

Liste des figures

Figure II-1.....	
Figure II-2.....	
Figure II-3.....	
Figure II-4.....	
Figure II-5.....	
Figure II-6.....	
Figure II-7.....	
Figure II-8.....	
Figure II-9.....	
Figure II-10.....	
Figure II-11.....	
Figure III-1.....	
Figure III-2.....	
Figure III-3.....	
Figure III-4.....	
Figure III-5.....	
Figure III-6.....	
Tableau II-1.....	
Tableau II-2.....	
Tableau III-1.....	
Tableau III-2.....	
Tableau III-3.....	
Tableau III-4.....	

Liste des tableaux

NOMENCLATURE

Symbole

Définition

$D(cm^2/s)$	Coefficient de diffusion des porteurs de charge dans la base de la photopile
A_m, b_m	Coefficients dans l'expression du taux de génération
K_m	Constante dans l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge
$\delta (cm^{-3})$	Densité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile
$H(cm)$	Epaisseur de la base de la photopile
$L(cm)$	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge dans la base de la photopile
N	Nombre de soleils
$V_{ph}(V)$	Phototension
$x(cm)$	Profondeur dans la base, comptée à partir de la jonction ($x = 0$)
$G(N/cm^3 s)$	Taux de génération des porteurs de charge
$T(K)$	Température
$S_f(cm/s)$	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction
$S_b(cm/s)$	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en face arrière de la photopile
C_1, C_2	Constantes dans l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge
$q (e)$	Charge électrique élémentaire
$J_{ph}(A/cm^2)$	Densité de photocourant
N_b	Taux de dopage de la base en atomes d'impureté
$N_i (cm^{-3})$	Concentration intrinsèque des porteurs dans la base
$V_{co} (V)$	Phototension de circuit ouvert
$J_{cc}(A/cm^2)$	Densité de courant de court circuit

Nomenclature

Sf_0 (cm.s ⁻¹)	Vitesse de recombinaison intrinsèque des porteurs minoritaires à la jonction
τ (s)	Durée de vie des porteurs minoritaires de charge dans la base de la photopile
Φ (cm ⁻²)	Flux des protons

Introduction générale

Depuis l'existence de l'homme le soleil et son énergie ont été au centre de ses préoccupations. Cette attitude s'est renforcée après la crise du pétrole de 1973 qui a touché les pays industrialisés. Cette crise a obligé les scientifiques à réfléchir sur le danger qui guette l'humanité si on ne trouve pas une énergie qui peut se substituer aux énergies fossiles épuisables. Ainsi l'énergie solaire inépuisable et disponible en grande quantité donne une solution satisfaisante pour ce problème.

La conversion photovoltaïque découverte par le physicien français A. BECQUEREL (1839) reste encore le seul moyen efficace de convertir directement la lumière en énergie électrique.

L'élément de base de cette transformation est la cellule photovoltaïque ou cellule solaire ou encore photopile. Cette transformation fait appel aux propriétés des semi-conducteurs utilisés dans l'industrie électronique, notamment quand ils sont dopés en jonction p-n.

Quand une cellule solaire est exposée à un éclairage, il se produit une génération de paires électron-trou. L'existence du champ électrique qui résulte de la mise en contact de deux matériaux dopés différemment à la jonction permet de séparer ces charges électriques de signes contraires (positives et négatives) et d'obtenir un courant.

Ces porteurs photogénérés « succombent » à différents processus de recombinaison lors de leur diffusion au sein de la photopile ; ces phénomènes de recombinaison réduisent la collecte des porteurs de charge et par conséquent le rendement de la cellule solaire. Ainsi, différentes techniques de caractérisation [1-6] ont été mises en œuvre pour évaluer les effets des différentes imperfections (impuretés non contrôlées, dislocations, joints de grain ...) sur la photopile, pour un contrôle de qualité, ce qui permet d'améliorer certaines étapes de la fabrication pour conduire à un meilleur rendement de la photopile.

En environnement radiatif spatial (satellites, sondes spatiales, stations orbitales), les photopiles solaires sont soumises à différents rayonnements ionisants qui interagissent avec elles en y créant des dommages irréversibles ou non ; les irradiations créent des défauts simples (lacune et site interstitiel) ou plus complexes (dislocation) qui modifient leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques. La prévision de ces évolutions a fait et fait toujours l'objet d'une recherche fondamentale et appliquée [7-9].

Dans ce travail, nous étudions en régime statique l'effet de l'irradiation sur les paramètres de recombinaison d'une photopile bifaciale successivement éclairée par une lumière multispectrale sur la face avant puis sur la face arrière.

Dans le chapitre I, nous présentons une étude bibliographique de l'effet de l'irradiation sur les paramètres de recombinaison des photopiles.

Dans le chapitre II, nous faisons une étude théorique de la photopile sous irradiation.

Le chapitre III enfin est consacré aux résultats expérimentaux et discussions.

Chapitre I

Etude bibliographique

Introduction

La prévision de ces évolutions a fait et fait toujours l'objet d'une recherche fondamentale et appliquée. Par ailleurs, l'irradiation est un moyen utilisé pour modifier volontairement les matériaux: durcissement des polymères, modifications des propriétés électroniques des semiconducteurs...

Les matériaux inertes subissent également des irradiations dans différents environnements. C'est dans les réacteurs nucléaires que les matériaux subissent les irradiations les plus importantes. Dans un matériau, les irradiations créent des défauts simples (lacune et site interstitiel) ou plus complexes (dislocation) qui modifient leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques. La prévision de ces évolutions a fait et fait toujours l'objet d'une recherche fondamentale et appliquée. Par ailleurs, l'irradiation est un moyen utilisé pour modifier volontairement les matériaux: durcissement des polymères, modifications des propriétés électroniques des semiconducteurs...

En environnement radiatif spatial (satellites, sondes spatiales, stations orbitales), les photopiles solaires sont soumises à différents rayonnements ionisants qui interagissent avec elles en y créant des dommages irréversibles ou non. Il est donc de première importance de pouvoir maîtriser les différents processus qui conduisent à la dégradation des photopiles solaires dans l'environnement spatial.

L'irradiation désigne également l'action d'exposer (volontairement ou accidentellement) un organisme, une substance, à l'action de rayonnements. Ces radiations, que nos sens ne peuvent pas détecter, perturbent le fonctionnement des cellules vivantes. Les molécules comme l'ADN et les protéines constituant les cellules subissent des dégâts (rupture de liaisons chimiques, modifications de la structure...). Face à cette agression, les systèmes de défense dont disposent toutes les cellules vont tenter de réparer les dommages. Dans la plupart des cas, cette réparation sera efficace. Si les dégâts sont trop importants, l'élimination de la cellule est opérée par des processus de mort cellulaire (par apoptose par exemple). Le danger provient des réparations imparfaites qui peuvent aboutir à des cellules déclenchant un cancer des années après l'irradiation. À très forte dose d'irradiation, les systèmes de défense ne peuvent plus faire face à cette importante mortalité des cellules perturbant les fonctions vitales pouvant aller jusqu'au décès. Le problème des très faibles doses d'irradiation est toujours débattu. Mais il faut savoir que tous les organismes vivants sont soumis depuis toujours aux rayonnements cosmiques et telluriques, les systèmes de réparation des dégâts d'irradiation sont particulièrement efficaces.

Les normes internationales se basent sur le principe que le risque pour la santé est proportionnel à la dose reçue et que *toute dose de rayonnement comporte un risque cancérogène et génétique* (CIPR 1990). Bien qu'aucune dose ne soit inoffensive, des seuils sont admis par les normes internationales. L'exposition à la **radioactivité** artificielle (y compris les essais nucléaires) a **induit** de nombreux cancers dans le **monde**. Les **données** officielles des Nations unies parlent de 1,17 millions de morts depuis 1945. Le Comité Européen sur le Risque de l'Irradiation annonce le **chiffre** de 61,1 millions de morts.

Par analogie, le terme d'irradiation est également rencontré dans les domaines suivants :

- En anatomie, l'irradiation est une disposition rayonnée des **fibres**, des vaisseaux.
- En physiologie, l'irradiation est la propagation d'une sensation douloureuse à partir de son **point** d'origine vers les régions voisines.
- En linguistique, l'irradiation est l'influence exercée par le radical d'un mot sur le sens d'un préfixe ou d'un suffixe.

- L'irradiation désigne un déploiement en rayons à partir d'un centre, ou de façon figurée, la propagation, ou la [diffusion](#) par exemple d'un fait ou d'un sentiment, dans toutes les directions.

On utilise l'irradiation (parfois appelée ionisation) pour stériliser divers objets (la plupart dans le secteur médical). Elle est également utilisée dans le secteur agro-alimentaire afin de stériliser les aliments et de les conserver plus longtemps. Ceci est sujet à controverse, car il pourrait y avoir des risques pour la santé.

Les matériaux inertes subissent également des irradiations dans différents environnements. C'est dans les réacteurs nucléaires que les matériaux subissent les irradiations les plus importantes. Dans un matériau, les irradiations créent des défauts simples ([lacune](#) et [site interstitiel](#)) ou plus complexes ([dislocation](#)) qui modifient leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques. La prévision de ces évolutions a fait et fait toujours l'objet d'une recherche fondamentale et appliquée. Par ailleurs, l'irradiation est un moyen utilisé pour modifier volontairement les matériaux: durcissement des polymères, modifications des propriétés électroniques des semiconducteurs...

On utilise l'irradiation (parfois appelée ionisation) pour stériliser divers objets (la plupart dans le secteur [médical](#)). Elle est également utilisée dans le secteur [agro-alimentaire](#) afin de [stériliser les aliments et de les conserver plus longtemps](#). Ceci est sujet à controverse, car il pourrait y avoir des risques pour la [santé](#).

Par [analogie](#), le terme d'irradiation est également rencontré dans les domaines suivants :

- L'**irradiation**, dans le domaine de la [physique](#), est une émission de [rayons](#) (notamment lumineux) d'une particule; ou une propagation par [rayonnement](#).
- En [anatomie](#), l'irradiation est une disposition rayonnée des fibres, des vaisseaux.
- En [physiologie](#), l'irradiation est la propagation d'une sensation douloureuse à partir de son point d'origine vers les régions voisines.
- En [linguistique](#), l'irradiation est l'influence exercée par le [radical](#) d'un mot sur le sens d'un [préfixe](#) ou d'un [suffixe](#).
- L'irradiation désigne un déploiement en [rayons](#) à partir d'un centre, ou de façon figurée, la propagation, ou la diffusion par exemple d'un fait ou d'un [sentiment](#), dans toutes les [directions](#).

Irradiations de matériaux [\[modifier\]](#)

Les matériaux inertes subissent également des irradiations dans différents environnements. C'est dans les réacteurs nucléaires que les matériaux subissent les irradiations les plus importantes. Dans un matériau, les irradiations créent des défauts simples ([lacune](#) et [site interstitiel](#)) ou plus complexes ([dislocation](#)) qui modifient leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques. La prévision de ces évolutions a fait et fait toujours l'objet d'une recherche fondamentale et appliquée. Par ailleurs, l'irradiation est un moyen utilisé pour modifier volontairement les matériaux: durcissement des polymères, modifications des propriétés électroniques des semiconducteurs...

On utilise l'irradiation (parfois appelée ionisation) pour stériliser divers objets (la plupart dans le secteur [médical](#)). Elle est également utilisée dans le secteur [agro-alimentaire](#) afin de

[stériliser les aliments et de les conserver plus longtemps](#). Ceci est sujet à controverse, car il pourrait y avoir des risques pour la [santé](#).

I.1 ANALYSIS AND MODELLING OF ELECTRON AND PROTON IRRADIATION EFFECTS IN Cu(In,Ga)Se₂ SOLAR CELLS [7]

Une étude théorique et expérimentale des defaults créés suite à une irradiation d'une photopile de type CIGS par un flux de protons et des électrons est faite.

A partir d'une spectroscopie d'impédance et de l'analyse des dégradations induites sur les propriétés de la photopile, le taux d'irradiation des défauts pour les CIGS suite à une irradiation par les protons aussi bien pour des électrons a été trouvé

La résistance du CIGS par rapport au bombardement par les électrons est nettement meilleure à celle par les protons ; de plus bas d'un bombardement par des électrons seule la tension de circuit ouvert est détériorée alors que dans le cas du bombardement par les protons, toutes les valeurs montrent que le CIGS semble 1000 fois plus résistant à l'irradiation par les électrons que par les protons.

I.2 INVESTIGATIONS ON THE CARRIER REMOVAL EFFECT AND DEEP LEVEL DEFECTS IN PROTON IRRADIATED InGaP SPACE SOLAR CELLS [8]

Les auteurs présentent une étude théorique et expérimentale sur les effets de l'irradiation par des protons d'une photopile de type n⁺/p⁻ InGaP

Ces effets incluent l'extraction des porteurs de charge comme la création de défauts. Ces défauts sont analysés par spectroscopie de type DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy). Cette analyse montre la création de centre de recombinaison aussi pour les porteurs majoritaires que minoritaires : HP1 (E_v+0,95ev) ; HP2 (E_v+0,75ev) H2 (E_v+0,55ev) et EP1 (E_v-0,54ev).

Les auteurs ont montré que les niveaux HP1, HP2 et H2 sont effectivement des centres de recombinaison. Dans le cas de H2, il a été prouvé qu'un recuit réduit sensiblement l'activité de ce centre par rapport aux porteurs minoritaires.

I.3 RADIATION RESPONSE ANALYSIS OF TRIPLE JUNCTION InGaP/InGaAs/Ge SOLAR CELLS [9]

Des photopiles tandem à double et triple jonction InGaP/InGaAs/Ge avec différentes combinaisons stœchiométriques et différentes structures de jonctions internes ont été étudiées sous irradiation par des protons d'énergie ≥ 1 Mev.

Les réponses de ces photopiles ont été étudiées à travers des mesures de tension et de rendement quantique et les auteurs ont analysé à travers les résultats obtenus les mécanismes de bases qui gouvernent la réaction de ces photopiles et surtout les combinaisons les plus intéressantes.

La sous jonction à base de Ge produit en réalité deux fois plus de courant que les deux autres sous jonctions dans la 3^{ème} jonction ; ce courant augmenterait avec l'irradiation de sorte que les propriétés de la 3^{ème} jonction pour que les facteurs de forme soient meilleurs en fin de vie par rapport aux autres types de jonctions. L'ajout d'irradiation dans la cellule intermédiaire ne réduit pas la résistance à l'irradiation par les protons et il en est de même pour l'ajout d'une couche active de germanium. Dans tous les cas toutes les mesures ont montré une plus forte décroissance du courant généré puis de la phototension et dans une moindre mesure du facteur de forme.

1.4 DISPLACEMENT DAMAGE DOSE ANALYSIS OF PROTON IRRADIATED CIGS SOLAR CELLS ON FLEXIBLE SUBSTRATES [10]

L'analyse de l'irradiation par des protons de photopile de type CIGS $\text{CuIn}(\text{Ga})\text{Se}_2$ est présentée. L'étude montre que les cellules sur substrats flexibles présentent des résultats semblables à celles sur verre en termes de dose de dommage (Dd).

Les caractéristiques I-V sous obscurité ont été présentées avant et après irradiation ; elles ont montré que le comportement de la photopile dépendait alors de la tension de polarisation, car pour des faibles tensions de polarisation, le courant d'obscurité est réduit (après irradiation) tandis que pour les tensions de polarisation plus grandes, c'est le contraire : le courant d'obscurité augmente après irradiation.

La caractéristique P-V montre que la puissance maximale diminue avec le flux de protons incidents pour cinq types différents de photopile CIGS.

Le tracé des points de puissance maximale en fonction de la dose de dommage Dd permet de trouver une relation empirique $\frac{P}{P_0} = 1 - C \cdot \log \left\{ 1 + \frac{D_d}{D_x} \right\}$ avec P_0 : puissance maximale avant irradiation, P celle après irradiation, C et D_x des coefficients obtenus par ajustement logarithmique.

Cette étude montre que la dégradation primaire causée par l'irradiation par les protons est la réduction de la tension de circuit ouvert due à l'augmentation du courant d'obscurité.

1.5 BIFACIAL SILICON SOLAR CELL DEGRADATION DUE TO LOW ENERGY PROTON BOMBARDMENT: EXPERIMENTAL AND MODELING [11]

Une étude expérimentale de l'effet de l'irradiation sur des photopiles bifaciales est présentée. L'analyse est faite à partir de mesures de rendement quantique interne et les paramètres de recombinaison sont calculés en considérant une répartition non uniforme des défauts dans la profondeur de la base de la photopile.

Ces résultats ont montré la non dépendance du coefficient de dommage par rapport à l'énergie des protons tant que cette énergie est inférieure à 0,46MeV.

La variation relative du courant de court circuit avec l'irradiation est beaucoup plus importante que celle de la tension de circuit ouvert, pour le même mode d'éclairement.

Quant à la puissance maximale, celle-ci est plus sensible à l'irradiation surtout pour un éclairement par la face arrière de la photopile.

Conclusion



Chapitre II

Etude théorique de la photopile sous irradiation

II. 1 INTRODUCTION

L'irradiation, dans le domaine de la physique, est une émission de rayons (notamment lumineux) d'une particule; ou une propagation par rayonnement. Les matières radioactives sont constituées d'atomes instables qui, en se désintégrant, émettent des radiations. Il ne faut pas confondre irradiation et radioactivité : moyennant le fait que les particules ne sont pas de trop grande énergie (moins que 10 MeV pour les électrons par exemple), l'irradiation ne rend pas la matière radioactive. Les matériaux inertes subissent également des irradiations dans différents environnements. C'est dans les réacteurs nucléaires et dans certaines régions de l'espace que les matériaux subissent les irradiations les plus importantes. Dans un matériau, les irradiations créent des défauts simples (lacune et site interstitiel) ou plus complexes (dislocation) qui modifient leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques.

En environnement radiatif spatial (satellites, sondes spatiales, stations orbitales), les photopiles solaires sont soumises à différents rayonnements ionisants qui interagissent avec elles en y créant des dommages irréversibles ou non. Il est donc de première importance de pouvoir maîtriser les différents processus qui conduisent à la dégradation des photopiles solaires dans l'environnement spatial. Notre contribution dans ce chapitre sera de simuler la conséquence principale de l'irradiation, c'est-à-dire la détérioration du coefficient de diffusion sur les caractéristiques de la photopile.

La photopile étudiée est une photopile bifaciale au silicium de type n-p-p+ dont la structure est représentée ci-dessous :

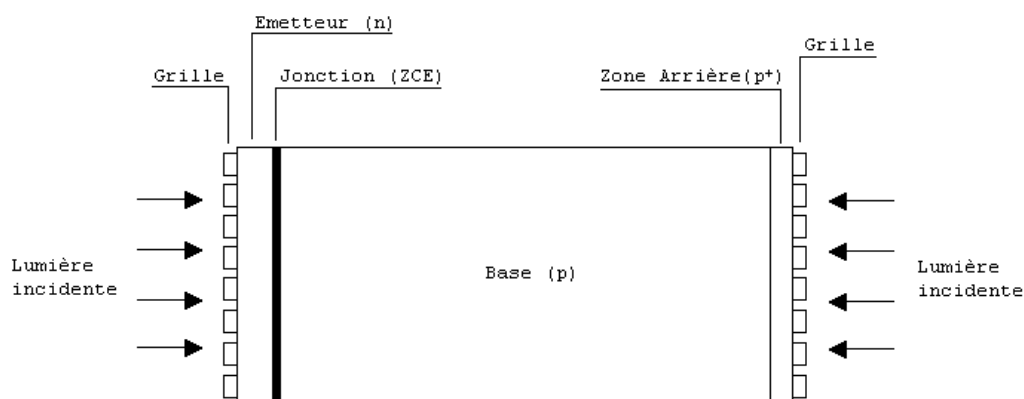


Figure II-1 : Photopile bifaciale

Cette photopile comprend quatre parties essentielles :

- **l'émetteur de type (n+)** : l'épaisseur est faible (0,5 à 1 μm), elle est fortement dopée en atomes donneurs (10^{17} à 10^{19} cm^{-3}) et recouverte d'une grille métallique qui permet de collecter les charges électriques photocréées. On l'appelle également face avant de la photopile.

- **La zone de charge d'espace** : cette zone est caractérisée par un champ électrique qui sépare les paires électron-trou qui arrivent à la jonction.
- **La base de type (p)** : elle est de grande dimension (300 à 400μm) et peu dopée en atomes accepteurs (10^{15} à 10^{17} cm^{-3}). C'est la zone de prédominance des phénomènes de génération, diffusion et recombinaison.
- **Le BSF (back surface Field)** : C'est la zone située en face arrière de la base, surdopée en atomes accepteurs (**p+**) (10^{17} à 10^{19} cm^{-3}) par rapport à la base et crée un champ électrique arrière qui renvoie vers la jonction les porteurs minoritaires photocréés près de la face arrière.

II-2 Densité des porteurs des charges dans la base de la photopile

Lorsque la photopile est éclairée, l'évolution des porteurs minoritaires en excès dans la base (ici de type p) est régie par l'équation de continuité suivante en régime statique :

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{D\tau} = -\frac{G(x)}{D} \quad (\text{II-1})$$

soit :

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

$\delta(x)$ est la densité des électrons générés dans la base à l'abscisse x , $G(x)$ le taux de génération sous la lumière blanche constante des porteurs à la profondeur x dans la base, τ la durée de vie des électrons dans la base et D le coefficient de diffusion des électrons générés dans la base.

Nous écrirons les différents taux de génération sous la forme [12] :

$$G(x) = n \sum_{m=1}^3 a_m \left[\xi e^{-b_m x} + \chi e^{-b_m (H-x)} \right] \quad (\text{II-3})$$

Les termes a_m et b_m sont des coefficients tabulés de l'éclairement solaire sous AM=1,5 ; n étant le nombre de soleil, il traduit le niveau d'éclairement de la photopile par rapport au niveau de référence (100 mW.cm^{-2}).

Le tableau ci-dessous nous donne les valeurs de a_m et b_m sous AM=1,5 [13]

Tableau I-1: Valeurs tabulées du rayonnement solaire sous AM=1,5

a_m	b_m
-------	-------

$6,13. 10^{20}$	6630
$0,54. 10^{20}$	1000
$0,099. 10^{20}$	130

χ et ξ sont définis comme indique le tableau ci-après : **Tableau II-2**

Mode d'éclairement	ξ	χ
Eclairement par la face avant	1	0
Eclairement par la face arrière	0	1

L'équation (II.2) est une équation différentielle avec second membre dont la solution, selon que la photopile est éclairée par sa face avant, sa face arrière peut être mise sous la forme :

$$\delta(x) = c_1 e^{\frac{x}{L}} + c_2 e^{-\frac{x}{L}} + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi e^{-b_m x} + \chi e^{-b_m (H-x)}) \quad (\text{II-4})$$

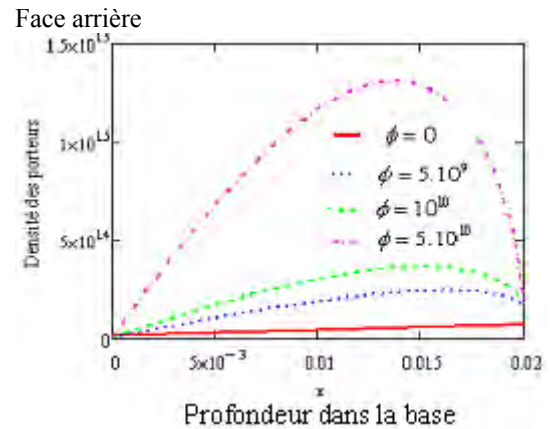
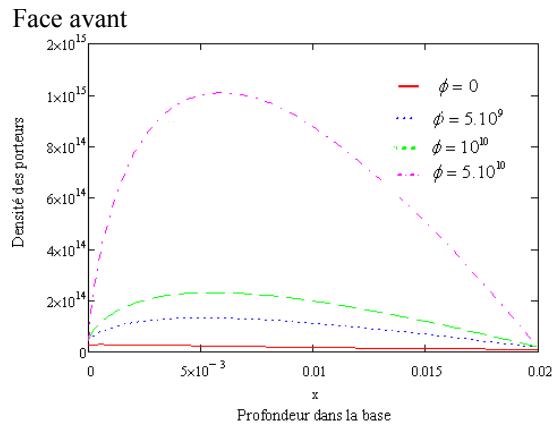
$$\text{avec } K_m = \frac{-n.a_m}{D.(b_m^2 - \frac{1}{L^2})} \quad (\text{II-5})$$

Pour une photopile donnée et des conditions d'éclairement connue ; les coefficients c_1 et c_2 sont des constantes que l'on peut obtenir à partir des conditions aux limites suivantes :

- A la jonction ($x = 0$) : $\frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{S_f}{D} \delta(0)$ (II-6)

S_f désigne la vitesse de recombinaison des porteurs et traduit le flux de porteurs qui traversent la jonction.

- Face arrière $\frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = \frac{-S_b}{D} \delta'(H)$ (II-7)



Figures II-2, II-3 : Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs d'irradiations pour ($S_f = 4000 \text{ cm.s}^{-1}$) et ($S_f = 1000 \text{ cm.s}^{-1}$)

Ces figures montrent que pour les différentes valeurs d'irradiations utilisées et pour des valeurs S_f et S_b données, la densité des charges minoritaires diminue lorsque l'irradiation augmente.

II-3 Densité de photocourant

A partir de la densité de porteurs, on peut exprimer le photocourant sous la forme suivante :

$$J_{ph} = qD \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (\text{II-8})$$

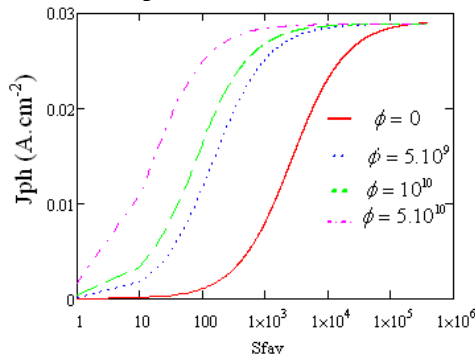
soit, en remplaçant la densité de porteurs par son équation :

$$J_{ph} = qD \left\{ \frac{1}{L} c_1 - \frac{1}{L} c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m \left[-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H} \right] \right\} \quad (\text{II-9})$$

avec q : charge élémentaire

:

Eclairement par la face avant



Eclairement par la face arrière

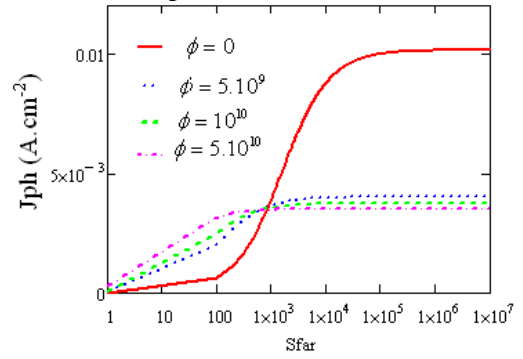


Figure II-4, II-5 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes irradiations ($S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

On remarque que la densité de photocourant est faible pour des faibles valeurs de S_f puis elle augmente quand la vitesse de recombinaison augmente, et atteint une zone où la densité de photocourant est maximale et constante aux valeurs élevées de la vitesse de recombinaison à la jonction. En effet, lorsque S_f augmente, cela signifie que le flux de porteurs à travers la jonction est important, donc le courant recueilli sera d'autant plus grand que S_f augmente.

Cependant nous constatons que pour de grand flux d'irradiation, la photopile semble entrer plus vite en court circuit qu'avec un flux plus faible de proton. Cet effet est bien plus marqué pour l'éclairement par la face avant que pour celui par la face arrière.

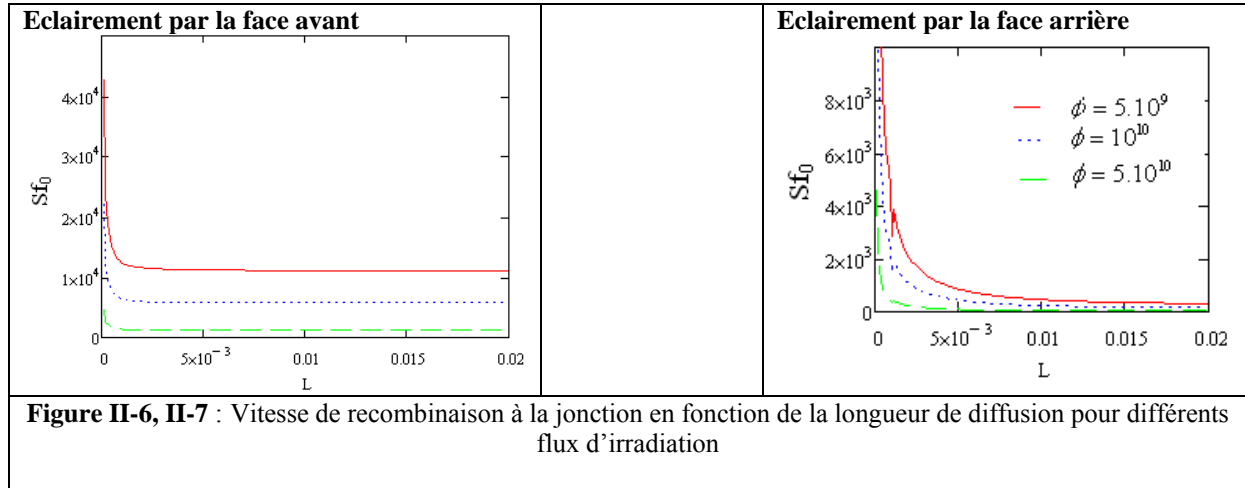
Expression de s_{f0} [2]

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial s_b} = 0 \quad (\text{II-10})$$

La résolution de l'équation (II-10) pour les différents modes d'éclairements donne les résultats suivants :

$$s_{f0,av} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{m=1}^3 \frac{-b_m - \left\{ \frac{1}{L} sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_m ch\left(\frac{H}{L}\right) \right\} \exp(-b_m H)}{\exp(-b_m H) \cdot \left\{ b_m sh\left(\frac{H}{L}\right) + \frac{1}{L} ch\left(\frac{H}{L}\right) \right\} - \frac{1}{L}} \quad (\text{II-11})$$

$$s_{f0,ar} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{m=1}^3 \frac{b_m \cdot \exp(-b_m H) + \frac{1}{L} \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) - b_m ch\left(\frac{H}{L}\right)}{\frac{1}{L} \cdot \exp(-b_m H) - \left\{ \frac{1}{L} \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) - b_m \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) \right\}} \quad (\text{II-12})$$



Chaque courbe présente un maximum de la vitesse de recombinaison pour une valeur faible de L puis décroît pour atteindre une valeur relativement faible et pratiquement constante quand L augmente.

Plus l'irradiation est faible plus la courbe occupe la zone supérieure.

Vitesse de recombinaison en face arrière

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial s_f} = 0 \quad (\text{II-13})$$

La résolution de l'équation (II-13) pour les différents modes d'éclairements donne les résultats suivants :

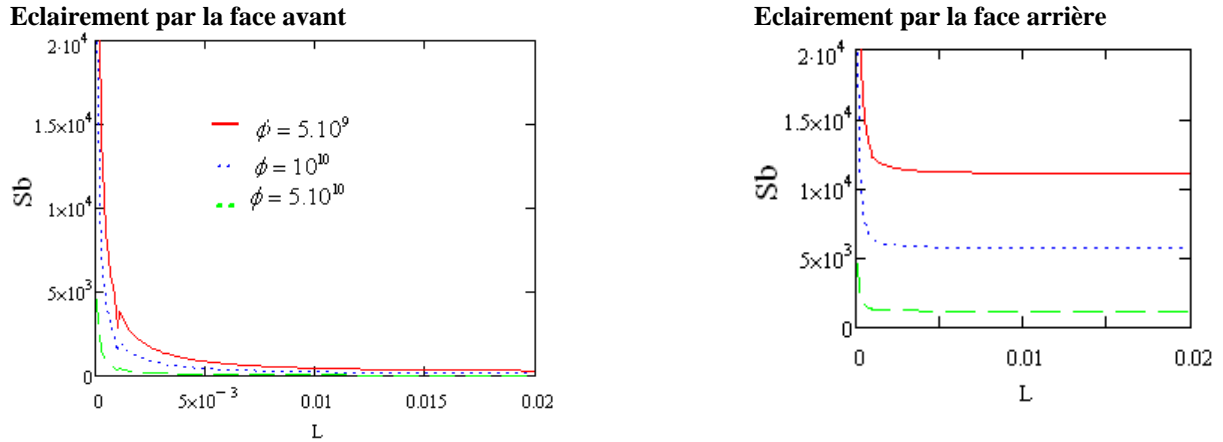
$$s_{b,av} = \sum_{m=1}^3 D \cdot \frac{\frac{-1}{L} \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_m \cdot \left[ch\left(\frac{H}{L}\right) - \exp(-b_m H) \right]}{-L \cdot b_m \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) + ch\left(\frac{H}{L}\right) - \exp(-b_m H)} \quad (\text{II-14})$$

Figure II-14 : Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la longueur de diffusion et pour un éclairement face avant

Cette figure présente la même allure que la figure II-13 avec le même commentaire

$$s_{b,ar} = \sum_{m=1}^3 \frac{D}{L} \cdot \frac{\exp(-b_m H) \cdot \left[sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_m L \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) \right] - b_m L}{1 - \left[ch\left(\frac{H}{L}\right) + b_m L \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \exp(-b_m H)} \quad (\text{II-15})$$

Figure II-15 : Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la longueur de diffusion et pour un éclairement face arrière



Cette figure a pratiquement la même allure que la précédente mais avec des amplitudes différentes chaque courbe présente un maximum de la vitesse de recombinaison puis décroît et la partie constantes est très importantes que celle rencontrée dans les figures précédentes .

II-4 Phototension

L'expression de la tension qui existe aux bornes de la pile lorsque celle-ci est soumise à un éclairement est obtenue par la relation de Boltzmann

$$V_{ph} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{Nb.\delta(0)}{n_i^2} + 1\right) \quad (\text{II-16})$$

n_i est la concentration intrinsèque et N_b est le taux de dopage de la base

Les figures ci-dessous présentent le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction lorsque la photopile est éclairée par ses faces avant puis arrière, pour différents flux Φ de protons.

Eclairement par la face avant

Eclairement par la face arrière

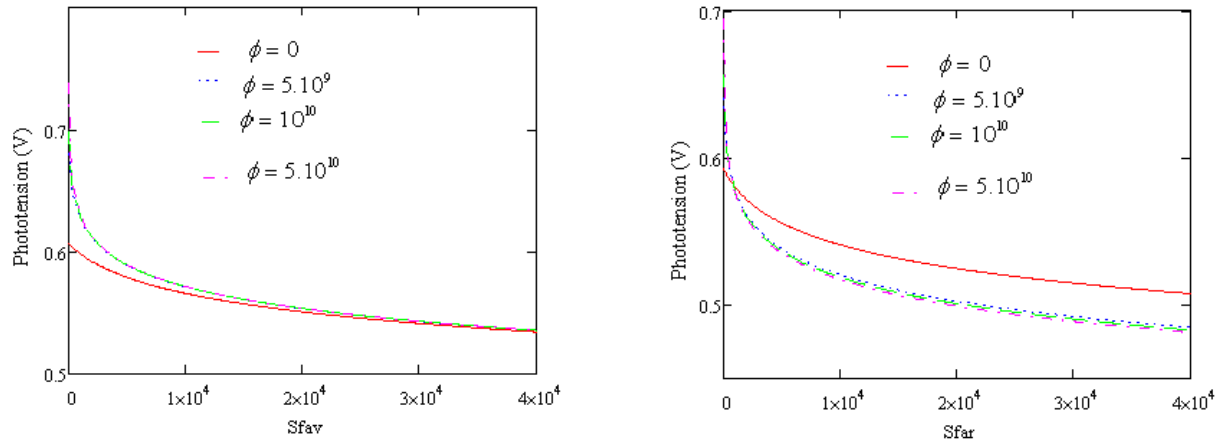


Figure II-10, II-11 : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face avant pour différents flux d'irradiations, $S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$

Ces figures nous montrent une décroissance de la phototension au fur et à mesure que S_f augmente ; en effet, lorsque S_f augmente, cela signifie que le flux de porteurs à travers la jonction augmente : beaucoup plus de porteurs traversent la jonction donc il y a de moins en moins de stockage alors la phototension baisse.

Pour l'irradiation, on constate que c'est au voisinage du circuit ouvert que l'activité des défauts est ressentie le plus pour l'éclairement par la face avant contrairement à l'éclairement par la face arrière.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la densité des porteurs de charges, la densité de photocourant et la phototension en montrant l'effet de l'irradiation sur ces différentes grandeurs ainsi que les vitesses de recombinaison S_{f0} et S_b en fonction de la longueur de diffusion pour ces différentes irradiations et ce pour une photopile éclairée en face avant puis en face arrière.

Chapitre III

Détermination des paramètres phénoménologiques

Introduction

Nous présentons dans cette partie des méthodes de détermination de la longueur de diffusion effective ainsi que de la vitesse de recombinaison intrinsèque des porteurs Sf_0 pour différents flux de protons.

A. Détermination de la longueur de diffusion effective

Nous partons de la densité de courant de court circuit ; pour cela on choisit Sf très grand et on peut alors écrire :

$$J_{cc}(Sb, L) = J_{ph}(Sf, Sb, L) \quad \text{III.1}$$

$$Sf \rightarrow \infty$$

Tous calculs faits, on obtient les expressions suivantes :

- *Eclairement par la face avant*

$$J_{ccav} = q.D \sum_{m=1}^3 K_m \cdot \frac{L.(b_m.D - S_b.av). \cosh(\frac{H}{L}) + (b_m.L^2.S_b.av - D). \sinh(\frac{H}{L}) + L.(S_b.av - b_m.D).e^{-b_m.H}}{D.L. \cosh(\frac{H}{L}) + L^2.S_b.av. \sinh(\frac{H}{L})} \quad \text{III.2}$$

- *Eclairement par la face arrière*

$$J_{ccar} = q.D \sum_{m=1}^3 K_m \cdot \frac{L.(S_b.av + b_m.D) - (L.(b_m.D + S_b.ar). \cosh(\frac{H}{L}) + (b_m.L^2.S_b.ar + D). \sinh(\frac{H}{L})).e^{-b_m.H}}{D.L. \cosh(\frac{H}{L}) + L^2.S_b.ar. \sinh(\frac{H}{L})} \quad \text{III.3}$$

Nous représentons ci-dessous l'évolution de la densité de courant de court circuit en fonction de la longueur de diffusion, pour différents flux de protons.

Face avant		Face arrière
Figure xx : Densité de courant de court circuit en fonction de la longueur de diffusion, pour différentes valeurs du flux de protons ; $Sb = \text{cm.s}^{-1}$		

On constate que la densité de courant de court circuit reste très sensible avec le flux de protons incidents, en particulier lorsque la longueur de diffusion est petite et que l'énergie des protons incidents est grande.

Etant donné que la densité de courant de court circuit J_{cc} est fonction à la fois de la longueur de diffusion et de la vitesse de recombinaison en face arrière des porteurs de charge $Sb(L)$, nous pouvons remplacer dans l'équation (III.2) (respectivement (III.3)) $Sb(L)$ par son expression (II.14) (respectivement (II.15)). Ainsi, la densité de courant de court circuit J_{cc} devient fonction de la longueur de diffusion seule : $J_{cc} = J_{cc}(L)$

On utilise alors la courbe $J(L)$ comme courbe de calibration comme l'illustre la figure ci-dessous.

Figure xx : Densité de courant de court circuit en fonction de la longueur de diffusion : Détermination de la longueur de diffusion		

Pour un flux donné de protons incidents, la courbe $J_{cc}(L)$ sert de référence par rapport au courant de court circuit réel mesuré aux bornes de la photopile J_{ccexp} ; l'intersection de cette droite avec la courbe $J_{cc}(L)$ donne la longueur de diffusion effective L_{eff} des porteurs de charge pour le niveau d'irradiation considéré.

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats obtenus pour différents flux d'irradiation Φ .

Tableau III.1 : Longueurs de diffusion effectives pour différentes irradiations ($E = 500$ keV): Eclairement par la face avant

Flux de protons (cm^{-2})	J_{ccexp} (A. cm^{-2})	L_{eff} (μm)

Tableau III.2 : Longueurs de diffusion effectives pour différentes irradiations ($E = 500$ keV) : Eclairement par la face arrière

Flux de protons (cm^{-2})	J_{ccexp} (A. cm^{-2})	L_{eff} (μm)

Ces deux tableaux montrent une décroissance de la longueur de diffusion effective avec le flux d'irradiation, ce qui était prévisible étant donné que la densité des défauts augmente avec le flux incident d'une part mais aussi avec le niveau d'énergie des protons utilisés.

B. Détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque

A partir de la phototension obtenue à l'équation (II.16), nous remplaçons $S_b(L)$ par son expression (II.14) (respectivement (II.15)) et on obtient une phototension ne dépendant plus que de la longueur de diffusion L et de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f pour une photopile donnée. Pour des vitesses de recombinaison à la jonction très faibles, nous sommes au voisinage du circuit ouvert et on peut utiliser la courbe $V_{ph}(L, S_f)$ comme courbe de calibration une fois que la longueur de diffusion effective L_{eff} est connue (cf. paragraphe précédent). La figure ci-dessous illustre ainsi le principe de détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction S_{f_0} [].

Figure xx : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction : Détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction S_{f_0}		

Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus pour différents flux d'irradiation [].

Tableau III.3 : Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction pour différentes irradiations ($E = 500$ keV):
Eclairement par la face avant

Flux de protons (cm^{-2})	V_{coexp} (A. cm^{-2})	S_{f_0} (cm.s^{-1})

Tableau III.4 : Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction pour différentes irradiations ($E = 500$ keV):
Eclairement par la face arrière

Flux de protons (cm^{-2})	V_{coexp} (A. cm^{-2})	S_{f_0} (cm.s^{-1})

On peut noter dans ces deux tableaux que, contrairement au courant de court circuit, la tension de circuit ouvert reste moins sensible à l'irradiation pour le même flux de protons. Quant à la

valeur de la vitesse intrinsèque, celle-ci augmente avec l'irradiation c'est-à-dire avec la densité de défauts surtout (comme pour le courant) si l'énergie des protons augmente.

Conclusion

Cette étude expérimentale nous a permis d'appliquer deux techniques de détermination des paramètres de recombinaison pour différents flux d'irradiation par des protons d'énergie égale à environ 500keV. La dépendance de la longueur de diffusion effective et de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction avec le flux de protons a été montrée.

Conclusion générale

Une étude bibliographique sur l'influence de l'irradiation sur les paramètres de recombinaison de photopiles a d'abord été présentée ; ensuite une étude théorique d'une photopile bifaciale éclairée par les faces avant puis arrière par une lumière multispectrale a été faite. L'effet de l'irradiation sur la densité des porteurs, la densité de photocourant et la phototension a été montré.

A partir des courbes de densité de courant de court circuit $J_{cc}(L)$ et de phototension utilisées comme courbes de calibration, la longueur de diffusion effective ainsi que la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction ont été trouvées et l'effet de l'irradiation sur ces paramètres a été montré.

Dans cette étude, nous avons maintenu la photopile sous un flux de protons dont l'énergie est constante ; on pourrait augmenter cette énergie afin d'en évaluer toutes les conséquences et tenir compte également de l'éclairement simultané des deux faces de la photopile. Cette étude faite en régime statique pourrait être complétée par une étude en régime dynamique transitoire afin d'évaluer l'effet de l'irradiation directement sur la durée de vie des porteurs de charge.



Références bibliographiques

- [1] The electrical characterization of semiconductors: measurement of minority carrier properties, J. W. Orton and P. Blood, Academic press, 1990.
- [2] G.Sissoko, C. Museruka, A. Corr  a, I. Gaye, A. L. Ndiaye.
World Renewable Energy Congress (1996), part III, pp.1487-1490
- [3] A. L. Ndiaye, Y. L. B. Bocand  , G.Sissoko, D. Lincot, J. Vedel,
and P. Cowache.
World Renewable Energy Congress (1996), part III, pp.1590-1593
- [4] G.Sissoko, E. Nan  ma, Y. L. B. Bocand  , A. L. Ndiaye.
World Renewable Energy Congress (1996), part III, pp.1594-1597
- [5] I. F. Barro, E. Nan  ma, F. Zougmore  , G. Sissoko.
J.Sci. Vol.1.N  1, 2001, pp.76-80.
- [6] H. Nodet, D. Casenave, R. Gauthier, et P. Pinard.
Revue Phys.Appl. 16, 1981, pp.591-595.
- [7] Radiation Hardness of CdTe/CdS Solar Cells
D.L. B  tzner, A. Romeo, H. Zogg, A.N. Tiwari, M. D  beli
17th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2001), pp. 1043-1046
- [8] Radiation-Hard High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells for Commercial Space Applications
Navid S. Fatemi, Paul R. Sharps, Mark A. Stan, Daniel J. Aiken, Brad Clevenger, and Hong Q. Hou
17th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2001), pp. 2155-2158
- [9] Electron and Proton Radiation Study of GaInP2/GaAs/Ge Solar Cell
P. R. Sharps, D. J. Aiken, M. A. Stan, C. H. Thang, and N. S. Fatemi
17th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2001), pp. 2163-2166
- [10]
- [11]
- [11]
- [11]
- [11]
- [11]
- [12] Joz   Furlan and Slavko Amon.
Solid State Electr. Vol.28,No.12,pp.1241-1243,1985.
- [13] S. Noor Mohammad.
J.Appl.Phys. 61(2),pp.767-772,1987.

ANNEXE MATHEMATIQUE

I- l'équation de continuité :

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{G(x)}{D} \quad (1)$$

La solution est sous la forme

$$\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x) \quad (2)$$

$\delta_1(x)$: Solution sans second membre

$\delta_2(x)$: Solution avec second membre

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

L'équation caractéristique est

$$ar^2 + b = 0 \Rightarrow r_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{1}{L^2}} = \pm \frac{1}{L} \quad (4)$$

Solution sous la forme

$$\delta_1(x) = c_1 e^{\frac{x}{L}} + c_2 e^{-\frac{x}{L}} \quad (5)$$

c_1 et c_2 sont définies par les conditions limites

Nous écrirons les différents taux de génération sous la forme :

$$G(x) = n \sum_{m=1}^3 a_m \left[\xi e^{-b_m x} + \chi e^{-b_m (H-x)} \right] \quad (6)$$

- pour la solution avec second membre, on utilise la méthode de la variation des constantes

Face avant $\chi = 0$

$$G_1(x) = n \sum_{m=1}^3 a_m \xi e^{-b_m x} \quad (7)$$

On suppose une solution sous la forme

$$\delta_3(x) = \sum_{m=1}^3 \xi K_m e^{-b_m x} \quad (8)$$

On dérive 2 fois pour avoir la valeur de K_m

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} = \sum_{m=1}^3 b_m^2 \xi K_m e^{-b_m x} \quad (9)$$

On remplace (7), (8) et (9) dans (1) on trouve

$$K_m = \frac{-n.a_m}{D.(b_m^2 - \frac{1}{L^2})} \quad (10)$$

Face arrière $\xi = 0$

$$G_2(x) = n \sum_{m=1}^3 a_m \chi e^{-b_m(H-x)} \quad (11)$$

$$\text{Solution sous la forme } \delta_4(x) = \sum_{m=1}^3 \chi K_m e^{-b_m(H-x)} \quad (12)$$

En dérivant 2 l'équation (12) fois on trouve :

$$\frac{\partial^2 \delta_4(x)}{\partial x^2} = \sum_{m=1}^3 b_m^2 \chi K_m e^{-b_m(H-x)} \quad (13)$$

En remplaçant (11),(12),(13) dans (1) on trouve aussi

$$K_m = \frac{-n.a_m}{D.(b_m^2 - \frac{1}{L^2})}$$

-Faces simultanées :

$$\delta_2(x) = \delta_3(x) + \delta_4(x)$$

$$\delta_2(x) = \sum_{m=1}^3 \xi K_m e^{-b_m x} + \sum_{m=1}^3 \chi K_m e^{-b_m(H-x)} \quad (14)$$

Solution générale

$$\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x)$$

$$\delta(x) = c_1 e^{\frac{x}{L}} + c_2 e^{\frac{-x}{L}} + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi e^{-b_m x} + \chi e^{-b_m(H-x)}) \quad (15)$$

Conditions aux limites

$$\text{A la jonction } \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{s_f}{D} \delta(0) \quad (16)$$

Face arrière :

$$\frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = \frac{-s_b}{D} \delta'(H) \quad (17)$$

Or

$$\frac{\partial \delta(x)}{\partial x} = \frac{1}{L} c_1 e^{\frac{x}{L}} - \frac{1}{L} c_2 e^{\frac{-x}{L}} + \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi e^{-b_m x} + b_m \chi e^{-b_m (H-x)}) \quad (18)$$

$$\text{A la jonction } \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{1}{L} c_1 - \frac{1}{L} c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H}) \quad (19)$$

$$\delta(0) = c_1 + c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi + \chi e^{-b_m H}) \quad (20)$$

$$\frac{s_f}{D} \delta(0) = \frac{s_f}{D} \left\{ c_1 + c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi + \chi e^{-b_m H}) \right\} \quad (21)$$

Or (19) = (21)

$$\frac{1}{L} c_1 - \frac{1}{L} c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H}) = \frac{s_f}{D} \left\{ c_1 + c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi + \chi e^{-b_m H}) \right\}$$

$$c_1 \left(\frac{1}{L} - \frac{s_f}{D} \right) - c_2 \left(\frac{1}{L} + \frac{s_f}{D} \right) = - \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H}) + \frac{s_f}{D} \left\{ c_1 + c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi + \chi e^{-b_m H}) \right\} \quad (22)$$

$$\text{A la face arrière } \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = \frac{1}{L} c_1 e^{\frac{H}{L}} - \frac{1}{L} c_2 e^{\frac{-H}{L}} + \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi e^{-b_m H} + b_m \chi) \quad (23)$$

$$\delta(H) = c_1 e^{\frac{H}{L}} + c_2 e^{\frac{-H}{L}} + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi e^{-b_m H} + \chi) \quad (24)$$

$$\frac{-s_b}{D} \delta(H) = \frac{-s_b}{D} \left[c_1 e^{\frac{H}{L}} + c_2 e^{\frac{-H}{L}} + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi e^{-b_m H} + \chi) \right] \quad (25)$$

Or (23) = (25)

$$\frac{1}{L} c_1 e^{\frac{H}{L}} - \frac{1}{L} c_2 e^{\frac{-H}{L}} + \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi e^{-b_m H} + b_m \chi) = \frac{-s_b}{D} \left[c_1 e^{\frac{H}{L}} + c_2 e^{\frac{-H}{L}} + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi e^{-b_m H} + \chi) \right]$$

$$c_1 \left(\frac{1}{L} e^{\frac{H}{L}} + \frac{s_b}{D} e^{\frac{H}{L}} \right) - c_2 \left(\frac{1}{L} e^{-\frac{H}{L}} - \frac{s_b}{D} e^{-\frac{H}{L}} \right) = - \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi e^{-b_m H} + b_m \chi) - \frac{-s_b}{D} \left[\sum_{m=1}^3 K_m (\xi e^{-b_m H} + \chi) \right] \quad (26)$$

Pour déterminer c_1 et c_2 on résout le système d'équation (21) et (26)

$$\text{Posons } \varepsilon_1 = \frac{1}{L} - \frac{s_f}{D} \quad \varepsilon_2 = \left(\frac{1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) e^{\frac{H}{L}}$$

$$\gamma_1 = -\left(\frac{1}{L} + \frac{s_f}{D} \right) \quad \gamma_2 = -\left(\frac{1}{L} - \frac{s_b}{D} \right) e^{-\frac{H}{L}}$$

$$\beta_1 = - \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H}) + \frac{s_f}{D} \left\{ c_1 + c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m (\xi + \chi e^{-b_m H}) \right\}$$

$$\beta_2 = - \sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi e^{-b_m H} + b_m \chi) - \frac{-s_b}{D} \left[\sum_{m=1}^3 K_m (\xi e^{-b_m H} + \chi) \right]$$

On écrit le système d'équation sous la forme des produits des matri

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_1 & \gamma_1 \\ \varepsilon_2 & \gamma_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} c_1 \\ c_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{vmatrix}$$

$$\text{Déterminant D} = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & \beta_1 \\ \varepsilon_2 & \beta_2 \end{vmatrix} = \varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1$$

$$c_1 = \frac{Dc_1}{D} = \frac{\beta_1 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_1}{\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1} \quad (27)$$

$$c_{1,2} = \frac{Dc_2}{D} = \frac{\varepsilon_1 \beta_2 - \varepsilon_2 \beta_1}{\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1} \quad (28)$$

Calcul du déterminant

$$D = \left(\frac{1}{L} - \frac{s_f}{D} \right) \left(\frac{1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) e^{\frac{H}{L}} + \left(\frac{1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) \left(\frac{1}{L} - \frac{s_b}{D} \right) e^{-\frac{H}{L}}$$

En calculant Dc_1 et Dc_2 et en remplaçant dans (27) , (28) on trouve

$$\begin{aligned}
& \left\{ -\sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H}) + \frac{s_f}{D} \left(\sum_{m=1}^3 K_m (\xi + (\chi e^{-b_m H})) \right) \right\} \left(\frac{-1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) e^{\frac{-H}{L}} + \\
& \text{Annexe mathématique} \\
& \left\{ -\sum_{m=1}^3 K_m \left[-b_m \xi e^{-b_m H} + b_m \chi \right] - \frac{s_b}{D} \left(\sum_{m=1}^3 K_m \left[\xi e^{-b_m H} + \chi \right] \right) \right\} \left(\frac{1}{L} + \frac{s_f}{D} \right) \\
c_1 = & \frac{\left\{ -\sum_{m=1}^3 K_m \left[-b_m \xi e^{-b_m H} + b_m \chi \right] - \frac{s_b}{D} \left(\sum_{m=1}^3 K_m \left[\xi e^{-b_m H} + \chi \right] \right) \right\} \left(\frac{1}{L} + \frac{s_f}{D} \right)}{\left(\frac{1}{L} - \frac{s_f}{D} \right) \left(\frac{-1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) e^{\frac{-H}{L}} + \left(\frac{1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) \left(\frac{1}{L} + \frac{s_f}{D} \right) e^{\frac{H}{L}}} \quad (29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ -\sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi e^{-b_m H} + b_m \chi) - \frac{s_b}{D} \left(\sum_{m=1}^3 K_m \left[\xi e^{-b_m H} + \chi \right] \right) \right\} \left(\frac{1}{L} - \frac{s_f}{D} \right) - \\
& \left\{ -\sum_{m=1}^3 K_m \left[-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H} \right] + \frac{s_f}{D} \left(\sum_{m=1}^3 K_m \left[\xi + \chi e^{-b_m H} \right] \right) \right\} \left(\frac{1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) e^{\frac{H}{L}} \\
c_2 = & \frac{\left\{ -\sum_{m=1}^3 K_m (-b_m \xi e^{-b_m H} + b_m \chi) - \frac{s_b}{D} \left(\sum_{m=1}^3 K_m \left[\xi e^{-b_m H} + \chi \right] \right) \right\} \left(\frac{1}{L} - \frac{s_f}{D} \right) - \left\{ -\sum_{m=1}^3 K_m \left[-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H} \right] + \frac{s_f}{D} \left(\sum_{m=1}^3 K_m \left[\xi + \chi e^{-b_m H} \right] \right) \right\} \left(\frac{1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) e^{\frac{H}{L}}}{\left(\frac{1}{L} - \frac{s_f}{D} \right) \left(\frac{-1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) e^{\frac{-H}{L}} + \left(\frac{1}{L} + \frac{s_b}{D} \right) \left(\frac{1}{L} + \frac{s_f}{D} \right) e^{\frac{H}{L}}} \quad (30)
\end{aligned}$$

Face avant $\xi = 1$ $\chi = 0$ les constantes donnent

$$c_{1av} = \frac{\sum_{m=1}^3 K_m L \left\{ (s_{fav} + b_m D)(L s_{bav} - D) e^{\frac{-H}{L}} + (-s_{bav} + b_m D)(D + L s_{fav}) e^{-b_m H} \right\}}{2(D^2 + L^2 s_{fav} s_{bav}) sh\left(\frac{H}{L}\right) + 2DL(s_{fav} + s_{bav}) ch\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (31)$$

$$c_{2av} = \frac{\sum_{m=1}^3 K_m L \left\{ (b_m D - s_{bav})(D - s_{fav} L) e^{-b_m H} - (b_m D + s_{fav})(D + s_{bav} L) e^{\frac{H}{L}} \right\}}{2(D^2 + L^2 s_{fav} s_{bav}) sh\left(\frac{H}{L}\right) + 2DL(s_{fav} + s_{bav}) ch\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (32)$$

Face arrière $\chi = 1$ $\xi = 0$

$$c_{1ar} = \frac{\sum_{m=1}^3 K_m L \left\{ (s_{far} - b_m D) e^{-b_m H} (L s_{bar} - D) e^{\frac{-H}{L}} - (s_{bar} + b_m D)(D + L s_{far}) \right\}}{2(D^2 + L^2 s_{far} s_{bar}) sh\left(\frac{H}{L}\right) + 2DL(s_{far} + s_{bar}) ch\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (33)$$

$$c_{2ar} = \frac{\sum_{m=1}^3 K_m L \left\{ (-s_{bar} - b_m D)(D - L s_{far}) - (s_{far} - b_m D) e^{-b_m H} (L s_{bar} + D) e^{\frac{H}{L}} \right\}}{2(D^2 + L^2 s_{far} s_{bar}) sh\left(\frac{H}{L}\right) + 2DL(s_{far} + s_{bar}) ch\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (34)$$

Expression de J_{ph} :

$$J_{ph} = qD \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=0}$$

$$J_{ph} = qD \left\{ \frac{1}{L} c_1 - \frac{1}{L} c_2 + \sum_{m=1}^3 K_m \left[-b_m \xi + b_m \chi e^{-b_m H} \right] \right\} \quad (35)$$

Expression de s_{f0}

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial s_b} = 0 \quad (36)$$

La résolution de l'équation (36) pour les différents modes d'éclairements donne les résultats suivants :

$$s_{f0,av} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{m=1}^3 \frac{-b_m - \left\{ \frac{1}{L} sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_m ch\left(\frac{H}{L}\right) \right\} \exp(-b_m H)}{\exp(-b_m H) \cdot \left\{ b_m sh\left(\frac{H}{L}\right) + \frac{1}{L} ch\left(\frac{1}{L}\right) \right\} - \frac{1}{L}} \quad (37)$$

$$s_{f0,ar} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{m=1}^3 \frac{b_m \cdot \exp(-b_m H) + \frac{1}{L} \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) - b_m ch\left(\frac{H}{L}\right)}{\frac{1}{L} \cdot \exp(-b_m H) - \left\{ \frac{1}{L} \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) - b_m \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) \right\}} \quad (38)$$

Vitesse de recombinaison en face arrière

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial s_f} = 0 \quad (39)$$

La résolution de l'équation (39) pour les différents modes d'éclairements donne les résultats suivants :

$$s_{b,av} = \sum_{m=1}^3 D \cdot \frac{\frac{-1}{L} \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_m \left[ch\left(\frac{H}{L}\right) - \exp(-b_m H) \right]}{-L b_m \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) + ch\left(\frac{H}{L}\right) - \exp(-b_m H)} \quad (40)$$

$$s_{b,ar} = \sum_{m=1}^3 \frac{D}{L} \cdot \frac{\exp(-b_m H) \cdot \left[sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_m L \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) \right] - b_m L}{1 - \left[ch\left(\frac{H}{L}\right) + b_m L \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \exp(-b_m H)} \quad (41)$$

Phototension :

L'expression de la tension qui existe aux bornes de la pile lorsque celle-ci est soumise à un éclairage est obtenue par la relation de Boltzmann

$$V_{ph} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{Nb \delta(0)}{n_i^2} + 1\right) \quad (42)$$

Densité du courant de court circuit. Pour trouver les valeurs de J_{cc} on fait tendre S_f vers ∞
 $J_{cc} = \lim_{S_f \rightarrow \infty} \{ J_{ph}(S_f) \}$ en faisant les calculs on trouve pour les différents modes
 d'éclairement les résultats suivants :

$$J_{ccav} = q.D.\sum_{m=1}^3 K_m \cdot \frac{L.(b_m.D - S_b.av).\cosh(\frac{H}{L}) + (b_m.L^2.S_b.av - D).\sinh(\frac{H}{L}) + L.(S_b.av - b_m.D).e^{-b_m.H}}{D.L.\cosh(\frac{H}{L}) + L^2.S_b.av.\sinh(\frac{H}{L})} \quad (43)$$

$$J_{ccar} = q.D.\sum_{m=1}^3 K_m \cdot \frac{L.(S_b.av + b_m.D) - (L.(b_m.D + S_b.ar).\cosh(\frac{H}{L}) + (b_m.L^2.S_b.ar + D).\sinh(\frac{H}{L})).e^{-b_m.H}}{D.L.\cosh(\frac{H}{L}) + L^2.S_b.ar.\sinh(\frac{H}{L})} \quad (44)$$

