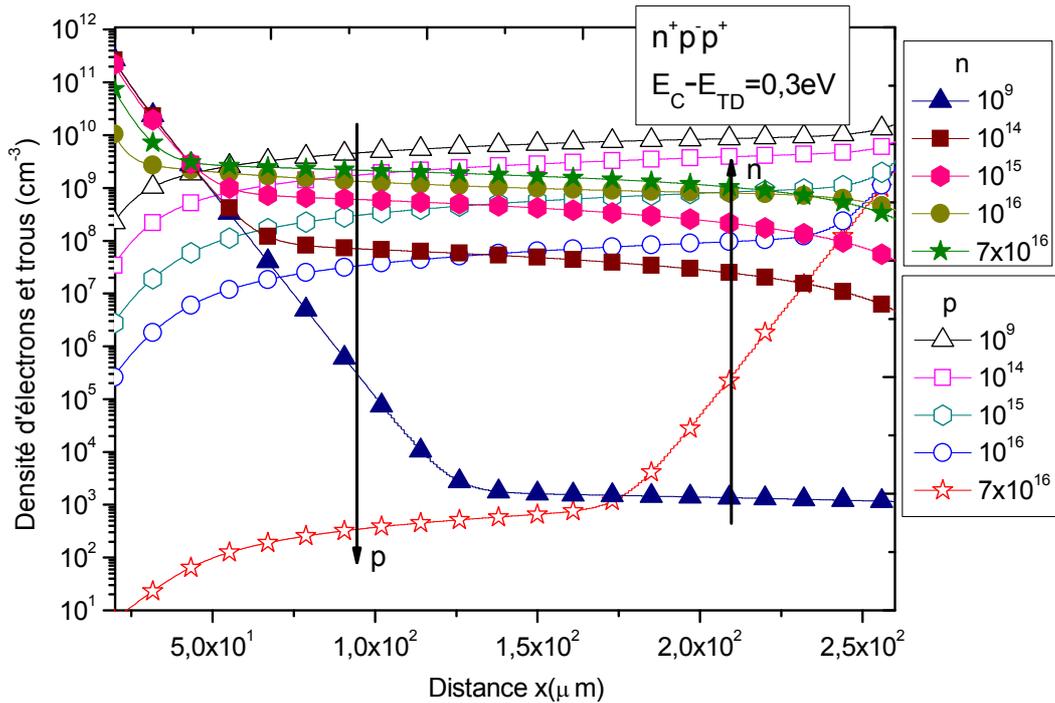


Figure 4.15 : Distribution des électrons et trous pour la structure  $n^+p^-p^+$  pour différentes densités de fluence d'irradiation avec  $V=-1V$  et  $E_C - E_{TD}=0.3 eV$ .

La figure 4.15 représente que la densité des électrons augmente avec l'augmentation de celle des pièges ( $N_{TD}$ ) parce que ces derniers s'ionisent et génèrent plus d'électrons. Les trous diminuent à cause l'augmentation de la densité des électrons génère par le piège donneur. Donc, la capacité diminue avec l'augmentation de la densité de la fluence pour les fluences inférieures à  $10^{16} cm^{-2}$  puis commence à augmenter. A ce point la densité des trous est égale à des électrons, c'est le point d'inversion.

#### 4.4. Calcul des $V_{dep}$ et $N_{eff}$ pour les structures $p^+n^-n^+$ et $n^+p^-p^+$ :

La concentration effective est liée par la tension de déplétion par l'équation suivante (en négligeant  $V_{bi}$  devant la tension de déplétion  $V_{dep}$ ).

$$N_{eff} = \frac{2\epsilon\epsilon_0 V_{dep}}{qd^2} \quad (4.1)$$

Donc la tension de déplétion est linéairement proportionnelle à la densité effective

Le calcul de la tension de déplétion est délicat et dans la plupart des cas elle se détermine à partir de la caractéristique capacité tension. La figure (4.16) montre un exemple de calcul de la tension de déplétion.

La tension de déplétion est généralement déterminée graphiquement par le point d'intersection entre le plateau de saturation ( $C_0$ ) et la pente de la forme linéaire en échelle logarithmique

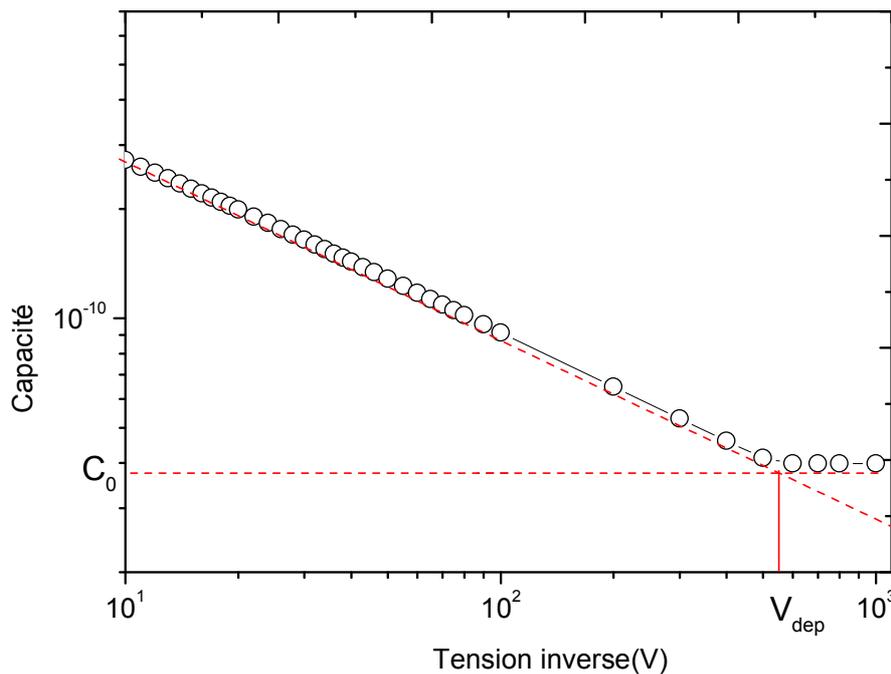


Figure 4.16 : Un exemple de détermination de la tension de déplétion ( $V_{dep}$ ) à partir de la caractéristique C-V en échelle logarithmique. Dans ce cas  $V_{dep} = 560V$ .

#### 4.4.1. L'effet du piège accepteur et centre de recombinaison:

##### 4.4.1.1. La structure $p^+ n^- n^+$ :

On présente dans la figure (4.17), la tension de déplétion qu'est évaluée à partir de la caractéristique capacité tension en fonction de la fluence, pour la structure  $p^+ n^- n^+$ . La concentration effective est évaluée à partir de la tension de déplétion (équation 4.1)

La concentration effective diminue avec l'augmentation du fluence jusqu'au point d'inversion où le type n se transforme au type p. Puis  $N_{eff}$  augmente linéairement avec

l'augmentation du fluence ceci indique que le semi-conducteur de type n, avec l'augmentation de la densité des pièges, la densité des électrons diminue tandis que celle des trous augmente jusqu' au point d'inversion ou la densité des trous est égale à celle des électrons. Lorsque la densité des trous dépasse celle des électrons le semi-conducteur devient de type p.

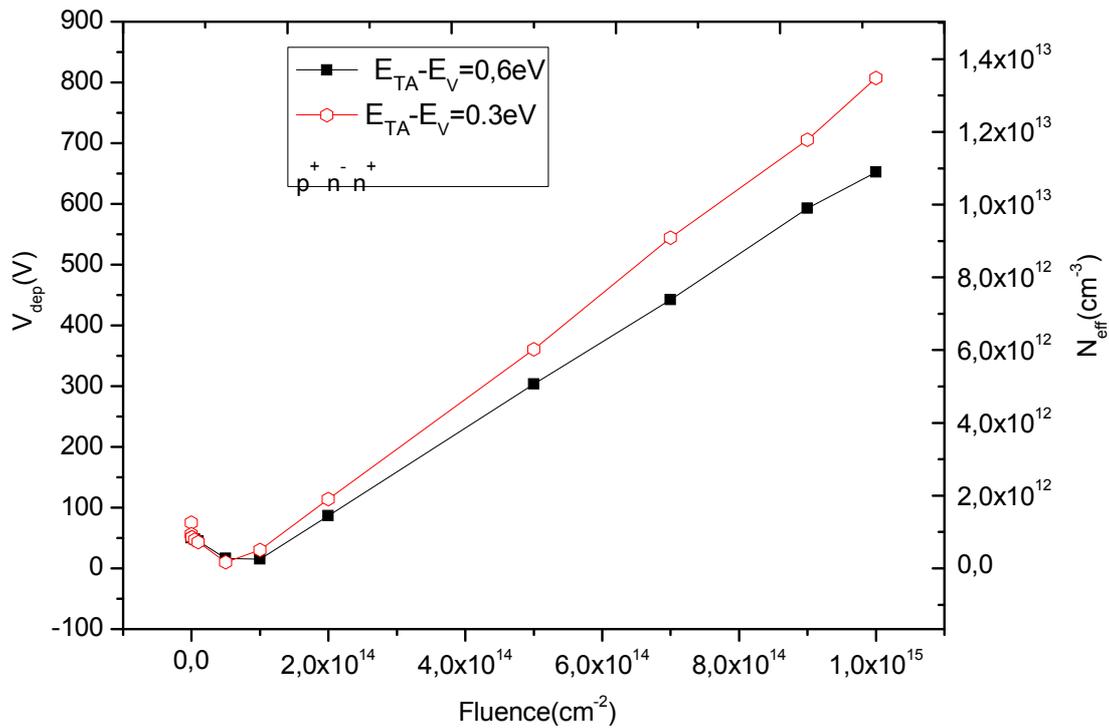


Figure 4.17 : La concentration effective du dopage et la tension de la déplétion en fonction de la fluence d'irradiation. Pour la structure p<sup>+</sup> n<sup>-</sup> n<sup>+</sup>.

La figure 4.18 présente la tension de la déplétion et la concentration effective en fonction de la fluence pour le niveau accepteur peu profond :

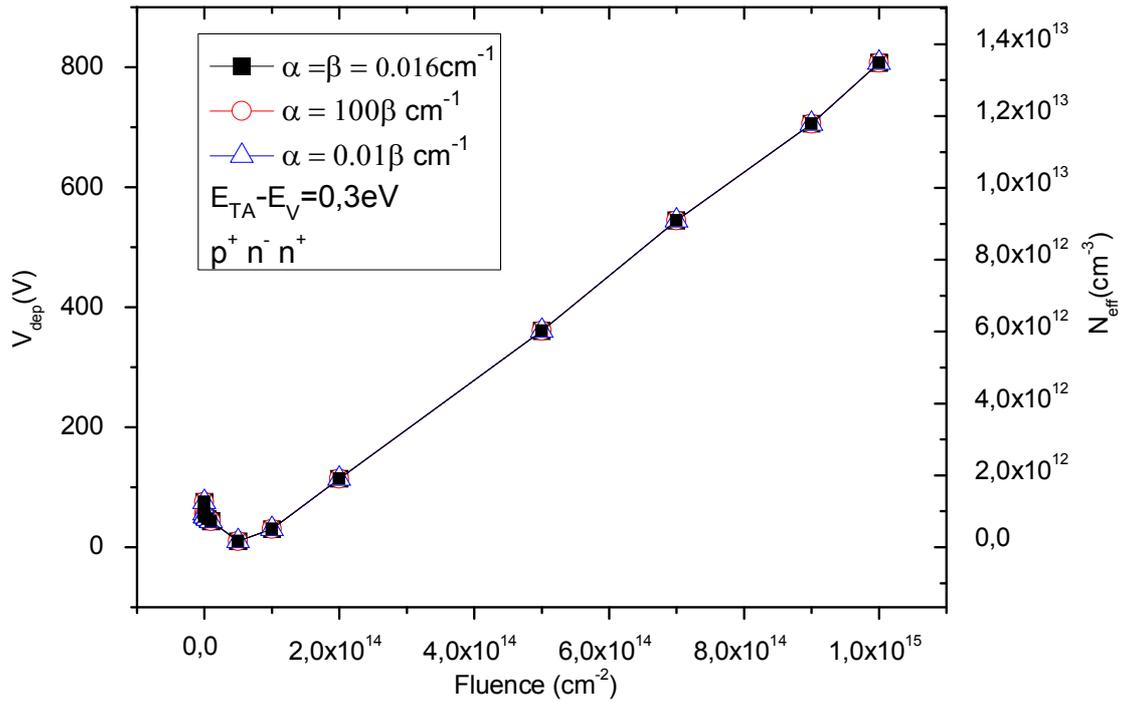


Figure 4.18 : La concentration effective du dopage et la tension de la déplétion en fonction de la fluence pour  $E_{TA}-E_V=0.3\text{eV}$  dans trois cas,  $\alpha = \beta$ ,  $\alpha = 100\beta$  et  $\alpha = \beta$ . En la structure  $p^+ n^- n^+$ .

A partir de la figure 4.18, on remarque que la concentration effective en fonction de la fluence ne change pas avec le changement de la densité du centre de génération –recombinaison.

Donc, on peut dire, dans le cas  $E_{TA}-E_V=0.3\text{eV}$ , que l'effet des centres de génération - recombinaison est très faible.

La tension de la déplétion et la concentration effective en fonction de la fluence pour le niveau accepteur plus profond est présentée dans la figure suivante:

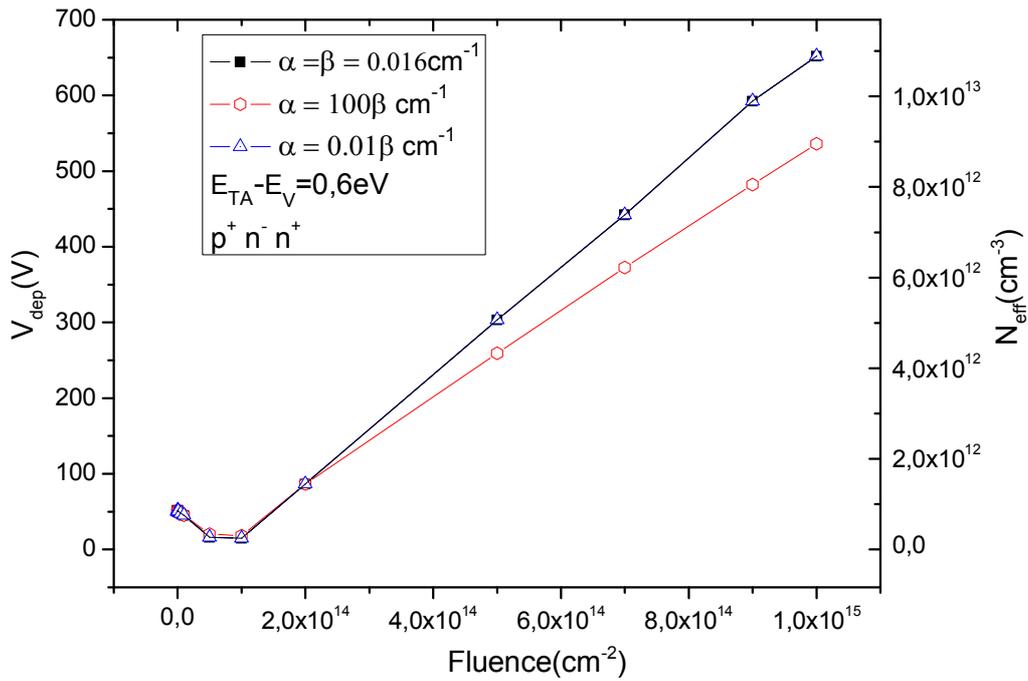


Figure 4.19 : La concentration effective du dopage et la tension de la déplétion en fonction de la fluence pour  $E_{TA}-E_V=0.6\text{eV}$  dans les trois cas,  $\alpha = \beta$ ,  $\alpha = 100\beta$  et  $\alpha = \beta$ . En structure  $p^+ n^- n^+$ .

On remarque ici que l'effet de la densité de centre g-r est plus important lorsque le niveau d'énergie du piège accepteur est loin de la bande de valence  $E_{TA}-E_V= 0.6 \text{ eV}$ .

Ceci est dû au fait que les pièges accepteurs plus profonds sont moins ionisés comme il est indiqué dans la figure 4.20

#### 4.4.1.2. Discussion :

La représentation de la densité du piège ionisé par rapport au niveau d'énergie.

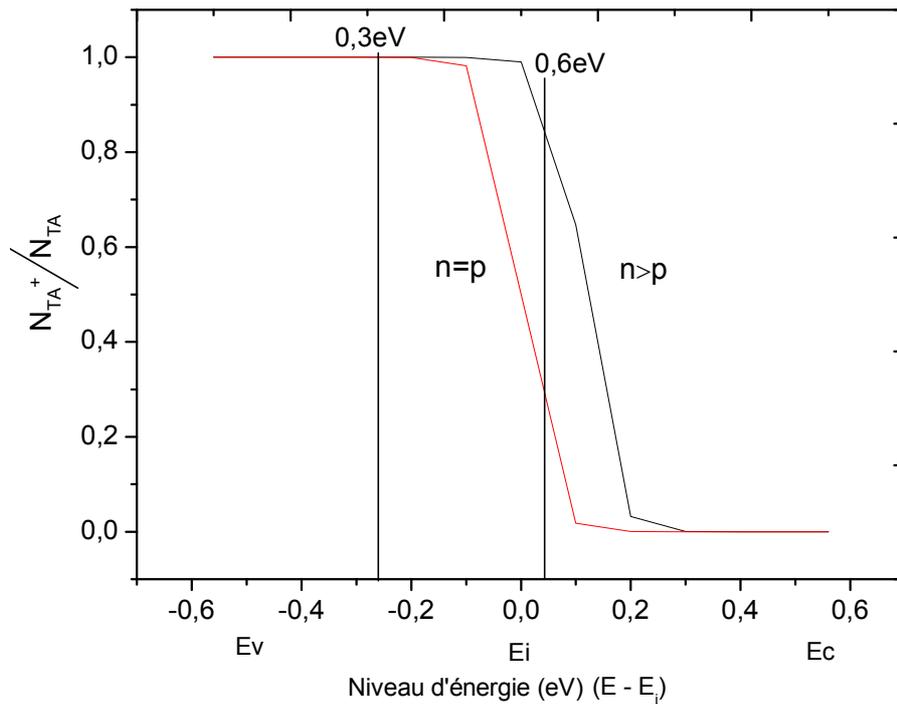


Figure 4.20 : La proportion du piège accepteur ionisé en fonction du niveau d'énergie.

Dans la figure 4.20, la proportion du piège accepteur ionisé est tracée en fonction du niveau d'énergie. Quand la densité du centre  $g-r$  dans un semi-conducteur est plus importante, la concentration des électrons est comparable à la concentration des trous. Donc le piège accepteur est moins ionisée, qui implique que la concentration effective est inférieure. Mais, si le semi-conducteur est de type n le piège accepteur est plus ionisé.

L'effet de la position du piège accepteur à la concentration et la tension de déplétion est présenté dans la figure 4.21 :

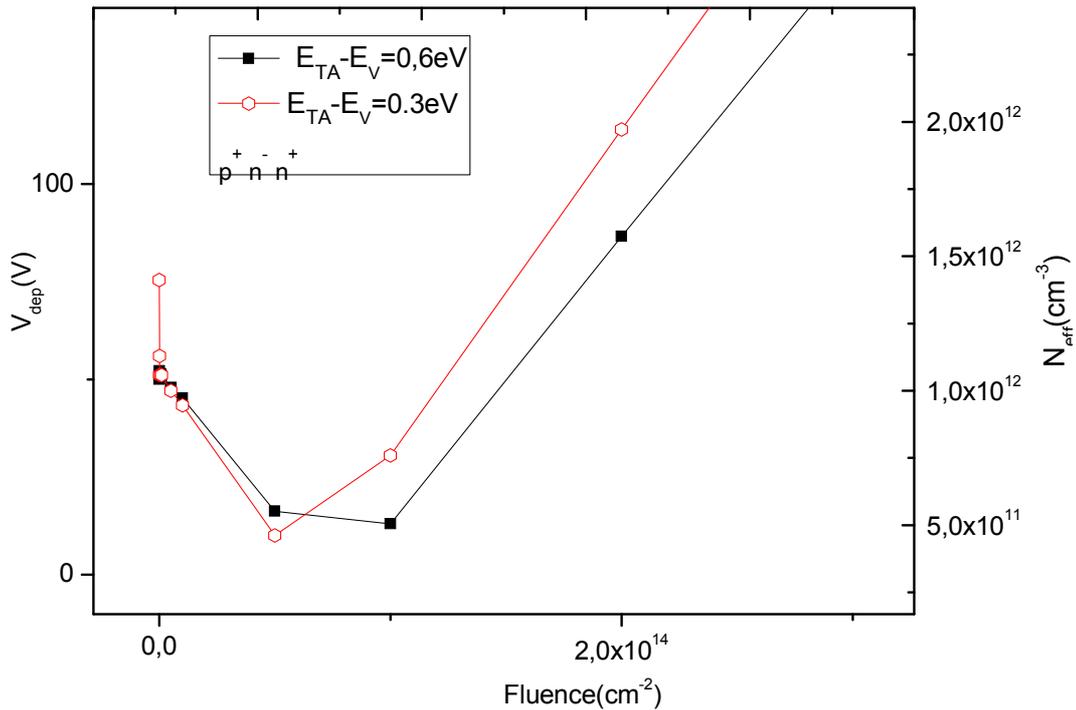


Figure 4.21 : La concentration effective du dopage en fonction de la densité de la fluence pour la structure  $p^+ n^- n^+$  avec  $E_{TA}-E_V=0.3eV$  et  $E_{TA}-E_V=0.6eV$ .

La fluence nécessaire pour inverser la région active est plus élevée pour un piège accepteur plus loin de la bande de valence ( $E_{TA}-E_V=0.6$ ). Ceci est dû au fait que, la densité du piège accepteur est moins ionisée lorsqu' il est loin de la bande de valence (Figure 4.20).

#### 4.4.1.3. La structure $n^+ p^- p^+$ :

La figure 4.22 montre que  $N_{eff}$  et  $V_{dep}$  augmente avec l'augmentation de la fluence. Ceci indique que le semi-conducteur de type p, avec l'augmentation de la densité des pièges accepteurs, la densité des électrons diminue tandis que celle des trous augmente, qui implique que le semi-conducteur devient fortement dopé (p).

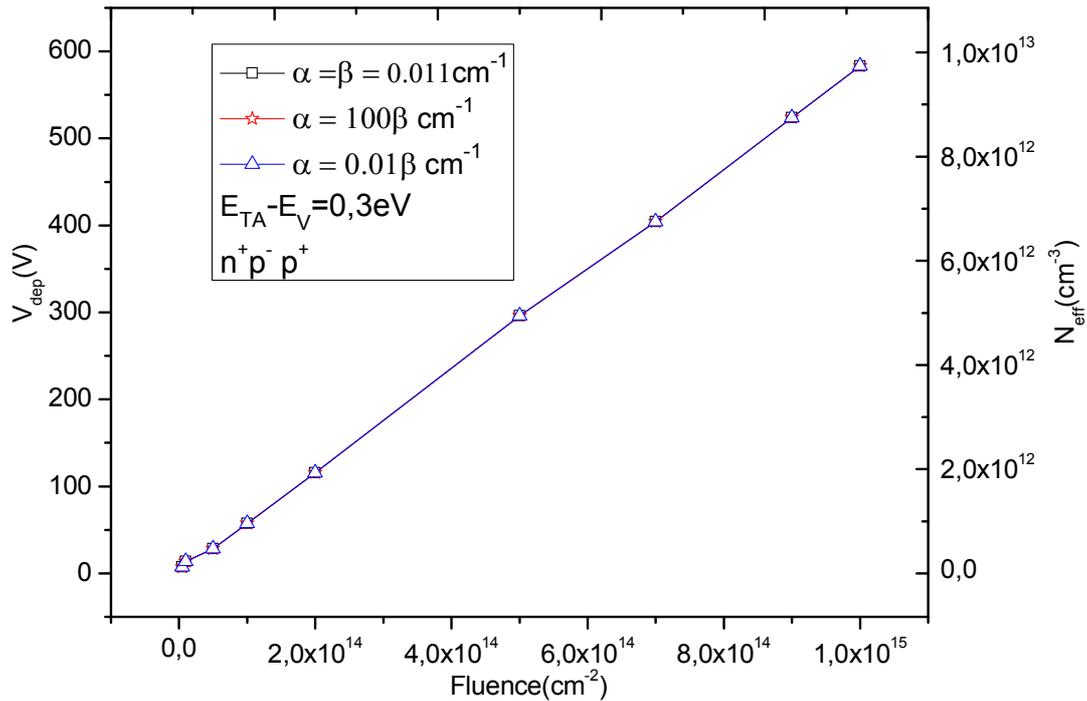


Figure 4.22 : La concentration effective de dopage et la tension de déplétion en fonction de la fluence pour la structure  $n^+ p^- p^+$  avec  $E_{TA}-E_V=0.3\text{eV}$  dans trois cas,  $\alpha = \beta$ ,  $\alpha = 100\beta$  et  $\alpha = 0.01\beta$ .

La figure 4.23 présente la tension de déplétion et la concentration effective en fonction de la fluence pour le niveau accepteur plus profond :

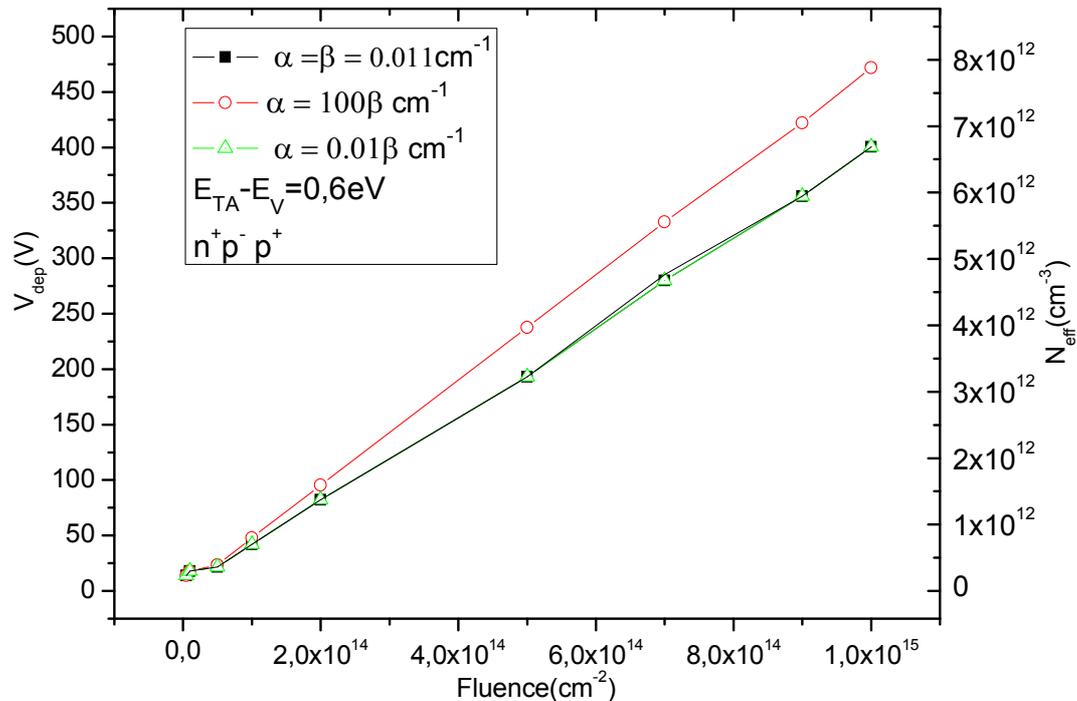


Figure 4.23 : La concentration effective de dopage et la tension de déplétion en fonction de la fluence pour la structure  $n^+ p^- p^+$  avec  $E_{TA}-E_V=0.6\text{eV}$  dans trois cas,  $\alpha = \beta$ ,  $\alpha = 100\beta$  et  $\alpha = 0.01\beta$ .

A partir des figures 4.22 et 4.23, on remarque que l'effet de la densité de centre g-r est plus important lorsque le niveau d'énergie de piège accepteur est loin de la bande de valence ( $E_{TA}-E_V=0.6$ ).

La figure 4.24 présente les différents effets entre les niveaux profonds et peu profonds :

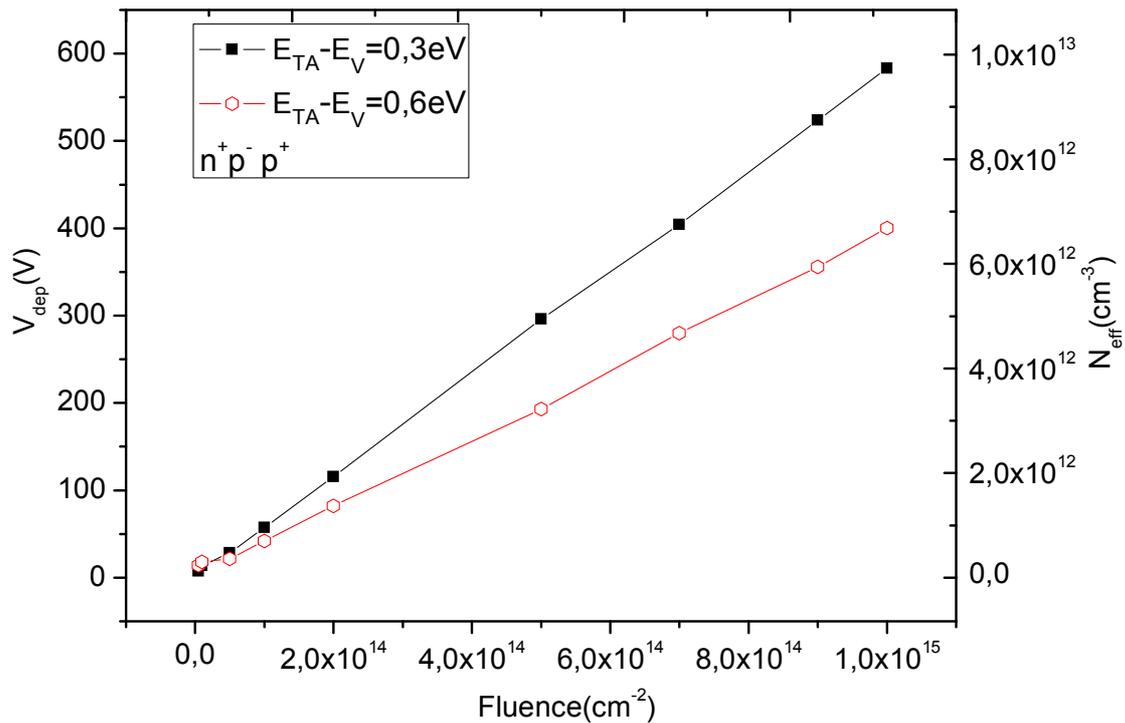


Figure 4.24 : La concentration effective de dopage en fonction de la densité de la fluence pour la structure n<sup>+</sup> p<sup>-</sup> p<sup>+</sup> avec  $E_{TA}-E_V=0.3\text{eV}$  et  $E_{TA}-E_V=0.6\text{eV}$ .

#### 4.4.1.4. Discussion :

Pour expliquer la différence entre les deux niveaux 0.3ev et 0.6ev, il est nécessaire de représenter la densité du piège accepteur ionisé en fonction du niveau d'énergie :

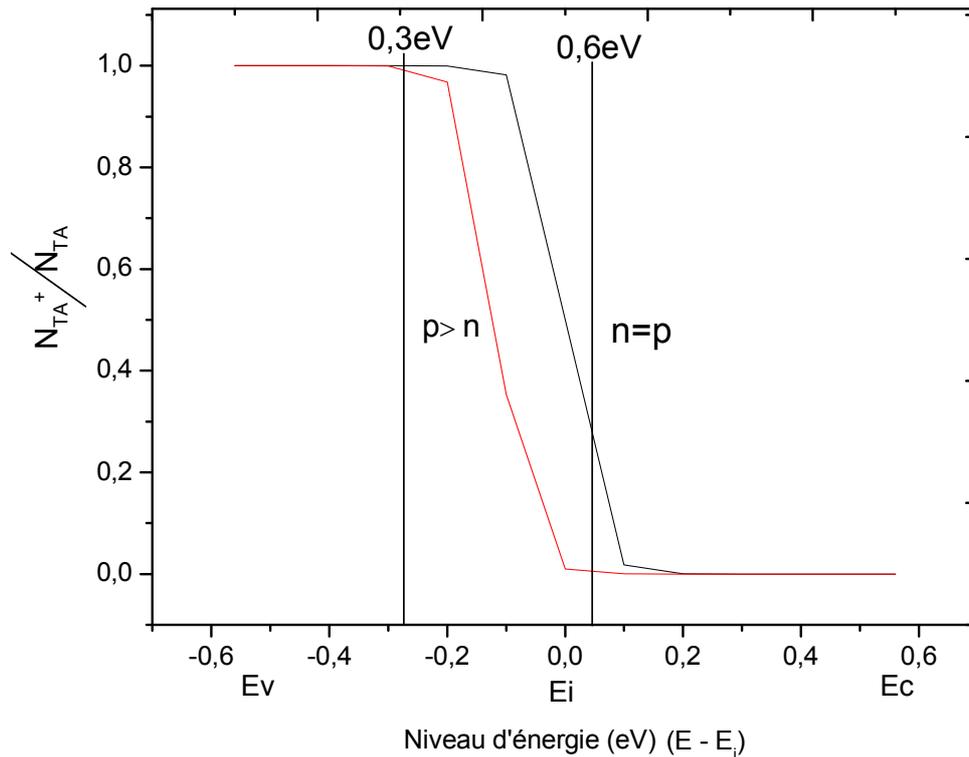


Figure 4.25 : La proportion du piège accepteur ionisé en fonction du niveau d'énergie.

A partir de cette figure (4.25), pour le semi-conducteur de type p, l'ionisation du piège accepteur est moins lorsqu'il est loin de la bande de valence. Lorsque la densité de centre g-r est importante, le piège accepteur est plus ionisé, donc la concentration effective est plus élevée.

On a fait une comparaison entre les deux structures  $n^+ p^- p^+$  et  $p^+ n^- n^+$  :

A partir de la figure au-dessous (4.26), on voit que la pente de la forme linéaire de la structure  $p^+ n^- n^+$  est plus élevée, c'est-à-dire la variation de la tension de déplétion dans cette structure est plus important que celle de la structure  $n^+ p^- p^+$

On résulte que l'effet de la fluence en la structure  $p^+ n^- n^+$  est plus élevée donc la dureté est plus basse que la structure  $n^+ p^- p^+$ .

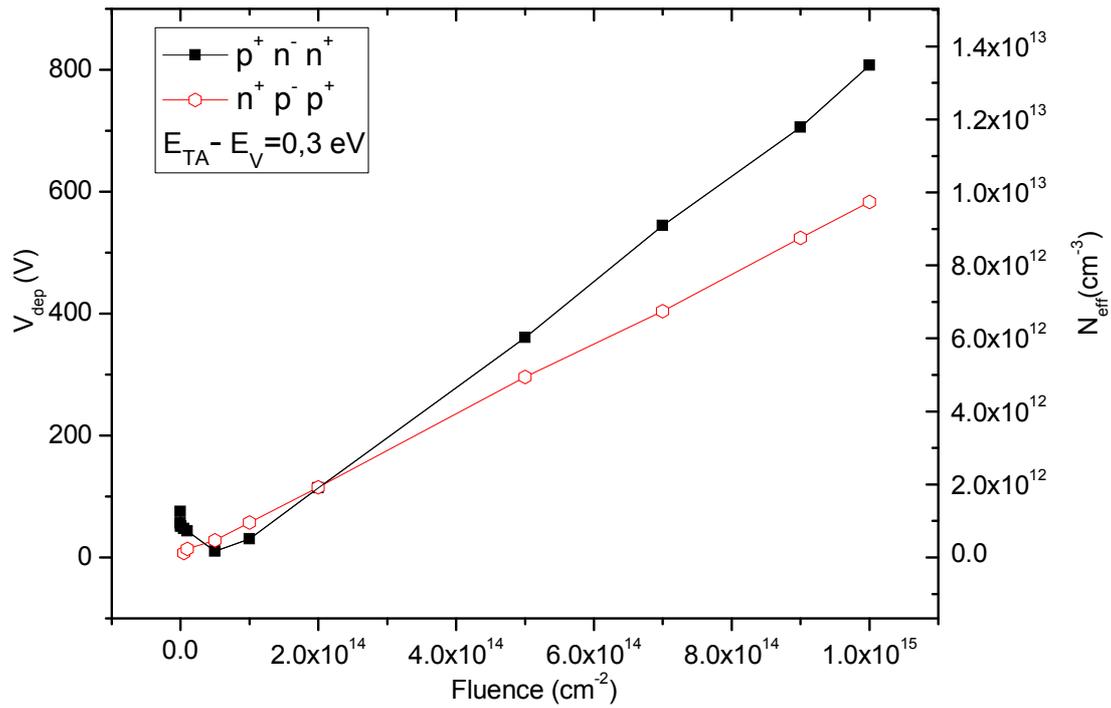


Figure 4.26 : Comparaison entre les structures  $p^+ n^- n^+$  et  $n^+ p^- p^+$ , pour  $E_{TA}-E_V=0.3\text{eV}$ .

#### 4.4.2. L'effet du piège donneur et centre de recombinaison:

##### 4.4.2.1. La structure $p^+ n^- n^+$ :

La tension de déplétion et la concentration effective en fonction de la fluence pour le niveau donneur peu profond :

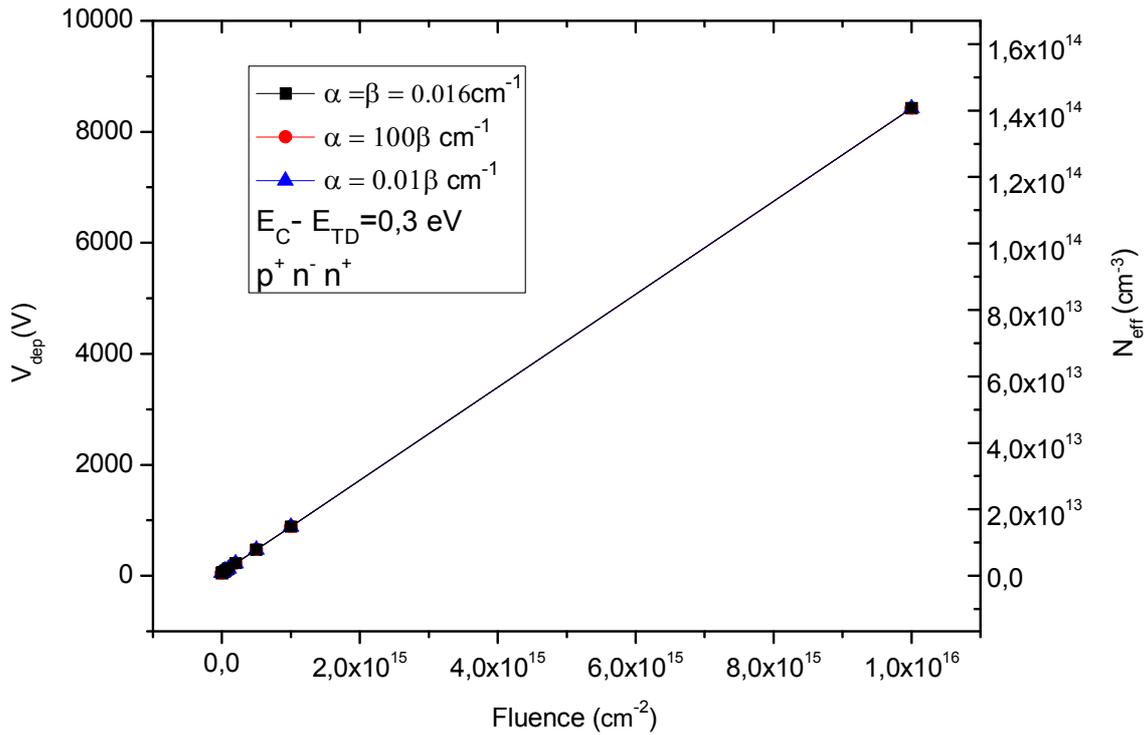


Figure 4.27 : La concentration effective de dopage en fonction de la densité de la fluence pour la structure  $p^+ n^- n^+$  et pour  $E_C - E_{TD} = 0.3$  eV.

La figure 4.27 montre que la concentration effective de dopage et la tension de déplétion augmentent avec l'augmentation de la fluence (piège donneur). Donc, la zone active devient fortement dopée de type n.

#### 4.4.2.2. La structure $n^+ p^- p^+$ :

La tension de déplétion et la concentration effective en fonction de la fluence :

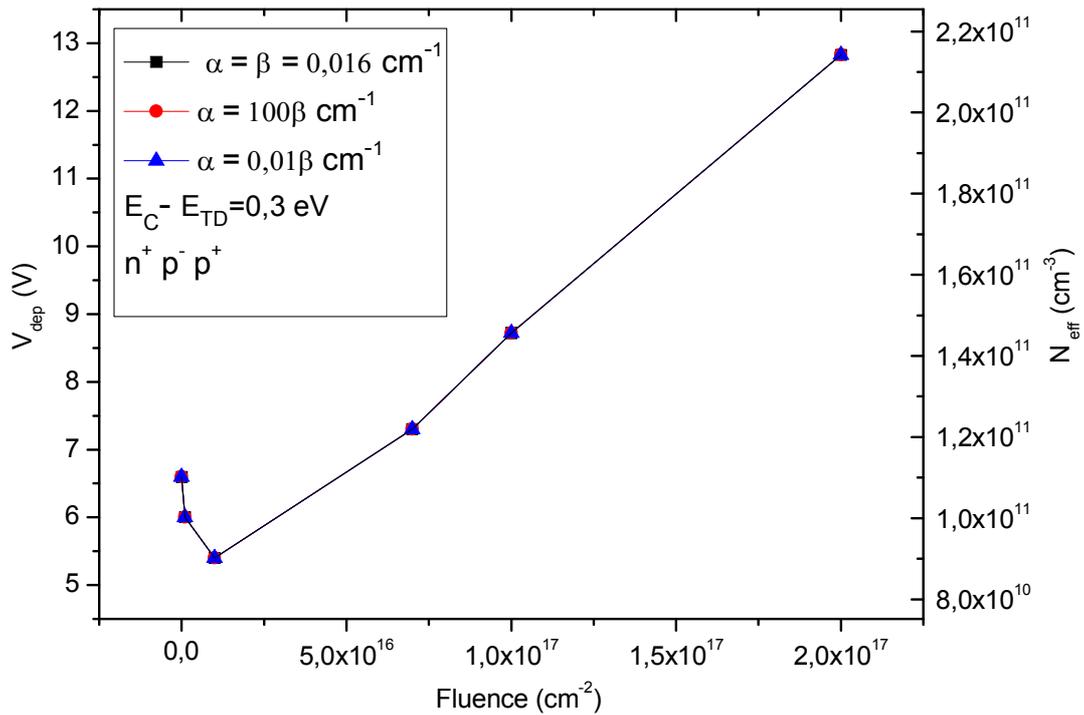


Figure 4.28 : La concentration effective de dopage en fonction de la densité de la fluence pour la structure  $n^+ p^- p^+$  et pour  $E_C - E_{TD} = 0.3$  eV.

La figure 4.28 montre que  $N_{\text{eff}}$  et  $V_{\text{dep}}$  décroît avec l'augmentation de la fluence jusqu'au points d'inversion ( $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) où ils commencent à remonter, c'est-à-dire la région active de type p devient de type n. A partir des figures 4.27 et 4.28, l'effet du centre g-r est négligeable.

#### 4.4.2.3. Discussion :

Pour expliquer ces phénomènes, la proportion d'ionisation du piège donneur en fonction du niveau d'énergie est présentée dans la figure 4.29 :

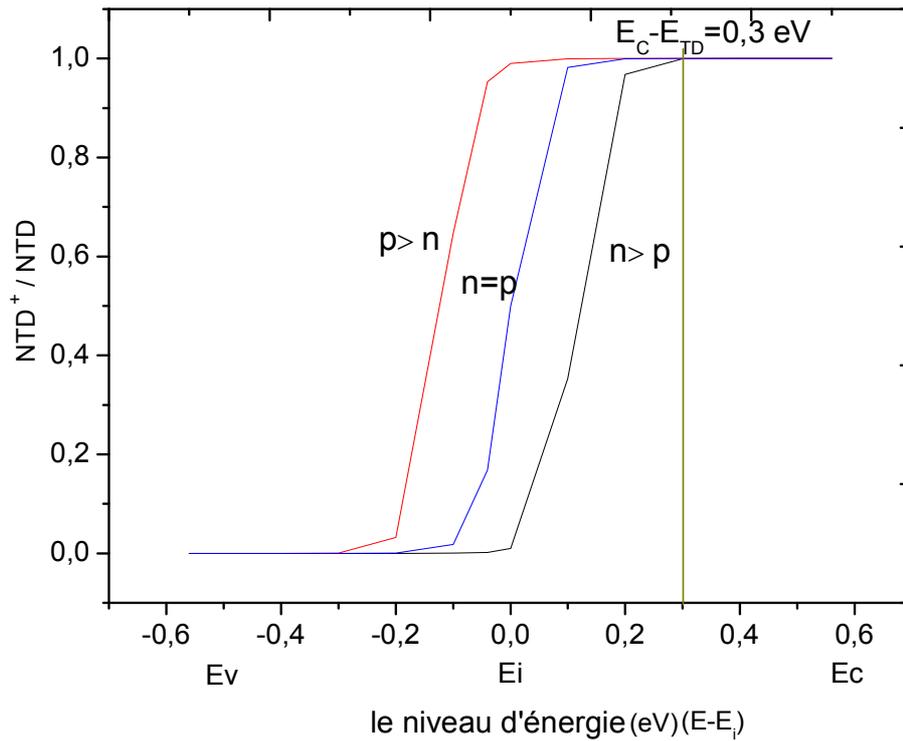


Figure 4.29 : La proportion du piège donneur ionisé en fonction du niveau d'énergie.

Si le niveau d'énergie du piège donneur est loin de la bande de conduction, l'ionisation de ce piège en semi-conducteur de type n est inférieure à semi-conducteur intrinsèque (la densité du centre g-r est plus importante), mais dans le type p est supérieure. Pour  $E_C - E_{TD} = 0.3$  eV, l'ionisation du piège donneur est maximale en tous les types de semi-conducteur. Donc, l'effet du centre g-r est très faible.

A partir les figures 4.27 et 4.28, pour  $E_C - E_{TD} = 0.3$  eV, on vut que la variation de la tension de déplétion dans la structure  $p^+ n^- n^+$  est plus élevé que celle de la structure  $n^+ p^- p^+$ . Donc la dureté plus basse que la structure  $n^+ p^- p^+$ .