

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE DE THESE

Présenté par

M. Mor NDIAYE

DOCTEUR DE 3^{ème} CYCLE

Pour obtenir le Diplôme de DOCTORAT D'ETAT EN PHYSIQUE

Option : Energie Solaire

SUJET :

**ETUDE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL D'UNE PHOTOPILE
BIFACIALE SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE : DETERMINATION
DES PARAMETRES ELECTRIQUES**

Soutenu publiquement le 04 Décembre 2010 devant le jury composé de :

Président :	Grégoire SISSOKO (Directeur)	Professeur Titulaire	FST/UCAD
Membres :	Amadou Seidou MAIGA (Co-directeur)	Maître de Conférences	UFR/SAT, UGB, St Louis
	Alhadi WEREME (Rapporteur)	Maître de Recherche	IRSAT-CNRST, BURKINA FASO
	Mamadou L. SOW (Rapporteur)	Maître de Conférences	FST/UCAD
	Senghane MBODJI	Docteur d'Etat, Chargé d'Enseignements	Univ. Bambey
	Issa DIAGNE	Docteur d'Etat, Assistant	FST/UCAD
	Birame DIENG	Docteur d'Etat, Maître Assistant Associé	Univ. Bambey

DEDICACES

Ce travail est dédié à :

Mon Père Ndiaye Coumba NDIAYE

Ma Mère Maty WADÉ

Ma Femme Nougaye NIANG

Feu mon Cousin Adama NDIAYE

Mes Tantes

Mes Oncles

Mes Frères et Sœurs

Mes Cousins et Cousines

Mes Neveux et Nièces

Mes Ami(e)s

Tous (tes) ceux (celles) qui, de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de mon cursus élémentaire jusqu'au cursus universitaire.

Ce travail a été effectué à la Faculté des Sciences et Techniques (FST), de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal)

Sous la direction de Monsieur Grégoire SISSOKO Professeur Titulaire de classe exceptionnelle des Universités, Directeur du Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable et Rédacteur en Chef du Journal Des Sciences (www.cadjds.org) au Département de Physique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal)

Et sous la co-direction de Monsieur Amadou Seidou MAIGA, Maître de conférences à l'UFR/SAT de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis (Sénégal)

REMERCIEMENTS

Je remercie :

Monsieur **Grégoire SISSOKO**, Professeur Titulaire de classe exceptionnelle à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar d'avoir bien voulu diriger ce travail. En toute franchise je ne saurais trouver de mots assez forts pour vous exprimer ma profonde gratitude. Vous avez été toujours disponible à promouvoir davantage la recherche, vous donnez le meilleur de vous-même pour accompagner les jeunes dans leurs éducations scientifique, morale et sociale. Vous êtes un homme exceptionnel, de conviction et de sagesse. Vos conseils ont suscité en moi la persévérance et l'abnégation dans le travail. Vous avez été accueillant, attentif à nos différentes sollicitations et également aussi à l'égard des autres. Je vous remercie, de tout cœur, pour l'honneur que vous me faites en m'acceptant dans votre équipe de recherche. Que Dieu le Tout Puissant vous attribue récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Monsieur **Amadou Seidou MAIGA**, Maître de Conférences à l'Université Gaston Berger de Saint-Louis de Saint Louis pour l'honneur que vous me faites en acceptant de codiriger ce travail et également pour votre participation à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant vous rétribue et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Monsieur **Mamadou Lamine SOW**, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant vous accorde le tribut de votre noble apport.

Monsieur **Alhadi WEREME**, Maître de Recherche à l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technologique, Burkina Faso pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant vous fasse récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Monsieur **Senghane MBODJI**, Docteur d'Etat, Chargé d'enseignements à l'Université de Bambey pour tout le soutien et les conseils que vous n'avait cessé de manifester à mon égard. Je vous remercie également pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant vous récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Monsieur **Birame DIENG**, Docteur d'Etat, Maître Assistant associé à l'Université de Bambey pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant soit votre pourvoyeur de biens et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Monsieur **Issa DIAGNE**, Docteur d'Etat, Assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour tout le soutien et les conseils que vous n'avez cessé de me donner. Je vous remercie également pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant vous se charge de votre bonheur et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Monsieur **Fabé Idrissa BARRO**, Maître Assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Vous avez été toujours disponible à nos innombrables sollicitations. De part votre abnégation dans le travail, votre courage, votre volonté de faire toujours mieux, j'ai pu bénéficier de votre apport dans la confection de ce travail. Je ne cesserai jamais de vous remercier pour tout ce que vous avez fait pour l'ensemble de l'équipe que nous formons. Que Dieu le Tout Puissant illumine toujours votre chemin.

Je remercie également tous mes camarades chercheurs aux LASES Dr. Amadou DIAO, Dr. Baba FLEUR, Dr. Mouhamadou Moustapha DEME, Dr. Zeïnabou NOUHOU BAKO, Dr. Aminata GUEYE, Dr. Séga GUEYE, Dr. Ibrahima LY, Dr. Moustapha THIAM, Alfred DIENG, Moussa DIENG, Secou DIALLO, Mouhamed SIDIYA, Amadou Mar NDIAYE, Amary THIAM, Pierre FAYE, Ndeye THIAM, Mouhamadou Moustapha DIONE, Fallou MBAYE, Fassa TOURE, Souleymane LY. Vous avez été toujours disponibles à nos innombrables sollicitations. De part votre abnégation dans le travail, votre courage, votre volonté de toujours faire mieux, j'ai pu bénéficier de votre apport dans la confection de ce travail.

Remerciements

Mes remerciements à Monsieur Omar YOUM Proviseur du Lycée de Diofior et à tous mes collègues professeurs du lycée.

Je remercie également mes amis Mory DIOP et Mbaye DIOP, de m'avoir soutenu dans la confection de ce travail.

Mes remerciements à toute ma famille, à toute ma belle famille et à Mme Yacine NIANG et sa famille.

Qu'Allah le Tout Puissant, Le Miséricordieux vous protège par la grâce du Prophète Mouhamad (PSL)

Recevez la bénédiction de Serigne Touba Khadim Rassoul (RTA) mon guide confrérique et que chacun reçoive le bonus de son guide de surcroit.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	7
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	14
INTRODUCTION GENERALE	17
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL.....	20
INTRODUCTION.....	21
I.1 MEASUREMENT OF AC PARAMETERS OF GALLIUM ARSENIDE (GAAS/GE) SOLAR CELL BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY.....	21
I.2 A NEW CHARACTERIZATION METHOD FOR SOLAR CELL DYNAMIC IMPEDANCE	22
I-3 PV MODULE DYNAMIC IMPEDANCE AND ITS VOLTAGE AND FREQUENCY DEPENDENCIES [43].....	24
I-4 MEASUREMENT OF SOLAR CELL AC PARAMETERS USING IMPEDANCE SPECTROSCOPY	24
I.5 ETUDE COMPARATIVE DES MODELES A UNE ET DEUX DIODES [45]	27
I-6 A MODELLING FOR AC PHOTO CONDUCTANCE RESPONSE OF A N⁺-P-P⁺ CRYSTALLINE SILICON: PARTI I: MONOCHROMATIC LIGHT [46].....	31
I.7 VITESSES DE RECOMBINAISON INTRINSEQUES D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE A JONCTION HORIZONTALE ET A UNE DIMENSION [47,48].....	32
CONCLUSION.....	35
CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DE LA PHOTOPILE BIFACIALE SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL.....	36
II-1 PRESENTATION DE LA PHOTOPILE BIFACIALE.....	37
II-1-1 DESCRIPTION D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE AU SILICIUM.....	37
II-1-2 FONCTIONNEMENT DE LA PHOTOPILE SOUS ECLAIREMENT.	39
II-2 DENSITE DES PORTEURS MINORITAIRES GENERES DANS LA BASE DE LA PHOTOPILE PAR UNE LUMIERE MONOCHROMATIQUE EN MODULATION DE FREQUENCE.....	39
II-2-1 EQUATION DE CONTINUTE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL.....	39
II- 2-2 SOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUTE ET CONDITIONS AUX LIMITES.....	41
II- 2-2 -1 SOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUTE	41
II- 2-2-2 SOLUTION PARTICULIERE DE L'EQUATION AVEC SECOND MEMBRE	41
II- 2-2 -3 SOLUTION GENERALE DE L'EQUATION SANS SECOND MEMBRE	41

II- 2-2 -4 CONDITIONS AUX LIMITES	41
II- 3 DENSITE DES PORTEURS MINORITAIRES EN EXCES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR X DANS LA BASE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE DE LA PHOTOPILE.....	42
II-3-1 PROFIL DU MODULE DE LA DENSITE DES PORTEURS DE CHARGE PHOTOCREES DANS LA BASE	42
II-4 DENSITE DE PORTEURS MINORITAIRES EN EXCES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR X DANS LA BASE POUR UN .. ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES.....	45
II-5 ETUDE DE LA DENSITE DU PHOTOCOURANT POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	48
II-5-1 GENERALITES	48
II-5-2 ETUDE DU PROFIL DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT DE LA PHOTOPILE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE.....	49
II-5-3 ETUDE DU PROFIL DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT DE LA PHOTOPILE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES ...	52
II-5-4 ETUDE COMPARATIVE DES PROFILS DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT DE LA PHOTOPILE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	53
II-5-5 PHOTOCOURANT DE COURT CIRCUIT	54
II-6 ETUDE DE LA PHOTOTENSION	55
II-6-1 GENERALITES	55
II-6-2 ETUDE DU PROFIL DE LA PHOTOTENSION POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE.....	55
II-6-3 ETUDE DU PROFIL DE LA PHOTOTENSION POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	57
II-6-4 ETUDE COMPARATIVE DES PHOTOTENSIONS POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	59
II-7 ETUDE DE LA CARACTERISTIQUE DENSITE DE PHOTOCOURANT- PHOTOTENSION DE LA PHOTOPILE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	60
7-1 ETUDE DE LA RESISTANCE SHUNT POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	64
7-1-1 ETUDE DE LA RESISTANCE SHUNT POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE	64
7-1-2 ETUDE DE LA RESISTANCE SHUNT POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	66
7-2 ETUDE DE LA RESISTANCE SERIE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	68

7-2-1 ETUDE DE LA RESISTANCE SERIE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE	69
7-2-2 ETUDE DE LA RESISTANCE SERIE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	70
II-8 ETUDE DE LA VARIATION DE LA CAPACITE DE DIFFUSION EN FONCTION DE LA FREQUENCE DE MODULATION POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	72
II-9 ETUDE DES VITESSES DE RECOMBINAISON POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	73
II-9-1 ETUDE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON SB A LA FACE ARRIERE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT.....	73
II-9-1-1 EXPRESSION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON SB₂ A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE.....	74
II-9-1-1-1 DIAGRAMME DE NYQUIST DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON SB₂ A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE.....	74
II-9-1-2 EXPRESSION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON SB₃ A LA FACE ARRIERE UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES.....	78
II-9-1-2-1 DIAGRAMME DE NYQUIST DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON SB₃ A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES.....	79
II-9-1-2-2 DIAGRAMME DE BODE DU MODULE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON SB₃ A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	80
II-9-1-2-3 DIAGRAMME DE BODE DE LA PHASE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON SB₃ A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	80
II-9-1-3 CIRCUITS ELECTRIQUES EQUIVALENT AUX PHENOMENES OBSERVES POUR LES VITESSES DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE SB POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	81

II-9-2 ETUDE DES VITESSES DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE SF0 A LA JONCTION POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	83
II-9-2-1 EXPRESSION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE SF0₂ A LA JONCTION POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE.....	83
II-9-2-2 EXPRESSION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE SF0₃ A LA JONCTION POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	85
CONCLUSION.....	87
CHAPITRE III : DETERMINATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE AU SILICIUM.....	89
III-1 IMPEDANCE DYNAMIQUE.....	90
III-2 REPRESENTATION DE NYQUIST	90
III-2-1 REPRESENTATION DE NYQUIST POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE	90
III-2-2 REPRESENTATION DE NYQUIST POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	93
III-3 DIAGRAMME DE BODE DU MODULE DE L'IMPEDANCE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	96
III-3-1 DIAGRAMME DE BODE DU MODULE DE L'IMPEDANCE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE.....	97
III-3-2 DIAGRAMME DE BODE DU MODULE DE L'IMPEDANCE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	101
LA CAPACITE EST INVERSEMENT PROPORTIONNELLE A LONGUEUR D'ONDE MAIS NOTONS QUE SA VALEUR DIMINUE LORSQU'ON PASSE D'UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE A UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES.	103
III-4 DIAGRAMME DE BODE DE LA PHASE DE L'IMPEDANCE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	103
III-4-1 DIAGRAMME DE BODE DE LA PHASE DE L'IMPEDANCE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE.....	103
III-5 CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION.....	108
III-5-1 COURANT DE DIODE.....	108
III-5-2 CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION	110
III-5-2-1 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE.....	111
III-5-2-2 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES	112

III-5-2-3 ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT	112
III-5-3 PUISSANCE ELECTRIQUE DE LA PHOTOPILE	113
III-5-3-1 EXPRESSION DE LA PUISSANCE	113
III-5-3-2 ETUDE DE LA PUISSANCE EN FONCTION DE LA TENSION ET DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA JONCTION SF.....	113
III-5-4 FACTEUR DE FORME.....	116
CONCLUSION GENERALE	118
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	119
ANNEXE MATHEMATIQUE	125

NOMENCLATURE

τ	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base -----	(s)
D	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base -----	($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
L	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base -----	(cm)
$L(\omega)$	Longueur de diffusion complexe des porteurs minoritaires dans la base -----	(cm)
ω	Fréquence angulaire -----	($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
ω_c	Fréquence angulaire de coupure -----	($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
x	Profondeur de la base de la photopile bifaciale -----	(μm)
H	Epaisseur totale de la photopile bifaciale -----	(μm)
q	Charge élémentaire de l'électron -----	(C)
n_0	Concentration intrinsèque du matériau Si -----	(cm^{-3})
N_B	Taux de dopage des impuretés dans la base -----	(cm^{-3})
t	Temps -----	(s)
$G(x,t)$	Taux de génération monochromatique en modulation de fréquence en fonction de la profondeur x et du temps t -----	($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
$g(x)$	Taux de génération en fonction de la profondeur x -----	($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
$\alpha(\lambda)$	Coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ -----	(cm^{-1})
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion du matériau à la longueur d'onde λ	
$\delta(x,t)$	Densité des porteurs minoritaires photocréés dans la base en fonction de la profondeur x et du temps t -----	(cm^{-3})
SF	Vitesse de recombinaison à la jonction -----	($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
SB	Vitesse de recombinaison à la face arrière -----	($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
J	Densité de photocourant -----	($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
J_{CC}	Densité de photocourant de court-circuit -----	($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
V	Phototension -----	(V)
V_{CO}	Phototension de circuit ouvert -----	(V)
V_T	Tension thermique -----	(V)
T	Température absolue -----	(K)
R_s	Résistance série -----	($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
R_{sh}	Résistance shunt -----	($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
R_C	Résistance de charge -----	(Ω)
R_d	Résistance dynamique -----	($\Omega \cdot \text{cm}^2$)

Nomenclature

R_p	Résistance parallèle -----	$(\Omega.cm^2)$
Z	Impédance dynamique de la photopile -----	$(\Omega.cm^2)$
C_1	Capacité -----	$(\mu F.cm^{-2})$
C_2	Capacité -----	$(\mu F.cm^{-2})$
C	Capacité-----	$(\mu F.cm^{-2})$
K	Constante de Boltzmann-----	(J/K)
I_0	Flux incident lumière monochromatique-----	(W/cm^2)
λ	Longueur d'onde-----	(μm)

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Liste des figures

I.1	19
I.2	20
I.3	21
I.4	22
I.5	22
I.6	22
I.7	23
I.8	23
I.9	23
I-10	24
I-11	26
I-12	26
II.1	34
II.2	40
II.3	41
II.4	42
II.5	43
II.6	45
II.7	47
II.8	48
II.9	49
II.10	49
II.11	50
II.12	51
II.13	53
II.14	54
II.15	55
II.16	56
II.17	57
II.18	58
II.19	59

II.20	60
II.21	61
II.22	61
II.23	63
II.24	63
II.25	64
II.26	65
II.27	66
II.28	67
II.29	68
II.30	69
II.31	70
II.32	71
II.33	72
II.34	73
III.1	77
III.2	77
III.3	78
III.4	78
III.5	80
III.6	80
III.7	81
III.8	81
III.9	83
III.10	84
III.11	84
III.12	85
III.13	87
III.14	87
III.15	88
III.16	89
III.17	90
III.18	90
III.19	91

III.20	92
III.21	92
III.22	93
III.23	93
III.24	94
III.25	94
III.26	95
III.27	96
III.28	97
III.29	98
III.30	99
III.31	100
III.32	100
III.33	101
III.34	102

Liste des tableaux

I.1	20
III.1	79
III.2	82
III.3	85
III.4	86
III.5	86
III.6	88

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, les contraintes économiques telle que l'augmentation du coût des énergies classiques et écologiques à l'exemple le réchauffement climatique incitent à développer la recherche sur les énergies renouvelables qui constituent une solution prometteuse au problème énergétique mondial.

Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque occupe une place très importante. En effet, elle présente des avantages tels que : l'abondance, l'absence de toutes pollutions et sa disponibilité. C'est ainsi qu'actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire avec les cellules photovoltaïques. La cellule photovoltaïque ou photopile est le dispositif qui assure la transformation directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette photopile est en réalité une photodiode à grande surface dont le matériau de base est un semi-conducteur (généralement du silicium).

La conversion directe de la lumière en électricité a été découverte par le français Alexandre Edmond Becquerel en 1839 bien que l'énergie solaire aie été utilisée depuis l'Egypte ancienne. Depuis la recherche s'intensifie dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, ainsi dans les années 1954-1955 est crée par les laboratoires BELL aux Etats-Unis la première cellule photovoltaïque à base de silicium obtenue par tirage Czochralski [1] avec un rendement de 4%.

Pour améliorer ce faible rendement, les scientifiques et les industriels du monde entier se sont investis dans différents travaux de recherche en proposant de nouvelles structures : bifaciale [2-5], jonction verticale [6,7], triple jonction [8] ou en améliorant des structures existantes grâce à la passivation [9-11], à l'effet BSF (Back Surface Field) [12], etc.

Les différents processus de recombinaison des porteurs minoritaires en excès photo-générés dans la photopile sont essentiellement les causes principales des faibles rendements : il s'agit notamment des recombinaisons en volumes [1,13] Shockley-Read-Hall, des recombinaisons Auger [14,15] radiative, ainsi que des recombinaisons en surface elles-mêmes liées aux imperfections du réseau cristallin

Dans les différentes techniques de caractérisation, les paramètres les plus importants sont : le coefficient de diffusion D (en relation avec le dopage de la base), la longueur de diffusion des porteurs de charges L (c'est-à-dire la distance moyenne parcourue par les porteurs de charge avant de succomber à un processus de recombinaison), les vitesses de recombinaison (à la jonction S_f , en face arrière S_b , aux joints de grain S_g) et la durée de vie τ .

Les techniques de caractérisation utilisées pour étudier les photopiles peuvent se scinder en deux grandes familles :

- Les techniques en régime statique

Elles consistent à mesurer la réponse de la photopile suivant :

- Une excitation optique monochromatique [16-17] ou multi spectrale [18-19] constante
- Un bombardement par faisceau d'électrons [20]
- Une excitation électrique [21]
- Les techniques en régime dynamique

D'une part les techniques en régime dynamique fréquentiel

Lorsque le signal est électrique périodique de pulsation ω , les réponses obtenues de la photopile sont :

- L'impédance $Z(\omega)$ [22]
- La capacitance $C(\omega)$ [23-24]
- La conductance $G(\omega)$ [25]

Lorsque le signal est optique périodique de pulsation ω , les réponses obtenues sont [26-27]:

- La phototension alternative $V_{ph}(\omega)$
- Le photocourant alternatif $I_{ph}(\omega)$

D'autre part les techniques en régime dynamique transitoire

Dans ce cas de figure la mesure de la réponse de la photopile est faite à partir de l'enregistrement du courant de court circuit $I_{cc}(t)$, de la tension à circuit ouvert ou par photoluminescence ; la photopile est alors soumise à :

- Un faisceau d'électrons [28-29] : Méthode du courant induit par un faisceau d'électron (EBIC :Electron Beam Induced Current)
- Un signal électrique [30] : ESCCD (Electrical Short Circuit Current Decay)
- Un signal optique [31-32] : OBIC (Optical Beam Induced Current), O-DLTS (Optical Deep Level Transient Spectroscopy)
- Un signal électromagnétique [33-34]
- Une excitation électrique [35-36] avec la méthode E-DLTS (Spectroscopie électrique d'un niveau transitoire interne)
- Une excitation optique [37-38] avec les méthodes de décroissance de la tension (PVD :Photovoltage Decary) de phototension surfacice (SPV :Surface photovoltage)

Les régimes transitoires en photoluminescence sont observés sur des matériaux semi conducteurs qui sont photoémetteurs [39-40]

Dans ce travail, nous présenterons d'abord une étude bibliographique sur les techniques de caractérisation en régime dynamique fréquentiel. En suite, une étude théorique de la photopile basée sur l'exploitation de l'équation de diffusion des porteurs minoritaires et des différentes conditions aux limites sera opérée en régime dynamique fréquentiel. En fin nous procéderons à la détermination des paramètres électriques de la photopile tels que les résistances shunt et série, la capacité, la fréquence de coupure en régime dynamique fréquentiel sous éclairage monochromatique.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL

INTRODUCTION

Le régime dynamique fréquentiel est obtenu en excitant la photopile à partir d'une source, lumineuse ou électrique variable ou en modulation de fréquence. Dans ce chapitre nous présentons quelques travaux importants relatifs aux méthodes de détermination des paramètres de recombinaison des porteurs minoritaires de charge dans la base des photopiles au silicium polycristallin en régime dynamique fréquentiel. Certains modèles électriques qui ont été utilisés pour la détermination de paramètres comme R_s , R_{sh} et Z seront aussi présentés.

I.1 MEASUREMENT OF AC PARAMETERS OF GALLIUM ARSENIDE (GaAs/Ge) SOLAR CELL BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY

(Mesure des paramètres électriques d'une cellule en Arséniure de Gallium « GaAs/Ge », par spectroscopie d'impédance) [41]

Dans cet article, il est proposé une méthode expérimentale de détermination des paramètres électriques. L'étude est faite sur une cellule solaire en Arséniure de Gallium par la méthode spectroscopie d'Impédance.

Les mesures sont réalisées sur une cellule GaAs/Ge de taille (20 x 40 mm), la température de la salle est de $22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. La cellule est polarisée à l'obscurité, la tension de polarisation est comprise entre 0,3V et 0,9V et l'amplitude du signal alternatif est de 10 mV avec une fréquence variant de 1HZ à 60 KHZ.

Le spectre d'impédance obtenu est un demi-cercle (diamètre R_p), permettant de déterminer

les paramètres électriques de la cellule (R_s, R_p, C)

Des observations faites sur cette méthode ont permis aux auteurs de dire que lorsque la cellule est en circuit ouvert, les demi-cercles ne sont plus parfaits.

La résistance parallèle R_p qui est un paramètre important de la cellule car étant la combinaison de deux résistances : la résistance dynamique et la résistance shunt R_{sh} . En

Général $R_{sh} \gg R_D$ lorsque ces cellules sont en circuit ouvert, ce qui entraîne que $R_p \approx R_D$.

L'expression de la résistance dynamique est donnée par la relation suivante :

$$R_D = \frac{V_T \cdot \eta}{I} \quad (\text{I-1})$$

V_T la tension thermique

η facteur d'idéalité

I le photocourant de la cellule solaire

I.2 A NEW CHARACTERIZATION METHOD FOR SOLAR CELL DYNAMIC IMPEDANCE

(Nouvelle méthode de caractérisation de l'impédance dynamique d'une cellule solaire)[42]

Cet article fait part d'une technique de caractérisation d'impédance dynamique d'une cellule solaire par une méthode basée sur la spectroscopie d'impédance.

Pour cette nouvelle méthode de caractérisation d'impédance dynamique, les auteurs utilisent un courant continu modulé par un petit signal carré en lieu et place d'un signal sinusoïdal fréquemment utilisé en spectroscopie d'impédance.

Cette méthode permet de réduire le matériel expérimental, de simplifier en rendant plus accessibles les mesures de l'impédance.

Les mesures sont effectuées sur une cellule en silicium cristallin de surface (10 cm x 10 cm)

Les conditions expérimentales sont :

- La température de la cellule est égale à la température ambiante de la salle
- La cellule est polarisée à l'obscurité

Les courants et les tensions d'entrée et de sortie de la cellule test peuvent être visualisés par un oscilloscope numérique. Les données sont transférées au PC par l'intermédiaire du port de transmission de données GPIB. L'impédance dynamique de la cellule solaire est calculée sur la base de MATLAB en utilisant la technique de transformée de Fourier rapide (FFT :Fast Fourier Transform).

Dispositif expérimental :

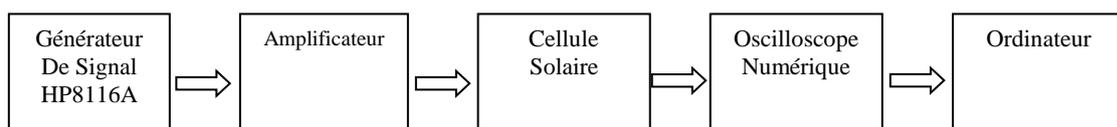


Figure I.1 : Dispositif expérimental utilisé en spectroscopie d'impédance

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire en régime dynamique est représenté à la figure I.2 :

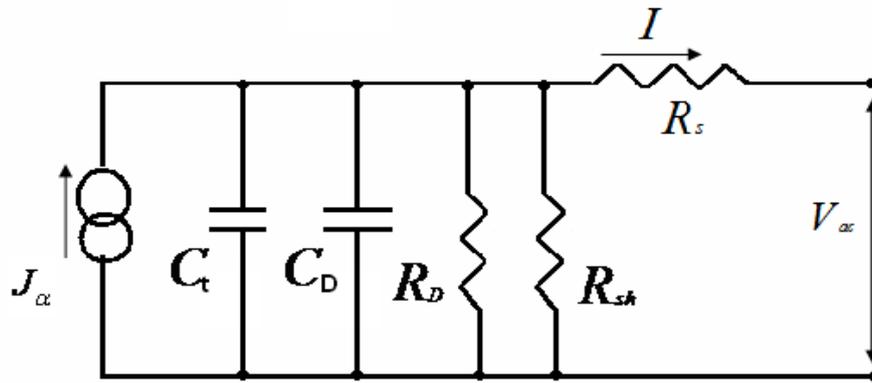


Figure I.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

L'impédance dynamique du circuit ci-dessus s'écrit sous la forme suivant :

$$R_{pv} + i \cdot X_{pv} = R_S + \frac{R_D \cdot R_{Sh} \cdot (R_{Sh} + R_D)}{(R_{Sh} + R_D)^2 + (\omega \cdot R_D \cdot R_{Sh} \cdot C)^2} - \frac{i \cdot \omega \cdot (R_{Sh} \cdot R_D)^2 \cdot C}{(R_{Sh} + R_D)^2 + (\omega \cdot R_D \cdot R_{Sh} \cdot C)^2} \quad (\text{I-2})$$

Avec :

R_{pv} étant la composante résistif de l'impédance dynamique

et X_{pv} étant la composante réactive de l'impédance dynamique

Les valeurs de la résistance dynamique obtenues à partir des méthodes de caractérisation de l'impédance dynamique sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.1 : Résistance dynamique

Tension (v)	0,2	0,3	0,4
R_{d1} (Ω)	15,53	4,90	1,40
R_{d2} (Ω)	15,53	4,71	1,39

R_{d1} est obtenue à partir de la méthode de détermination qui utilise un courant continu modulé par un petit signal carré.

R_{d2} est obtenue à partir de la méthode de détermination qui utilise un signal sinusoïdal.

Cet article montre une nouvelle méthode simple pour mesurer les impédances des cellules solaires en utilisant un signal carré en lieu et place d'un signal sinusoïdal. Les résultats expérimentaux de la nouvelle méthode donnent des valeurs d'impédance comparables à celles des études précédentes. Cette étude compare deux techniques de mesure basées sur le même principe, en utilisant un signal d'entrée sinusoïdal et un signal entrée carré, plutôt qu'une mesure absolue qui dépend elle de l'exactitude et de la qualité de l'équipement d'essai.

I-3 PV MODULE DYNAMIC IMPEDANCE AND ITS VOLTAGE AND FREQUENCY DEPENDENCIES [43]

Cet article présente une méthode de détermination de l'impédance dynamique à partir du modèle électrique équivalent suivant:

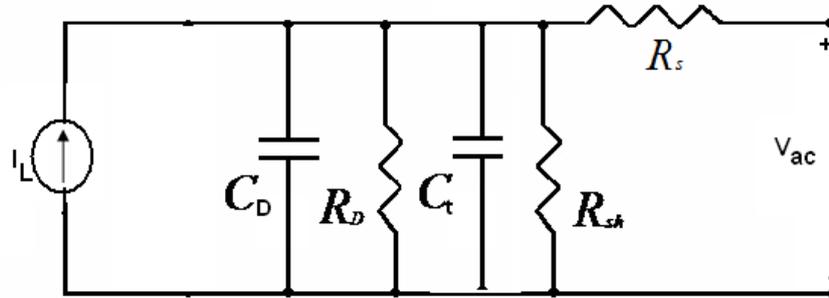


Figure I.3 schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

Ainsi à partir des représentations de Nyquist et de Bode, les spectres de l'impédance et de la phase pour différentes valeurs de la fréquence sont mis en évidence.

L'étude des résistances dynamique et parallèle en fonction de la phototension a été aussi présentée.

I-4 MEASUREMENT OF SOLAR CELL AC PARAMETERS USING IMPEDANCE SPECTROSCOPY

(Mesure des paramètres électriques d'une photopile par la méthode de la Spectroscopie d'impédances) [44]

L'auteur de ce document présente une méthode de détermination des paramètres d'une photopile.

Ainsi en utilisant le diagramme de Nyquist, il a représenté les spectres de l'impédance selon quelques modèles électriques de base:

- Le Spectre d'impédance d'une résistance pure (R) que nous présentons à la figure I.4

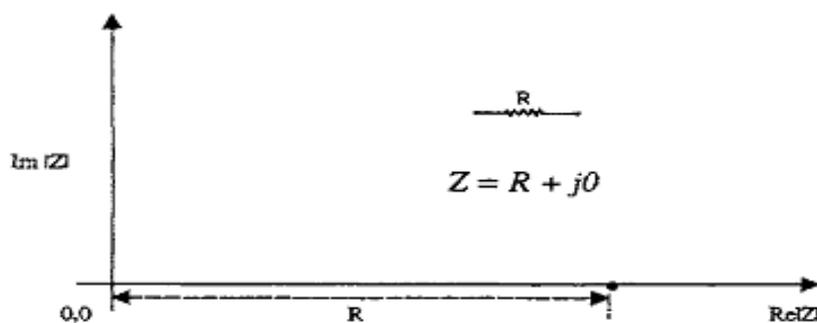


Figure I-4 Impédance d'une résistance pure (R)

- Le Spectre d'impédance d'une capacité pure (C) que nous présentons à la figure I.5

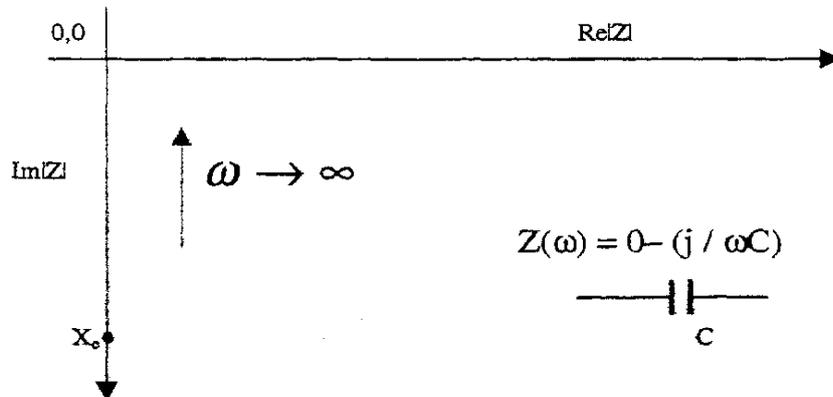


Figure I-5 Impédance d'une capacité pure (C)

- Le Spectre de l'impédance spectroscopique d'une inductance pure (L) que nous présentons à la figure I.6

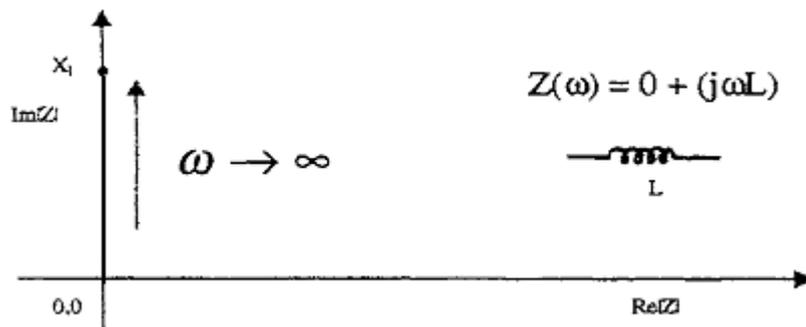


Figure I-6 Impédance d'une inductance pure (L)

- Le Spectre de l'impédance spectroscopique d'un circuit R-C en série que nous présentons à la figure I.7

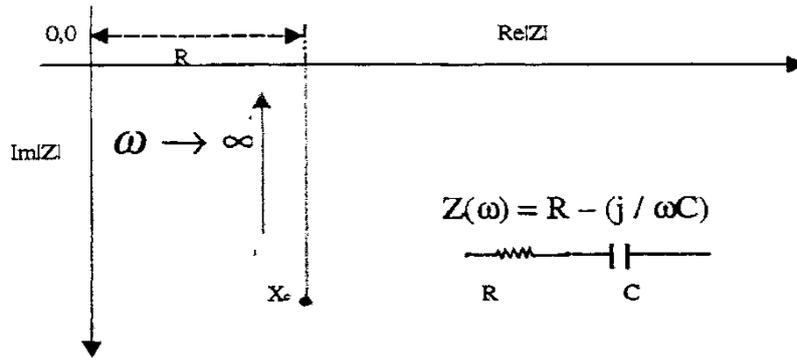


Figure I-7 Impédance d'un circuit R-C en série

- Le Spectre d'impédance d'un circuit R-L en série que nous exposons à la figure I.8

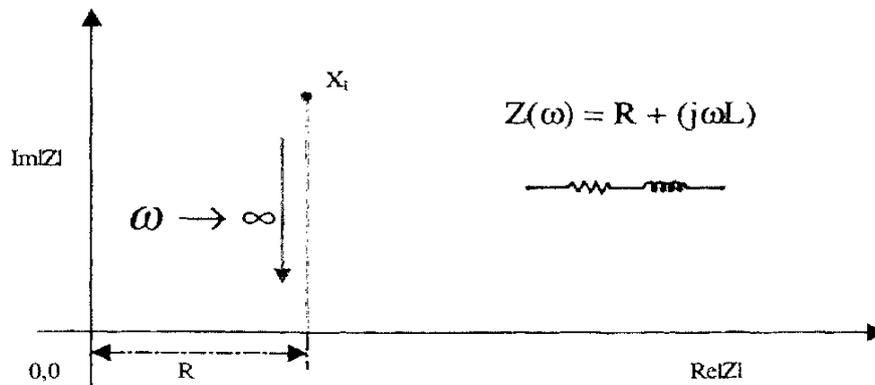


Figure I-8 : Impédance d'un circuit R-L en série

- Le Spectre d'impédance d'un circuit R-C en parallèle que nous montrons à la figure I.9

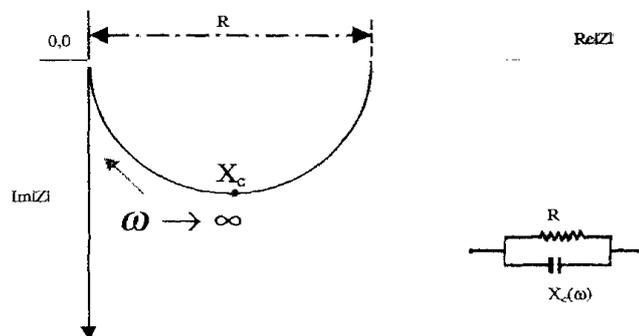


Figure I-9 : Impédance d'un circuit R-C en parallèle

- Le Spectre d'impédance d'un circuit R-L en parallèle que nous reproduisons à la figure I.10

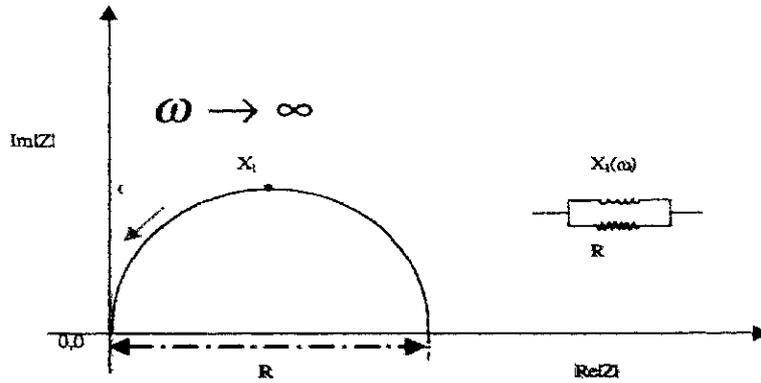


Figure I-10 : Impédance d'un circuit R-C en parallèle

Après cette étude théorique sur les circuits, l'auteur a déterminé quelques paramètres électriques de la photopile par la méthode de la spectroscopie d'impédance

I.5 ETUDE COMPARATIVE DES MODELES A UNE ET DEUX DIODES [45]

Dans cet article, afin de mieux décrire les paramètres électriques d'une cellule solaire, il est proposé deux modèles de circuits électriques équivalents en régime statique :

- l'un comportant une seule diode modélisant le courant de diffusion de Shockley
- l'autre ayant deux diodes modélisant le courant de Shockley et le courant de recombinaison qui est dû aux centres de pièges dans la zone de charge d'espace.

Les modèles à une diode et à deux diodes font l'objet de la présentation des figures I.4 et I.5 respectivement :

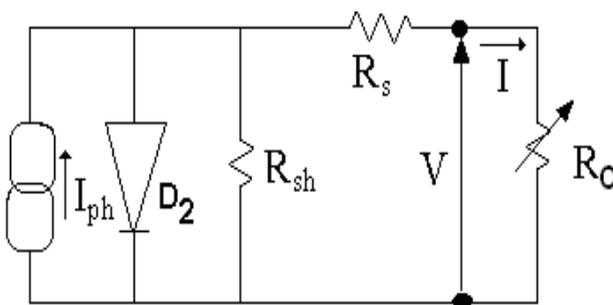


Figure I.11: Circuit électrique équivalent du modèle à une diode sous éclairement.

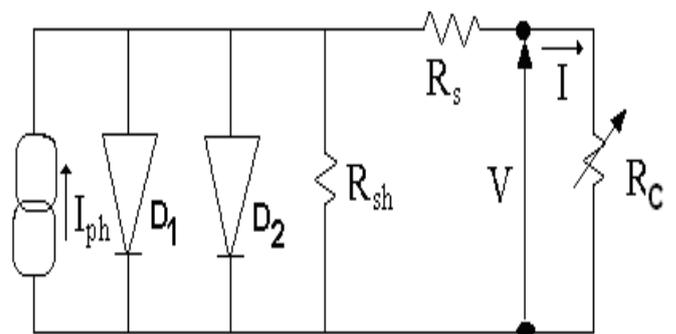


Figure I.12: Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes sous éclairement.

Où I_{ph} et I sont le photocourant et le courant dans le circuit extérieur de la photopile ; D_1 , D_2 les diodes ; R_s , R_{sh} et R_c les résistances série, shunt et de charge ; V la tension aux bornes de R_c .

En appliquant la loi des nœuds et celle des mailles, dans le cas général, on obtient l'expression (I-32) :

$$I = I_{ph} - \frac{V+I \cdot R_s}{R_{sh}} - I_{s1} \cdot \left(\exp \left[q \cdot \frac{V+I \cdot R_s}{K \cdot T} \right] - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp \left[q \cdot \frac{V+I \cdot R_s}{A \cdot K \cdot T} \right] - 1 \right) \quad (I-3)$$

avec I_{s1} et I_{s2} courants de saturation des diodes 1 et 2 respectivement ; A le facteur d'idéalité.

La caractéristique $I-V$ est habituellement décrite par l'équation implicite (I-32)

Pour déterminer les paramètres I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_{s2} et A , de nombreuses méthodes d'approximation sont proposées.

On peut citer parmi ces méthodes :

- Singal
- Warashima et Ushirokawa

La comparaison des résultats avec ceux obtenus par l'analyse numérique, permet de déterminer le domaine expérimental de validité des méthodes.

Ce dispositif expérimental comprend :

- Un APPLE II (ordinateur) qui commande une alimentation et lie deux voltmètres par l'intermédiaire d'un BUS IEEE.

La photopile est fixée sur un bloc de laiton où circule de l'eau à une température T mesurée par une sonde de platine et un thermomètre digital. On éclaire la photopile avec deux lampes de 100 Watts quartz-halogène à filament de tungstène au travers d'un filtre à eau de 1 cm d'épaisseur. La puissance lumineuse est contrôlée par un circuit électronique d'asservissement optique et au moyen d'un filtre spatial à lamelles.

- L'ordinateur commande la mesure de M points $[V(N), I(M)]$ tels que $V(1) > V(M)$ en visualisant la courbe $I(V)$ en temps réel et permet de caractériser les points remarquables suivants :

I_{sc} et R_{sho} ; V_{oc} et R_{so} ; I_{mp} , V_{mp} et R_{mp} .

- Méthode de SINGAL :

Dans cette méthode, les différentes approximations faites sont :

- l'effet de la résistance R_{sh} est négligeable.
- $\exp(V_{oc}/V_{th}) \gg 1$
- $I_{ph} \gg I_s$ et $I_{sc} = I_{ph}$.
- $R_s \cdot I_{ph} < V_{oc}/4$.

De l'équation (I-32), il s'en suit :

$$I_s = I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_{th}}\right) \quad (I-4)$$

$$(R_s)_F = V_{oc} \cdot \frac{\left[FF - (FF)_{R_s=0}\right]}{\Delta FF \cdot I_{sc}} \quad (I-5)$$

$$(R_s)_V = V_{oc} \cdot \frac{\left[\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}}\right)_{R_s=0}\right]}{\Delta V_{mp} \cdot I_{sc}} \quad (I-6)$$

Où

$$(FF)_{R_s=0} = \left(1 - \frac{1}{u}\right) \cdot \left(1 - \text{Log} \frac{u}{v}\right) \quad (I-7)$$

$$\Delta FF = \left(\frac{V_{oc}}{I_{sc} \cdot R_s}\right) \cdot \left[FF - (FF)_{R_s=0}\right] \quad (I-8)$$

$$\Delta FF = \left[w^2 \cdot \frac{(u-2)}{u^3} - 2 \cdot v \cdot w \cdot \frac{\left(1 - \text{Log} \frac{u}{v}\right)}{u^3} \right] \quad (I-9)$$

$$\left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}}\right)_{R_s=0} = 1 - \text{Log} \frac{u}{v} \quad (I-10)$$

$$\Delta V_{mp} = \left(\frac{V_{oc}}{I_{sc} \cdot R_s} \right) \cdot \left[\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)_{R_s=0} \right] \quad (I-11)$$

$$\Delta V_{mp} = -w \cdot \frac{(u-2)}{u^2} \quad (I-12)$$

avec

$$v = \frac{V_{oc}}{V_{th}} \quad (I-13)$$

$$w = v - \text{Log}v \quad (I-14)$$

$$u = w + 1 \quad (I-15)$$

Ces différentes données sont utilisées dans le programme afin de trouver les valeurs des paramètres A , R_s et I_{s2} .

- Méthode de WARASHINA et USHIROKAWA:

Cette méthode part des conditions aux limites V_{oc} et I_{sc} et des considérations suivantes :

- l'effet R_{sh} est négligeable.
- $I_{sc} = I_{ph}$.
- $\exp(V_{oc} / V_{th}) \gg \exp(R_s I_{sc} / V_{th})$

De l'équation (I-34), il s'en suit :

$$I_{s2} = I_{sc} \left\{ \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_{th}}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{V_{th}}\right) \right\}^{-1} \quad (I-16)$$

$$R(I) = \left(- \frac{dV}{dI} \right) = R_s + \frac{A \cdot K \cdot T}{q \cdot (I_{sc} - I)} \quad (I-17)$$

Les paramètres A et R_s sont déterminés graphiquement à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la courbe linéaire $R \left(\frac{1}{I_{sc} - I} \right)$ qui se déduit de la courbe expérimentale $I(V)$.

Ceci permet de calculer le paramètre I_{s2} en remplaçant R_s dans l'équation (I-45).

- Modèle à une exponentielle

Les variations de A et de R_s sont représentées pour des mesures effectuées à la température de 30°C et sous éclairément variable de 0,3AM1 à 1,5AM1. Ici, on note que le résultat obtenu avec la méthode de WARASHNA et USHIROKAWA est distinct des autres pour les faibles éclairéments. Par contre, la méthode de l'analyse numérique donne un résultat similaire à ceux obtenus par les trois méthodes ci-dessus citées.

L'accord ou le désaccord avec une méthode, peut être évalué grâce à la moyenne quadratique des distances entre les points expérimentaux et la courbe théorique correspondant aux paramètres du circuit équivalent calculés. Les valeurs fortes de la moyenne quadratique à faible éclairément, montre un désaccord entre l'expérience et le résultat calculé pour le modèle à une exponentielle. Cet écart peut être attribué soit au fonctionnement de la photopile ou à la méthode de calcul.

- Modèle à deux exponentielles

La résolution numérique de l'équation (I-34) par CHARLES et AL, permet d'obtenir cinq paramètres et on peut noter que la valeur de la résistance R_s ne semble pas varier avec l'éclairément, ni aussi I_{s1} et I_{s2} .

Les valeurs obtenues par la moyenne quadratique sont plus faibles que celles du modèle à une exponentielle : elles se rapprochent des points théoriques de l'équation à deux exponentielles. Ainsi, le fonctionnement de la photopile met en œuvre un courant de diffusion et un courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace.

Différentes méthodes d'approximation de calculs des paramètres électriques d'une photopile, sont présentées. Les mesures théoriques et expérimentales ont une très large gamme de différence pour le modèle à une diode, par contre pour le modèle à deux diodes, les mesures se rapprochent. Ceci permet de dire que le modèle à deux exponentielles est plus approprié pour décrire de la photopile au silicium en situation réelle.

I-6 A MODELLING FOR AC PHOTO CONDUCTANCE RESPONSE OF A N⁺-P-P⁺ CRYSTALLINE SILICON: PART I: MONOCHROMATIC LIGHT [46]

Ce document comporte deux chapitres :

Dans le chapitre I, une étude bibliographique sur le régime dynamique fréquentiel exposant des méthodes de détermination de la durée de vie τ , de la longueur d'onde de diffusion L et de la constante de diffusion D a été faite.

Dans le chapitre II, après la résolution de l'équation de continuité régissant l'évolution des porteurs de charge minoritaires photogénérés dans la base, l'amplitude du photocourant a été corrélée à la fréquence de modulation et à la vitesse de recombinaison à la jonction, ce qui a permis à l'auteur de constater l'évolution de la fréquence de coupure en fonction du coefficient d'absorption du matériau.

I.7 VITESSES DE RECOMBINAISON INTRINSEQUES D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE A JONCTION HORIZONTALE ET A UNE DIMENSION [47,48]

Les vitesses de recombinaison intrinsèques caractérisant certains phénomènes recombinatoires des porteurs minoritaires en excès au niveau des interfaces et des surfaces des photopiles (mono- ou bifaciales), font l'objet d'études pertinentes ayant pour but de contrôler leurs qualités. C'est ainsi que des études ont été menées sur la détermination des expressions des vitesses de recombinaisons en régimes dynamique fréquentiel en éclairage monochromatique.

Lorsqu'on éclaire la photopile bifaciale avec une lumière multispectrale en modulation de fréquence :

L'équation de continuité des porteurs minoritaires de charge dans la base en régime dynamique fréquentiel est de la forme:

$$D^*(\omega) \cdot \frac{\partial^2 \delta_\alpha(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta_\alpha(x,t)}{\tau} = -G_\alpha(x,t) + \frac{\partial \delta_\alpha(x,t)}{\partial t} \quad (I-18)$$

Où

- $\delta_\alpha(x,t)$ est la densité des électrons générés dans la base
- $G_\alpha(x,t)$ est le taux de génération en lumière blanche des porteurs de charge en excès en fonction de la profondeur de la base et de la fréquence de modulation
- $D^*(\omega)$ est le coefficient de diffusion

La solution de l'équation de continuité s'écrit sous la forme suivante:

$$\delta_\alpha(x,t) = \delta_\alpha(x) \cdot e^{i\omega t} \quad (I-19)$$

Où $\delta_\alpha(x)$ représente la composante spatiale du taux de génération et $e^{i\omega t}$ la composante temporelle.

L'expression du taux de génération en lumière blanche des porteurs minoritaires de charge s'écrit :

$$G_{\alpha}(x, t) = g_{\alpha}(x) \cdot e^{i\omega t} \quad (\text{I-20})$$

Où $g_{\alpha}(x)$ constitue la composante spatiale du taux de génération et $e^{i\omega t}$ la composante temporelle.

En remplaçant les expressions (II-2) et (II-3) dans celle-ci (II-1), on obtient une nouvelle équation de continuité :

$$\frac{\partial^2 \delta_{\alpha}(x)}{\partial x^2} - \left(\frac{1}{L_n^*} \right)^2 (1 + i \cdot \omega \cdot \tau) \cdot \delta_{\alpha}(x) = - \frac{g_{\alpha}(x)}{D^*(\omega)} \quad (\text{I-21})$$

$$\left(L_c^* \right)^{-2} = \left(\frac{1}{L_n^*} \right)^2 (1 + i \cdot \omega \cdot \tau) \quad (\text{II-22})$$

- L_n^* est la longueur de diffusion en fonction de la fréquence de modulation et de l'intensité du champ magnétique appliqué
- L_c^* est la longueur de diffusion complexe en fonction de la fréquence de modulation et de l'intensité du champ magnétique appliqué

En régime dynamique fréquentiel, le coefficient et la longueur de diffusion varient en fonction de la fréquence de modulation pour une durée de vie moyenne des porteurs minoritaires supposée constante. Ainsi, il suffit de remplacer le coefficient de diffusion D par $D^*(\omega)$ et la longueur de diffusion L par L_c^* pour obtenir de nouvelles expressions des vitesses de recombinaison intrinsèques à la jonction et à la face arrière qui varient en fonction de la fréquence de modulation :

- pour un éclairage par la face avant, les vitesses de recombinaison intrinsèques à la face arrière sont données par :

$$S_{bav1}(\omega) = - \frac{D}{L_{\omega}} \cdot \text{th} \left(\frac{H}{L_{\omega}} \right) \quad (\text{I-23})$$

$$Sb_{av2}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{D \cdot b_k \cdot \left[ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) - e^{-b_k \cdot H} \right] - \frac{D}{L\omega} \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right)}{ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) - e^{-b_k \cdot H} - L\omega \cdot b_k \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right)} \quad (I-24)$$

et à la jonction, on a :

$$Sf_{oav}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{D}{L\omega} \cdot \frac{\left[sh\left(\frac{H}{L\omega}\right) + L\omega \cdot b_k \cdot ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) \right] \cdot e^{-b_k \cdot H} - L\omega \cdot b_k}{1 - \left[ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) + L\omega \cdot b_k \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right) \right] \cdot e^{-b_k \cdot H}} \quad (I-25)$$

- pour un éclairage par la face arrière, les vitesses de recombinaison à la jonction et à la face arrière sont respectivement :

$$Sf_{oar}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{D \cdot b_k \cdot \left[ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) - e^{-b_k \cdot H} \right] - \frac{D}{L\omega} \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right)}{ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) - e^{-b_k \cdot H} - L\omega \cdot b_k \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right)} \quad (I-26)$$

$$Sb_{ar}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{D}{L\omega} \cdot \frac{\left[sh\left(\frac{H}{L\omega}\right) + L\omega \cdot b_k \cdot ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) \right] \cdot e^{-b_k \cdot H} - L\omega \cdot b_k}{1 - \left[ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) + L\omega \cdot b_k \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right) \right] \cdot e^{-b_k \cdot H}} \quad (I-27)$$

- pour un éclairage simultané des deux faces, les vitesses de recombinaison à la face arrière et à la jonction sont respectivement :

$$Sb_3(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{D}{L\omega} \cdot \frac{e^{-b_k \cdot H} \cdot \left[sh\left(\frac{H}{L\omega}\right) + L\omega \cdot b_k \cdot \left(1 + ch\left(\frac{H}{L\omega}\right)\right) \right] - L\omega \cdot b_k \cdot \left(1 + ch\left(\frac{H}{L\omega}\right)\right) + sh\left(\frac{H}{L\omega}\right)}{e^{-b_k \cdot H} \cdot \left[1 - ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) - L\omega \cdot b_k \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right) \right] + 1 - ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) + L\omega \cdot b_k \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right)} \quad (I-28)$$

$$Sf_{ode}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{D}{L\omega} \cdot \frac{\left[b_k \cdot L\omega \cdot \left\{ 1 + ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) \right\} \cdot \left\{ 1 - e^{-b_k \cdot H} \right\} - \left\{ 1 + e^{-b_k \cdot H} \right\} \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right) \right]}{\left[\left\{ ch\left(\frac{H}{L\omega}\right) - 1 \right\} \cdot \left\{ 1 + e^{-b_k \cdot H} \right\} + b_k L\omega \cdot \left\{ e^{-b_k \cdot H} - 1 \right\} \cdot sh\left(\frac{H}{L\omega}\right) \right]} \quad (I-29)$$

Le profil de chaque vitesse de recombinaison intrinsèque considérée, traduit une augmentation de la vitesse en fonction de la fréquence de modulation de l'éclairage ; ce qui

suppose qu'il y ait une recombinaison très importante des porteurs minoritaires en excès à la jonction et à la face arrière de la photopile.

L'action de la fréquence de modulation sur la photopile entraîne une baisse de performance de la photopile.

CONCLUSION

Dans l'étude bibliographique que nous venons de réaliser, des techniques de caractérisation de l'impédance dynamique d'une cellule solaire basées sur la méthode de la spectroscopie d'impédance ou en utilisant un courant continu modulé par un signal carré faible ont été présentées.

Par contre, l'influence de la longueur d'onde ou de la fréquence sur certains paramètres électriques et de recombinaison tels que : la capacité de transition, la résistance série, la résistance shunt n'ont pas été déterminés. Dans notre étude nous allons déterminer quelques paramètres électriques montrer l'influence de la fréquence de modulation, de la longueur d'onde et des vitesses de recombinaison sur ces paramètres électriques.

**CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DE LA
PHOTOPILE BIFACIALE SOUS ECLAIREMENT
MONOCHROMATIQUE EN REGIME DYNAMIQUE
FREQUENTIEL**

INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre sera l'étude des techniques de détermination des paramètres de recombinaison d'une cellule solaire bifaciale au silicium polycristallin [50-51-52-53-54] de type $n^+ - p - p^+$ en régime dynamique fréquentiel sous éclairage monochromatique. Elle se subdivisera en trois parties :

Dans un premier temps, nous établirons les équations régissant la diffusion des porteurs en excès générés dans la base lorsque la face arrière et les deux faces sont éclairées par une lumière monochromatique en régime dynamique fréquentiel.

Le second volet sera consacré à l'étude de la densité de photocourant, de la phototension et des vitesses de recombinaison pour différents modes d'éclairage.

Nous terminerons par étudier l'influence de la longueur d'onde et de la fréquence de modulation de la radiation excitatrice sur la densité du photocourant et de la phototension.

Nous aboutirons à l'étude des vitesses de recombinaison en fonction de la fréquence.

II-1 PRESENTATION DE LA PHOTOPILE BIFACIALE.

II-1-1 DESCRIPTION D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE AU SILICIUM

La photopile considérée est de type $n^+ - p - p^+$ et sa structure est présentée à la figure II.1:

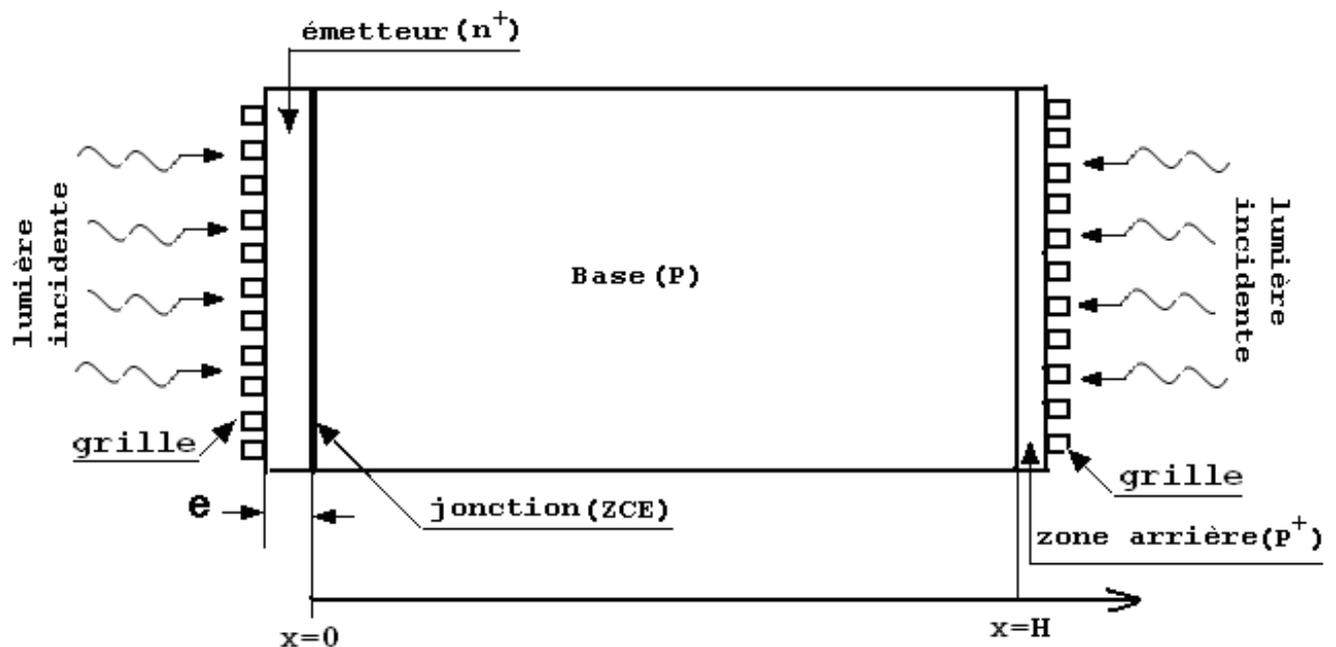


Figure II.1 : structure d'une photopile bifaciale au silicium de type $n^+ - p - p^+$

La photopile bifaciale au silicium représentée à la figure II-1 est composée principalement de quatre parties dopées différemment: l'émetteur, la base, la jonction (ou zone de charge d'espace) et la zone arrière de la base.

- **L'émetteur de type n^+** : l'épaisseur e est faible (0.5 à 1 μm), 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. Cette partie de la cellule est aussi appelée face avant de la photopile et peut recevoir de la lumière incidente.

- **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. Elle peut s'élever jusqu'à 400 μm . 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 (ou zone de charge d'espace):**

Lorsqu'on met en contact les deux semi-conducteurs dopés différemment (émetteur de type n et base de type p) alors on obtient 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 qui frappe la cellule peut pénétrer dans le cristal à travers la grille collectrice et provoquer l'apparition d'une tension électrique autour de la jonction, si le rayon possède une énergie suffisante.

- **Le BSF (back surface Field) 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 qui permet de renvoyer vers l'interface émetteur-base les porteurs minoritaires générés près de la face arrière [55-56].

Pour relier la cellule à une charge extérieure c'est-à-dire pour la collecte du courant résultant de l'absorption de la lumière (des photons), des électrodes sous forme de grilles métalliques sont déposées par sérigraphie sur les deux faces avant et arrière servant de contacts électriques. Pour améliorer les performances de la cellule solaire ces grilles doivent laisser passer le maximum de flux lumineux incident. C'est la cause pour laquelle une couche d'anti-reflet est déposée sur ces deux électrodes pour augmenter la quantité de lumière absorbée par la cellule.

Dans le cadre de notre étude, nous ferons les approximations suivantes :

- la contribution de l'émetteur au photocourant sera négligée par rapport à celle de la base [57]
- le champ cristallin sera négligé au niveau de la base de la photopile, seul le champ électrique à la jonction sera pris en compte.
- On va utiliser un modèle mathématique unidimensionnel, la jonction de la photopile sera prise comme origine ($x = 0$).

Lorsque la photopile est éclairée, il y a création de paires électron-trou dans la base. La distribution des porteurs minoritaires photocréés (électrons) dans la base est régie par l'équation de continuité.

II-1-2 FONCTIONNEMENT DE LA PHOTOPILE SOUS ECLAIREMENT.

Sous l'effet d'une excitation (optique ou électrique) des porteurs de charge sont générés dans la base de la photopile. Ces porteurs de charge peuvent diffuser dans les zones n et p à cause des gradients de concentration pour participer au courant externe ou déplacer par le champ de la zone de charge d'espace au niveau de la jonction (conduction). Certains subissent au sein de la photopile des recombinaisons dues aux défauts présents dans la photopile. Parmi d'autres nous pouvons citer des défauts comme les impuretés c'est-à-dire des atomes étrangers indésirables, les joints de grain (dislocation qui signifie la rupture du réseau cristallin), etc.

II-2 DENSITE DES PORTEURS MINORITAIRES GENERES DANS LA BASE DE LA PHOTOPILE PAR UNE LUMIERE MONOCHROMATIQUE EN MODULATION DE FREQUENCE

II-2-1 EQUATION DE CONTINUTE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL

Sous l'effet de l'excitation, des paires électron-trou sont générés aussi bien dans la jonction, l'émetteur et la base de la photopile.

Compte tenu des phénomènes de génération, de recombinaison et de diffusion au sein de la photopile, l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charge dans la base à l'abscisse x en régime dynamique fréquentiel est de la forme:

$$D \cdot \frac{\partial^2 \delta_n(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta_n(x,t)}{\tau} = -G_n(x,t) + \frac{\partial \delta_n(x,t)}{\partial t}$$

où

- $\delta_n(x,t)$ est la densité des porteurs minoritaires dans la base qui peut s'écrire sous la forme :

$$\delta_n(x, t) = \delta(x) \exp(i\omega t) \quad (\text{II-2})$$

avec $\delta_n(x)$ la composante spatiale et $e^{i\omega t}$ la composante temporelle.

➤ $G_n(x,t)$ est le taux de génération [58-59] donné par l'expression (II-3):

$$G_n(x, t) = g_n(x) \exp(i\omega t) \quad (\text{II-3})$$

avec $g_n(x)$ la composante spatiale et $e^{i\omega t}$ la composante temporelle. On a :

$$g_n(x) = \alpha I_0 (1 - R) \left[\xi \times e^{-\alpha x} + \chi \times e^{-\alpha(H-x)} \right]$$

n symbolise le mode d'éclairement : n = 1, n = 2, n = 3 pour un éclairage respectif de la face avant, de la face arrière et simultanément des deux faces de la photopile.

Les paramètres ξ et χ sont définis suivant le mode d'éclairement :

Mode d'éclairement	ξ	χ
Eclairement par la face avant	1	0
Eclairement par la face arrière	0	1
Eclairement simultanément des deux faces	1	1

$\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ ; $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion du matériau à la longueur d'onde λ ; H l'épaisseur de la photopile.

➤ D est le coefficient de diffusion

➤ τ est la durée de vie moyenne des porteurs minoritaires de charge.

Posons :

$$L^2 = \tau D \quad (\text{II-5a})$$

et

$$\frac{1}{L(\omega)^2} = \frac{1}{L^2} \times (i\omega\tau + 1) \quad (\text{II-5b})$$

où $L(\omega)$ est la longueur de diffusion complexe

En introduisant les équations (II-2), (II-3) et (II-4) dans (II-1) nous obtenons l'équation (II-6):

$$\frac{\partial^2 \delta_n(x)}{\partial x^2} - \frac{1}{L(\omega)^2} \cdot \delta_n(x) = - \frac{g_n(x)}{D} \quad (\text{II-6})$$

II- 2-2 SOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUTE ET CONDITIONS AUX LIMITES

II- 2-2 -1 SOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUTE

La solution générale de l'équation (II.6) s'écrit sous la forme :

$$\delta_n(x) = \delta_{1n}(x) + \delta_{2n}(x) \quad (\text{II-7})$$

$\delta_{1n}(x)$ est la solution particulière de l'équation avec second membre et $\delta_{2n}(x)$ la solution générale de l'équation sans second membre.

II- 2-2-2 SOLUTION PARTICULIERE DE L'EQUATION AVEC SECOND MEMBRE

$$\delta_{1n}(x) = A'' \cdot \exp(\xi \times e^{-\alpha x} + \chi \times e^{(-\alpha(H-x))}) \quad (\text{II-8a})$$

En remplaçant (II-8a) dans (II-6) on obtient une équation qui permet de calculer C.

On trouve :

$$A'' = \frac{-\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \quad (\text{II-8b})$$

$$\delta_{1n}(x) = \frac{-\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \cdot \exp(\xi \times e^{-\alpha x} + \chi \times e^{(-\alpha(H-x))}) \quad (\text{II-8c})$$

II- 2-2 -3 SOLUTION GENERALE DE L'EQUATION SANS SECOND MEMBRE

$$\delta_{2n}(x) = A_n \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B_n \sinh\left(\frac{x}{L}\right) \quad (\text{II-9})$$

Expression de la densité des porteurs de charges selon le mode d'éclairement est donnée par la relation (II-10)

$$\delta_n(x) = A \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - \frac{\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2 \cdot \exp(\xi \times e^{-\alpha x} + \chi \times e^{(-\alpha(H-x))})}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \quad (\text{II-10})$$

II- 2-2 -4 Conditions aux limites

Pour déterminer les expressions des coefficients A et B on utilise les conditions aux limites suivantes:

➤ à la jonction (x = 0):

$$\frac{\partial \delta_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{Sf_n}{D} \delta_n(0) \quad (\text{II-11a})$$

➤ à la face arrière de la base (x =H) :

$$\frac{\partial \delta_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = -\frac{Sb_n}{D} \delta_n(H) \quad (\text{II-11b})$$

Sf_n et Sb_n désignent respectivement les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction et à la face arrière de la base.

II- 3 DENSITE DES PORTEURS MINORITAIRES EN EXCES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR X DANS LA BASE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE DE LA PHOTOPILE

L'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base et pour un éclairage par la face arrière de la photopile est obtenue par la résolution de l'équation (II-10).

Avec les conditions aux limites des équations (II-11a) et (II-11b), on détermine les coefficients A_2 et B_2 correspondant à un éclairage par la face arrière. Pour cela, on obtient un système de deux équations à deux inconnues A_2 et B_2 . La résolution de ce système conduit aux expressions suivantes :

$$A_2 = \frac{\alpha.I.R.L(\omega)^3 \left[D(Sb + \alpha.D) + (Sf - \alpha.D) \left(D \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + L(\omega).Sb \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right) e^{-\alpha.H} \right]}{\left[\alpha^2.L(\omega)^2 - 1 \right] D \left[(D^2 + Sb.Sf.L(\omega)^2) \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + D.L(\omega).(Sf + Sb). \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right]}$$

(II-12)

$$B_2 = \frac{\alpha.I.R.L(\omega)^3 \left[[Sf.L(\omega)(Sb + \alpha.D)] - (Sf - \alpha.D) \left(D \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + L(\omega).Sb \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right) e^{-\alpha.H} \right]}{\left[(D^2 + Sb.Sf.L(\omega)^2) \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + D.L(\omega).(Sf + Sb). \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right] \left[\alpha^2.L(\omega)^2 - 1 \right] D}$$

(II-13)

En introduisant les coefficients A_2 et B_2 dans l'équation (II.10), on obtient l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès qui dépend de la profondeur x dans la base, des vitesses de recombinaison à la jonction Sf_2 et en face arrière Sb_2 , de la longueur d'onde λ et de la pulsation ω .

II-3-1 PROFIL DU MODULE DE LA DENSITE DES PORTEURS DE CHARGE PHOTOCREES DANS LA BASE

Nous représentons aux figures II.2 et II.3 le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base de la photopile pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

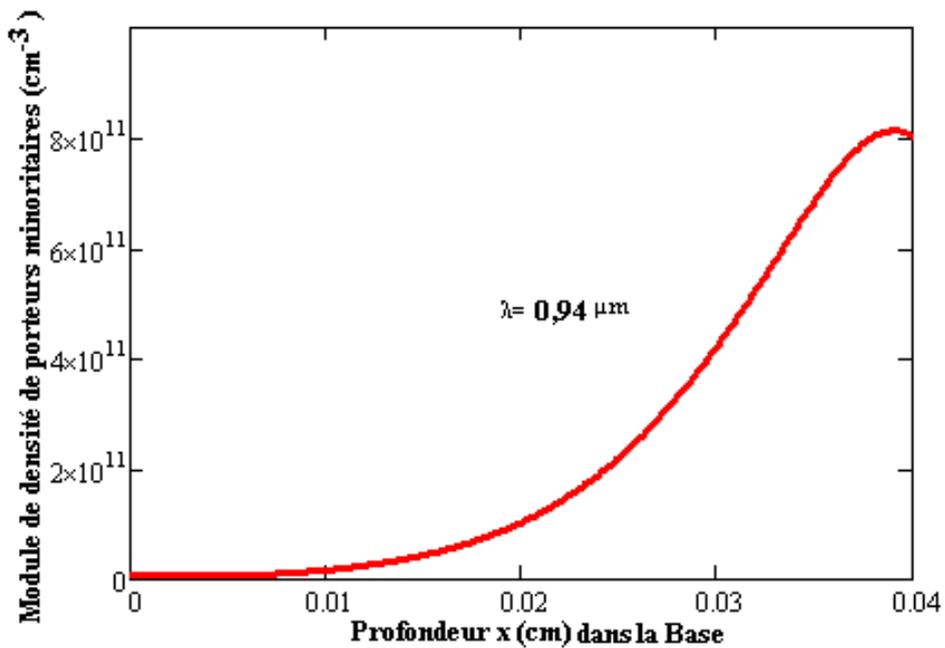


Figure II.2 : Module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur dans la base : éclairage par la face arrière. $\lambda=0,94\mu\text{m}$; $S_b = S_f = 3.10^3\text{cm.s}^{-1}$; $f=1,59.10^5\text{Hz}$; $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

La densité des porteurs augmente avec la profondeur x de la jonction jusqu'à une valeur maximale située à la face arrière de la base. Dans cette zone de la base, le gradient des porteurs étant positif, alors les porteurs minoritaires situés dans cette région peuvent traverser la jonction et générer un photocourant. Le maximum de densité correspond à un gradient des porteurs nul (il n'y a donc pas de passage d'électron). Ce maximum est situé à la face arrière de la base.

L'impact de la longueur d'onde sur la densité des porteurs est mis en évidence également à la figure II.3.

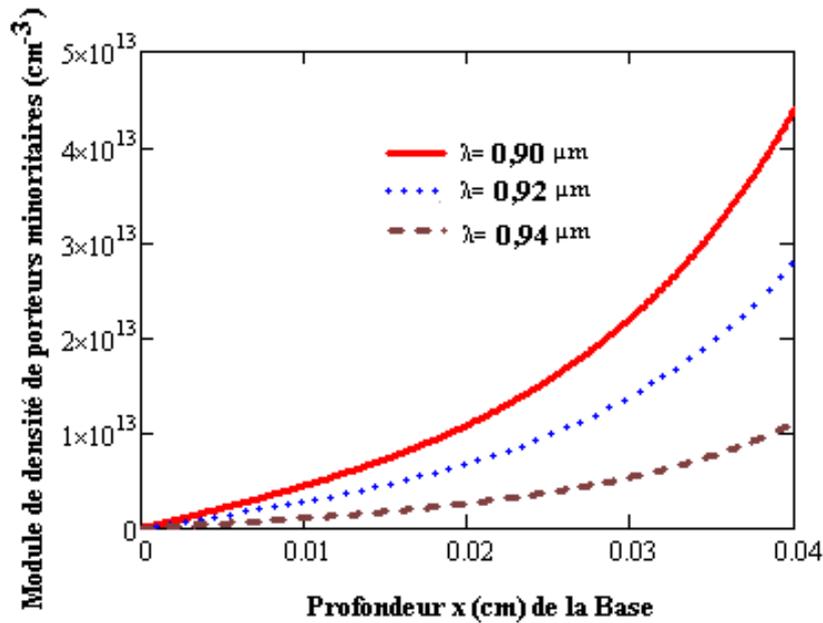


Figure II.3 : Module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur dans la base pour différentes longueurs d'onde : éclairage par la face arrière.

1°) $\lambda=0,90\mu\text{m}$; 2°) $\lambda=0,92\mu\text{m}$; 3°) $\lambda=94\mu\text{m}$; $f=1,59.10^5\text{Hz}$; $S_f = S_b = 3.10^3\text{cm.s}^{-1}$; $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

La densité des porteurs augmente avec la profondeur x de la jonction jusqu'à une valeur maximale, située presque à la face arrière de la base. Dans cette zone le gradient des porteurs est positif car les porteurs situés dans cette région peuvent traverser la jonction et générer un photocourant. Le maximum de densité correspond à un gradient des porteurs nul. Ensuite cette densité décroît avec la profondeur x dans la base. De ce fait, les porteurs ne peuvent pas traverser la jonction pour produire un photocourant. Ils vont se recombiner.

En outre, on remarque que : plus la longueur d'onde est élevée, moins est importante le maximum de la densité des porteurs minoritaires.

Après l'étude de l'effet de la longueur d'onde sur la densité des porteurs minoritaires, nous procéderons à l'étude de l'effet de la fréquence.

Nous représentons à la figure II.4 le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base de la photopile pour différentes fréquences de modulation.

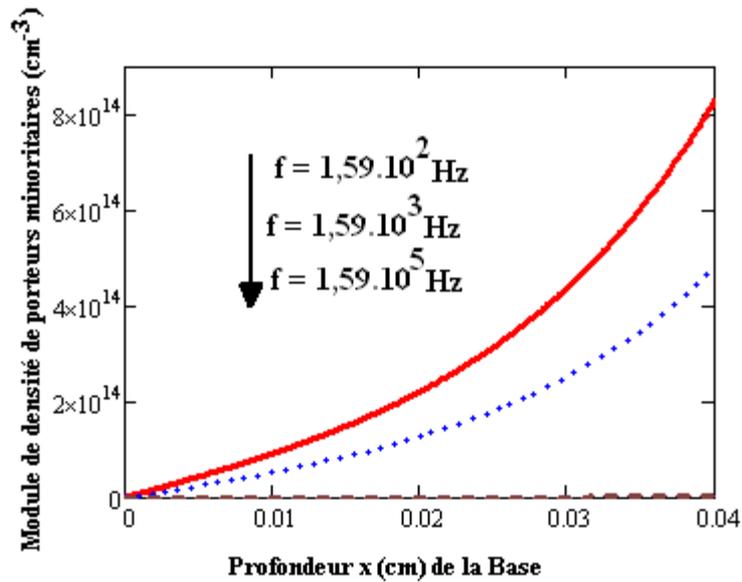


Figure II.4 : Module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes fréquences de modulation : éclairage par la face arrière.
 1°) $f=1,59.10^2\text{Hz}$; 2°) $f=1,59.10^3\text{Hz}$; 3°) $f=1,59.10^5\text{Hz}$; $\lambda=0,8\mu\text{m}$; $S_f = S_b = 3.10^3\text{cm.s}^{-1}$;
 $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Pour chaque courbe considérée, le module de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base augmente en fonction de la profondeur de la base. L'augmentation de la fréquence de l'éclairage constitue un blocage pour les porteurs minoritaires photogénérés dans la base. Car la photopile n'a pas le temps de se relaxer et il y a peu de charge qui vont franchir la jonction pour participer au photocourant.

II-4 DENSITE DE PORTEURS MINORITAIRES EN EXCES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR X DANS LA BASE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES.

La résolution de l'équation de continuité (II-10) donne l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base pour un éclairage simultané. On obtient les coefficients A_3 et B_3 en introduisant l'expression de la densité des porteurs $\delta_3(x)$ dans les équations (II-11a) et (II-11b) définissant les conditions aux limites. Ainsi on a un système de deux équations à deux inconnues A_3 et B_3 . La résolution de ce système conduit aux expressions suivantes :

$$A_3 = \frac{\alpha.I.R.L(\omega)^3 \left[D[(Sb + \alpha.D) + (Sb - \alpha.D)e^{-\alpha.H}] + [(Sf + \alpha.D) + (Sf - \alpha.D)e^{-\alpha.H}] \left[\begin{matrix} D.\cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + \\ L(\omega).Sb.\sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \end{matrix} \right] \right]}{\left[\alpha^2.L(\omega)^2 - 1 \right] D \cdot \left[\left(D^2 + Sb.Sf.L(\omega)^2 \right) \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + D.L(\omega).(Sf + Sb).\cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right]} \quad (II-14)$$

$$B_3 = \frac{\alpha.I.R.L(\omega)^3 \left[Sf.L(\omega) \cdot \left[(Sb + \alpha.D) + (Sb - \alpha.D)e^{-\beta.H} \right] - \left[(Sf + \alpha.D) + (Sf - \alpha.D)e^{-\alpha.H} \right] \left[\begin{matrix} L(\omega).Sb.\sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + \\ D.\cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \end{matrix} \right] \right]}{\left[\alpha^2.L(\omega)^2 - 1 \right] D \cdot \left[\left(D^2 + Sb.Sf.L(\omega)^2 \right) \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + D.L(\omega).(Sf + Sb).\cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right]} \quad (II-15)$$

En introduisant les coefficients A_3 (II-14) et B_3 (II-15) dans (II-10), on en déduit l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès pour un éclairage simultanée des deux faces.

Nous représentons à la figure II.5 le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base de la photopile pour différentes valeurs de la fréquence de modulation.

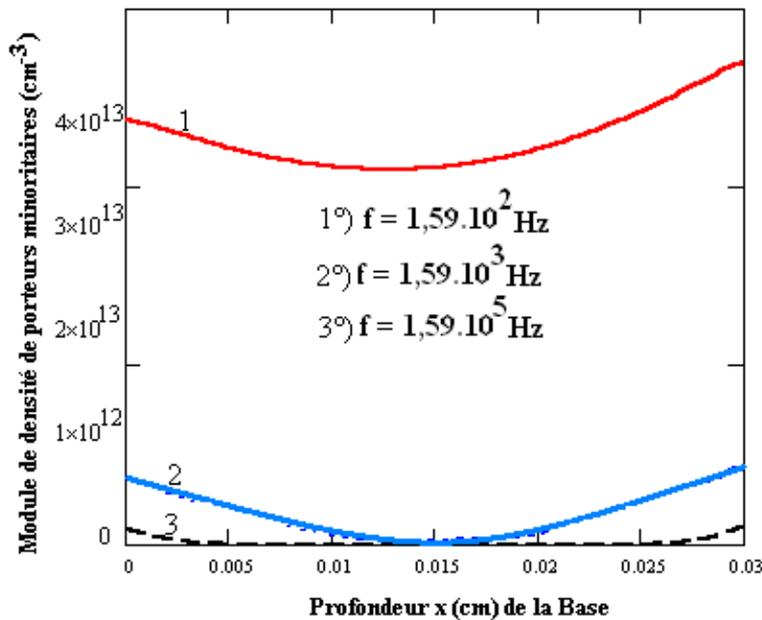


Figure II.5 : Module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de la fréquence de modulation : éclairage simultané.

1°) $f=1,59.10^2\text{Hz}$; 2°) $f=1,59.10^3\text{Hz}$; 3°) $f=1,59.10^5\text{Hz}$; $\lambda=0,8\mu\text{m}$; $Sf = Sb = 3.10^3\text{cm.s}^{-1}$; $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Cette courbe montre que la densité décroît avec la profondeur x de la jonction vers l'intérieur de la base. Ensuite elle augmente avec la profondeur x de l'intérieur de la base jusqu'à la fin de celle-ci.

Ainsi on distingue deux zones principales :

* Une première due à l'effet de l'éclairement sur la face avant et qui met en exergue deux phénomènes :

- Le maximum de la densité de photocourant située à la jonction ($x=0$). Cette densité est maximale car la vitesse de recombinaison Sf_3 est presque nulle par conséquent aucun porteur ne traverse la jonction. On est en situation de circuit ouvert.

- De la jonction vers l'intérieur de la base où le gradient des porteurs est négatif. Dans cette région on a une diminution des porteurs avec l'augmentation de la profondeur x .

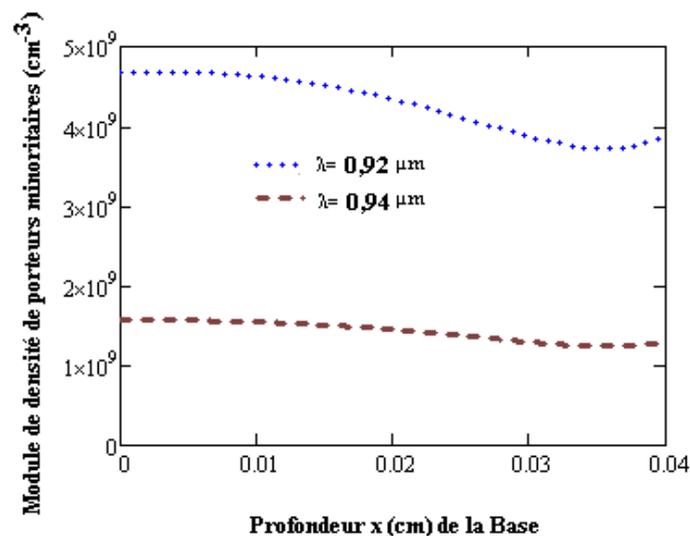
* Une seconde région due à l'effet de l'éclairement par la face arrière divisée en 2 régions également :

- une 1^{ère} localisée de l'intérieur de la base jusqu'au deuxième maximum de la courbe avec un gradient de densité positif,

- une 2^{ème} région ayant un gradient nul qui correspond au 2^{ème} maximum de la courbe située à la fin de la base.

Comme pour les autres modes d'éclairement [65] la densité des porteurs minoritaires pour un éclairage simultané diminue lorsque la fréquence augmente.

Nous représentons à la figure II.6 le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base de la photopile pour différentes longueurs d'onde.



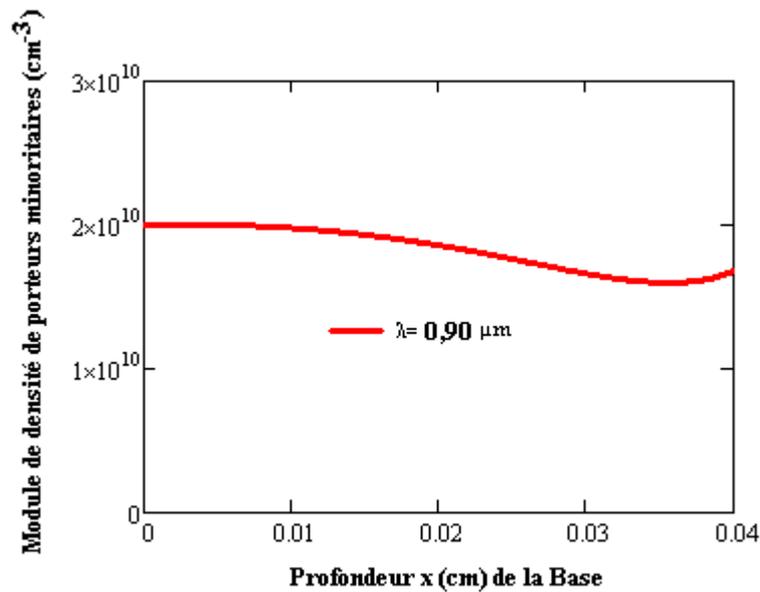


Figure II.6 : Module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes longueurs d'onde: éclairage simultané
 1°) $\lambda=0,90\mu\text{m}$; 2°) $\lambda=0,92\mu\text{m}$; 3°) $\lambda=94\mu\text{m}$; $f=1,59.10^5\text{Hz}$; $S_f = S_b = 3.10^3\text{cm.s}^{-1}$;
 $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Pour chaque courbe considérée, le module de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base est maximal au voisinage de la jonction émetteur-base et en face arrière. En outre nous notons que ce maximum diminue lorsque la longueur d'onde augmente.

L'étude comparative des différents modes d'éclairage permet comme l'on pouvait s'y attendre, de conclure que l'éclairage simultané des deux faces produit plus de porteurs minoritaires en excès que l'éclairage de la face avant [65] ou de la face arrière de la photopile.

Lorsque la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base varie en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, un photocourant est produit aux bornes de la photopile ; ce photocourant est étudié en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes fréquences de l'éclairage et de la longueur d'onde.

II-5 ETUDE DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

II-5-1 GENERALITES

La densité de photocourant est le photocourant rapporté à la surface de la cellule solaire. Elle est due à la diffusion des porteurs minoritaires de charge à travers la jonction. Connaissant

l'expression de la densité de porteurs minoritaires, nous pouvons déterminer l'expression de la densité du photocourant en utilisant la loi de FICK. Elle est donnée par la relation (II-15):

$$J_n(\lambda, \omega, S_{f_n}, S_{b_n}) = q \cdot D \cdot \left. \frac{\partial \delta_n(x, \lambda, \omega, S_{f_n}, S_{b_n})}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (\text{II-15})$$

D'après la relation (II-15) l'expression de la densité de photocourant devient une fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Ainsi les densités des photocourants J_n peuvent être représentées en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f suivant les différents modes d'éclairement (face arrière et simultanément les deux faces) de la photopile.

II-5-2 ETUDE DU PROFIL DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

La résolution de l'équation (II-15) pour un éclairage par la face arrière ($n = 2$) donne l'expression de la densité de photocourant. Elle est de la forme suivante :

$$J_2(\lambda, \omega, S_{f_2}, S_{b_2}) = q \cdot D \cdot \left. \frac{\partial \delta_2(x, \lambda, \omega, S_{f_2}, S_{b_2})}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (\text{II-16})$$

Avec S_{f_2} la vitesse de recombinaison à la jonction pour un éclairage par la face arrière.

A partir de l'équation (II-16), nous allons étudier la densité de photocourant en fonction de la vitesse de combinaison à la jonction en faisant ressortir les effets de la fréquence de modulation et de la longueur d'onde.

Nous représentons aux figures II.7 et II.8 le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes fréquences.

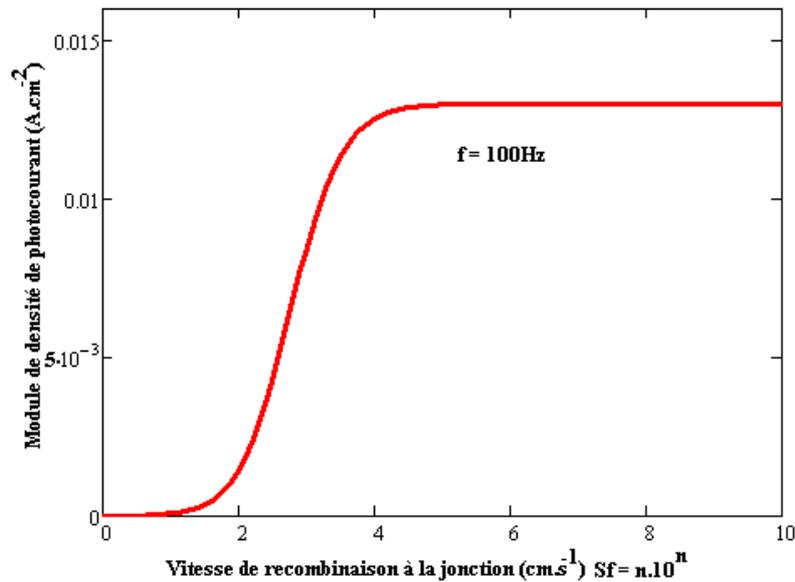


Figure : II.7 Module de densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes fréquences de modulation : éclairnement par la face arrière. $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

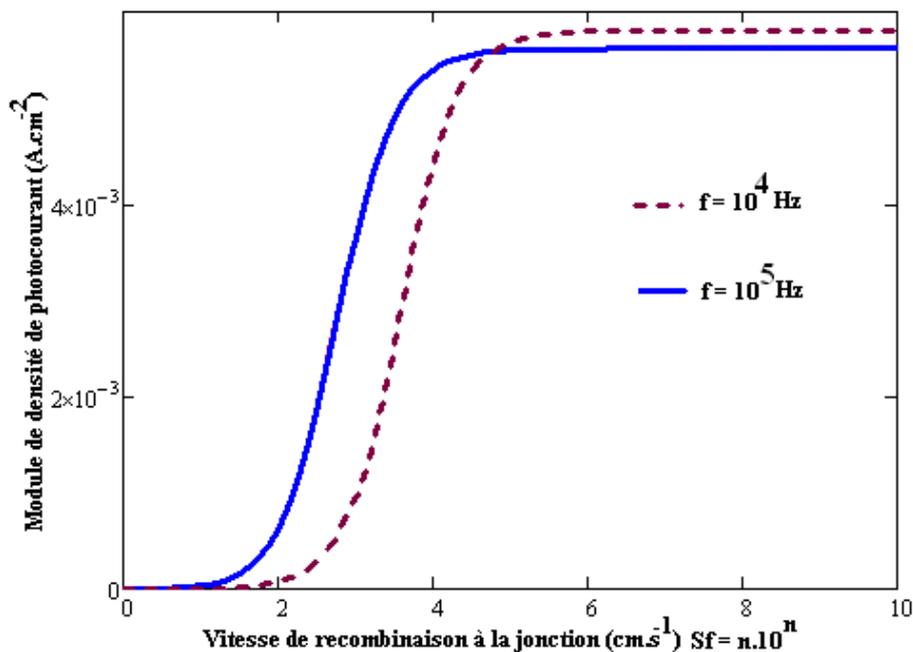


Figure : II.8 Module de densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes fréquences de modulation : éclairnement par la face arrière. $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

Ces profils de densité de photocourant présentent trois parties dont deux paliers : l'un des paliers correspond à de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction où la densité de courant est presque nulle et la deuxième partie où la densité augmente jusqu'à une valeur constante qui correspond au deuxième palier avec les grandes valeurs de la vitesse de

recombinaison à la jonction. Cette valeur constante de la densité de photocourant correspond à la valeur du courant de court circuit pour un éclairage par la face arrière.

L'augmentation de la fréquence de l'éclairage diminue considérablement la densité de photocourant de la photopile. Ceci nous amène à étudier la variation du module de photocourant en fonction de la fréquence de modulation de l'éclairage pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

Nous représentons à la figure II.9 le profil de la densité de photocourant en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

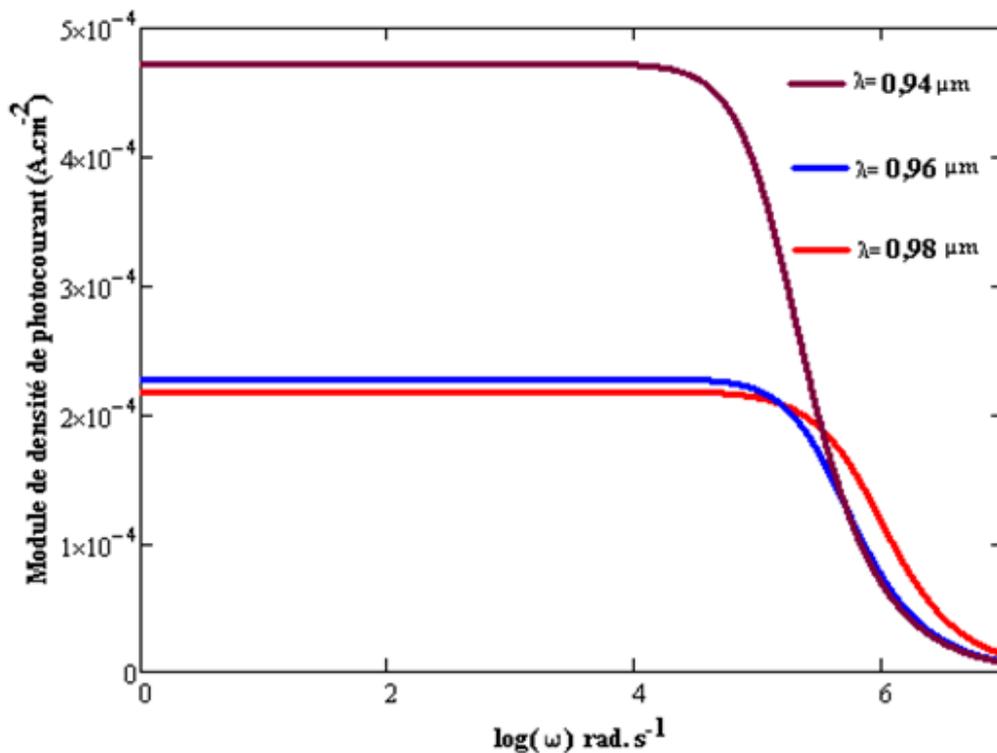


Figure : II.9 Module de densité de photocourant en fonction de la fréquence de modulation pour différentes longueurs d'onde : éclairage simultané. $S_f = S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

Pour chacune des courbes, le photocourant est pratiquement constant dans l'intervalle de fréquence $[0 \text{ Hz} ; 4.10^4 \text{ Hz}]$ (régime quasi-statique) puis diminue brusquement dans l'intervalle $[4.10^4 \text{ Hz} ; 6.10^6 \text{ Hz}]$ jusqu'à atteindre une valeur à partir de laquelle la réponse de la photopile est pratiquement nulle. Les très hautes fréquences bloquent la relaxation de la photopile.

En outre, on peut noter que le courant de court-circuit diminue lorsqu'on augmente la fréquence de modulation ou la longueur d'onde.

II-5-3 ETUDE DU PROFIL DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

La résolution de l'équation (II-15) pour un éclairage simultané des deux faces ($n = 3$) donne l'expression de la densité de photocourant.

Nous représentons à la figure II.10 le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes fréquences de modulation.

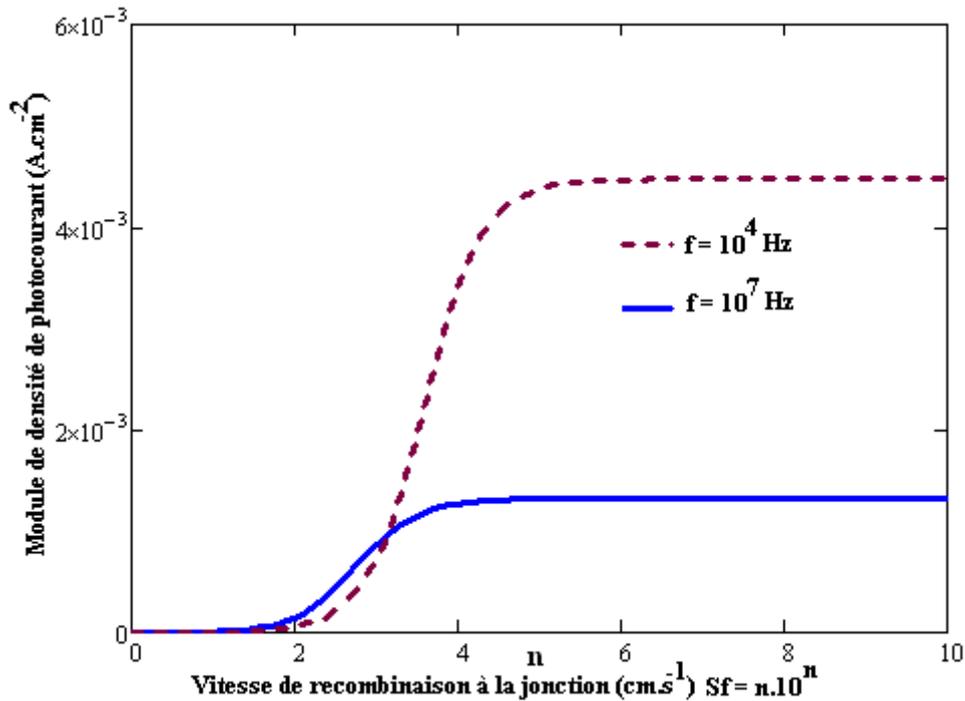


Figure : II.10 Module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes fréquences de modulation : éclairage simultané des deux faces. $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

L'allure de ces courbes est identique à celle obtenue lors de l'éclairage par la face avant [65] ou arrière de la photopile. La différence fondamentale est que l'amplitude de la densité de photocourant pour un éclairage simultané des deux faces est supérieure à celle obtenue lors de l'éclairage sur la face avant et sur la face arrière de la photopile.

Pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la densité de photocourant est presque nulle. Ensuite elle augmente avec la vitesse de recombinaison jusqu'à une valeur constante donnant la valeur du courant de court-circuit.

Nous représentons à la figure II.11 le profil de la densité de photocourant en fonction de la valeur de la fréquence de modulation pour différentes longueurs d'onde.

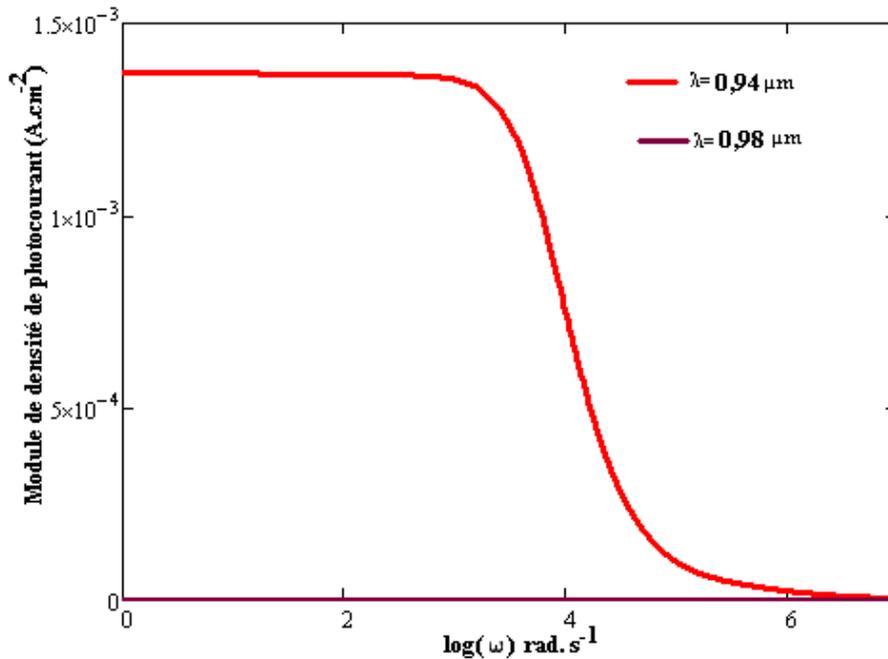


Figure : II.11 Module de densité de photocourant en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde : éclairage simultané des deux faces. $S_f = S_b = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

On retrouve une allure observée pour l'éclairage par la face avant ou arrière de la photopile. La différence fondamentale est que l'amplitude de la densité de photocourant pour un éclairage simultané des deux faces est supérieure à celle obtenue lors de l'éclairage sur la face avant et sur la face arrière de la photopile. Cela montre l'intérêt d'éclairer simultanément les deux faces de la photopile

II-5-4 ETUDE COMPARATIVE DES PROFILS DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

Nous représentons à la figure II.12 le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différents modes d'éclairage.

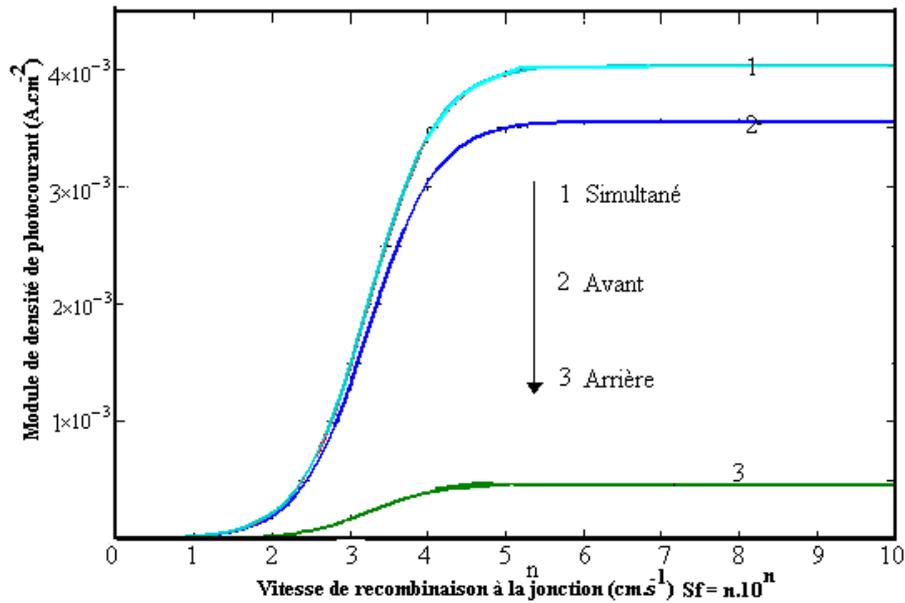


Figure : II.12 Module de densités de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f différents modes d'éclairement. $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $f = 1,59.10^4 \text{Hz}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

Ces profils de la densité de courant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction présentent tous les mêmes allures. Pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison (S_f tendant vers 0) ces densités tendent vers 0. Ensuite elles augmentent avec la vitesse de recombinaison à la jonction. Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison les différentes courbes de densités présentent un plateau correspondant à une densité maximale de photocourant équivalent à une situation de court-circuit.

On note que l'amplitude de la densité de photocourant pour un éclairage simultané est supérieure à celles des densités obtenues par la face avant et la face arrière.

II-5-5 PHOTOCOURANT DE COURT CIRCUIT

La densité du photocourant de court-circuit est obtenue à partir de l'expression du photocourant (II-15) en faisant prendre à la vitesse de recombinaison à la jonction S_f de très grandes valeurs. Elle correspond au courant maximal que peut débiter la photopile. Ceci pour les différents modes d'éclairement

$$J_n(\lambda, \omega, S_{f_n}, S_{b_n}) \rightarrow J_{cc}(\lambda, \omega, S_{b_n})$$

$$S_{f_n} > 10^5 \text{ cm.s}^{-1} \quad (\text{II-17})$$

II-6 ETUDE DE LA PHOTOTENSION

II-6-1 GENERALITES

Lorsque la photopile est éclairée, il apparaît aux bornes de celle-ci une phototension V_n dont l'expression est donnée par la relation de Boltzmann :

$$V_n = V_T \ln \left(\frac{N_b}{n_i} \delta_n(0) + 1 \right) \quad (\text{II-18})$$

Où N_b est le taux de dopage de la base ($N_b=10^{16}\text{cm}^{-3}$)

n_i est la densité intrinsèque des porteurs minoritaires $n_i=10^{10}\text{cm}^{-3}$

V_T la tension thermique définie par la relation (II-19):

$$V_T = \frac{K.T}{q} \quad (\text{II-19})$$

Sachant que :

K la constante de Boltzmann

q la charge de l'électron

T la température absolue à l'équilibre thermique ($T=300^\circ\text{K}$)

n le type d'éclairement

II-6-2 ETUDE DU PROFIL DE LA PHOTOTENSION POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

Nous représentons à la figure (II.13) la variation de la densité de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison S_f à la jonction pour différentes longueurs d'onde.

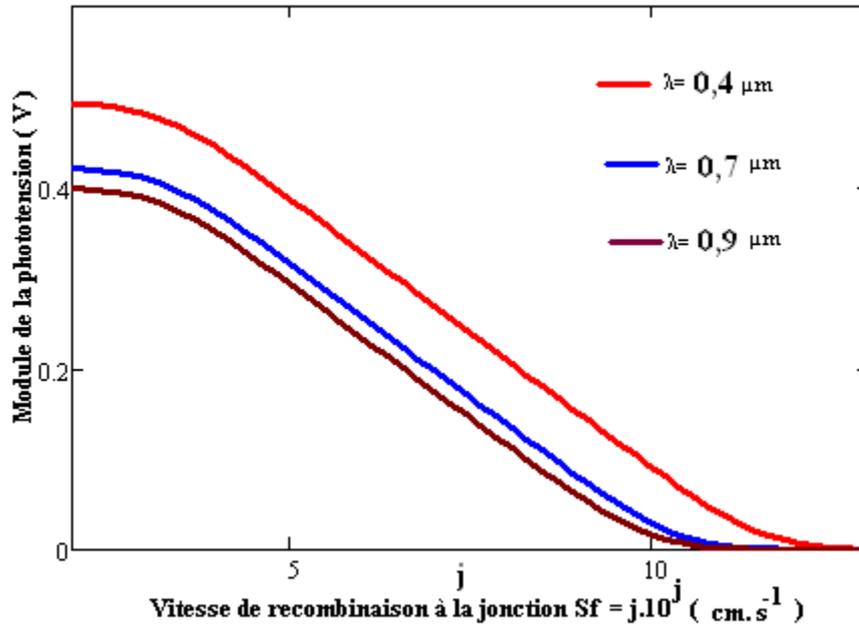


Figure : II.13 Module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison Sf à la jonction pour différentes longueurs d'onde : éclairage par la face arrière. $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $f = 1,59.10^5 \text{Hz}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

Pour une longueur d'onde donnée, la phototension est maximale aux faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf_2 . C'est une situation du circuit ouvert. Par contre pour les valeurs élevées de la vitesse de recombinaison à la jonction, la phototension diminue et tend vers zéro. Cette tension nulle caractérise le fonctionnement de la photopile en situation de court-circuit au quel cas elle débite un courant maximum. Ces figures montrent également que la phototension de circuit ouvert diminue avec la longueur d'onde.

Nous représentons à la figure (II.14) les variations de la densité de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison Sf à la jonction pour différentes fréquences de modulation.

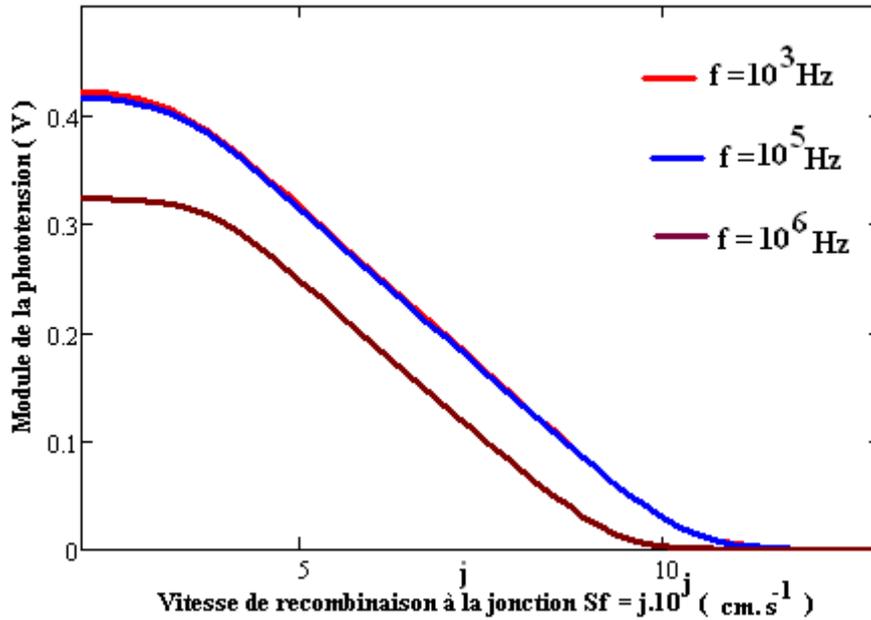


Figure : II.14 Module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison Sf à la jonction pour différentes fréquences de modulation : éclairage par la face arrière. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$, $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

La phototension, pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, est maximale et correspond à la tension de circuit ouvert puis elle diminue progressivement pour s'annuler lorsque la vitesse de recombinaison croît. Ces figures montrent également que la phototension diminue avec la fréquence de modulation.

II-6-3 ETUDE DU PROFIL DE LA PHOTOTENSION POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

Nous représentons à la figure (II.15) la variation de la densité de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison Sf à la jonction pour différentes longueurs d'onde.

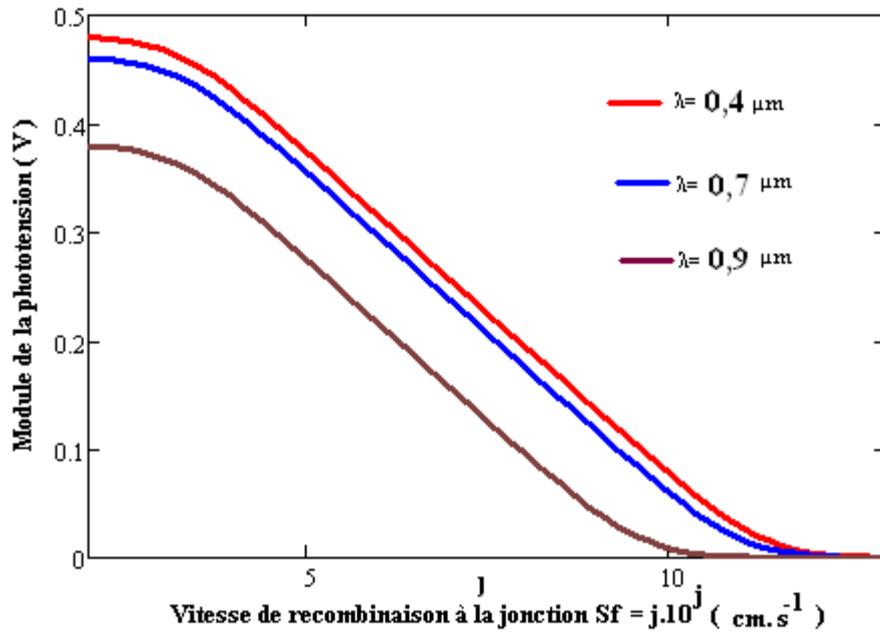


Figure : II.15 Module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison Sf à la jonction pour différentes longueurs d'onde : éclairage simultané. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $f = 1,59 \cdot 10^5 \text{Hz}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

Pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf_3 , la phototension tend vers une valeur constante et maximale. C'est la situation du circuit ouvert. Cette valeur maximale de la phototension est la tension de circuit ouvert. Pour les vitesses de recombinaison Sf_3 tendant vers des valeurs très élevées (les porteurs minoritaires de charge traversent en permanence la jonction) la phototension décroît rapidement jusqu'à une valeur presque nulle. C'est le point de fonctionnement de court circuit de la photopile.

La phototension de circuit ouvert diminue lorsque la longueur d'onde augmente.

Nous représentons à la figure (II.16) la variation de la densité de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison Sf à la jonction pour différentes fréquences de modulation.

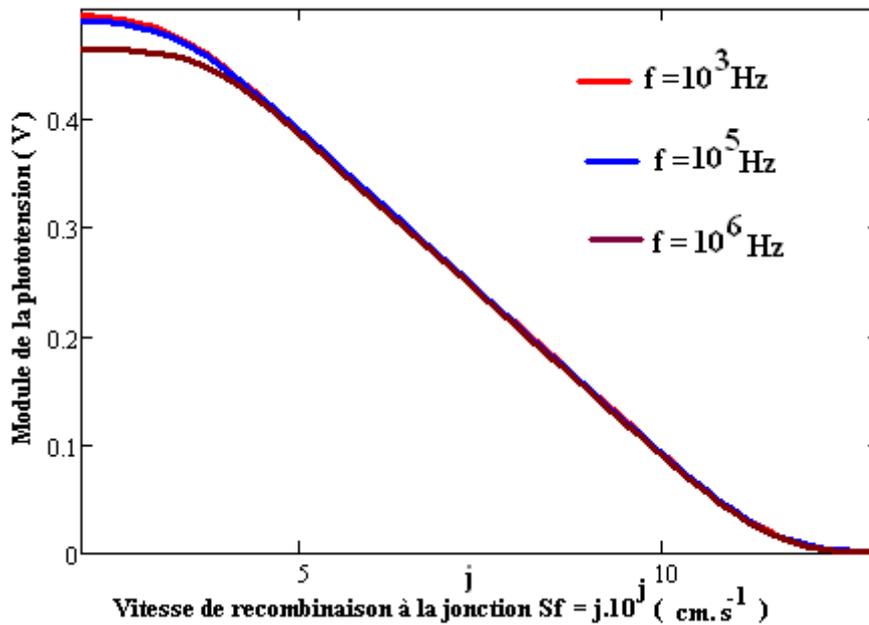


Figure : II.16 Module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison Sf à la jonction pour différentes fréquences de modulation : éclaircissement simultané. $S_b = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Pour une fréquence donnée, L'allure de ces courbes est identique à celle obtenue à la figure II.14. En outre on remarque que lorsque la fréquence de modulation augmente, la phototension de circuit ouvert diminue.

II-6-4 ETUDE COMPARATIVE DES PHOTOTENSIONS POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

A la figure II.17, nous présentons la variation de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents modes d'éclaircissement de la photopile

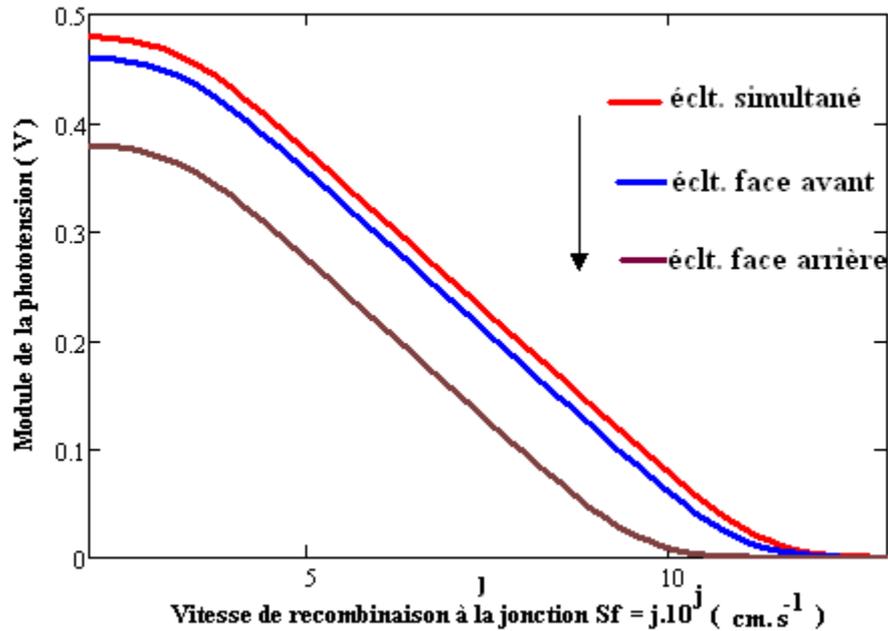


Figure : II.17 Variation de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents modes d'éclairage de la photopile. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$; $f = 1,59 \cdot 10^5 \text{Hz}$

Cette figure montre que pour une fréquence et une longueur d'onde données, la phototension pour un éclairage simultané est légèrement supérieure à celle obtenue par un éclairage sur la face avant. Ces deux valeurs de phototension sont supérieures à celle obtenue par un éclairage sur la face arrière de la base.

Maintenant que nous avons étudié le photocourant ainsi que la phototension, nous pouvons analyser la caractéristique photocourant- tension de la photopile

II-7 ETUDE DE LA CARACTERISTIQUE DENSITE DE PHOTOCOURANT-PHOTOTENSION DE LA PHOTOPILE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

Nous représentons à la figure II-18 la variation de la densité de photocourant en fonction de la phototension pour un éclairage par la face arrière de la photopile.

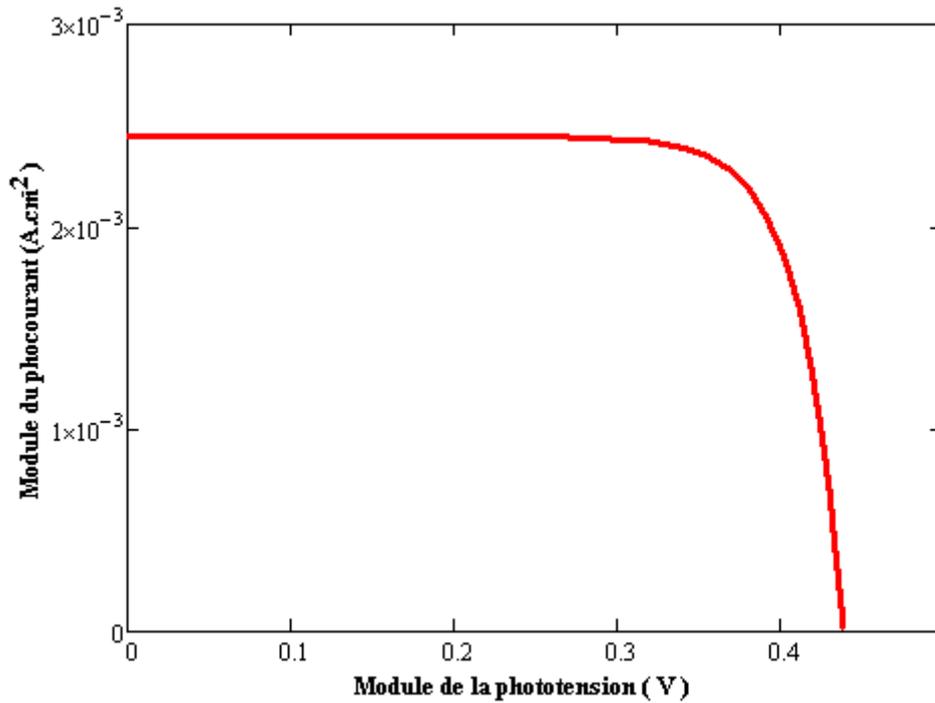


Figure : II.18 Variation du courant en fonction de la phototension. $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$; $f = 1,59.10^5 \text{Hz}$

Le photocourant est maximal pour les faibles valeurs de la phototension, il correspond au courant de court-circuit. Lorsque la phototension augmente et tend vers la phototension de circuit ouvert, le photocourant diminue pour tendre vers zéro.

Nous représentons à la figure II-19 les variations du courant en fonction de la phototension pour un éclairage simultané des deux faces de la photopile.

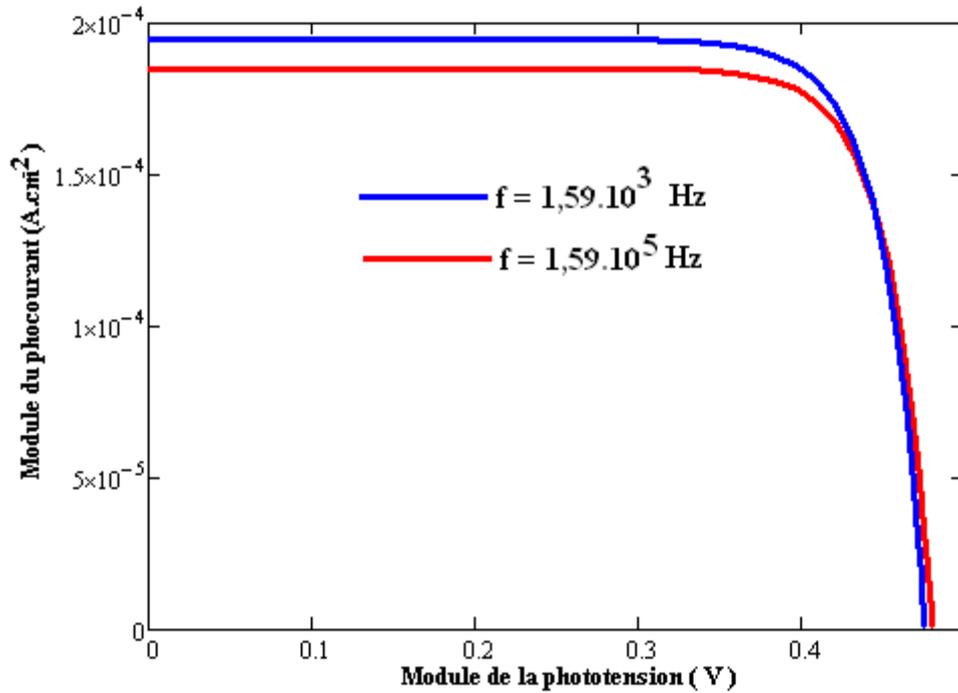


Figure : II.19 Variation du courant en fonction de la phototension. $S_f = S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$;

La caractéristique courant-tension pour un éclairage simultané des deux faces de la photopile représentée par la figure II-17 montre que pour une tension inférieure à 0.4 V , la densité de courant est constante. Elle correspond à la valeur de la densité de courant de court-circuit. Ensuite la densité de courant décroît rapidement pour des valeurs de tension supérieure à 0.4 V pour s'annuler. Ce point où la densité de courant est nulle correspond au voisinage du circuit ouvert.

Ces courbes montrent également que la tension du circuit- ouvert et le courant de court circuit varient avec la fréquence.

Nous représentons à la figure II-20 la variation du courant en fonction de la phototension pour différents modes d'éclairage de la photopile.

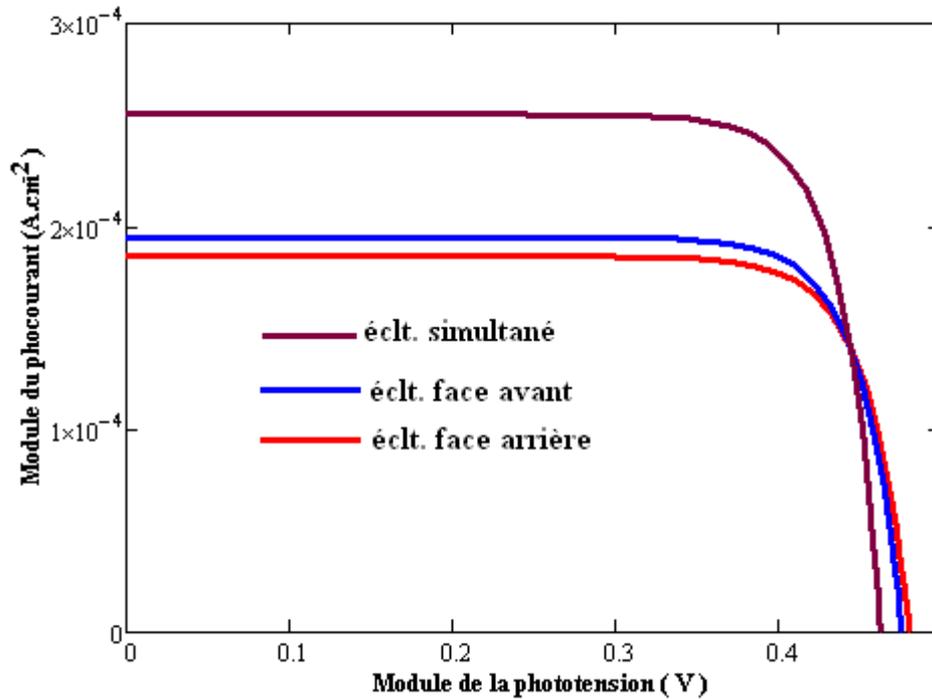


Figure : II.20 Variation du courant en fonction de la phototension. $S_f = S_b = 3.10^3 cm.s^{-1}$; $\lambda = 0,92 \mu m$; $L = 0,02 cm$; $H = 0,03 cm$; $D = 26 cm^2/s$.

Cette figure II-20 comparative des caractéristiques I-V obtenues pour les trois modes d'éclairage permet, d'affirmer que pour une fréquence et une longueur d'onde données, la densité de courant comme la tension de circuit ouvert pour un éclairage simultané des deux faces sont supérieures à celles obtenues par un éclairage sur la face avant et sur la face arrière de la photopile.

Quant à la densité de courant et de la tension de circuit ouvert obtenue pour un éclairage par la face arrière sont inférieures aux deux autres.

Ces trois caractéristiques I-V suivant les différents modes d'éclairage ont la même allure. Elles possèdent chacune une partie horizontale qui correspond à une zone où le photocourant est indépendant de la phototension. Ces caractéristiques correspondent à celle d'une source de courant qui débite une intensité électrique constante quelle que soit la valeur de la tension ; cette valeur de l'intensité est assimilable au photocourant de court-circuit. Comme la photopile n'est pas idéale, elle présente des fuites de courant. Ces courants de fuite sont caractérisés par la présence d'une charge interne dans la photopile qu'on appelle résistance de fuite ou résistance shunt.

7-1 ETUDE DE LA RESISTANCE SHUNT POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

A la lumière de ce que nous avons dans le paragraphe précédent, nous pouvons proposer un circuit électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne en court-circuit à la figure II-21 [86,87].

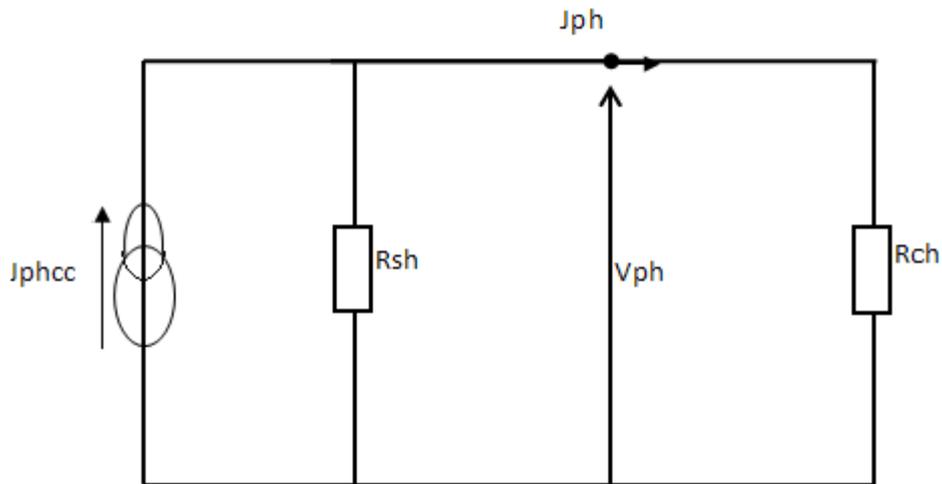


Figure : II.21 Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en court-circuit

J_{phcc} : densité de photocourant de court-circuit

R_{sh} : résistance shunt

J_{ph} : densité de photocourant

V_{ph} : phototension

R_{ch} : résistance de charge

La loi à la maille (R_{sh} , V_{ph} , R_{sh}) appliquée à ce circuit permet d'écrire :

$$V_{ph} = R_{sh}(I_{cc} - J_{ph}) \quad (II-20)$$

De cette expression, on tire la résistance shunt, qui s'écrit :

$$R_{sh} = \frac{V_{ph}}{I_{cc} - J_{ph}} \quad (II-21)$$

7-1-1 ETUDE DE LA RESISTANCE SHUNT POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

Nous représentons à la figure II-22 les variations de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f pour différentes longueurs d'onde.

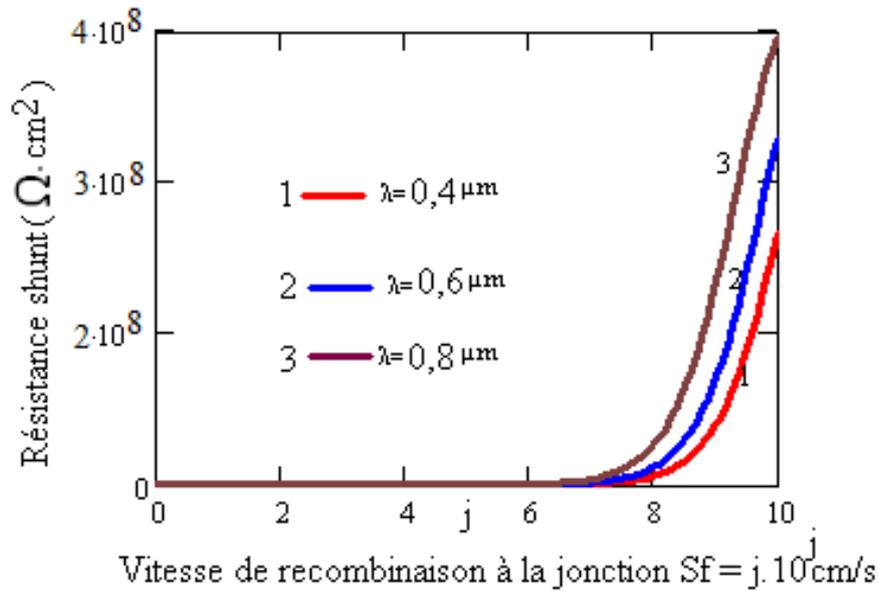


Figure : II.22 Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $f = 1,59.10^4 \text{Hz}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$. Eclairage par la face arrière.

Pour une longueur d'onde donnée, la résistance shunt est presque nulle lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction S_f est inférieure à 6.10^6cm/s puis elle augmente de façon exponentielle si S_f est supérieure à 6.10^6cm/s .

En outre, on remarque qu'une augmentation de la longueur d'onde entraîne une augmentation de la résistance shunt.

Nous représentons à la figure II-23 les variations de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f pour différentes valeurs de la fréquence.

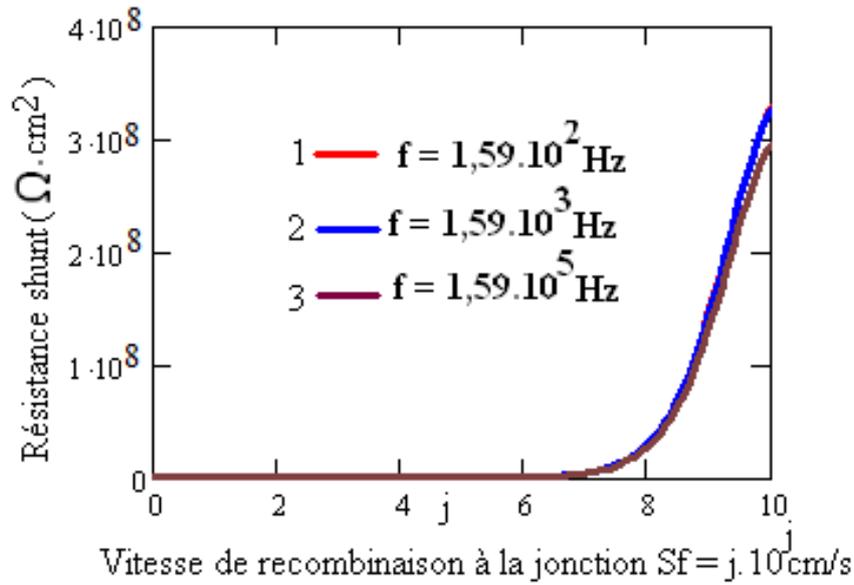


Figure : II.23 Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$. Eclairage par la face arrière.

Nous avons également une augmentation de la résistance shunt avec la fréquence comme avec la longueur d'onde mais on peut noter que pour des vitesses de recombinaison à la jonction élevées, l'influence de la longueur d'onde sur la résistance shunt est plus nette que celle de la fréquence ; cela laisse penser que la résistance shunt reste peu sensible à la fréquence de modulation.

7-1-2 ETUDE DE LA RESISTANCE SHUNT POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

Les variations de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la longueur d'onde sont schématisées par la figure II.24.

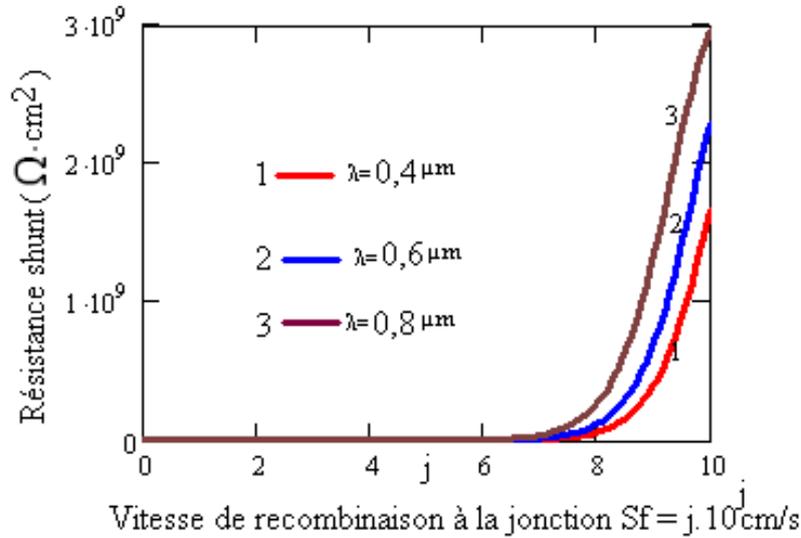


Figure : II.24 Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction : éclairage simultané. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $f = 1,59 \cdot 10^4 \text{ Hz}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

La résistance shunt augmente lorsqu'on passe d'un éclairage par la face arrière à un éclairage simultané des deux faces. La résistance shunt augmente avec la longueur d'onde.

Nous représentons à la figure II-25 les variations de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la fréquence.

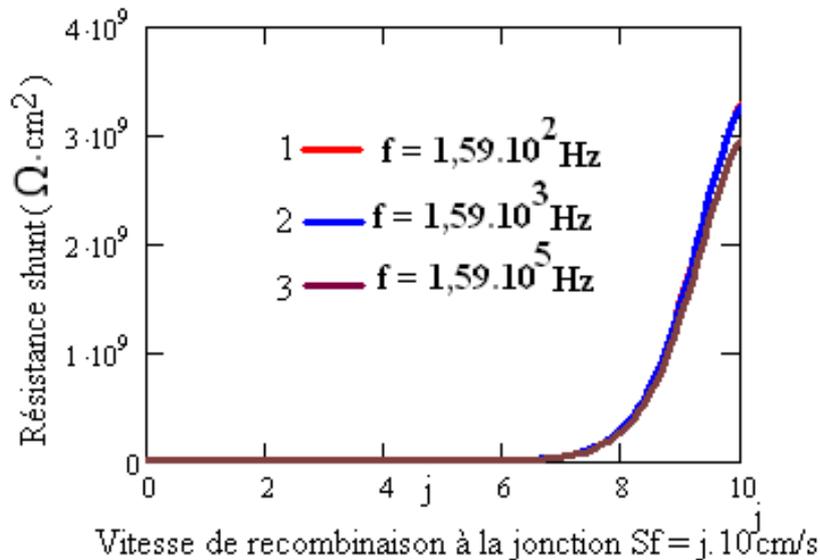


Figure : II.25 Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction : éclairage simultané. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Nous obtenons les mêmes profils. En revanche nous pouvons noter que la résistance shunt diminue lorsque que la fréquence de modulation augmente.

7-2 ETUDE DE LA RESISTANCE SERIE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

Les caractéristiques courant-tension présentent un palier presque vertical (figure II.20) ou la phototension varie faiblement avec le photocourant. Cela correspond à une source de tension constante quel que soit le courant débité. Cette tension est assimilable à la phototension de circuit ouvert. Comme la photopile n'est pas idéale, elle présente des fuites. Ces dernières sont caractérisées par la présence dans le circuit équivalent d'une résistance R_s , montée en série avec la source de tension.

Nous proposons à la figure II-26 un circuit électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne en circuit ouvert. [88,89]

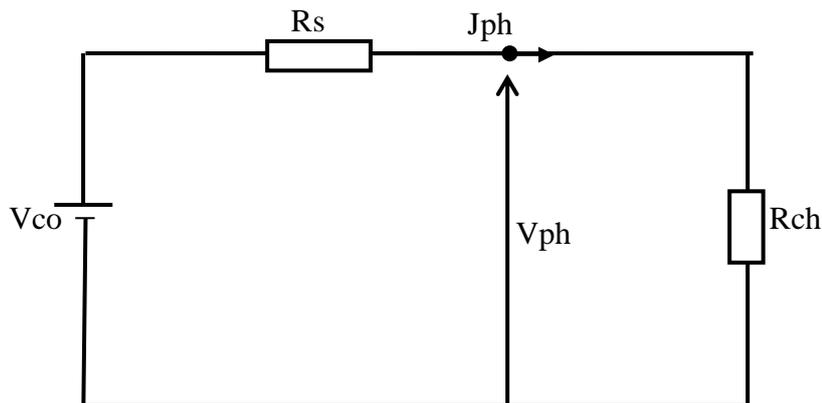


Figure : II.26 Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en circuit ouvert.

V_{co} : phototension assimilable à la phototension de circuit ouvert

R_s : résistance série

J_{ph} : densité de photocourant

V_{ph} : phototension

R_{ch} : résistance de charge

En appliquant la loi des mailles, on obtient la relation suivante :

$$V_{ph} = V_{co} - R_s \cdot J_{ph} \quad (\text{II-22})$$

De cette expression, on tire la résistance série, qui s'écrit :

$$R_s = \frac{V_{co} - V_{ph}}{J_{ph}} \quad (\text{II-23})$$

7-2-1 ETUDE DE LA RESISTANCE SERIE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

Nous représentons à la figure II-27 les variations de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

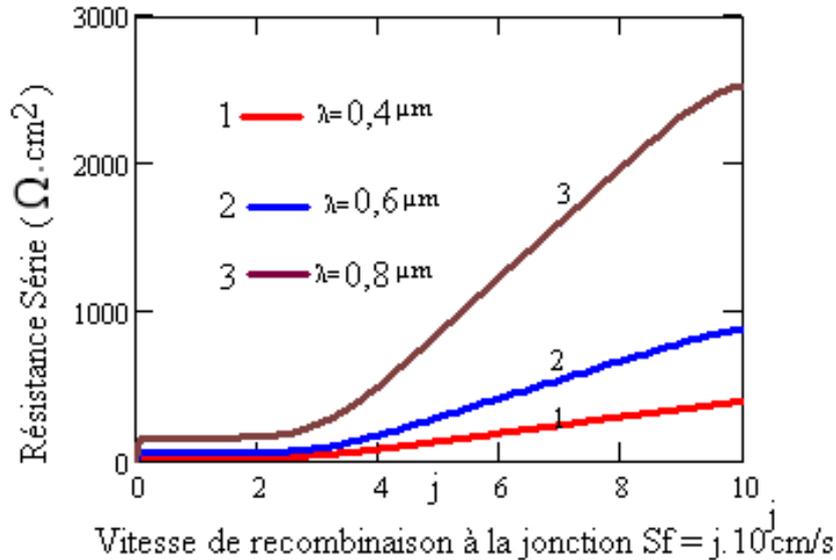


Figure : II.27 Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction : éclairage par la face arrière. $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $f = 1,59.10^4 \text{Hz}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

Pour une longueur d'onde donnée, la courbe présente deux parties :

- $Sf < 2.10^2 \text{cm/s}$; la résistance série est constante
- $Sf > 2.10^2 \text{cm/s}$; la résistance série augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction.

En outre, une augmentation de la longueur d'onde entraîne une augmentation de la résistance série.

Nous représentons à la figure II-28 les variations de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la fréquence

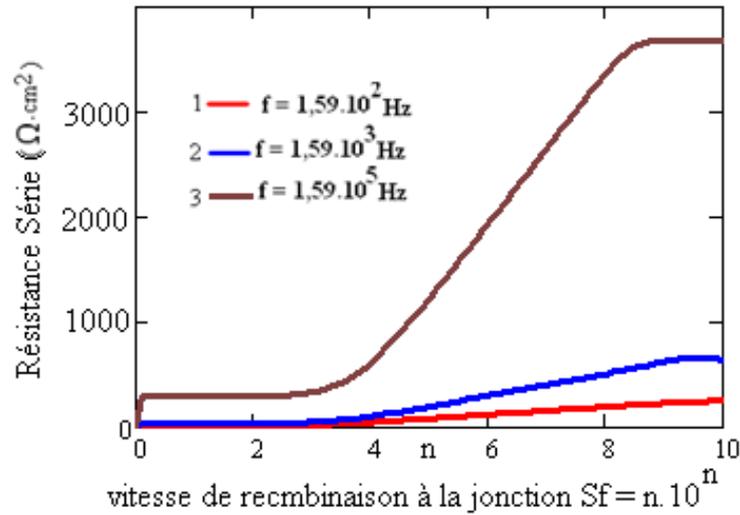


Figure : II.28 Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction : éclairage par la face arrière. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Pour une fréquence donnée, la courbe présente deux parties :

- $Sf < 2 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$; la résistance série est constante
- $Sf > 2 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$; la résistance série augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction.

En outre, on constate que l'influence de la longueur d'onde est plus visible que celle de la fréquence

7-2-2 ETUDE DE LA RESISTANCE SERIE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

Nous représentons à la figure II-29 les variations de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la longueur d'onde

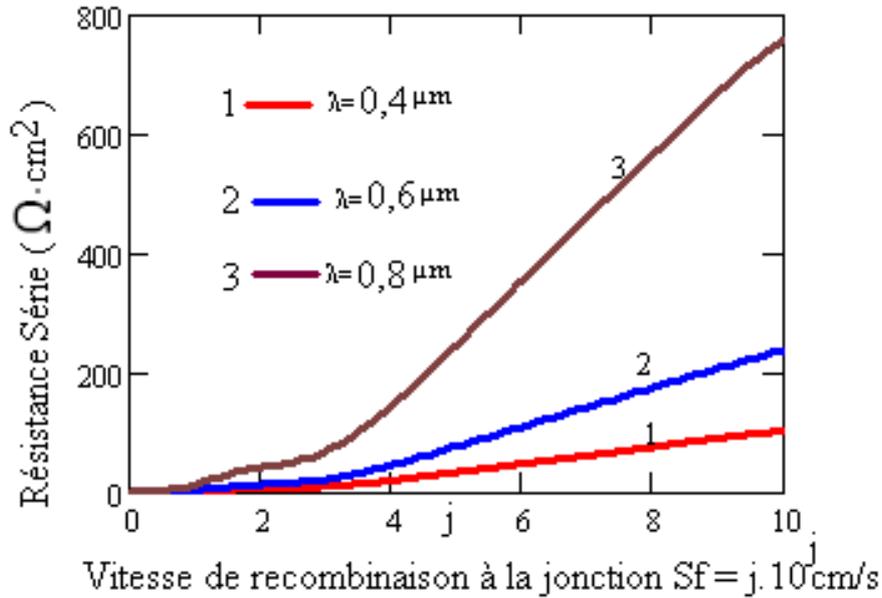


Figure : II.29 Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction : éclairage simultané. $S_f = S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $f = 1,59 \cdot 10^4 \text{ Hz}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Nous représentons à la figure II-30 les variations de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f pour différentes valeurs de la fréquence

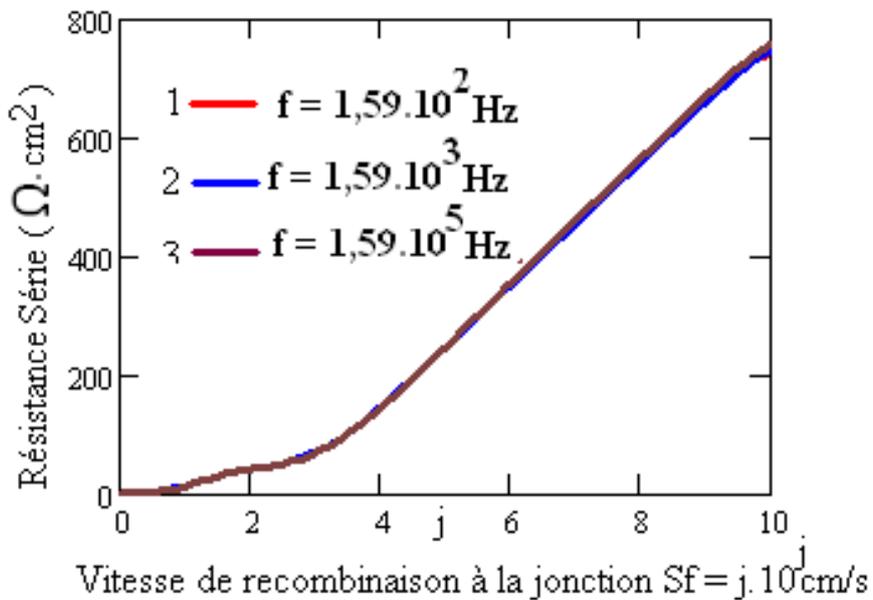


Figure : II.30 Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction : éclairage simultané. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$; $L = 0,02 \text{ cm}$; $H = 0,03 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

La résistance série diminue lorsqu'on passe d'un éclairage par la face arrière à un éclairage simultané.

II-8 ETUDE DE LA VARIATION DE LA CAPACITE DE DIFFUSION EN FONCTION DE LA FREQUENCE DE MODULATION POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

L'expression de la capacité de diffusion est donnée par la relation (II.19) :

$$C_n = \frac{dQ_n}{dV_n} \quad \text{Avec} \quad Q_n = q.\delta(x)_n|_{x=0} \quad \text{et} \quad Vn = V_T . \ln \left[1 + \frac{N_B}{n_i^2} . \delta(x)_n|_{x=0} \right] \quad (\text{II.24})$$

A la figure II-31 nous présentons les variations de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes longueurs d'onde, ceci pour un éclairage par la face arrière de la photopile.

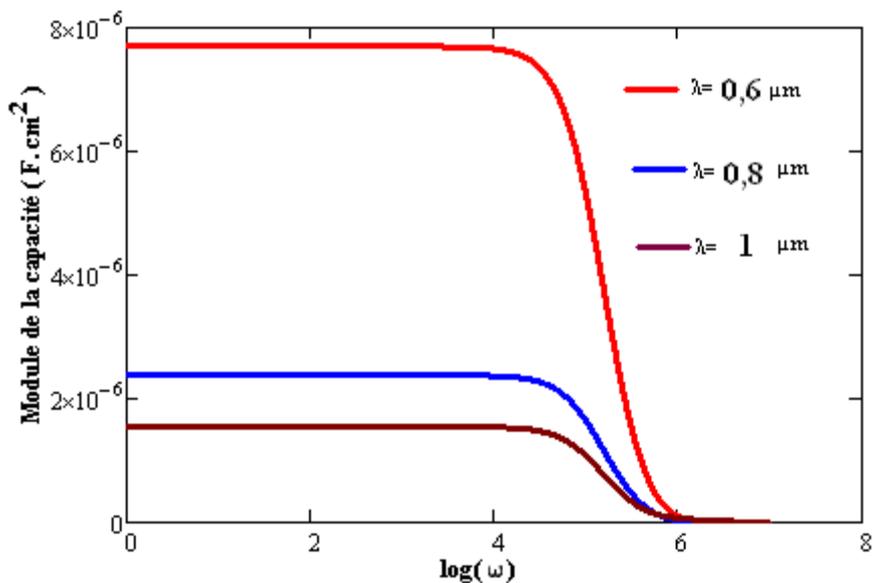


Figure : II.31 Variation de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes longueurs d'onde : éclairage par la face arrière. $S_b = S_f = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Pour une longueur d'onde donnée, Le module de la capacité de diffusion est constant pour les faibles valeurs de la fréquence et diminue considérablement pour s'annuler lorsque la fréquence est élevée.

A la figure II-32 nous présentons les variations de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde et pour un éclairage simultané des deux faces.

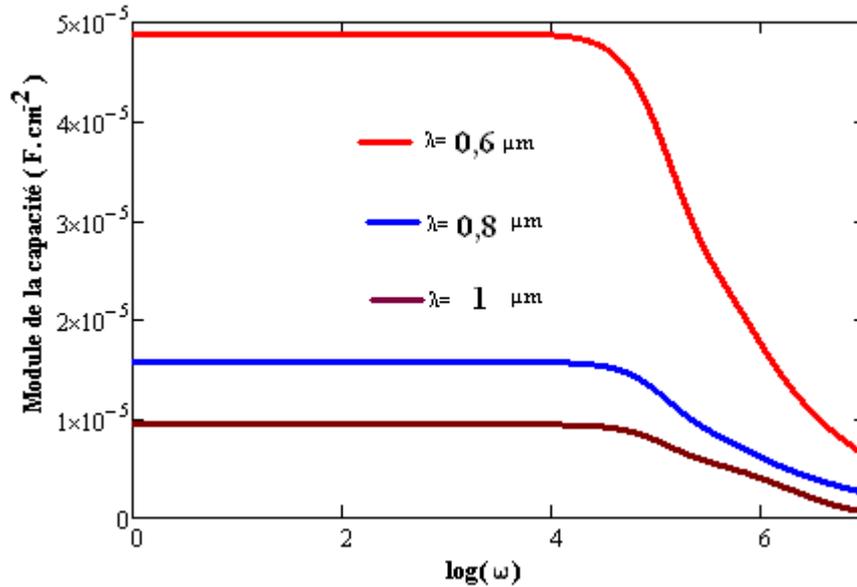


Figure : II.32 variations de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde : éclairage simultané. $S_b = S_f = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$; $L = 0,02 \text{cm}$; $H = 0,03 \text{cm}$; $D = 26 \text{cm}^2/\text{s}$.

Les courbes présentent les mêmes allures que pour l'éclairage par la face arrière mais on remarque que le maximum du module de la capacité est plus important quand la cellule est éclairée simultanément.

II-9 ETUDE DES VITESSES DE RECOMBINAISON POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

II-9-1 ETUDE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON S_b A LA FACE ARRIERE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

Les allures des courbes de variation du module de la densité du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction montrent qu'aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f , ces courbes présentent chacune un palier horizontal. Le gradient du photocourant par rapport à S_f tend alors vers zéro:

$$\frac{\partial J_n(\lambda, \omega, S_f_n, S_b_n)}{\partial S_f_n} = 0 \quad (\text{II-25})$$

La résolution de cette équation nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison S_b à la face arrière de la base de la photopile pour différents modes d'éclairage.

II-9-1-1 EXPRESSION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON Sb_2 A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

L'expression de la vitesse de recombinaison Sb_2 à la face arrière de la photopile pour un éclairage par la face arrière est donnée par la relation :

$$Sb_2 = D \cdot \frac{\left(\sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + L(\omega) \cdot \alpha \cdot \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right) \cdot e^{-\alpha \cdot H} - L(\omega) \cdot \alpha}{L(\omega) \cdot \left(1 - \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + L(\omega) \cdot \alpha \cdot \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right) \cdot e^{-\alpha \cdot H}} \quad (\text{II-26a})$$

Nous obtenons un nombre complexe qu'on peut transformer sous forme polaire:

$$Sb_2(\omega, \lambda) = [F(\omega, \lambda) + iG(\omega, \lambda)] = |Sb_2(\omega, \lambda)| e^{i\phi_{Sb_2}(\omega)} \quad (\text{II-26b})$$

II-9-1-1-1 DIAGRAMME DE NYQUIST DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON Sb_2 A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

Le diagramme de Nyquist est la représentation de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison Sb_2 .

Aux figures II.33 et II.34 nous présentons le diagramme de Nyquist de la vitesse de recombinaison Sb_2 pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

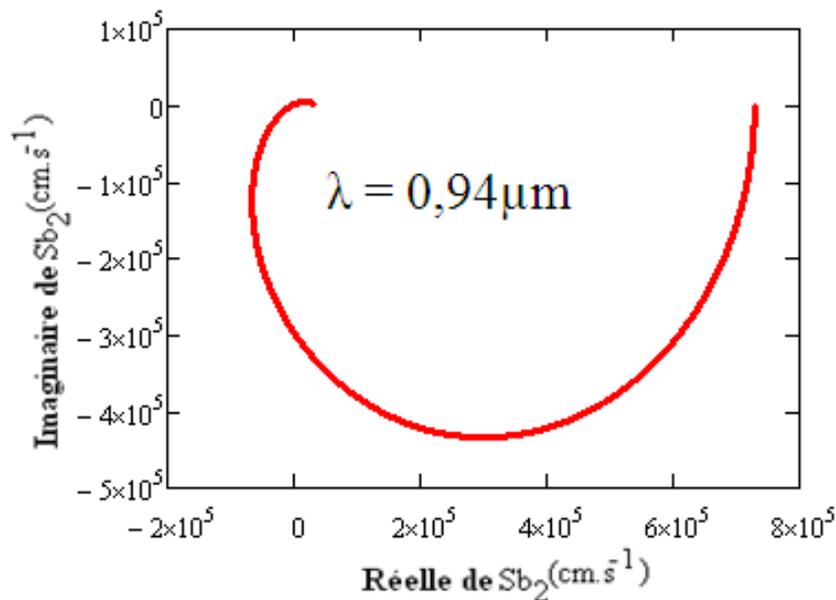


Figure: II.33 Variation de la partie imaginaire de Sb_2 en fonction sa partie réelle. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

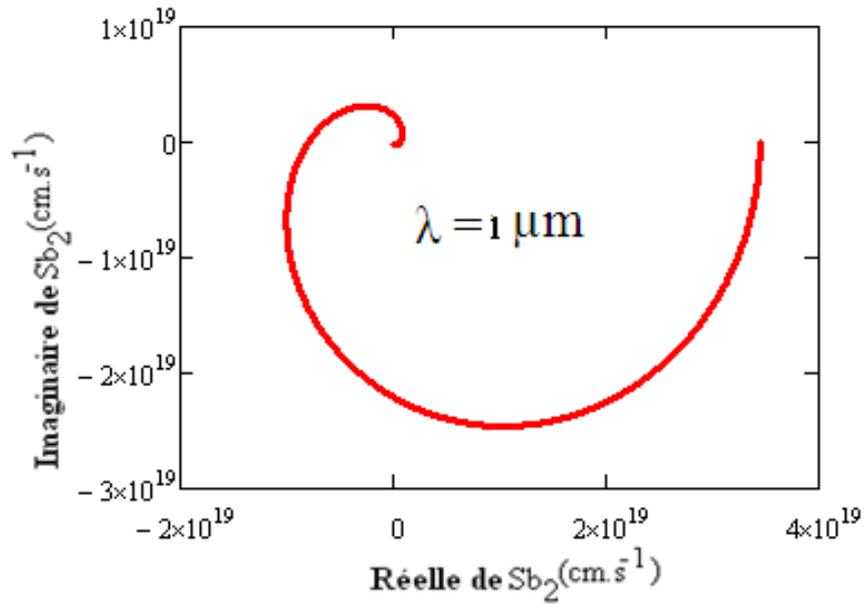


Figure: II.34 Variation de la partie imaginaire de Sb_2 en fonction de sa partie réelle. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

La courbe représentative de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison, est un demi-cercle dont le rayon peut être déterminé et qu'on note l'existence des effets capacitifs. Cependant, avec l'augmentation de la longueur d'onde, il y'a présence des effets capacitif et inductif.

**II-9-1-1-2 DIAGRAMME DE BODE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON Sb_2 A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE :
Module de Sb_2**

A la figure II.35 nous présentons les variations de la vitesse de recombinaison Sb en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

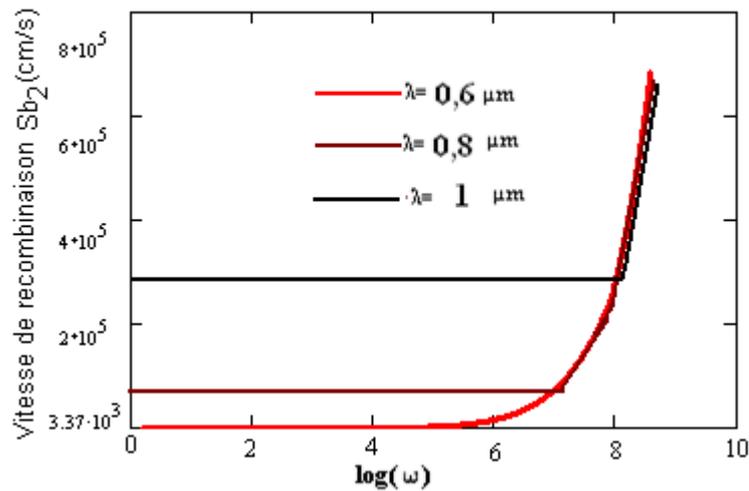


Figure : II.35 Variation de la vitesse de recombinaison Sb_2 en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

La figure (II-35) montre que pour des fréquences de modulation faibles ($\omega \leq 4 \times 10^4$ Hz), la vitesse Sb_2 ne dépend que de la longueur d'onde. Les grandes longueurs d'onde permettent d'avoir les plus grandes valeurs de Sb_2 c'est à dire plus de pertes de porteurs à la face arrière de la base. Au delà de cette fréquence la vitesse Sb_2 augmente rapidement. On observe qu'à partir d'environ 8×10^8 Hz les vitesses Sb_2 sont les mêmes quelque soit la longueur d'onde. Donc pour voir l'effet de la longueur d'onde sur Sb_2 il faut se placer dans une gamme de fréquence inférieure à $8 \cdot 10^8$ Hz.

II-9-1-1-3 DIAGRAMME DE BODE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON Sb_2 A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE : Phase de Sb_2

A la figure II.36 nous présentons les variations de la phase de la vitesse de recombinaison Sb_2 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde

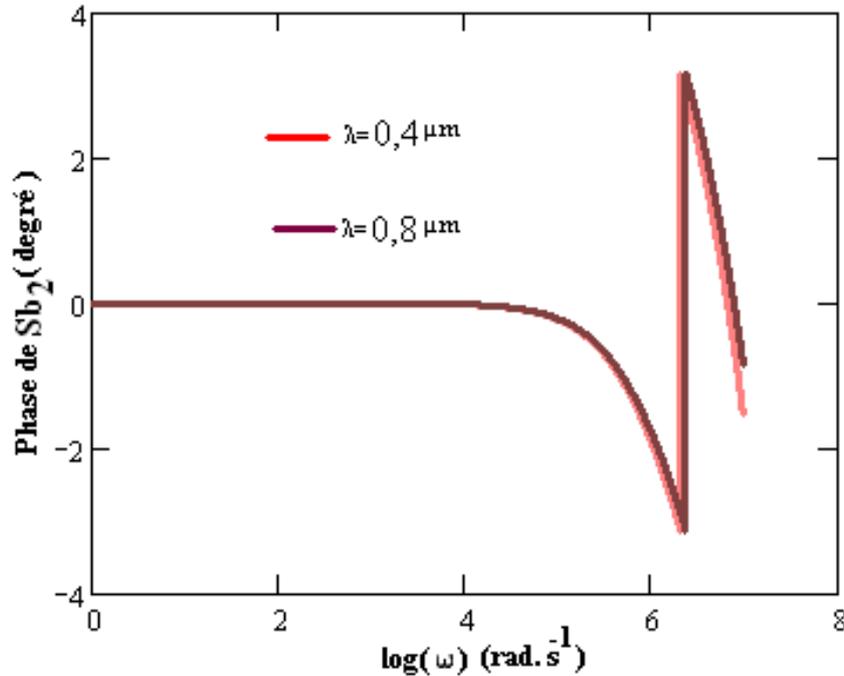


Figure : II.36 variations de la phase de la vitesse de recombinaison Sb_2 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Pour une longueur d'onde $\lambda \leq 0,8\mu\text{m}$, constatons que :

- Lorsque la pulsation est inférieure à 4.10^4Hz , la phase de la vitesse de recombinaison Sb_2 est nulle et indépendante de la pulsation ; c'est le régime statique.
- Pour les pulsations comprises entre 4.10^4Hz et 6.10^6Hz , la phase décroît et prend des valeurs négatives ; dans ce domaine les effets capacitifs l'emportent sur les effets inductifs
- Pour les fréquences supérieures à 6.10^6Hz , la phase augmente et prend des valeurs positives ; dans ce domaine les effets inductifs l'emportent sur les effets capacitifs.

A la figure II.37 nous présentons les variations de la phase de la vitesse de recombinaison Sb_2 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes longueurs d'onde

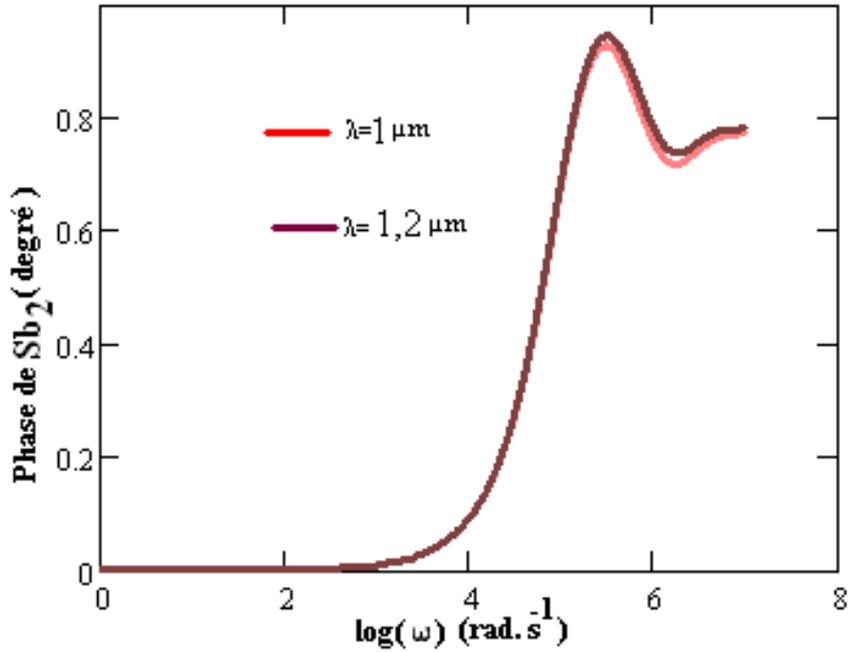


Figure : II.37 variations de la phase de la vitesse de recombinaison Sb_2 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d’onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Pour une longueur d’onde $\lambda \geq 0,8\mu\text{m}$, notons que :

- Lorsque la pulsation est inférieure à 4.10^4Hz , la phase de la vitesse de recombinaison Sb_2 est nulle et indépendante de la fréquence ; on l’appelle régime quasi statique.
- Pour les pulsations supérieures à 4.10^4Hz , la phase croît avant de diminuer mais reste toujours positive; dans ce cas les effets inductifs l’emportent sur les effets capacitifs.

II-9-1-2 EXPRESSION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON Sb_3 A LA FACE ARRIERE UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

L’expression de la vitesse de recombinaison Sb_3 à la face arrière de la photopile pour un éclairage simultané des deux faces est donnée par la relation II.27

$$Sb_3 = D \cdot \frac{\left[L(\omega) \cdot \alpha \left\{ 1 + \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right\} + \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right] \cdot e^{-\alpha \cdot H} - L(\omega) \cdot \alpha \cdot \left[1 + \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right] + \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)}{L(\omega) \cdot \left[1 - \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) - L(\omega) \cdot \alpha \cdot \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right] \cdot e^{-\alpha \cdot H} + L(\omega) \cdot \left[1 - \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + L(\omega) \cdot \alpha \cdot \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right]} \quad (\text{II.27})$$

II-9-1-2-1 DIAGRAMME DE NYQUIST DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON Sb_3 A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

Le diagramme de Nyquist est la représentation de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison Sb_3 .

Nous représentons à la figure II.38 les variations de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison Sb_3

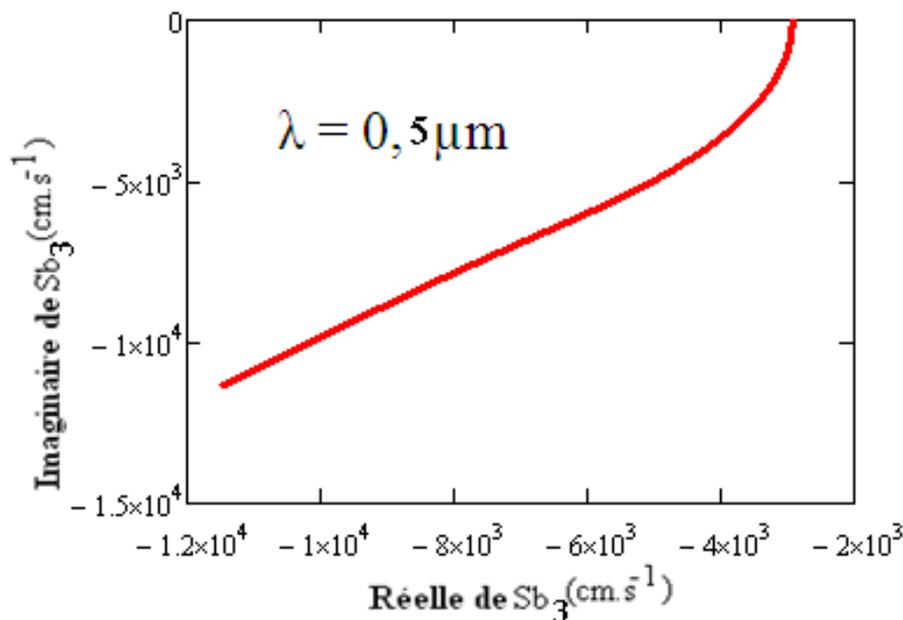


Figure : II.38 variations de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse recombinaison Sb_3 . $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

La courbe obtenue en II.38 de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison à la face arrière, est une qui caractérise les phénomènes résistifs et capacitifs de la vitesse de recombinaison Sb_3 .

**II-9-1-2-2 DIAGRAMME DE BODE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON Sb_3 A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES :
Module de Sb_3**

A la figure II.39 nous présentons les variations de la vitesse de recombinaison Sb_3 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

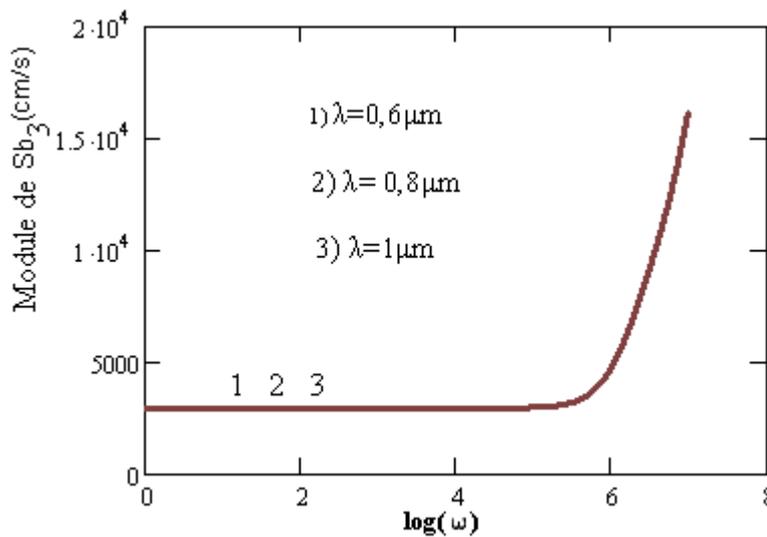


Figure : II.39 Variation de la vitesse de recombinaison Sb_2 en fonction de la fréquence pour différentes longueurs d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Lorsque la photopile est éclairée simultanément par les deux faces, la vitesse de recombinaison Sb_3 est indépendante de la longueur d'onde de la source excitatrice. En outre on remarque que la vitesse Sb_3 est constante aux faibles fréquences ($\omega \leq 6 \cdot 10^6 \text{ Hz}$) : Le photocourant produit par la photopile est donc constant. Au delà de cette fréquence, la vitesse augmente de façon rapide. Ceci montre que les pertes d'électrons par recombinaison augmentent ce qui entraîne une diminution du photocourant.

**II-9-1-2-3 DIAGRAMME DE BODE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON Sb_3 A LA FACE ARRIERE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES :
Phase de Sb_3**

Le diagramme de Bode de la vitesse de recombinaison Sb_3 pour un éclairage simultané des deux faces de la photopile est donné à la figure II.40 : Cas de la phase

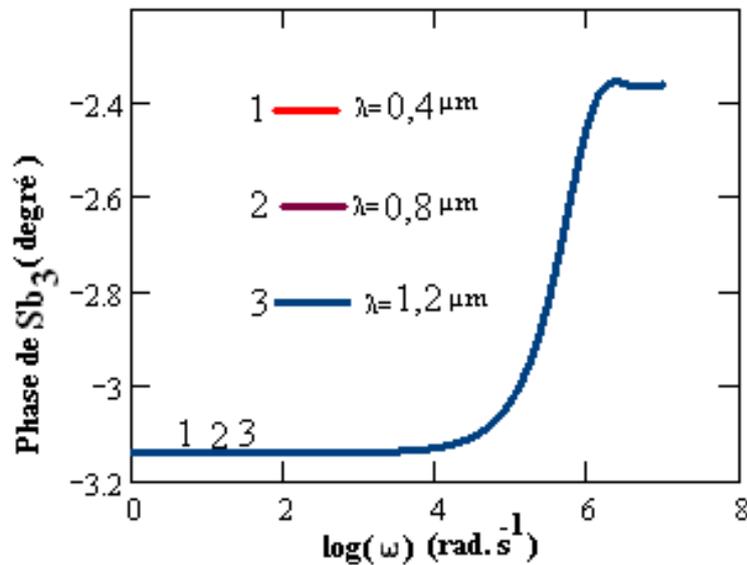


Figure : II.40 Phase de la vitesse de recombinaison Sb_3 pour un éclairage simultané des deux faces pour différents longueurs d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; 1) $\lambda=0,4\mu\text{m}$; 2) $\lambda= 0,8\mu\text{m}$; 3) $\lambda=1,2\mu\text{m}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Cette représentation de la phase de la vitesse de recombinaison en fonction du logarithme de la fréquence, montre qu'il existe une fréquence en dessous de laquelle la phase est constante quelque soit la longueur d'onde, c'est le domaine du régime statique. Au delà de cette fréquence, la phase augmente mais reste toujours négative. Pour ce type d'éclairage, les phénomènes inductifs sont prédominants.

II-9-1-3 CIRCUITS ELECTRIQUES EQUIVALENTS DEDUITS DE LA VITESSES DE RECOMBINAISON EN FACE ARRIERE Sb POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

Les représentations de Bode de la phase de la vitesse de recombinaison en fonction du logarithme de la fréquence nous ont permis de remarquer que :

- La phase de la vitesse de recombinaison Sb_2 à la face arrière prend des valeurs positives et négatives lorsque l'éclairage s'est fait par la face arrière, ce qui signifie que la photopile a un comportement capacitif (présence d'un condensateur) et inductif (présence d'une bobine).

- La phase de la vitesse de recombinaison Sb_3 à la face arrière ne prend que des valeurs négatives dans le cas d'un éclairage simultané. Les effets inductifs l'emportent sur les effets capacitifs.

Ces remarques faites ci-dessus nous permettent de proposer deux modèles électriques équivalents.

A la figure II.41 nous présentons le modèle électrique équivalent de la vitesse de recombinaison en face arrière pour un éclairage par la face arrière.

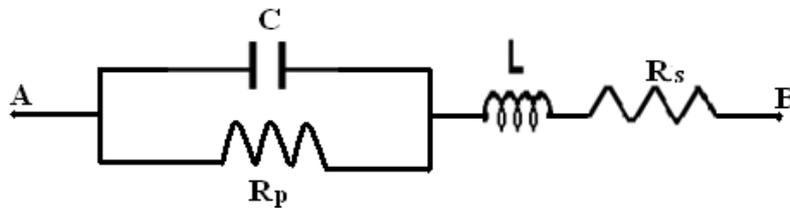


Figure II.41 : circuit équivalent déduit de la vitesse de recombinaison en face arrière : éclairage par la face arrière.

Le schéma en II.41 représente le circuit électrique équivalent de la vitesse de recombinaison en face arrière, lorsqu'on utilise les diagrammes de Bode, il caractérise les phénomènes capacitifs et inductifs observés dans la représentation de la phase en fonction de la fréquence où C est la capacité ; L est l'inductance qui caractérise le phénomène inductif ; R_p la résistance parallèle et R_s la résistance série.

A la figure II.42 nous présentons le modèle électrique équivalent de la vitesse de recombinaison en face arrière pour un éclairage simultané des deux faces.

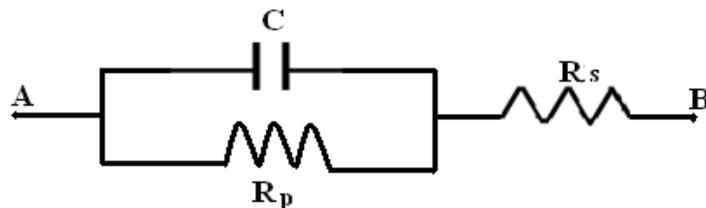


Figure II.42 : circuit équivalent déduit de la vitesse de recombinaison en face arrière : éclairage simultané des deux faces.

Le schéma en II.42 représente le circuit électrique équivalent de la vitesse de recombinaison en face arrière, lorsqu'on utilise les diagrammes de Bode, il caractérise le phénomène capacitif observé dans la représentation de la phase en fonction de la fréquence où C est la capacité ; R_p la résistance parallèle et R_s la résistance série.

II-9-2 ETUDE DES VITESSES DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE SF0 A LA JONCTION POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

L'étude de la variation du module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière montre qu'aux grandes valeurs de Sb_n , la densité de photocourant présente un palier. Donc le gradient de la densité de photocourant par rapport à la vitesse de recombinaison à la base (Sb_n) est nul. On obtient l'équation suivante

$$\frac{\partial J_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n)}{\partial Sb_n} = 0 \quad (\text{II-28})$$

La résolution de cette équation (II-28) nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_0 à la jonction de la photopile pour différents modes d'éclairagements.

II-9-2-1 EXPRESSION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE SF0₂ A LA JONCTION POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

L'expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_0_2 à la jonction pour un éclairagement par la face arrière est donnée par la relation (II-29) :

$$Sf_0_2 = \frac{D \cdot \left[\sinh\left\{\frac{H}{L(\omega)}\right\} + \alpha \cdot L(\omega) \cdot \left(e^{-\alpha \cdot H} - \cosh\left\{\frac{H}{L(\omega)}\right\} \right) \right]}{L(\omega) \cdot \left[\alpha \cdot L(\omega) \cdot \sinh\left\{\frac{H}{L(\omega)}\right\} - \cosh\left\{\frac{H}{L(\omega)}\right\} + e^{-\alpha \cdot H} \right]} \quad (\text{II-29})$$

A la figure II.43 nous présentons les variations de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_0_2 à la jonction en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

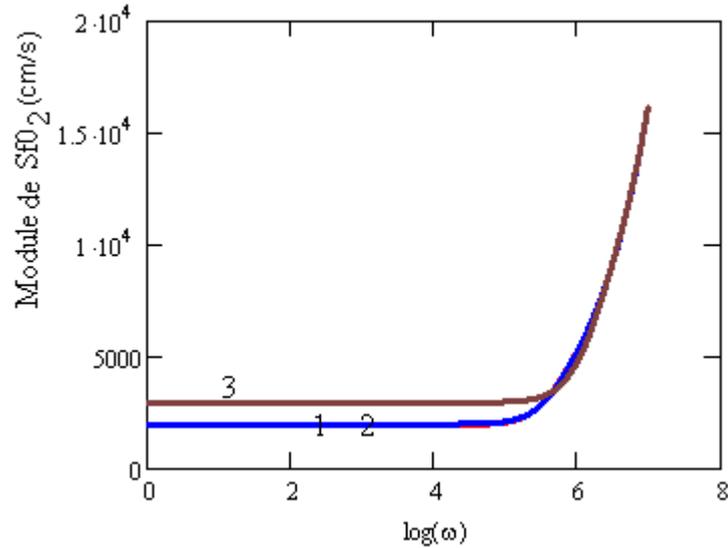


Figure : II.43 Variation de la vitesse de recombinaison intrinsèque sf_0_2 à la jonction en fonction de la fréquence pour différentes longueurs d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; 1) $\lambda=0,6\mu\text{m}$; 2) $\lambda=0,8\mu\text{m}$; 3) $\lambda=1\mu\text{m}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Nous remarquons que la vitesse de recombinaison intrinsèques à la jonction Sf_0_2 augmente lorsque la longueur d'onde augmente. Elle est insensible aux faibles fréquences et croît, de façon exponentielle pour les grandes fréquences de modulation.

A la figure II.44 nous présentons le diagramme de Bode de la phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sf_0_2

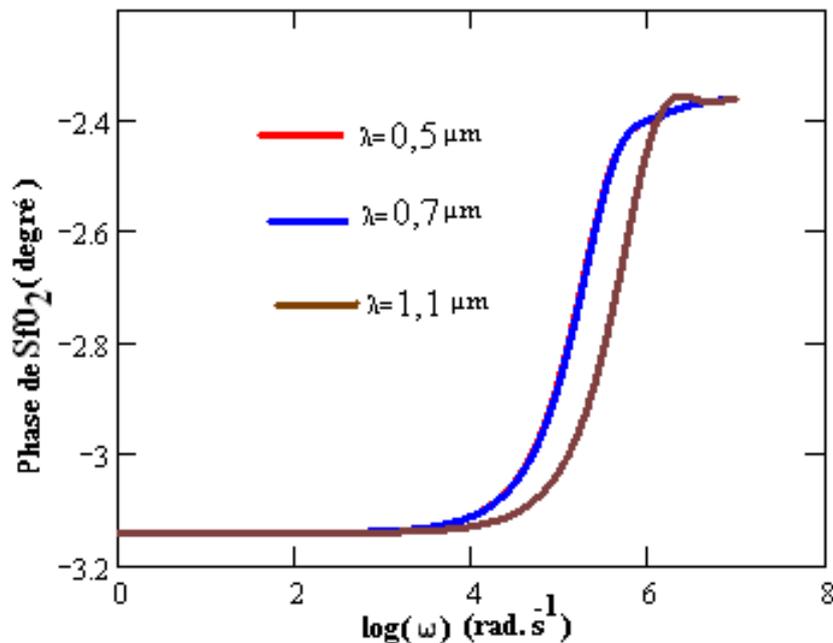


Figure : II.44 Phase de la vitesse de recombinaison Sf_0_2 pour un éclairage par la face arrière pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; 1) $\lambda=0,5\mu\text{m}$; 2) $\lambda= 0,7\mu\text{m}$; 3) $\lambda=1,1\mu\text{m}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

La phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction SfO_2 est négative quelle que soit la valeur de la longueur d'onde. On remarque en outre qu'elle est insensible aux faibles fréquences et croît exponentiellement lorsque la fréquence est élevée.

II-9-2-2 EXPRESSION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE SfO_3 A LA JONCTION POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

L'expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque SfO_3 à la jonction pour un éclairage simultané des deux faces est donnée par la relation (II-30) :

$$SfO_3 = D \cdot \frac{\left[\sinh\left\{\frac{H}{L(\omega)}\right\} \cdot [e^{-\alpha \cdot H} + 1] - \alpha \cdot L(\omega) [1 - e^{-\alpha \cdot H}] \cdot \left[1 + \cosh\left\{\frac{H}{L(\omega)}\right\} \right] \right]}{L(\omega) \cdot \left[\alpha \cdot L(\omega) \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot H}] \cdot \operatorname{sosh}\left\{\frac{H}{L(\omega)}\right\} + [1 + e^{-\alpha \cdot H}] \cdot \left[1 - \cosh\left\{\frac{H}{L(\omega)}\right\} \right] \right]} \quad (\text{II30})$$

A la figure II.45 nous présentons les variations de la vitesse de recombinaison intrinsèque SfO_3 à la jonction en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde

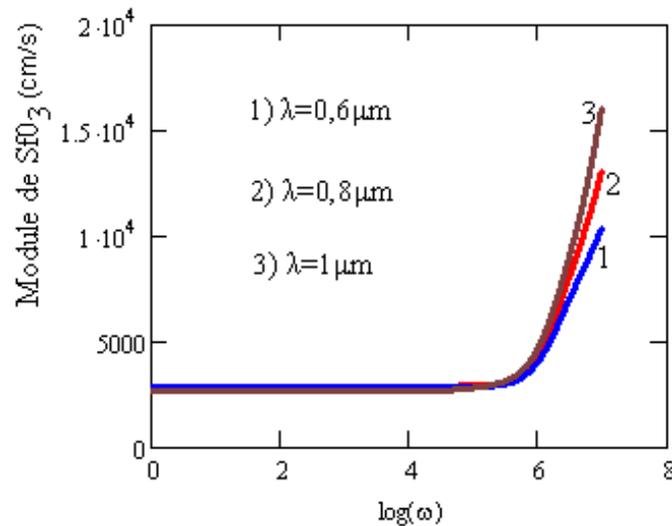


Figure : II.45 Variation de la vitesse de recombinaison intrinsèque SfO_2 à la jonction en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

Lorsque la photopile est éclairée simultanément par les deux faces la vitesse SfO_3 est indépendante de la longueur d'onde de la source excitatrice. Elle est aussi insensible aux faibles fréquences et croit, de façon exponentielle pour les grandes fréquences de modulation.

Nous présentons à la figure II.46 le diagramme de Bode de la phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque SfO_3 pour des longueurs d'onde inférieures à $0,8\mu\text{m}$.

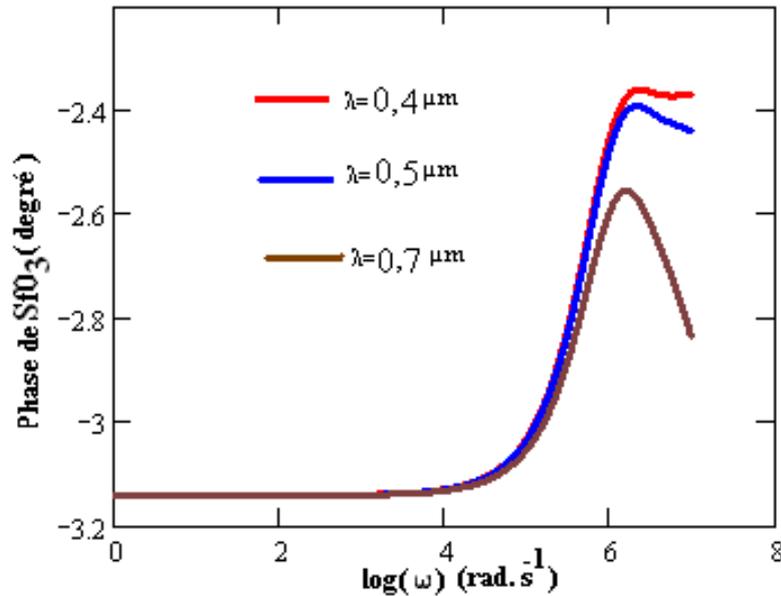


Figure : II.46 Variation de la phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque SfO_2 à la jonction en fonction de la fréquence pour différentes longueurs d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; 1) $\lambda=0,4\mu\text{m}$; 2) $\lambda=0,5\mu\text{m}$; 3) $\lambda=0,7\mu\text{m}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

La phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction SfO_3 est négative quelque soit la longueur d'onde inférieure à $0,8\mu\text{m}$. On remarque en outre qu'elle est insensible aux faibles fréquences et croit exponentiellement lorsque la fréquence est élevée.

Nous présentons à la figure II.47 le diagramme de Bode de la phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque SfO_3 pour des longueurs d'onde supérieures à $0,8\mu\text{m}$.

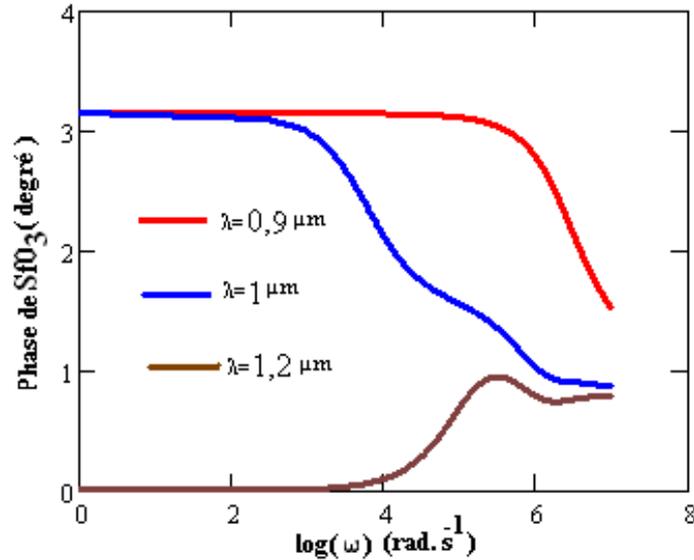


Figure II.47 Variation de la vitesse de recombinaison intrinsèque SfO_2 à la jonction en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $L = 0,02\text{cm}$; $H = 0,03\text{cm}$; 1) $\lambda=0,9\mu\text{m}$; 2) $\lambda=1\mu\text{m}$; 3) $\lambda=1,2\mu\text{m}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$.

La phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction SfO_3 est positive quel que soit la longueur d'onde supérieure à $0,8\mu\text{m}$. On remarque en outre qu'elle est insensible aux faibles fréquences et croît exponentiellement lorsque la fréquence est élevée.

Les résultats observés pour les vitesses de recombinaison intrinsèques SfO sont identiques à ceux obtenus pour les vitesses de recombinaison en face arrière Sb .

II-9-2-3 CIRCUITS ELECTRIQUES EQUIVALENTS DEDUITS DE LA VITESSES DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE A LA JONCTION SfO POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

La phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque SfO_3 à la jonction prend des valeurs négatives pour un éclairage par la face arrière et des valeurs positives pour un éclairage simultané des deux faces.

A la figure II.48 nous présentons le modèle électrique équivalent déduit de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction pour un éclairage de la photopile par la face arrière.

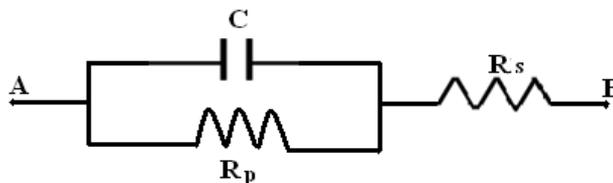


Figure II.48 : circuit équivalent à la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction

Le schéma à la figure II.42 représente le circuit électrique équivalent de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction. Lorsqu'on utilise les diagrammes de Bode, il caractérise le phénomène capacitif observé dans la représentation de la phase en fonction de la fréquence où C est la capacité ; R_p la résistance parallèle et R_s la résistance série.

A la figure II.49 nous présentons le modèle électrique équivalent déduit de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction pour un éclairage simultané des deux faces de la photopile.

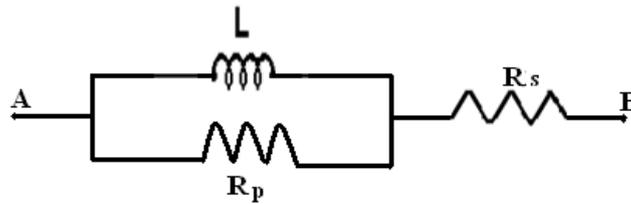


Figure II.49 : circuit équivalent à la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction

Le schéma à la figure II.49 représente le circuit électrique équivalent de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction. Lorsqu'on utilise les diagrammes de Bode, il caractérise les phénomènes inductifs observés dans la représentation de la phase en fonction de la fréquence où L est l'inductance qui caractérise le phénomène inductif ; R_p la résistance parallèle et R_s la résistance série.

CONCLUSION

Nous venons de faire une étude théorique de la photopile bifaciale en régime dynamique fréquentiel sous éclairage monochromatique. A cette phase de notre travail nous avons analysé l'influence de la fréquence et de la longueur d'onde sur le photocourant, sur la phototension, la capacité de diffusion et sur les vitesses de recombinaison.

La densité des porteurs de charge présente un gradient négatif pour de grandes valeurs de la fréquence de modulation. Elle atteint des valeurs maximales pour des vitesses de recombinaison à la jonction grandes ($S_f > 10^5$).

Les diagrammes de Nyquist et de Bode des vitesses de recombinaison pour différents modes d'éclairage nous ont permis de proposer des modèles électriques équivalents aux différents phénomènes observés.

**CHAPITRE III : DETERMINATION DES
PARAMETRES ELECTRIQUES D'UNE PHOTOPILE
BIFACIALE AU SILICIUM**

INTRODUCTION

Le chapitre que nous entamons sera consacré à la détermination des paramètres électriques de la photopile bifaciale éclairée par une lumière monochromatique en modulation de fréquence par la méthode de la spectroscopie d'impédance. Nous y proposerons aussi une méthode de détermination du courant de diode, de la puissance et du facteur de forme de la photopile dans différentes configurations.

III-1 IMPEDANCE DYNAMIQUE

L'impédance dynamique [63] est donnée par la relation (III-1) ci-dessous :

$$Z_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n) = \frac{V_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n)}{J_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n)} \quad (\text{III-1})$$

Dans les paragraphes qui vont suivre, nous nous intéresserons aux méthodes de détermination des paramètres électriques, en utilisant la représentation de Nyquist et les diagrammes de Bode de l'impédance dynamique.

III-2 REPRESENTATION DE NYQUIST

Le diagramme de Nyquist [64] est la représentation de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la fonction complexe $Z_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n)$.

$$\text{Im}(Z_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n)) = f(\text{Re}(Z_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n))) \quad (\text{III-2})$$

Une étude de la représentation de Nyquist nous permet de déterminer la résistance série et la résistance shunt pour différents modes d'éclairage.

III-2-1 REPRESENTATION DE NYQUIST POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

Sur les figures III.1, à III.4 nous représentons le profil de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance dynamique pour différentes valeurs de la longueur d'onde pour un éclairage par la face arrière.

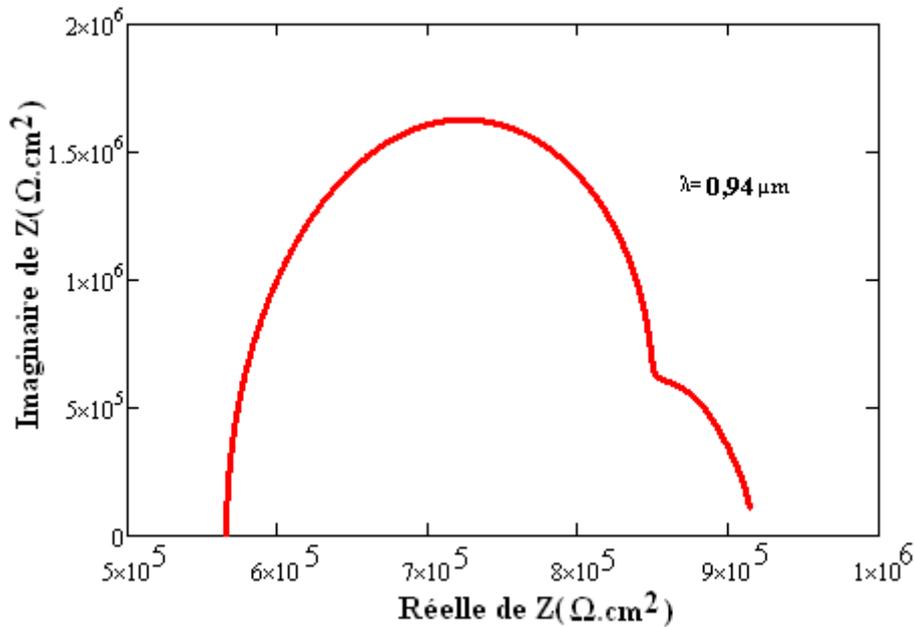


Figure III.1 : Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle ($\lambda=0,94\mu\text{m}$, $S_f = S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$).

La courbe obtenue à la figure III.1 de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle l'impédance, est un demi-cercle dont le rayon peut être déterminé. C'est ce qui, en corrélation à la représentation de Nyquist de l'impédance d'un circuit électrique, caractérise les phénomènes résistifs et capacitifs de l'impédance.

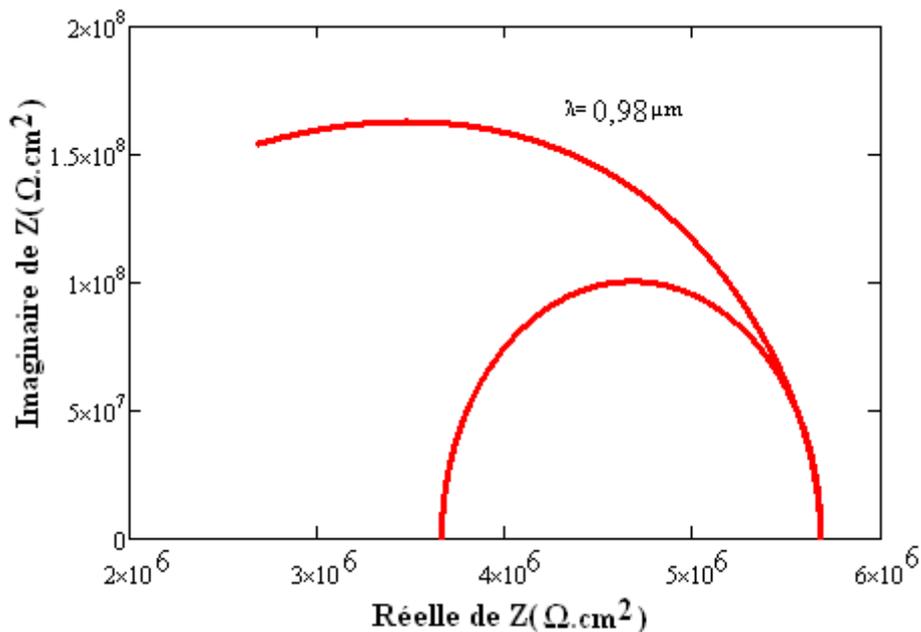


Figure III.2 : Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle ($\lambda=0,98\mu\text{m}$, $S_f = S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

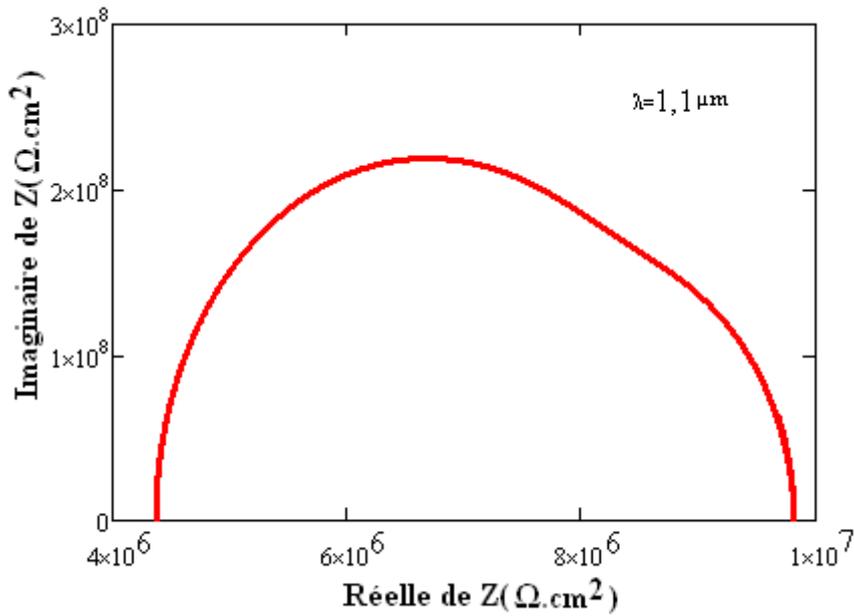


Figure III.3 : Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle ($\lambda=1,1\mu\text{m}$, $S_f = S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

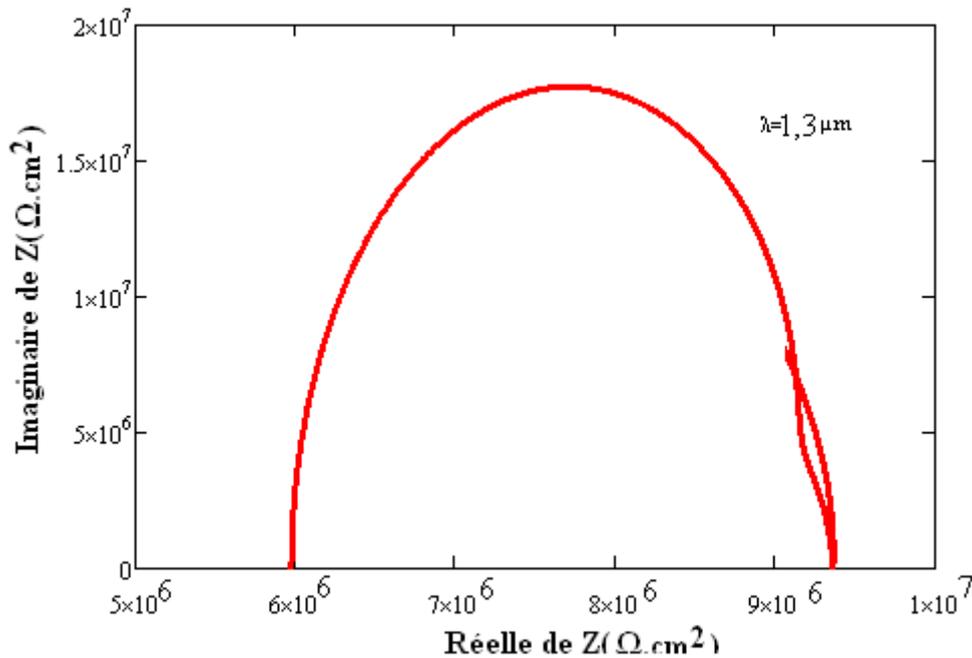


Figure III.4 : Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle ($\lambda=1,3\mu\text{m}$, $S_f = S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

Nous obtenons des demi-cercles de centre $\left(\frac{R_{SH}}{2} + R_s \right)$ et de rayon $\left(\frac{R_{SH}}{2} \right)$ en variant la pulsation de ses valeurs les plus basses aux plus hautes. Pour les faibles valeurs de la pulsation ($\omega \rightarrow 0$) la composante réelle de l'impédance (résistance) est égale à la somme de

la résistance série et de la résistance parallèle et la composante imaginaire de l'impédance (réactance) tend vers zéro. Lorsque la pulsation $\omega \rightarrow \omega_c$ la partie imaginaire est égale à $\frac{R_{SH}}{2}$

et la partie réelle est égale $\frac{R_{SH}}{2} + R_s$, ce point correspond à un maximum sur les courbes.

Enfin pour les grandes valeurs de la pulsation ($\omega \rightarrow \infty$) la composante réelle de l'impédance est égale à la résistance série et la composante imaginaire de l'impédance tend vers zéro [65-66].

Nous notons que pour les grandes valeurs de la pulsation, la photopile a un comportement ohmique du fait que son impédance se résume seulement à sa partie résistive.

Dans le tableau III.1 nous présentons des valeurs de la résistance série et shunt en fonction de la longueur d'onde.

λ (μm)	R_s ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$)	R_{Sh} ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$)
0,94	570	175
0,98	3600	1100
1,1	4400	2250
1,3	6000	1700

Tableau (III.1) : Valeurs des Résistances série et shunt de la photopile pour différentes longueurs d'onde

Les résistances (série et shunt) augmentent en fonction de la longueur d'onde.

III-2-2 REPRESENTATION DE NYQUIST POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

Aux figures III.5, III.6, III.7 et III.8 ; nous représentons le profil de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance dynamique pour différentes valeurs de la longueur d'onde pour un éclairage simultané des deux faces.

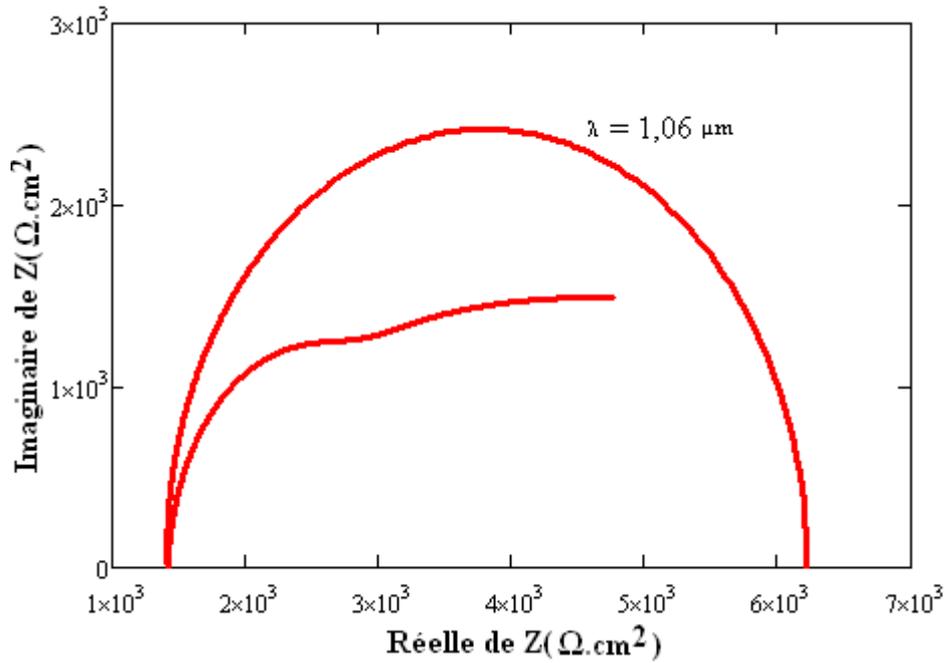


Figure III.5 : Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle ($\lambda=1,06\mu m$, $S_f = S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

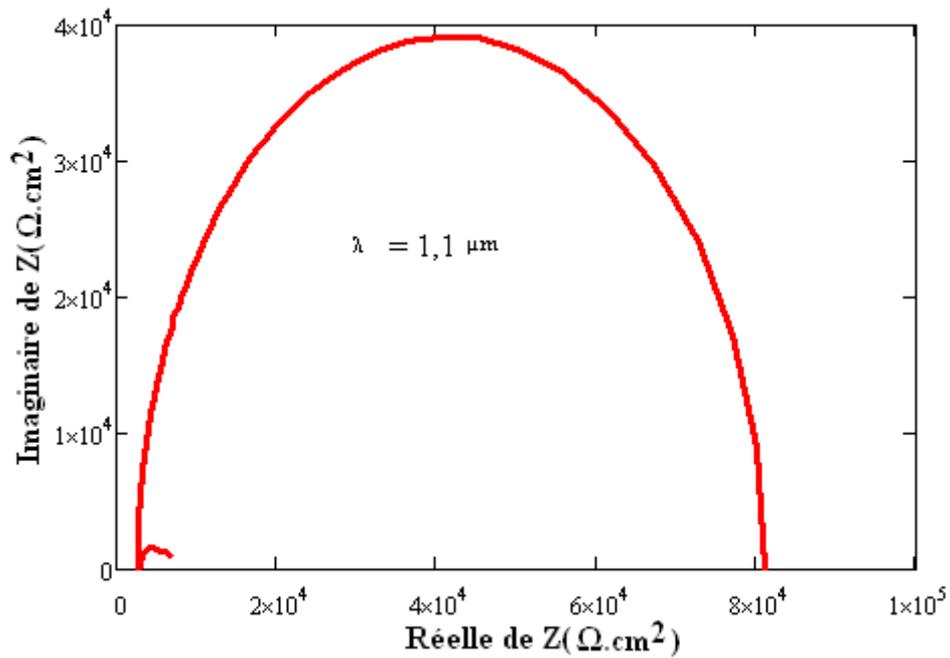


Figure III.6 : Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle ($\lambda=1,11\mu m$, $S_f = S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

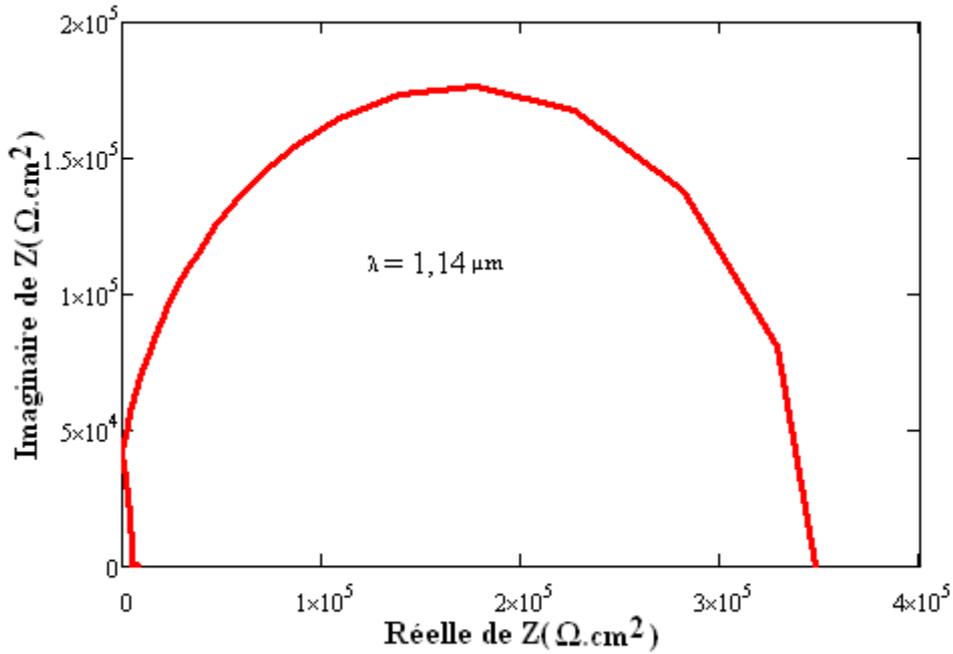


Figure III.7 : Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle ($\lambda=1,14\mu\text{m}$, $S_f = S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

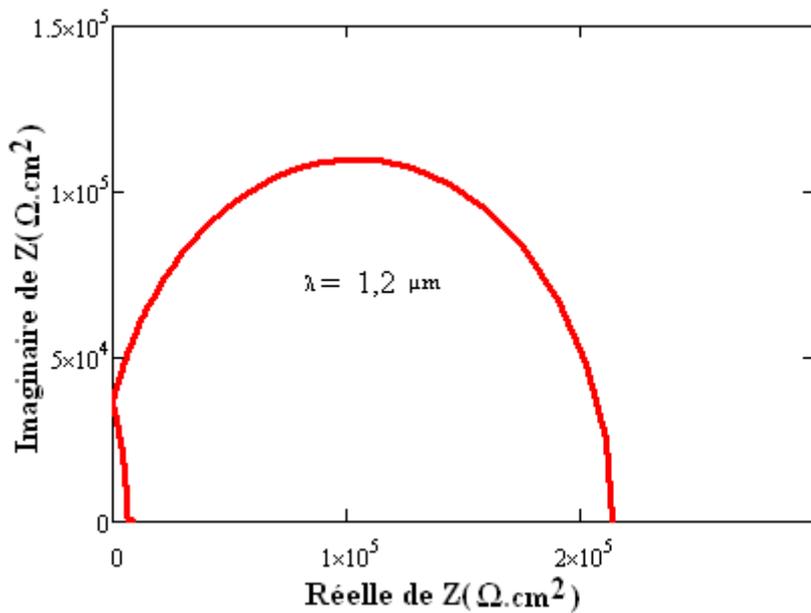


Figure III.8 : Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle ($\lambda=1,2\mu\text{m}$, $S_f = S_b = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

Nous obtenons des demi-cercles de centre $\left(\frac{R_{SH}}{2} + R_s \right)$ et de rayon $\left(\frac{R_{SH}}{2} \right)$ en variant la

pulsation de ses valeurs les plus basses aux plus hautes. Pour les faibles valeurs de la pulsation ($\omega \rightarrow 0$) la composante réelle de l'impédance (résistance) est égale à la somme de la résistance série et de la résistance parallèle et la composante imaginaire de l'impédance

(réactance) tend vers zéro. Lorsque la pulsation $\omega \rightarrow \omega_c$ la partie imaginaire est égale à $\frac{R_{SH}}{2}$ et la partie réelle est égale $\frac{R_{SH}}{2} + R_s$, ce point correspond à un maximum sur les courbes.

Enfin pour les grandes valeurs de la pulsation ($\omega \rightarrow \infty$) la composante réelle de l'impédance est égale à la résistance série et la composante imaginaire de l'impédance tend vers zéro[65-66].

Dans le tableau III.2 nous donnons des valeurs des résistances série et shunt obtenues en fonction de la longueur d'onde.

λ (μm)	R_s ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$)	R_{Sh} ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$)
1,06	1,4	2,2
1,1	2	39
1,14	10	170
1,2	12	114

Tableau (III.2) : Valeurs des Résistances série et des résistances shunt pour différentes longueurs d'onde.

Les résultats obtenus montrent que les résistances (série et shunt) sont plus faibles pour l'éclairage simultané des deux faces. Cela explique les résultats obtenus dans le chapitre II lors de la comparaison de la densité de photocourant et de la phototension pour les différents modes d'éclairage.

La représentation de Nyquist, nous a permis de déterminer la résistance série et la résistance shunt de la photopile. Dans le paragraphe suivant nous allons déterminer la capacité de la photopile à partir du diagramme de Bode après avoir déterminé la pulsation de coupure (ω_c).

III-3 DIAGRAMME DE BODE DE L'IMPEDANCE POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT : Module de Z_{ph}

Le diagramme de Bode [67] est une méthode mise au point pour simplifier l'obtention des tracés de réponse en fréquence.

Il s'agit, dans notre travail d'adapter le concept de Bode aux tracés de l'amplitude de l'impédance de la photopile (en décibels) et de la phase de l'impédance (en degré) en fonction du logarithme de la fréquence angulaire.

$$A_{dB} = 20 \cdot \log(|Z_{ph}|) \quad (III-3)$$

A_{dB} représente l'amplitude de l'impédance

$$\phi = \arg(Z_{ph}) \quad (III-4)$$

ϕ la phase de l'impédance

III-3-1 DIAGRAMME DE BODE DU MODULE DE L'IMPEDANCE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

Sur les figures III.9, à III.12 ; nous représentons les variations du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde

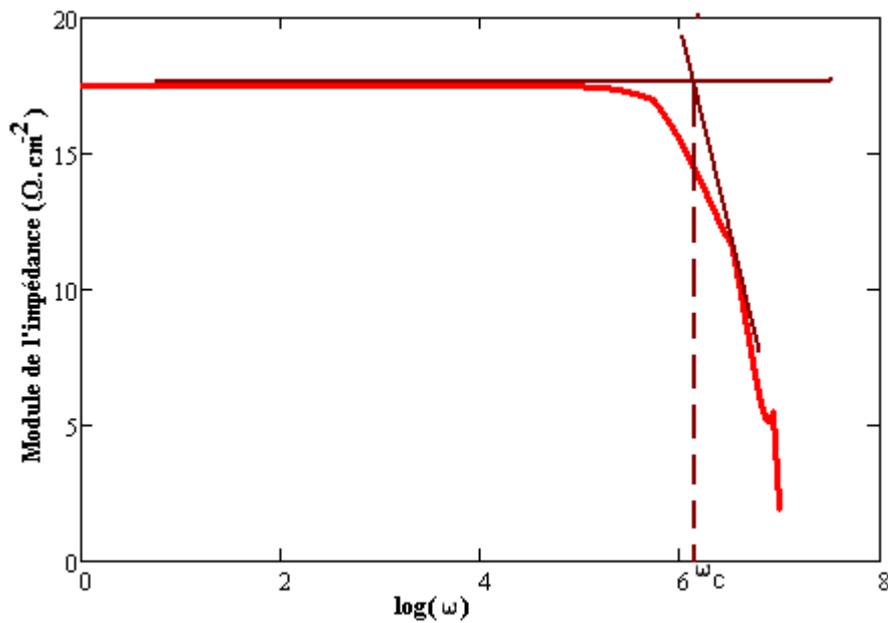


Figure III.9 Module de l'impédance en fonction de la fréquence pour un éclairage par la face arrière ($\lambda=0,5\mu\text{m}$, $S_b=S_f=3000 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

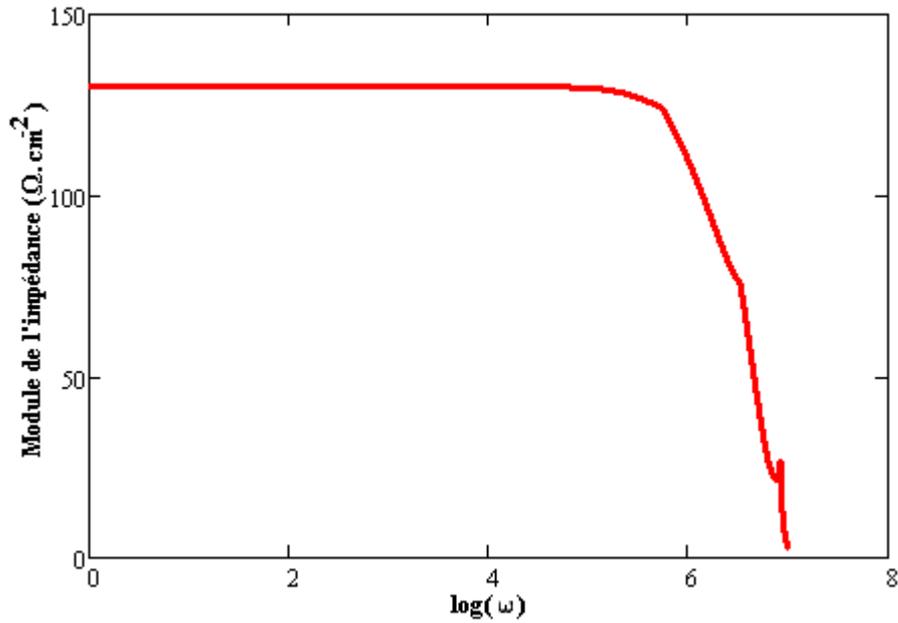


Figure III.10 Module de l'impédance en fonction de la fréquence pour un éclairage par la face arrière ($\lambda=0,6\mu\text{m}$, $S_b=S_f=3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

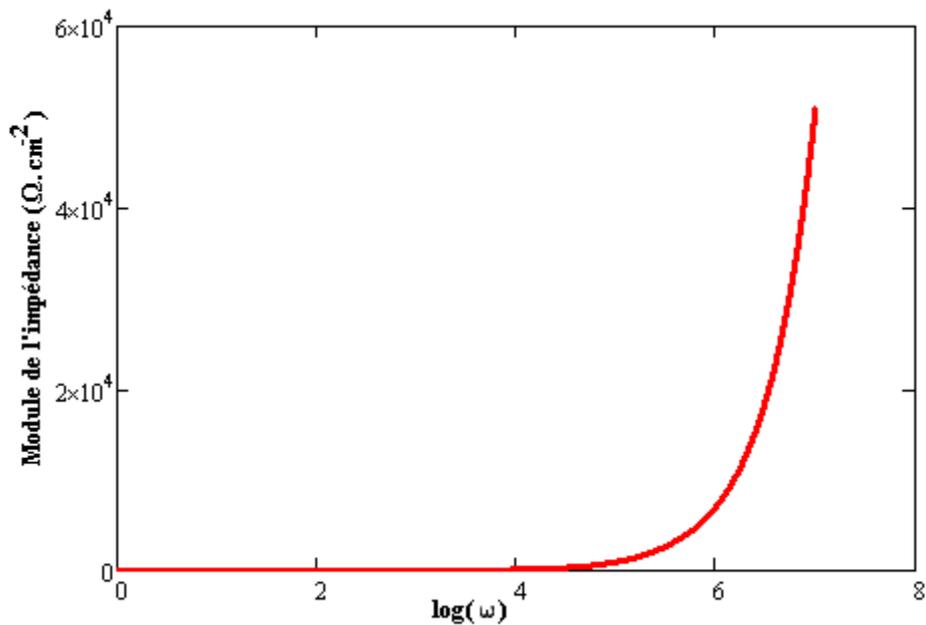


Figure III.11 Module de l'impédance en fonction de la fréquence pour un éclairage par la face arrière ($\lambda=1\mu\text{m}$, $S_b=S_f=3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

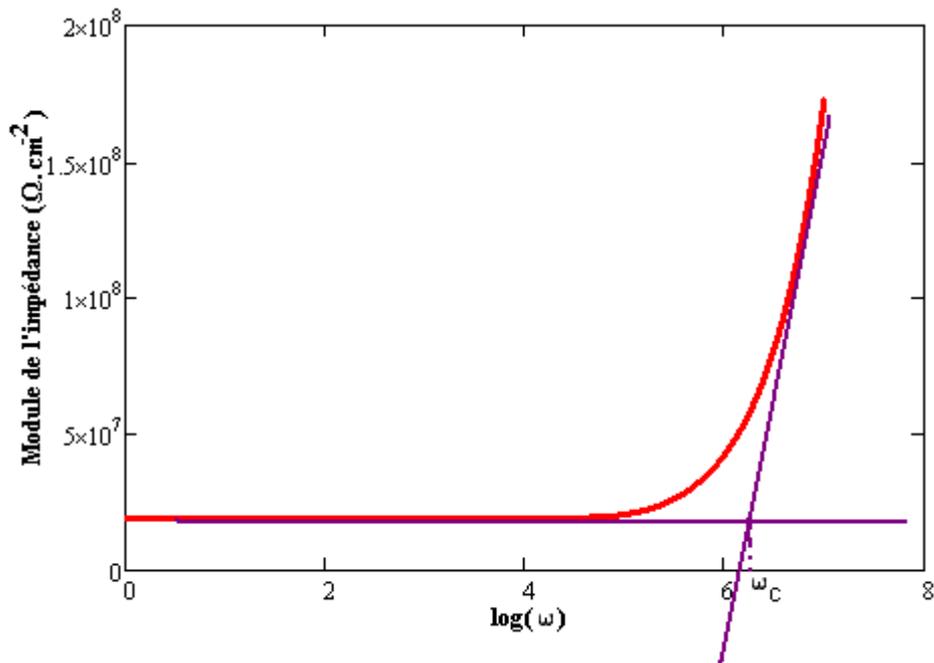


Figure III.12 Module de l'impédance en fonction de la fréquence pour un éclairage par la face arrière ($\lambda=1,2\mu\text{m}$, $S_b = S_f = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

L'analyse de ces résultats nous amène à distinguer deux domaines :

- Un où la longueur d'onde $\lambda < 0,8\mu\text{m}$

Pour les fréquences angulaires comprises dans l'intervalle $0 < \omega < \omega_c$, le module de l'impédance est indépendant de la pulsation. Et pour les valeurs de la pulsation telle que $\omega > \omega_c$ le module de l'impédance décroît avec la pulsation. Ainsi l'intersection des prolongements de chacune des deux parties linéaires de la courbe permet d'obtenir la fréquence angulaire de coupure ω_c .

Le tableau ci-dessous III.3 donne les valeurs de la pulsation de coupure en fonction de la longueur d'onde ($\lambda < 0,8\mu\text{m}$).

λ (μm)	Pulsation de coupure (rad/s)
0,5	$1,10 \cdot 10^6$
0,6	$6,30 \cdot 10^5$

Le tableau III-3 : fréquence de coupure en fonction de la longueur d'onde

Le comportement du module de l'impédance en fonction du logarithmique de fréquence est comme identique à celui qu'on observe dans des filtres électroniques.

Lorsqu'on augmente la longueur d'onde, la photopile se comporte comme un filtre passe-bas.

Un filtre passe-bas, présente une impédance élevée aux fréquences les plus basses. La tension de sortie est alors maximale. Lorsque la fréquence augmente, une plus grande partie de l'énergie est dirigée vers la masse et la tension de sortie diminue progressivement. Le filtre passe-bas laisse passer les tensions de basse fréquence et atténue (plus ou moins fortement selon l'ordre du filtre) les tensions de haute fréquence [68].

Un filtre passe-bas, nous permet en général de nous débarrasser des phénomènes parasites (lissage). Dans le cadre de notre travail, les phénomènes parasites intrinsèques à la photopile sont les recombinaisons à la jonction et à la face arrière.

- Une seconde ou la longueur d'onde $\lambda > 0,8\mu m$

Pour les fréquences angulaires comprises dans l'intervalle $0 < \omega < \omega_c$, le module de l'impédance est indépendant de la fréquence. Pour les valeurs de la pulsation telles que $\omega > \omega_c$ le module de l'impédance croît avec la pulsation.

Dans le tableau III.4 nous présentons les valeurs de la pulsation de coupure en fonction de la longueur d'onde ($\lambda > 0,8\mu m$)

λ (μm)	Pulsation de coupure (rad/s)
1	$1,25 \cdot 10^6$
1,2	$1,88 \cdot 10^6$

Le tableau III-4 : fréquence de coupure en fonction de la longueur

Nous remarquons qu'une augmentation de la longueur d'onde, entraîne une diminution de la fréquence angulaire de coupure.

La fréquence de coupure nous permet de déterminer la capacité de la photopile connaissant la résistance shunt grâce à la relation (III-5) :

$$R_{sh} \cdot C = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad (III-5)$$

λ (μm)	C (nF.cm ⁻²)
0,5	3
0,6	2,9
1	2,8
1,2	0,86

Le tableau III-5 : Capacité en fonction de la longueur d'onde

La capacité de la photopile diminue lorsqu'on augmente la longueur d'onde.

III-3-2 DIAGRAMME DE BODE DU MODULE DE L'IMPEDANCE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

Sur les figures III.13, à III.12 ; nous représentons les variations du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde

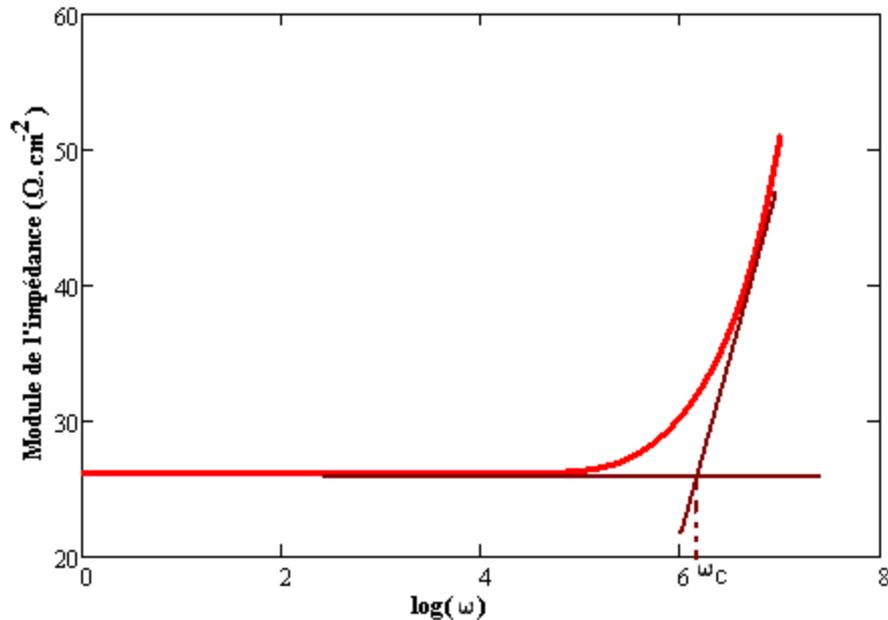


Figure III.13 Module de l'impédance en fonction de la fréquence pour un éclairage par la face arrière ($\lambda=0,4\mu\text{m}$, $S_b = S_f = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

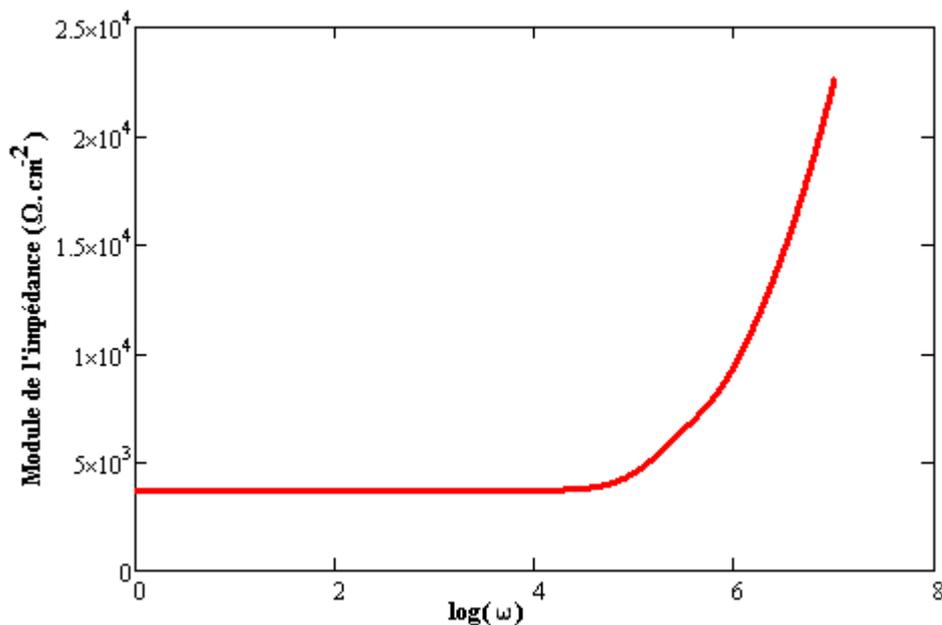


Figure III.14 Module de l'impédance en fonction de la fréquence pour un éclairage par la face arrière ($\lambda=0,7\mu\text{m}$, $S_b = S_f = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

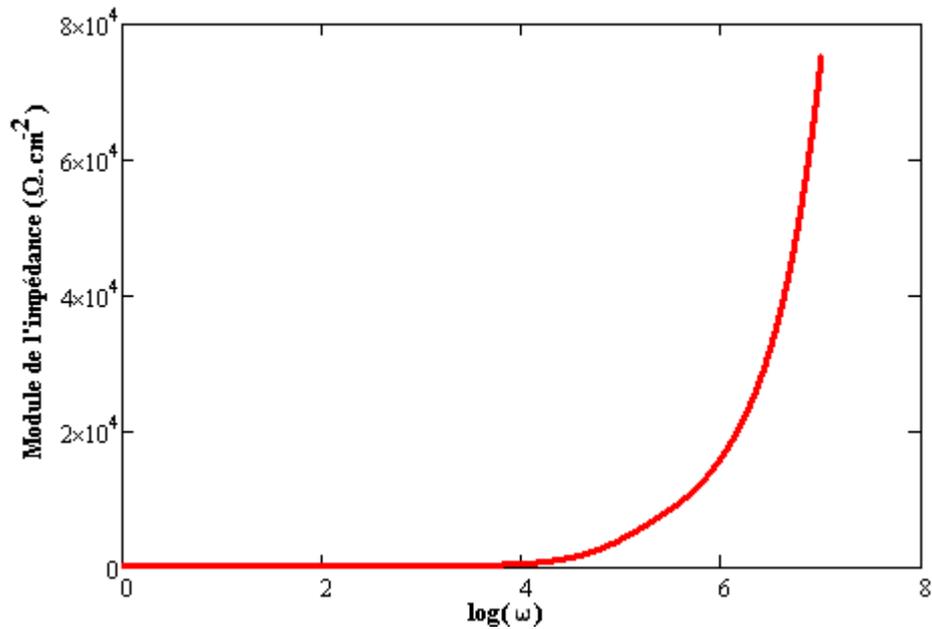


Figure III.15 Module de l'impédance en fonction de la fréquence pour un éclairage par la face arrière ($\lambda=1\mu\text{m}$, $S_b = S_f = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$)

Les courbes obtenues, montrent que pour des fréquences comprises dans l'intervalle $0 < \omega < \omega_c$, le module de l'impédance est indépendant de la fréquence. Et pour les valeurs de la pulsation telle que $\omega > \omega_c$ le module de l'impédance croît avec la pulsation. Ainsi l'intersection des prolongements de chacune des deux parties linéaires de la courbe permet d'obtenir la fréquence angulaire de coupure ω_c .

Dans le tableau III.5 nous présentons les valeurs de la pulsation de coupure en fonction de la longueur d'onde

λ (μm)	Pulsation de coupure (rad/s)
0,4	2.10^6
0,7	3.10^6
1	$3,16.10^6$

Le tableau III-6 : fréquence de coupure en fonction de la longueur

La fréquence de coupure augmente avec la longueur d'onde.

La fréquence de coupure nous permet de déterminer la capacité de la photopile connaissant la résistance shunt grâce à la relation (III-5) :

$$R_{sh} \cdot C = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad \text{(III-5)}$$

λ (μm)	C ($\mu\text{F.cm}^{-2}$)
0,4	0,0014
0,7	0,0005
1	0,000052

Le tableau III-5 : Capacité en fonction de la longueur d’onde

La capacité est inversement proportionnelle à longueur d’onde mais notons que sa valeur diminue lorsqu’on passe d’un éclairage par la face arrière à un éclairage simultané des deux faces.

III-4 DIAGRAMME DE BODE DE L’IMPEDANCE POUR DIFFERENTS MODES D’ECLAIREMENT : Phase de Zph

III-4-1 DIAGRAMME DE BODE DE L’IMPEDANCE POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

Le diagramme de Bode de l’impédance pour un éclairage par la face Arrière de la photopile est donné à la figure III.16

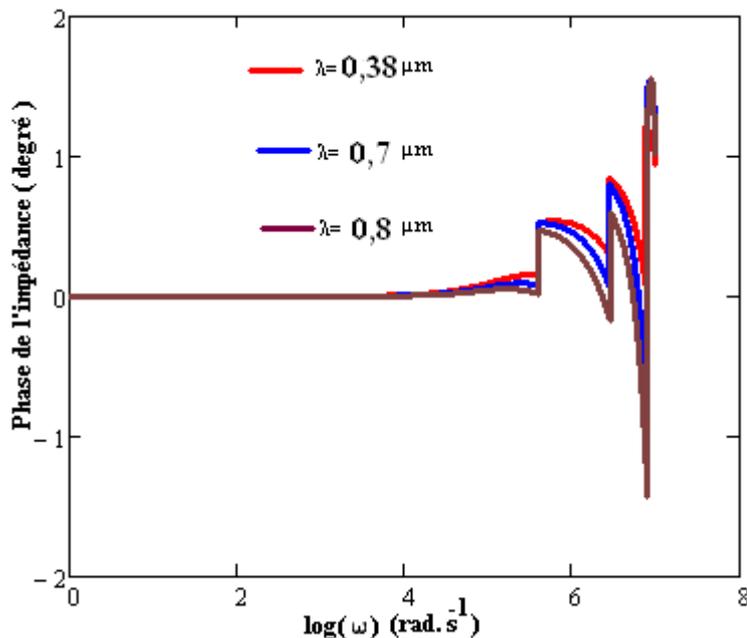


Figure III.16 Variation de la phase de l’impédance en fonction de la fréquence
 1°) $\lambda=0,38\mu\text{m}$, 2°) $\lambda=0,7\mu\text{m}$, $\lambda=0,8\mu\text{m}$, $S_b = S_f = 3000 \text{ cm.s}^{-1}$

Cette représentation de Bode de l'impédance en fonction du logarithme de la fréquence, montre qu'il existe une fréquence en dessous de laquelle la phase est nulle quelque soit la longueur d'onde, c'est le domaine du régime statique. Dans cette zone les phénomènes inductifs et capacitifs se compensent. Au delà de cette fréquence, l'un de ces phénomènes est prédominant.

Le diagramme de Bode de l'impédance (phase) pour un éclairage par la face arrière de la photopile est donné à la figure III.17

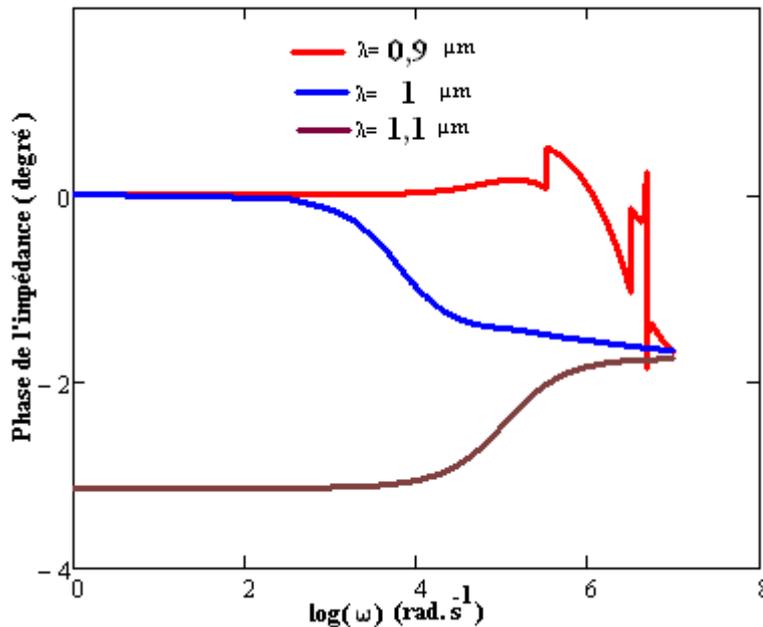


Figure III.17 Variation de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence
 1°) $\lambda=0,9\mu\text{m}$, 2°) $\lambda=0,1\mu\text{m}$, $\lambda=1,1\mu\text{m}$, $S_b=S_f=3000 \text{ cm.s}^{-1}$

Ces courbes montrent que la phase de l'impédance est négative lorsque la longueur d'onde est supérieure à $0,8\mu\text{m}$. Dans cette zone les phénomènes capacitifs l'emportent.

III-4-2 DIAGRAMME DE BODE DE L'IMPEDANCE POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES : Phase de Z_{ph3}

Le diagramme de Bode de la phase de l'impédance pour un éclairage par la face Arrière de la photopile est donné aux figures III.18 et III.19

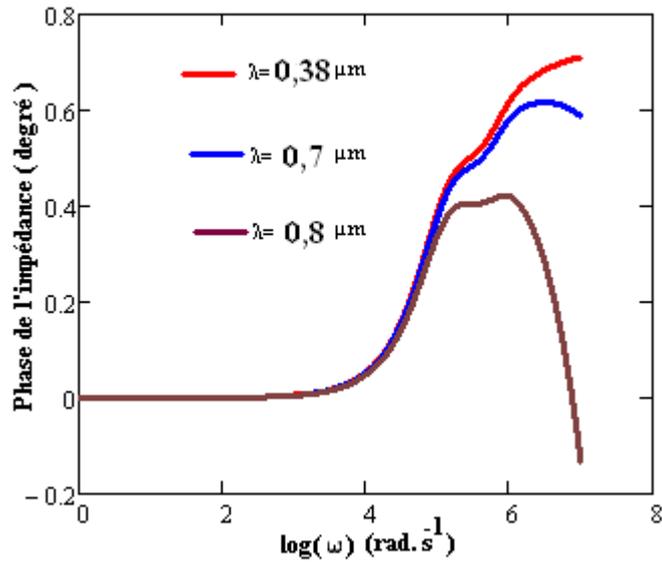


Figure III.18 Variation de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence
 1°) $\lambda=0,38\mu\text{m}$, 2°) $\lambda=0,7\mu\text{m}$, $\lambda=0,8\mu\text{m}$, $S_b = S_f = 3000 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Les courbes obtenues présentent les mêmes allures que pour un éclairage par la face arrière

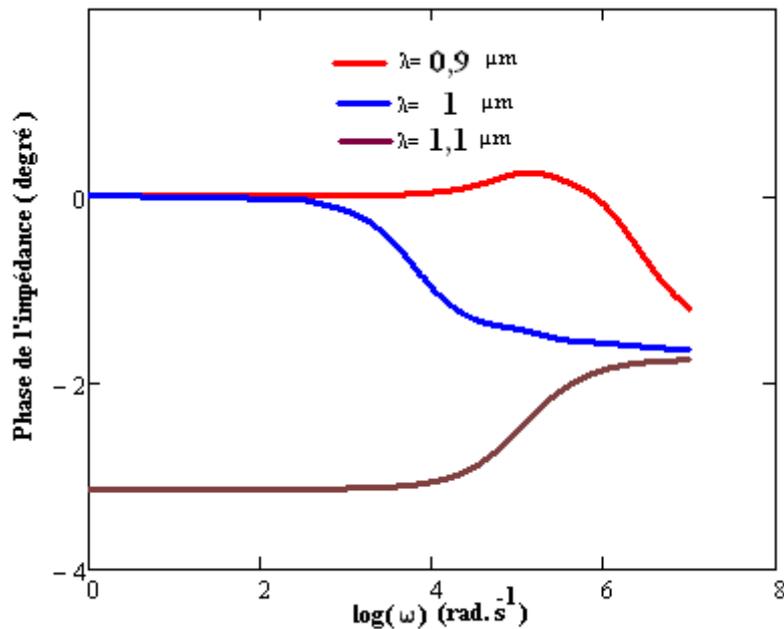


Figure III.19 Variation de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence
 1°) $\lambda=0,9\mu\text{m}$, 2°) $\lambda=0,1\mu\text{m}$, $\lambda=1,1\mu\text{m}$, $S_b=S_f=3000 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$

III-4-3 MODELE ELECTRIQUE EQUIVALENT DE LA PHOTOPILE

Pour déterminer les paramètres électriques (résistance série, résistance shunt, inductance et la capacité) en vue d'un contrôle de la qualité d'une photopile, différents modèles de circuits électrique équivalent de la photopile ont été proposés. Nous allons, tout d'abord, présenter un

modèle à exponentielle simple ou à une diode et ensuite un modèle à double exponentielle ou à deux diodes [69].

Le modèle à une diode, est une forme de représentation schématique d'une photopile en circuit électrique où l'on considère que la photopile est un générateur de courant avec ses différents éléments électriques placés dans un circuit caractérisant ainsi les phénomènes de résistivité, de fuite, de conductance, et de capacitance[70].

Dans ce modèle à une diode, les effets capacitifs de la zone de charge d'espace peuvent être mis en exergue en remplaçant la diode par une capacité de diffusion, une capacité de transition et une résistance en parallèle.

Le modèle électrique à une diode en régime dynamique est représenté à la figure III.20:

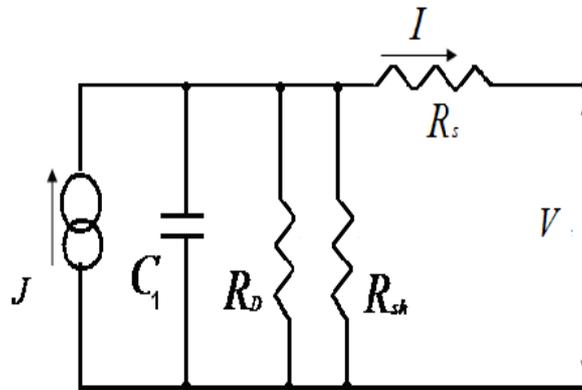


Figure III.20 : circuit équivalent avec le modèle à une diode

Dans le modèle à deux diodes, la diode modélisant les phénomènes de diffusion est remplacée par une capacité de diffusion, une capacité de transition et une résistance en parallèle et la diode modélisant les centres de recombinaison est remplacée par une autre résistance dynamique et une capacité de diffusion issues des centres de recombinaison.

Le modèle électrique à deux diodes en régime dynamique est représenté sur la figure III.21 :

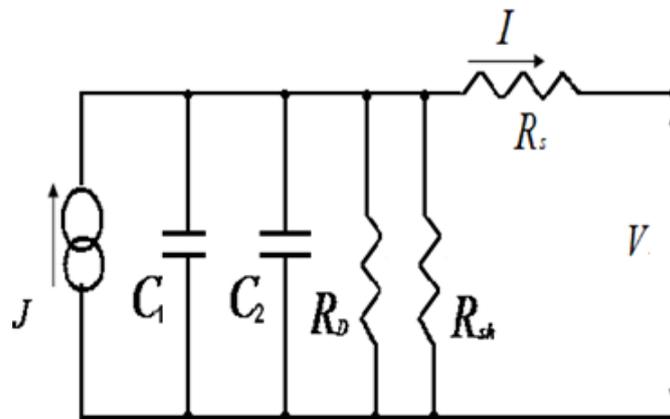


Figure III.21 : circuit équivalent avec le modèle à deux diodes

- C_1 est la somme de C_D et C_T
- C_D est la capacité de diffusion de la zone de charge d'espace.
- C_T est la capacité de transition.
- C_2 est la capacité due aux centres recombinaisons dans la zone de charge d'espace
- R_{sh} et R_D sont des résistances qui modélisent les courants de fuite existant au bord de la structure et l'ensemble des défauts au voisinage de la zone de charge d'espace (dislocation, joints de grain).
- R_S modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc des métallisations.

Dans notre travail, nous avons adopté la méthode de détermination des paramètres électriques proposée par les articles cités dans le chapitre I. Mais nous avons apporté quelques modifications car les modèles électriques existants ne pouvaient pas expliquer tous les résultats que nous avons obtenus. En effet nous avons remarqué que :

- La phase de l'impédance prend des valeurs positives et négatives lorsque la longueur d'onde λ est inférieure à $0,8\mu\text{m}$, ce qui signifie que la photopile a un comportement capacitif (présence d'un condensateur) et inductif (présence d'une bobine).
- La phase de l'impédance peut être nulle si la longueur d'onde $\lambda = 0,8\mu\text{m}$. Ce qui correspond à la résonance.
- Elle est négative lorsque la longueur d'onde est supérieure à $0,8\mu\text{m}$, ce qui signifie que la photopile a un comportement inductif (présence d'une bobine).

Ces trois remarques que nous avons énumérées ci-dessus nous permettent de proposer les deux modèles électriques équivalents d'une cellule solaire en régime dynamique fréquentiel que sont:

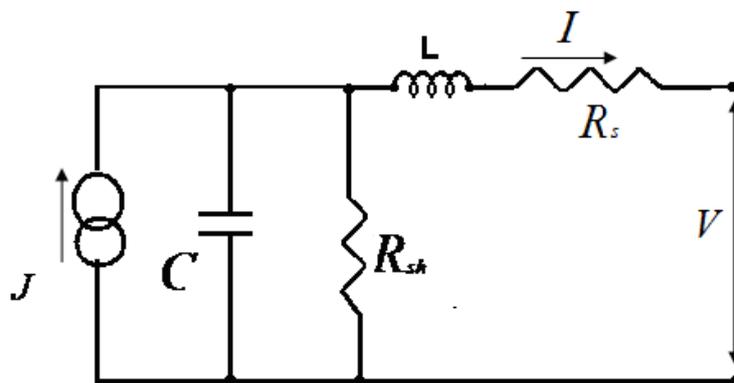


Figure III.22 : circuit équivalent 1

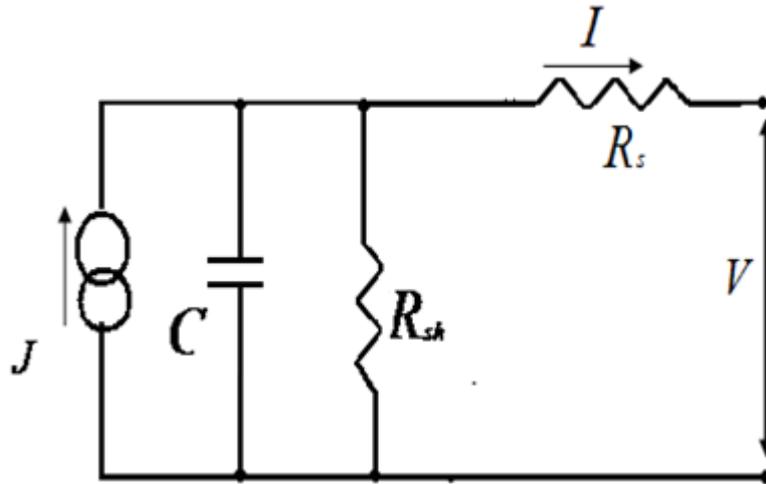


Figure III.23 : circuit équivalent 2

Dans ces deux modèles:

- R_{sh} est la résistance shunt qui modélise les courants de fuite existant au bord de la structure et l'ensemble des défauts au voisinage de la zone de charge d'espace (dislocation, joints de grains).
- R_s modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc des métallisations.
- C est la capacité équivalente
- L modélise les effets inductifs

III-5 CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION

III-5-1 COURANT DE DIODE

Le courant de diode est un courant de fuite, il s'établit lorsque les porteurs de charge sont injectés ou photo générés dans la photopile. Ainsi, pour une photopile éclairée, ce courant caractérise les pertes de porteurs générés et dépend de la tension, du coefficient d'absorption et des vitesses de recombinaison S_f et S_b . Il est donné par l'expression (III-6) suivante :

$$I_{d_n} = A \cdot q \cdot S_f n_0 \cdot \delta_n(0) \quad (\text{III-6})$$

Où $S_f n_0$ est la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction et

$$\delta_n(0) = \frac{n_0^2}{NB} \left[\exp\left(\frac{V_p h_n}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{III-7})$$

Nous présentons aux figures III.24 et III.25 les variations du module du courant de diode en fonction de la phototension pour différent modes d'éclairément.

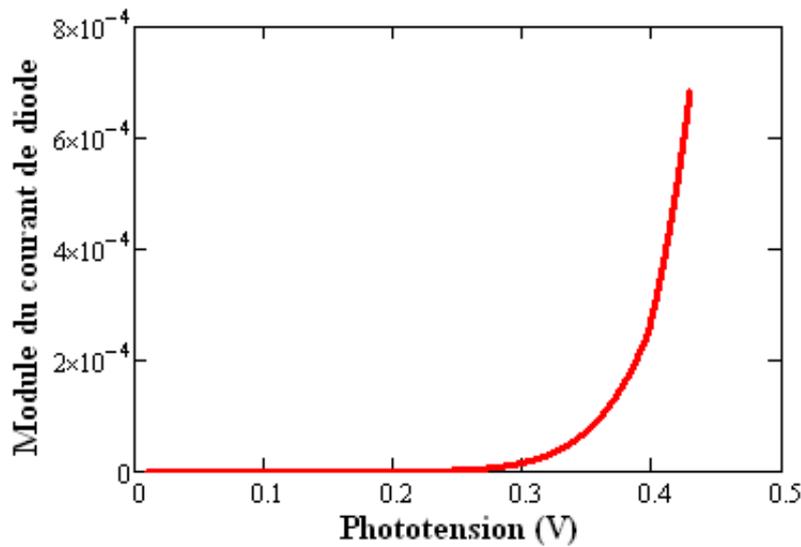


Figure III.24 Variation du module du courant de diode en fonction de la phototension $\lambda = 0,8\mu\text{m}$, $f=1,59.10^4\text{Hz}$. Éclairement par la face arrière.

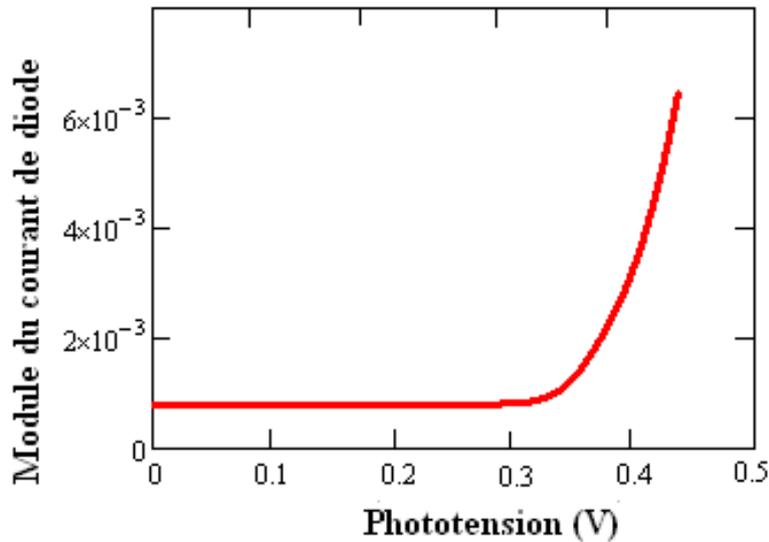


Figure III.25 Variation du module du courant de diode en fonction de la phototension $\lambda = 0,8\mu\text{m}$, $f=1,59.10^4\text{Hz}$. Éclairement simultané.

Dès que l'influence de la zone de charge d'espace perd son importance, c'est-à-dire dès que la tension est supérieure ou égale à 0,4volts, le courant de diode augmente avec la tension de façon exponentielle. Ainsi le courant de fuite se manifeste dès qu'il y a accumulation des porteurs de charge à la jonction (S_f faible ou gradient des porteurs faible) correspondant à des valeurs croissantes de la tension.

Nous présentons aux figures III.26 et III.27 les variations du module du courant de diode en fonction de la fréquence pour différents modes d'éclairement.

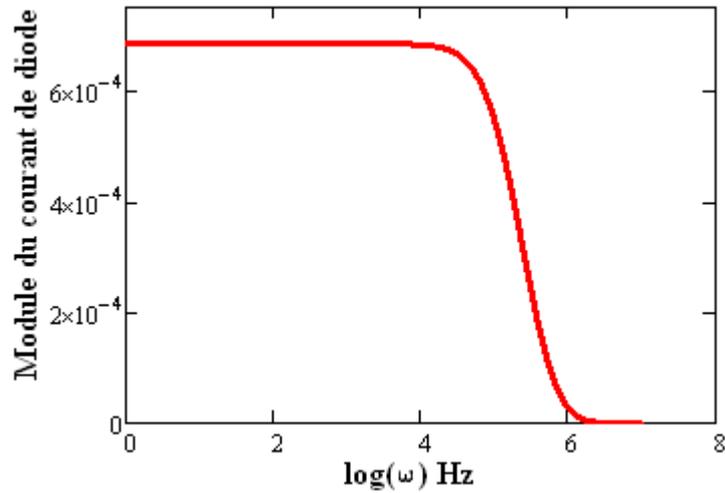


Figure III.26 Variation du module du courant de diode en fonction de la phototension $\lambda = 0,8\mu\text{m}$. éclairé par la face arrière.

Le courant de diode est constant lorsque la fréquence est faible (ω inférieure à 10^4Hz) puis diminue et tendant vers zéro lorsque la fréquence est supérieure à 10^6Hz

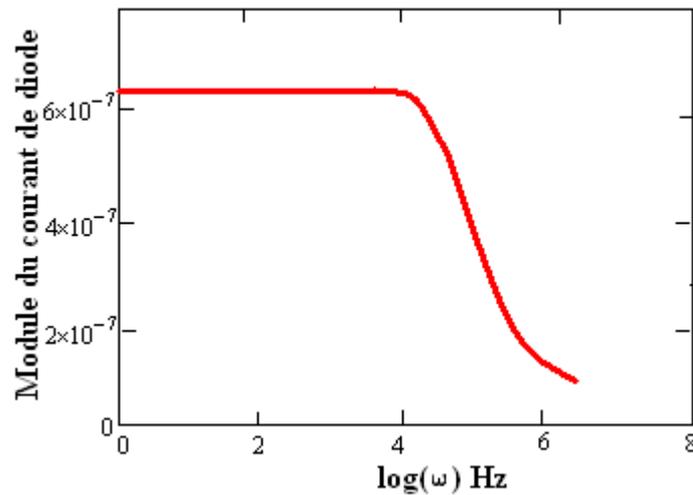


Figure III.27 Variation du module du courant de diode en fonction de la phototension $\lambda = 0,8\mu\text{m}$. éclairé simultanément

Le courant de diode est constant lorsque la fréquence est faible (ω inférieure à 10^4Hz) puis diminue en tendant vers zéro lorsque la fréquence est supérieure à 10^6Hz .

Le module du courant de diode est plus faible pour l'éclairé simultanément.

III-5-2 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION

La connaissance du photocourant et du courant de diode [80] permet d'évaluer l'intensité I du courant à la sortie de la cellule.

Ainsi l'intensité du courant recueilli à la sortie de la photopile est donnée par la relation (III-8) :

$$I = I_{ph} - Id \quad (III-8)$$

III-5-2-1 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION POUR UN ECLAIREMENT PAR LA FACE ARRIERE

Nous présentons à la figure III-28 les variations de la densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes fréquences

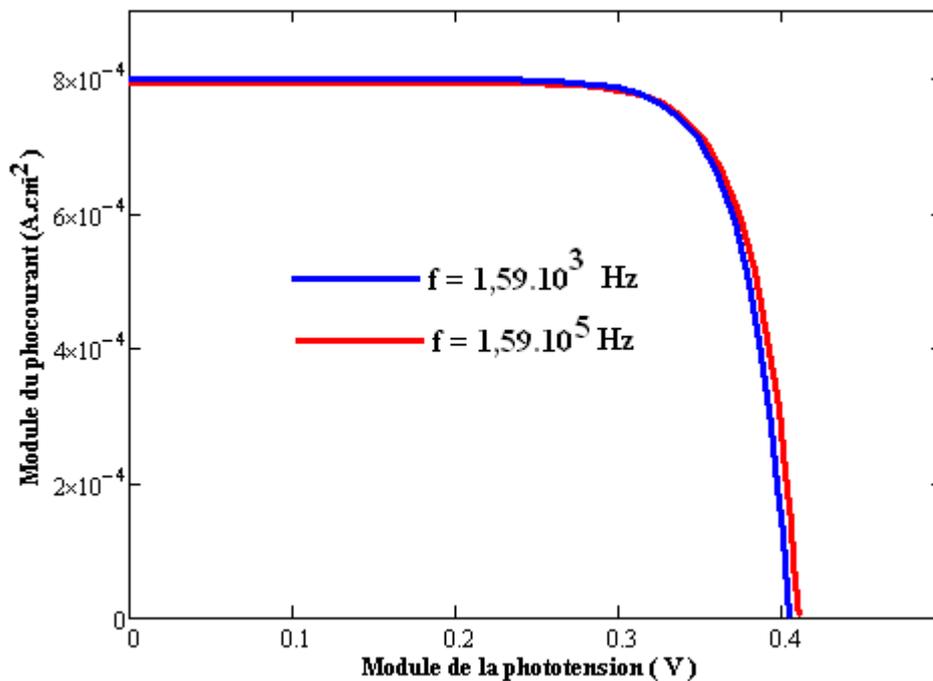


Figure III.28 Variation du module du photocourant en fonction de la phototension pour différentes fréquences de modulation. $\lambda = 0,8\mu\text{m}$. éclairage par la face arrière

Les profils de la figure III-28 montrent que pour une tension inférieure à 0,3 V environ la densité de courant est presque constante et égale à la valeur de la densité du courant de court-circuit. Ces valeurs de courant de court circuit diminue lorsque la fréquence augmente. Pour des valeurs de tension supérieures à 0,3V la densité de courant diminue rapidement pour tendre vers le voisinage du point de fonctionnement du circuit ouvert.

La tension comme le courant est proportionnelle à la fréquence.

III-5-2-2 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION POUR UN ECLAIREMENT SIMULTANE DES DEUX FACES

Nous présentons à la figure III-29 les variations du courant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la fréquence

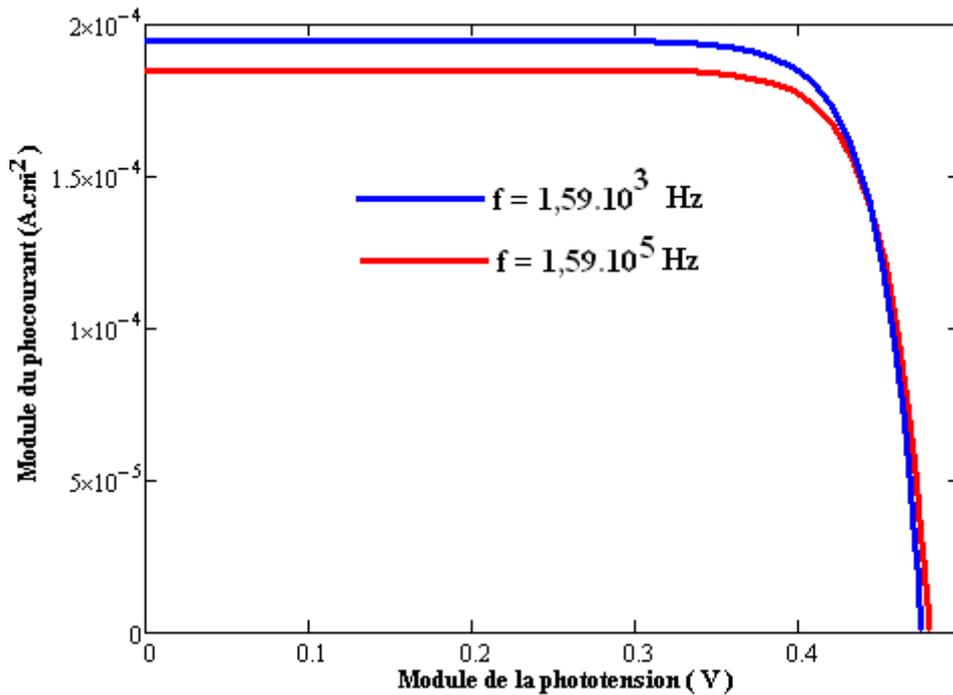


Figure III.29 Variation du module du photocourant en fonction de la phototension. $\lambda = 0,8\mu\text{m}$. éclairnement simultané

La caractéristique courant-tension pour un éclairnement simultané des deux faces de la photopile représentée à la figure III-29 montre que pour une tension inférieure à 0,4V la densité de courant est constante. Elle correspond à la valeur de la densité de courant de court-circuit. Ensuite la densité de courant décroît rapidement pour des valeurs de tension supérieure à 0,4V pour s'annuler. Ce point où la densité de courant est nulle correspond au voisinage du circuit ouvert.

Ces courbes montrent également que la tension du circuit- ouvert et le courant de court circuit varient avec la fréquence.

III-5-2-3 ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION POUR DIFFERENTS MODES D'ECLAIREMENT

Nous présentons à la figure III-30 les variations du courant en fonction de la phototension pour différents modes d'éclairnement.

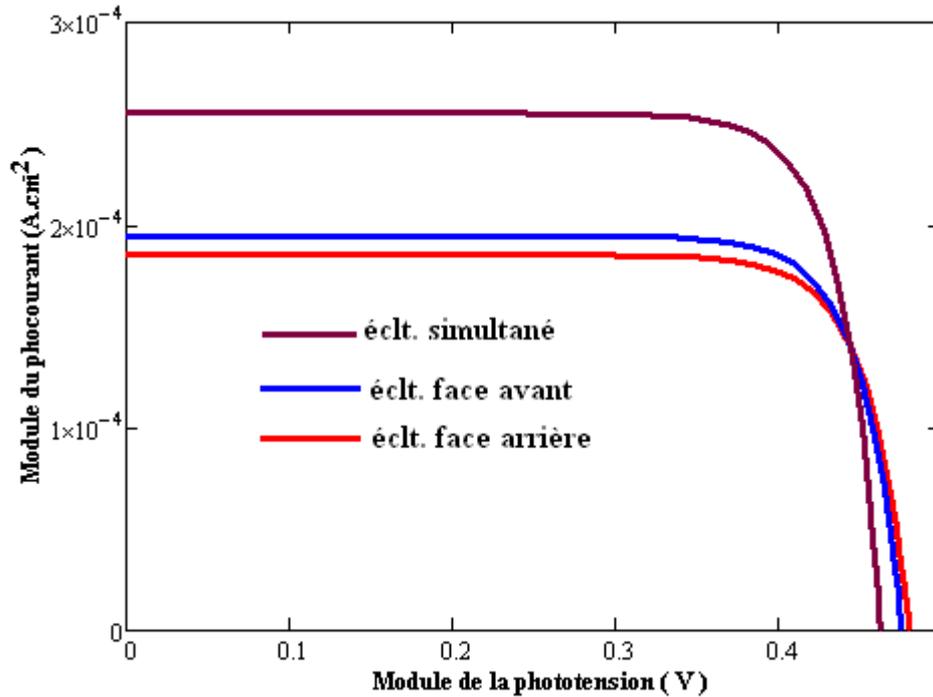


Figure III.30 Variation du module du photocourant en fonction de la phototension pour différents modes d'éclairement. $\lambda = 0,8\mu\text{m}$; $f = 1,59.10^5\text{Hz}$

Cette comparative des caractéristiques I-V, obtenues pour les trois modes d'éclairement permet d'affirmer que pour une fréquence et une longueur d'onde données, la densité de courant comme la tension à circuit ouvert pour un éclairage simultané des deux faces sont supérieures à celles obtenues par un éclairage sur la face avant et sur la face arrière de la photopile.

Quant à la densité de courant et la tension de circuit ouvert obtenues par éclairage sur la face arrière sont inférieures aux deux autres.

Ces trois caractéristiques I-V suivant les différents modes d'éclairement ont la même allure.

III-5-3 PUISSANCE ELECTRIQUE DE LA PHOTOPILE

III-5-3-1 EXPRESSION DE LA PUISSANCE

La puissance fournie par la photopile sous illumination monochromatique de longueur d'onde (λ_i) et pour un point de fonctionnement à Sf donné, s'exprime par le produit :

$$P = I \cdot V_{ph} \tag{III-9}$$

III-5-3-2 ETUDE DE LA PUISSANCE EN FONCTION DE LA TENSION ET DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA JONCTION Sf

Nous représentons aux figures III.31 et III.32 les variations de la puissance en fonction de la tension pour différentes longueurs d'onde

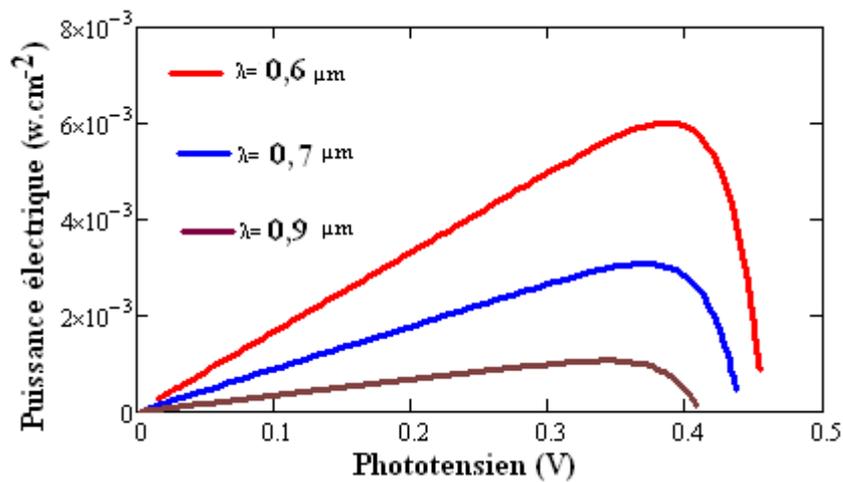


Figure III.31 Variation de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de la longueur d'onde 1°) $\lambda=0,6\mu\text{m}$, 2°) $\lambda=0,7\mu\text{m}$; 2°) $\lambda=0,9\mu\text{m}$; $f=10^5\text{HZ}$; $S_f = S_b = 3000\text{cm/s}$ éclairément par la face arrière.

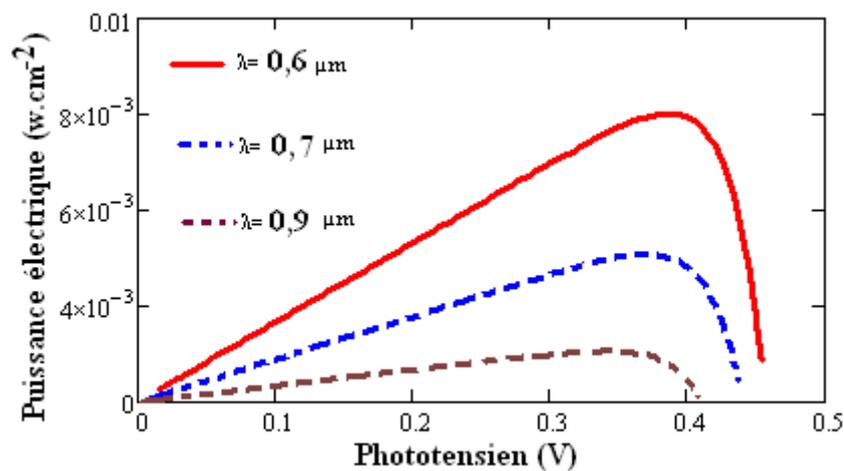


Figure III.32 Variation de la puissance en fonction de la tension pour différentes longueurs d'onde : éclairément simultané. 1°) $\lambda=0,6\mu\text{m}$, 2°) $\lambda=0,7\mu\text{m}$; 2°) $\lambda=0,9\mu\text{m}$; $f=10^5\text{HZ}$; $S_f = S_b = 3000\text{cm/s}$

Les courbes de puissance en fonction de la phototension présentent les mêmes allures. La puissance varie linéairement avec la phototension jusqu'au voisinage de la valeur limite qui correspond au maximum de puissance. Lorsque la phototension tend vers sa valeur du circuit ouvert, la puissance diminue pour s'annuler. L'augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution de la puissance maximale. On s'attend donc à une diminution de la qualité de photopile. [81]

En outre, on peut remarquer que la puissance maximale est plus importante pour l'éclairément simultané.

Nous représentons à la figure III.33 les variations de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour un éclairage par la face arrière

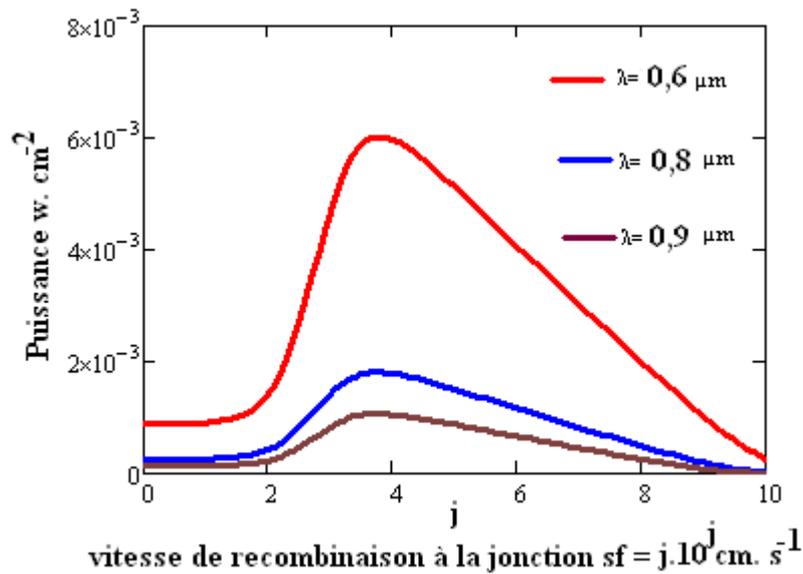


Figure III.33 Variation de la puissance en fonction de Sf pour différentes longueurs d'onde : éclairage par la face arrière. $f = 1,59.10^5 Hz$

Pour des faibles vitesses de recombinaison à la jonction c'est à dire lorsqu'on est au voisinage du circuit ouvert, le courant est faible; ceci entraîne une faible puissance de la photopile. Mais au fur et à mesure que la vitesse de recombinaison à la jonction croit, le courant augmente lentement, entraînant une augmentation de la puissance jusqu'à atteindre une valeur maximale. Lorsqu'on tend vers un fonctionnement de la photopile en condition de court-circuit, la phototension tend à s'annuler; cela provoque simultanément une diminution de la puissance

Nous représentons à la figure III.34 les variations de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour un éclairage simultané

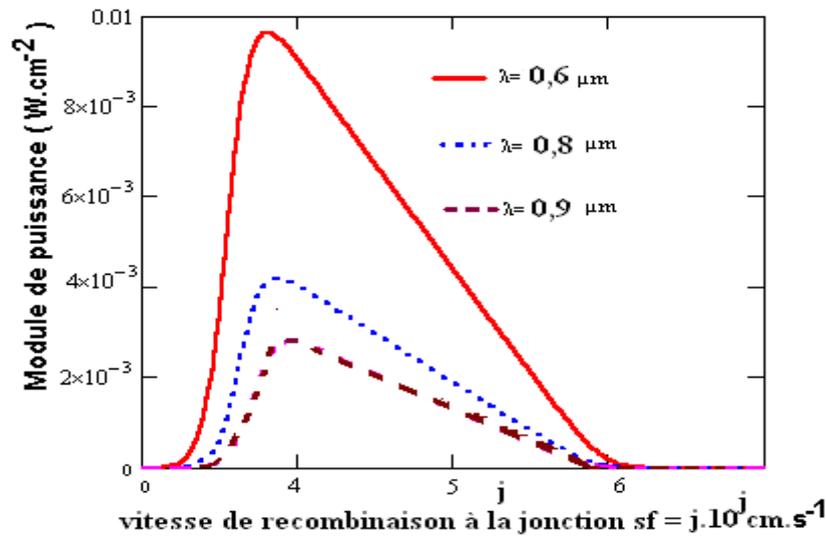


Figure III.34 Variation de la puissance en fonction de Sf différentes longueurs d'onde : éclairage simultané. $f = 1,59.10^5 \text{Hz}$

Le profil de la puissance en fonction de Sf montre que la puissance est maximale pour le point de fonctionnement $Sf_m = 10^4 \text{cm.s}^{-1}$ et cela quelque soit la longueur d'onde λ_i .

En fait la détermination graphique de Sf_m n'est pas exacte ; il faut le faire par calcul. Il suffit de remplacer le terme V dans la relation (III-9) par son expression définie par l'équation (II-118), ensuite dériver la puissance par rapport à la variable Sf, et enfin annuler la dérivée avant de résoudre. La résolution donne la valeur de Sf_m et nous en déduisons l'expression maximale pour une longueur d'onde λ_i donnée :

La puissance maximale fournie par la photopile est imposée par une valeur optimale de la vitesse de recombinaison Sf à la jonction.

Cette valeur de la puissance permet de définir le facteur de forme et le rendement de conversion de la photopile.

III-5-4 FACTEUR DE FORME

Le facteur de forme FF [69-70] est le rapport entre la puissance maximale fournie par la photopile P_{ma} et le produit du courant de court-circuit J_{cc} par la tension en circuit ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale)

Son expression est donnée par la relation (III-10):

$$FF(\lambda, \omega, Sf, Sb) = \frac{P_{ma}(\lambda, \omega, Sf, Sb)}{V_{co}(\lambda, \omega, Sf, Sb) \cdot J_{cc}(\lambda, \omega, Sf, Sb)} \quad \text{(III-10)}$$

- Le terme V_{co} représente la tension en circuit ouvert et est calculé à partir de l'expression (II-18) de V_{ph} pour les valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction à la jonction (Sf) très faibles.

- Quant à J_{cc} , il représente la densité courant de court-circuit et est donné par la relation (II-16) pour des valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f) très grand.

CONCLUSION

Dans cette partie, une méthode de détermination des paramètres électriques d'une photopile bifaciale au silicium sous éclairage monochromatique modulé en fréquence a été proposée. Cette méthode s'appuie sur l'impédance dynamique de la photopile à partir de laquelle les diagrammes de Nyquist et de Bode sont tracés et permettant ainsi d'extraire les résistances série et shunt équivalentes, la pulsation de coupure, la capacité et l'inductance équivalente de la photopile.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons présenté une étude en modélisation à une dimension d'une photopile bifaciale en régime dynamique fréquentiel sous éclairage monochromatique.

Au cours de notre étude bibliographique nous avons présenté un certain nombre d'articles relatifs aux méthodes de détermination des paramètres de recombinaison des porteurs minoritaires de charge dans la base des photopiles au silicium polycristallin en régime dynamique fréquentiel. Dans cette partie, certains modèles électriques qui ont été utilisés pour la détermination de paramètres comme R_S , R_{SH} et Z ont été aussi présentés.

Dans le chapitre deux, partant des expressions de la densité des porteurs minoritaires en excès de la photopile en régime dynamique fréquentiel, les expressions du photocourant, de la phototension, de la capacité de diffusion et des vitesses de recombinaisons ont été obtenues et étudiées en fonction de la fréquence de modulation et de la longueur d'onde pour différents modes d'éclairage.

Enfin la détermination de certains paramètres électriques de la photopile comme la résistance série (R_S), la résistance shunt (R_{sh}), l'impédance (Z), la fréquence de coupure (ω_c) et la capacité (C) par l'intermédiaire des diagrammes de Nyquist du module de l'impédance et de Bode de la phase et du module de l'impédance, nous a permis de proposer deux modèles électriques équivalents de la photopile. La puissance électrique et le facteur de forme de la photopile ont été aussi déterminés.

Cette contribution que nous venons d'effectuer dans les techniques de détermination des paramètres électriques d'une photopile bifaciale en régime dynamique fréquentiel ouvre de nouvelles perspectives de recherche dans le domaine des photopiles. En effet à l'avenir on peut envisager pour compléter notre travail comme perspectives des études sur :

- Le comportement de la photopile en régime dynamique transitoire pour un éclairage simultané de ses deux faces
- L'étude à trois dimensions pour déterminer ses paramètres électriques (les résistances série et shunt, la capacité de la zone de charge d'espace et l'inductance de la cellule et des fils de connexion)
- Les caractéristiques de la photopile en régime statique
- La même photopile avec un éclairage multi spectral

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Ricaud,
« Photopiles solaires ». Presses Polytechniques et Universitaires romandes. Lausanne, Suisse, 1997
- [2] S. Bau, T. Kieliba, D. Oswsolarald, A. Hurrie
Proc. 17th European photovoltaic Solar Energy Conference (PVSEC), (Munich, 2001) 1575-1577
- [3] A. Schneider, C. Gerhards, F. Huster, W. Neu, M. Spiegel, P. Fath, E. Bucher, R.J.S. Young, A. G. Prince, J. A. raby, A. F. Carool
Proc. 17th European photovoltaic Solar Energie Conference (PVSEC), (Munich, 2001) 1575-1577
- [4] I. F. Barro, S. Mbodji, A. L. Ndiaye, S. Madougou, I. Zerbo, F. Zougmore, G. Sissoko
Proceeding of the 21st European photovoltaic Solar Energy Conference, Septembre 2006, Dresden, Germany, pp. 447-450
- [5] B. Terheiden, G. Hahn, P. Fath, E. Bucher
Proceeding of the 16th European photovoltaic Solar Energy Conference, 15 Mai 2000, Glasgow, UK, pp. 1377-1380
- [6] Martin A. Green
Silicon Solar cells, Advanced Principles & Patrice, March, 1995, p.259
- [7] G. C. Jain, S. N. Singh and R. K. Kotnala
Solar Cells, 8(1993), pp.239-248
- [8] M. Meusel, W. Benssch, T. Berdunde, R. Kern, V. Khorenko, W. Kostler, G. Laroche, T. Torunski, W. Zimmermann, G. Strobl, W. Guter, M Hermle, R. Hoheisel, G Siefer, E Welsler, F. Dimroth, A. W. Bett, W. Geens, C. Baur, S. Taylor, G. Hey.
« Development and production of European III-V multijonction Solar cells »
Proceeding of the 22nd European photovoltaic Solar Energy Conference,(2007) 16 - 51
- [9] R. Monna, A. Slaoui, A. Lachiq, J. Kopp and J. C. Muller.
13th European PVSEC and Exhibition, Nice, 23 – 27 Octobre 1995,p . 1605.
- [10] S. Berger, S. Quoizola, A. Fave, A. Ouldabbes, A. kaminski, N. E. chabane-Sari, A. Laugier.
17th European PVSEC, Munich (Allemagne), Novembre 2001, pp.1772 – 1775.
- [11] a. Kaminski, B. vandelle, A. Fave, J. P. Boyeux, A. Laugier
Solar Energy Materials and Solar Cells, 72(2002), pp. 373 - 379
- [12] Linda M. Koschier, Stuar R. Wenham, Mark Gross, Tom Puzzer; Alistair B. Sproul.
Proceedings of the 2nd World Conference on photovoltaic Solar Energy Conversion,(1998), Vienna, Austria, pp. 1539 – 1542.
- [13] Solar Energy 24 Hours a day, Business Week, 6/17/96, p.91

- [14] « Semiconductors for solar cells », H. J. Moller, Artech house, 1993
- [15] « Energie Solaire Photovoltaïque », volume1, Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, sous la direction de Bernard Eguer, (Ellipses, Unesco, 1993)
- [16] S. R. Dhariwal and D. R. Mehrota.
Solar cells, 25(1988), pp. 223 - 233
- [17] G. C. Jain, S. N. Singh, and R. K. Kotnala
Solar cells, 8(1983), pp. 239 - 248
- [18] Daniel L. meier, jeong-mo Hwang, Robert B. Campbell.
IEEE Transaction on Electron Devices, vol. ED-35, N°1 ; 1988, pp. 70 – 78.
- [19] Modélisation d'une photopile bifaciale au silicium : méthodes de détermination des paramètres de recombinaison, E. Naména, Thèse de 3^{ème} cycle, UCAD, 1996, Sénégal
- [20] A. Romanowsky and D. B. Wittry
J. Appl. Phys. 60(8), 1986, pp. 1569 – 1579.
- [21] J. S. Park, F. A. Lindholm and A. Neugroschel.
J. Appl. Phys. 62 (3), 1987, pp. 948 - 995
- [22] D. Vanmaekelbergh and A. R de Wit, F. Cardon.
J. Appl. Phys. 70 (10), 1993, pp. 5049 - 5057
- [23] D. Caputo, G. De Cerare, F. Irrera, F. Palma and M. Tucci.
J. Appl. Phys. 76 (6), 1994, pp. 3524 - 3541
- [24] J. Roos Mac Donald.
J. Appl. Phys. 75 (2), 1994, pp. 1059 - 1069
- [25] J. Barrier, P. Boher and M. Renaud
Appl. Phys. Lett : 53 (13), 1998, pp. 1192 -1194
- [26] Noriak Honma and Chusuke Munakata
Jpn. J Appl. Phys. 26 (12), 1987, pp. 2033 - 2036
- [27] C. Longeaud and J. P. Kleider
Phys. Rev. B: 45 (20), 1992, pp. 11672 - 11684
- [28] G. Jager-Waldan and H. U. Habermeier, G Zwicker, E. Bucher
J. Appl. Phys. 75 (2), 1994, pp. 804 - 808
- [29] C. Donolato, M. Kittler
J. Appl. Phys. 64 (6), 1988, pp. 3330
- [30] Albert Zondervan, Leendert Verhoef, Fredrik A. Lindholm, and A. Neugroschel.
J. Appl. Phys. 63 (11), 1988, pp. 5563 - 5570
- [31] U. C. Ray and S. K. Agarwal
J. Appl. Phys. 63 (2), 1988, pp. 547- 549

- [32] Zhuohui Chen and Andreas Mandelis
Appl. Phys. Lett. 59 (15), 1991, pp. 1861 - 1863
- [33] C. Donolato, M. Kittler.
J. Appl. Phys. 79 (9), 1996, pp. 6954- 6960
- [34] A. Buczkowski, Z. J. Radzinski, G. A. Rozgonyi, and F. Shimura.
J. Appl. Phys. 69 (9), 1991, pp. 6495- 6499
- [35] Anders Ricksand and Olof Engstrom
J. Appl. Phys. 70 (11), 1991, pp. 6915- 6926
- [36] Thomas R. Hanak, Richard K. Ahrenkiel, Donald J. Dunlavy, and Assem A. Bakry
J. Appl. Phys. 69 (9), 1990, pp. 4126- 4132
- [37] M. K. Madan and V. K Tewary.
Solar cells. 9(1983), pp. 289 - 293
- [38] R. Yan and F. F. Y. Wand, R. R. Corderman, C. P. Khattak, M. H. Leipold
J. Appl. Phys. 62 (8), 1987, pp. 3249- 3252
- [39] O. Brandt, K. Kanamoto, M. Gotoda, T. Isu, and N. Tsukada.
Phys. Rev B. 51 (11), 1995, pp. 7029- 7037
- [40] Miguel Levy, W. K. Lee, and M. P. Sarachik
Phys. Rev B. 45 (20), 1992, pp. 11685- 11692
- [41] R. Anil Kumar, M. S. Suresh and J. Nagaraju
IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 48, No.9, September 2001
- [42] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate
Solar Energy Materials and Solar Cells 80 (2003) 459-464
- [43] D.Chenvidhya, Kirtikara, C. Jivacate
Solar Energy Materials and Solar Cells 86 (2005) 243-251
- [44] Measurement of solar Cell AC parameters using Impedance Spectroscopy
A Thesis Submitted of the Degree of Master of Science (Engg.) In Faculty of Engineering by
R. Anil Kumar. Departement of Instrumentation Indian Institue of Science INDIAN january
2000
- [45] J.-P. Charles, I. Mekkaoui-Alaoui, G. Bordure et P. Mialhe
Revue Phys. Appl.19 (1984) pp. 851 – 857
- [46]A modelling for ac photo conductance response of a n^+p^+ crystalline
siliconmonochromatic light.
M.Bouda, I.F Barro, I. Zerbo, O.H.Lemrabott, F. Zougmore, G. Sissoko

- [47] Y.L.B.Bocande, A.Correa, I.Gaye, M.L.Sow, G.Sissoko. World_Renewable Energy Congress (1994), part III, pp.1698-1700
- [48] I.Zerbo, I.F.Barro, B. Mbow, A.Diao, F.Zougmore, G.Sissoko. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris (2004)
- [49] M.Orgeret. Les piles solaires. Le composant et ses applications. P.247, Masson,Paris,1985
- [50] N.Bordin,L.Kreinin,N.Eisenberg.17th.European Photovoltaic Conference and Exhibition (2001), pp.1495-1498.
- [51] Théodore Fogelman/Régis Montloin. “Installations photovoltaïques dans l’habitat isolé”.pp.264, C.Y. Chaudoreille-Edisud, Aix-en-Provence, 1983.
- [52] Wiley and Sons.Solar Electricity. pp.228, John University of Gouthampon UK, 1994
- [53] Keith R.McIntosh,Christiana B.Honsberg,Stuart R.Wenham. 2nd Word Conference on photovoltaic Solar Energy Conversion pp.1515-1518, (1998)
- [54] K. Misiakos, C. H. Wang, A. Neugroschel, and F. A. Lindholm, J.Appl. Phys. 67 (1), (1990) 321-333
- [55] Linda M.Koschier, Stuart R.Wenham, Mark Gross, Tom Puzzer,Alistair B. Sproul.2nd Word Conference and exhibition on photovoltaic Solar Energy Conversion pp.1539-1542, (1998).
- [56] Issa Zerbo. “Etude en modélisation d’une photopile bifaciale au silicium sous éclairage multispectral en régime dynamique fréquentiel : méthodes de détermination des paramètres de recombinaison”. Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou Burkina Faso, 2005.
- [57] J.DUGAS
Solar Energy materials and Solar Cells, 32 (1994), pp 71-88
- [58] F. Ahmed and S. Garg, International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, ITALY, Internal Report, Août 1986
- [59] Andreas Mandelis J. Appl. Phys.Vol.66 No.11, 1 December,1989, pp. 5572 – 5583.
- [60] Jose Furlan and Slavko Amon
Solid State Electronics, Vol. 28 (12) (1985) 1241-1243
- [61] Alain Ricaud, Photopiles solaires, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1997.
- [62] Mohammad S.N An alternative Method for the performance analysis of silicon solar cells, J.Appl.Physi.61 (2), pp. 767-772 (1987)

- [63] A.J. Steckl and S.P. Sheu
Solid. State Electronics Vol.23, 21 October, 1979, pp. 715 – 720
- [64] Lathi, Bhagwandas Pannalal: Signals, Systems And Controls.
- [65] Determiation Des Parametres Electriques D'une Photopile Sous Eclairment Monochromatique En Modulation De Frequence, A Partir Des Diagrammes De Bode Et De Nyquist
M. Ndiaye , Z. Nouhou Bako, I. Zerbo, A. Dieng, F. I. Barro, G. Sissoko
Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire, Département de Physique, FST, Université Cheikh Anta Diop,Dakar, Sénégal Laboratoire des Matériaux et environnement, Département de Physique, UFR/SEA, Université de Ouagadougou, Burkina Faso
Journal des sciences [http : www. cadjds.org](http://www.cadjds.org), vol.8, N°3(2008) pp.59-68
- [66] Alfred Dieng, Ndeye Thiam, Mamadou Lamine Samb, Amadou Seïdou Maiga, Fabé Idrissa Barro, Grégoire Sissoko
Etude à 3D d'une photopile polycrystalline au silicium: influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur les paramètres électriques
J. Sci. Vol. 9, N°1 (2009) pp.51-63.
- [68] J.-P. Charles, I. Mekkaoui-Alaoui, G. Bordure et P. Mialhe
Revue Phys. Appl.19 (1984) pp. 851 – 857.
- [69] Measurement of solar Cell AC parameters using Impedance Spectroscopy
A Thesis Submitted of the Degree of Master of Science (Engg.) In Faculty of Engineering by R. Anil Kumar. Departement of Instrumentation Indian Institue of Science INDIAN january 2000
- [70] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate
Solar Energy Materials and Solar Cells 80 (2003) 459-464
- [71] R. Anil Kumar, M. S. Suresh and J. Nagaraju
IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 48, No.9, September 2001
- [72] Effet de la longueur d'onde de l'excitation optique sur les phénomènes de recombinaison dans une photopile en régimes statique et transitoire
Casimir Museruka these de doctorat de 3^{ème} cycle mars 1995
- [73] Recombination parameters measurement in silicon double sided surface field solar cell
F. I. Barro, E. Nanéma, A. Werème, F. Zougmoré, G. Sissoko
Journal des Sciences(2001),Vol.1,N°1, pp.76-80
- [74] B. Mazhari and H. Morkoç
J. Appl. Phys. 73(11), 1993, pp. 7509 – 7514.
- [75] H. El Ghitani and S. Martinuzzi
J. Appl. Phys. 66(4), 1989, pp. 1717 – 1726.
- [76] Solar cell quality control by recombination parameters determination.
G. Sissoko, E. Nanéma, A. Corréa, M.Adj, A. L. Ndiaye, M. N. Diarra.
Conférence régionale sur les ressources d'énergie renouvelable en Afrique tropicale.
Texte de communication. Pp.131-138, Conakry, 24-29 Novembre1997

- [77] K. Misiakos, C. H. Wang, A. Neugroschel, and F. A. Lindholm,
J. Appl. Phys. 67 (1), (1990) 321-333
- [78] J.N. Hollenhorst and G. Hasnain
App. Phys. Lett. Vol. 67 (15), (1995) 2203-2205
- [79] F. Ahmed and S. Garg,
International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, ITALY, Internal Report, Août
1986
- [80] Andreas Mandelis
J. Appl. Phys. Vol. 66 No. 11, 1 December, 1989, pp. 5572 – 5583.
- [81] Jose Furland and Slavko Amon
Solid State Electronics, Vol. 28 (12) (1985) 1241-1243
- [82] Th. Flohr and R. Helbig,
J. Appl. Phys. Vol. 66 (7), (1989) 3060-3065
- [83] “ G.Sissoko, E.Nanéma, A.Corréa, P.M.Biteye, M.Adj, A. L.Ndiaye.
World Renewable Energy Congress (1998), pp 1847–1851
- [84] Electrical parameters for bifacial silicon solar cell study in modelling :
capacitance and space charge region width determination
S. Madougou, B. Dieng, A. Diao, I. F. Barro, Nzonzolo, G. Sissoko
Journal des Sciences pour l'ingénieur, (2005).
- [85] Impedance parameters determination of silicon solar cell using the one diode
model in transient study.
I. Gaye, A. Corréa, B. BA, A. L. Ndiaye, E. Nanéma, A. B. B. BA, M. Adj and G.Sissoko.
Renewable Energy, Vol 3, pp.1598-1601, 1996.
Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00.
- [86] Theoretical Study of Bifacial Silicon Solar Cell Under Frequency Modulated
White Light: Determination of Recombination Parameters.
I. ZERBO, F.I. BARRO, B. MBOW, A.DIAO, F. ZOUGMORE, G. SISSOKO
Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2004), Poster
1AV.2.56, Paris, FRANCE.
- [87] Advanced Materials Research Vols. 18-19(2007) pp. 303-312
Online at: <http://www.scientific>
S. MADOUGOU, F. MADE, M. S. BOUKARY and G.SISSOKO
- [88] 21st European Photovoltaic Solar Energie Conference, 4-8 Sept.(2006), Dresden,
Germany, pp.447-450
S. MBODJ, I. LY, A. DIOUM, H. L. DIALLO, I.F. BARRO, G. SISSOKO
- [89] Eur Phys J App Phys. 42, pp. 203-211 (2008)
H.L. DIALLO, A. S. MAIGA, A. WEREME and G. SISSOKO
- [90] Solar Energy Materials & Solar Cell 91 (2007) pp. 1647-1651
K. BOUZIDI, M. CHEGAAR, A. BOUHEMADOU

ANNEXE MATHÉMATIQUE

EQUATION DE DIFFUSION DES PORTEURS DE CHARGES MINORITAIRES EN EXCES D'UNE PHOTODIODE BIFACIALE EN RÉGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL SOUS ÉCLAIREMENT MONOCROMATIQUE

A- ÉCLAIREMENT PAR LA FACE AVANT

I.1- Equation de diffusion des porteurs de charges minoritaires en excès :

$$D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x,t)}{\tau} = -G(x,t) + \frac{\partial \delta(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

Où

- $\delta(x,t)$ est la densité des porteurs minoritaires dans la base qui peut s'écrire sous la forme : $\delta(x,t) = \delta(x) \exp(i\omega t)$ (2)

Avec $\delta(x)$ la composante spatiale et $e^{i\omega t}$ la composante temporelle.

- $G(x,t)$ est le taux de génération donné par l'expression :

$$G(x,t) = g(x) \exp(i\omega t) \quad (3)$$

Avec $g(x)$ la composante spatiale et $e^{i\omega t}$ la composante temporelle

$$\text{Où on a pour un éclairage par la face avant } g(x) = \alpha I_0 (1 - R) \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

$\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ ; $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion du matériau à la longueur d'onde λ ; H l'épaisseur de la photodiode.

- D est le coefficient de diffusion
- τ est la durée de vie moyenne des porteurs minoritaires de charge.

Posons :

$$L^2 = \tau D \quad (5)$$

$$\text{et } \frac{1}{L(\omega)^2} = \frac{1}{L^2} \times (i\omega\tau + 1) \quad (6)$$

où L_ω est la longueur de diffusion complexe

En introduisant les équations (2), (3) et (4) dans (1) nous obtenons l'équation :

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{1}{L(\omega)^2} \cdot \delta(x) = -\frac{g(x)}{D}$$

I.2- Solution de l'équation différentielle

La solution générale de l'équation s'écrit sous la forme $\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x)$

$\delta_1(x)$ est la solution particulière de l'équation avec second membre et $\delta_2(x)$ la solution générale de l'équation sans second membre.

Solution particulière de l'équation avec second membre

$$\delta_1(x) = A \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (7)$$

En remplaçant (7) dans (1) on obtient une équation qui permet de calculer A.

$$\text{On trouve } A = \frac{-\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)}$$

$$\delta_1(x) = \frac{-\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \cdot \exp(-\alpha x) \quad (8)$$

- **Solution générale de l'équation sans second membre :**

$$\delta_2(x) = A_1 \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B_1 \sinh\left(\frac{x}{L}\right) \quad (9)$$

- **Expression de la densité des porteurs de charges.**

$$\delta(x) = A \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - \frac{\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \cdot \exp(-\alpha x) \quad (10)$$

Pour déterminer A₁ et B₁ on utilise les conditions aux limites :

$$\text{A la jonction de la photopile : } \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_F}{D} \delta(x) \Big|_{x=0} \quad (11)$$

$$\text{A la face arrière de la photopile : } \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_B}{D} \delta(x) \Big|_{x=H} \quad (12)$$

Pour tout calcul fait on trouve :

$$A = \frac{\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^3 \left\{ D \cdot (S_B - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H) + (S_F + \alpha \cdot D) \left[D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot S_B \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \right\}}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1) \left[L \cdot D \cdot (S_B + S_F) \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F \cdot S_B \cdot L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]}$$

(13)

$$B = \frac{\alpha I_0 (1-R) L^3 \left\{ L S_F (S_B - \alpha D) \exp(-\alpha H) - (S_F + \alpha D) \left[D \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + L S_B \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \right\}}{D (\alpha^2 L^2 - 1) \left[L D (S_B + S_F) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F S_B L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]}$$

(14)

II- Calcul de la capacité

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad \text{Avec} \quad Q = q \delta(x) \Big|_{x=0} \quad \text{et} \quad V = V_T \cdot \ln \left[1 + \frac{N_B}{n_i^2} \delta(x) \Big|_{x=0} \right] \quad (15)$$

$$C = \frac{q}{V_T N_B} \left[n_i^2 + \frac{\alpha N_B I_0 (1-R) L^2 \left[L D (S_B - \alpha D) (\exp(-\alpha H) - \cosh\left(\frac{H}{L}\right)) + D (\alpha S_B L^2 - D) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]}{D (\alpha^2 L^2 - 1) \left[L D (S_F + S_B) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F S_B L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \right]$$

III- Photocourant

III-1 Densité de courant

$$J = q D \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (16)$$

Pour tout calcul fait on trouve :

$$J = \frac{q \alpha I_0 (1-R) L^2}{(\alpha^2 L^2 - 1)} \left\{ \frac{L S_F (S_B + \alpha D) \exp(-\alpha H) \left\{ \begin{aligned} & [L S_B (S_F - \alpha D) + \alpha L D (S_F + S_B)] \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + \\ & [D (S_F - \alpha D) + \alpha (D^2 + S_F S_B L^2)] \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \end{aligned} \right\}}{L D (S_F + S_B) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F S_B L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right)} \right\}$$

(17)

III- Photocourant de court circuit

$$J(t, \omega, p, m) \rightarrow J_{cc}(t, \omega, m) \quad (18)$$

$$SF > 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$$

Pour tout calcul fait, on trouve :

$$J_{cc} = \frac{q \alpha I_0 (1-R) L^2}{(\alpha^2 L^2 - 1)} \left\{ \frac{L S_B \exp(-\alpha H) - \left\{ [L S_B - \alpha L D] \text{ch}\left(\frac{H}{L}\right) + [(D - \alpha S_B L^2)] \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right) \right\}}{L D \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + S_B L^2 \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right)} \right\} \quad (19)$$

IV Phototension

IV-1 Densité de phototension

$$V(t, \omega, p, m) = V_T \cdot \ln \left[\frac{N_b}{n_0^2} \cdot \delta(0, t, \omega, p, m) + 1 \right] \quad (20)$$

Avec

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

et

- V_T la tension thermique
- T la température absolue à l'équilibre thermique
- q la charge élémentaire de l'électron
- k est la constante de Boltzmann
- n_0 est la densité des porteurs intrinsèques
- N_b Taux de dopage des impuretés dans la base

Pour tout calcul fait on trouve :

$$V = V_T \cdot \ln \left\{ \frac{N_B \cdot E}{n_0^2} \left[L(\omega) \frac{(DS_F + \alpha D^2) \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + (S_B D - \alpha D^2) e^{-\alpha H} + S_B L(\omega) (S_F + \alpha D) \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)}{(D^2 + S_B S_F L^2(\omega)) \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + DL(\omega) (S_B + S_F) \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)} - 1 \right] + 1 \right\}$$

$$\text{Avec } E = \frac{\alpha \cdot I_o \cdot (1 - R) \cdot L^2(\omega)}{D(\alpha^2 \cdot L^2 - 1)}$$

(21)

IV-2 Phototension de circuit ouvert

$$V(t, \omega, p, m) \rightarrow V_{co}(t, \omega, m)$$

$$SF \rightarrow 0$$

Ainsi on obtient :

$$V_{co} = V_T \cdot \ln \left\{ \frac{N_B \cdot E}{n_0^2} \left[L(\omega) \frac{\alpha D^2 \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + (S_B D - \alpha D^2) e^{-\alpha H} + S_B L(\omega) \cdot \alpha \cdot D \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)}{(D^2 + S_B L^2(\omega)) \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + DL(\omega) S_B \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)} - 1 \right] + 1 \right\}$$

(22)

B- ECLAIREMENT PPAR LA FACE ARRIERE

I- Calcul de la densité des porteurs de charge minoritaire en excès

I.1- Equation de diffusion des porteurs de charges minoritaires en excès

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{\alpha \cdot I_0}{D} \cdot (1-R) \cdot \exp(-\alpha(H-x)) \quad (22)$$

I.2- Solution de l'équation différentielle

$$\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x) \quad (23)$$

- **Solution particulière de l'équation avec second membre**

$$\delta_1(x) = A'' \cdot \exp(-\alpha \cdot (H-x)) \quad (24)$$

En remplaçant (2) dans (1) on obtient une équation qui permet de calculer A''.

$$\text{On trouve } A'' = \frac{-\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)}$$

$$\delta_1(x) = \frac{-\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \cdot \exp(-\alpha(H-x)) \quad (25)$$

- **Solution générale de l'équation second membre :**

$$\delta_2(x) = A_2 \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B_2 \sinh\left(\frac{x}{L}\right) \quad (26)$$

- **Expression de la densité des porteurs de charges.**

$$\delta(x) = A_1 \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B_1 \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - \frac{\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2 \cdot \exp(-\alpha(H-x))}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \quad (27)$$

Pour déterminer A₁ et B₁ on utilise les conditions aux limites :

$$\text{A la jonction de la photopile : } \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_F}{D} \delta(x) \Big|_{x=0} \quad (28)$$

$$\text{A la face arrière de la photopile : } \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=H} = \frac{-S_B}{D} \delta(x) \Big|_{x=H} \quad (29)$$

Pour tout calcul fait, on trouve :

2 :

$$A_2 = \frac{\alpha.I_0.(1-R).L^3 \left\{ D.(S_B + \alpha.D) + (S_F - \alpha.D) \left[D.\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L.S_B.\sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right].\exp(-\alpha H) \right\}}{D.(\alpha^2.L^2 - 1) \left[L.D(S_B + S_F).\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F.S_B.L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]}$$

(30)

$$B_2 = \frac{\alpha.I_0.(1-R).L^3 \left\{ L.S_F(S_B + \alpha.D) - (S_F - \alpha.D) \left[D.\sinh\left(\frac{H}{L}\right) + L.S_B.\cosh\left(\frac{H}{L}\right) \right].\exp(-\alpha.H) \right\}}{D.(\alpha^2.L^2 - 1) \left[L.D(S_B + S_F).\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F.S_B.L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]}$$

(31)

II- Calcul de capacité

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad \text{Avec} \quad Q = q.\delta(x)|_{x=0} \text{ et } V = V_T.\ln \left[1 + \frac{N_B}{n_i}.\delta(x)|_{x=0} \right] \quad (32)$$

$$C = \frac{q}{V_T.N_B} \left[n_i^2 + \frac{\alpha.N_B.I_0.(1-R).L^2 \cdot \left[\begin{array}{l} L.D.(S_B + \alpha.D).(1 - \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \exp(-\alpha.H)) - \\ D.(\alpha.S_B.L^2 + D).\sinh\left(\frac{H}{L}\right).\exp(-\alpha.H) \end{array} \right]}{D.(\alpha^2.L^2 - 1) \left[L.D.(S_F + S_B).\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F.S_B.L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \right]$$

(33)

III- Densité de courant

$$J = q.D.\frac{\partial\delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (34)$$

Pour tout calcul fait on trouve

$$J = \frac{q \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{(\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \cdot \left\{ \frac{L \cdot S_F \cdot (S_B + \alpha \cdot D) - \exp(-\alpha \cdot H) \cdot \left[\begin{array}{l} \left[L \cdot S_B \cdot (S_F - \alpha \cdot D) + \right. \\ \left. \alpha \cdot L \cdot D \cdot (S_F + S_B) \right] \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + \\ \left[D \cdot (S_F - \alpha \cdot D) + \alpha \cdot (D^2 + S_F \cdot S_B \cdot L^2) \right] \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \end{array} \right]}{L \cdot D \cdot (S_F + S_B) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F \cdot S_B \cdot L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right)} \right\}$$

C- ECLAIREMENT SIMULTANE FACES AVANT ET ARRIERE.

I- Calcul de la densité des porteurs de charge minoritaire en excès

I.1- Equation de diffusion des porteurs de charges minoritaires en excès

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{\alpha \cdot I_0}{D} \cdot (1-R) \cdot (\exp(-\alpha \cdot x) + \exp(-\alpha(H-x))) \quad (35)$$

I.2- Solution de l'équation différentielle

$$\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x) \quad (36)$$

- Solution particulière de l'équation avec second membre

$$\delta_1(x) = A''' \cdot (\exp(-\alpha \cdot x) + \exp(-\alpha(H-x))) \quad (37)$$

En remplaçant (2) dans (1) on obtient une équation qui permet de calculer A'''.

$$\text{On trouve } A''' = \frac{-\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)}$$

$$\delta_1(x) = \frac{-\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \cdot (\exp(-\alpha \cdot x) + \exp(-\alpha(H-x))) \quad (38)$$

- Solution générale de l'équation second membre :

$$\delta_2(x) = A_3 \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B_3 \sinh\left(\frac{x}{L}\right) \quad (39)$$

- Expression de la densité des porteurs de charges.

$$\delta(x) = A_3 \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B_3 \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - \frac{\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^2 \cdot (\exp(-\alpha \cdot x) + \exp(-\alpha(H-x)))}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)}$$

(40)

Pour déterminer A_3 et B_3 on utilise les conditions aux limites :

$$\text{A la jonction de la photopile : } \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_{F3}}{D} \delta(x) \Big|_{x=0} \quad (41)$$

$$\text{A la face arrière de la photopile : } \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=H} = \frac{-S_{B3}}{D} \delta(x) \Big|_{x=H} \quad (42)$$

Pour tout calcul fait, on trouve :

$$A_3 = \frac{\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^3 \left\{ \begin{array}{l} D \cdot [(S_B + \alpha \cdot D) + (S_B - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H)] + [(S_F + \alpha D) + \\ (S_F - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H)] \left[D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot S_B \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \end{array} \right\}}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1) \left[L \cdot D(S_B + S_F) \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F \cdot S_B \cdot L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \quad (43)$$

$$B_3 = \frac{\alpha \cdot I_0 \cdot (1-R) \cdot L^3 \left\{ \begin{array}{l} L \cdot S_F \cdot [(S_B + \alpha \cdot D) + (S_B - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H)] - [(S_F + \alpha D) + \\ (S_F - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H)] \left[D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot S_B \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \end{array} \right\}}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1) \left[L \cdot D(S_B + S_F) \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F \cdot S_B \cdot L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \quad (44)$$

II- Calcul de capacité

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad \text{Avec} \quad Q = q \cdot \delta(x) \Big|_{x=0} \quad \text{et} \quad V = V_T \cdot \ln \left[1 + \frac{N_B}{n_i} \cdot \delta(x) \Big|_{x=0} \right] \quad (45)$$

$$C = \frac{q}{V_T \cdot N_B} \cdot \left[n_i^2 + \frac{N_B \cdot \alpha \cdot I_o \cdot L^2 \cdot \left\{ \begin{array}{l} L \cdot D \cdot [(S_B + \alpha \cdot D) + (S_F - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H)] - \\ L \cdot D [(S_B - \alpha \cdot D) + (S_B + \alpha \cdot D) \exp(-\alpha \cdot H)] \cosh\left(\frac{H}{L}\right) - \\ D \cdot [(D - \alpha \cdot S_B \cdot L^2) + (D + \alpha \cdot S_B \cdot L^2) \exp(-\alpha \cdot H)] \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \end{array} \right\}}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1) \left[L \cdot D \cdot (S_B + S_F) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F \cdot S_B \cdot L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \right]$$

(46)

III- Densité de courant

$$J = q \cdot D \cdot \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=0}$$

Pour tout calcul fait on trouve

$$J = \frac{q \cdot \alpha \cdot I_o \cdot (1 - R) \cdot L^2}{(\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \cdot \left[\frac{\left\{ \begin{array}{l} L \cdot S_F \cdot [(S_B + \alpha \cdot D) + (S_B - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H)] - \\ [L \cdot S_F \cdot [(S_B + \alpha \cdot D) \exp(-\alpha \cdot H) + (S_B - \alpha \cdot D)]] \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + \\ S_F \cdot [(D + \alpha \cdot S_B \cdot L^2) \exp(-\alpha \cdot H) + (D - \alpha \cdot S_B \cdot L^2)] \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \end{array} \right\}}{L \cdot D \cdot (S_F + S_B) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + S_F \cdot S_B \cdot L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right)} \right]$$

CALCUL DE L'IMPEDANCE DYNAMIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE ET METHODE DE DETERMINATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES

Schémas électriques équivalent de la cellule

Nous représentons aux figures 1 et 2 les deux modèles électriques équivalents. Pour la détermination des paramètres nous avons adopté les modèles suivants :

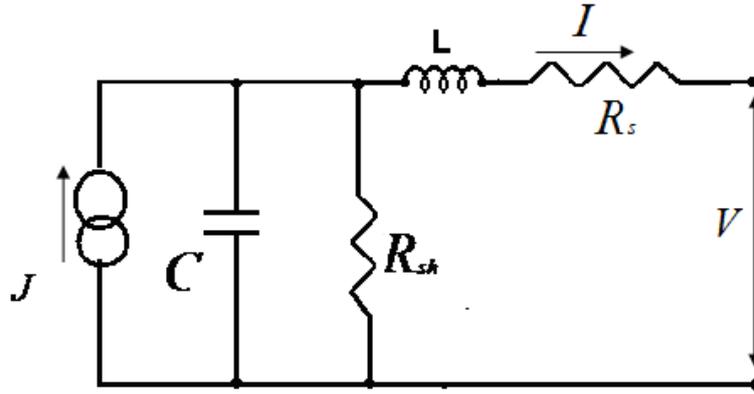


Figure 1 : circuit équivalent du modèle équivalent sous illumination en régime dynamique.

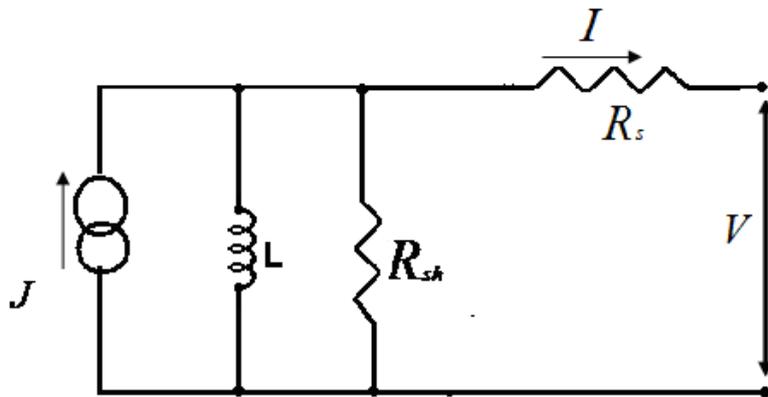


Figure 2 : circuit équivalent du modèle équivalent sous illumination en régime dynamique.

$$Z = R_s + \frac{R_{sh}}{1 + (\omega \cdot R_{sh} \cdot C)^2} + i(L\omega - \frac{\omega \cdot R_{sh}^2 \cdot C}{1 + (\omega \cdot R_{sh} \cdot C)^2}) \quad (47)$$

Méthode de calcul de l'impédance dynamique - Méthode des complexes

Résistance	$Z_R = R$
Capacité	$Z_C = -\frac{i}{\omega \cdot c}$
inductance	$Z_L = i \cdot \omega \cdot L$

$$Z = R_s + \frac{R_{sh}}{1 + (\omega \cdot R_{sh} \cdot C)^2} + i(L\omega - \frac{\omega \cdot R_{sh}^2 \cdot C}{1 + (\omega \cdot R_{sh} \cdot C)^2}) \quad (48)$$

Partie réelle $\text{Re}(Z) = R_s + \frac{R_{sh}}{1 + (\omega \cdot R_{sh} \cdot C)^2} \quad (49)$

Partie imaginaire $\text{Im}(Z) = L\omega - \frac{\omega \cdot R_{sh}^2 \cdot C}{1 + (\omega \cdot R_{sh} \cdot C)^2} \quad (50)$

Etude des extremums

Si $\omega \rightarrow 0$

$$\operatorname{Re}(Z) \rightarrow R_S + R_{SH} \quad (51)$$

Si $\omega \rightarrow \infty$

$$\operatorname{Re}(Z) \rightarrow R_S \quad (52)$$

Méthode de détermination des paramètres électriques

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= \operatorname{Re}(\omega) + i \cdot \operatorname{Im}(\omega) \\ Z(\omega) &= A(\omega) \cdot e^{i \cdot \phi(\omega)} \\ A(\omega) &= |Z(\omega)| \end{aligned} \quad (53)$$

$$A(\omega) = \left((\operatorname{Re}(\omega))^2 + (\operatorname{Im}(\omega))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (54)$$

$$\phi(\omega) = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}\right) = \arg(Z(\omega))$$

On suppose que l'impédance peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= \frac{K}{1 + i \cdot \tau_0 \cdot \omega} \\ \operatorname{Re}(\omega) &= \frac{K}{1 + (\tau_0 \cdot \omega)^2} \\ \operatorname{Im}(\omega) &= -\frac{K \cdot \tau_0 \cdot \omega}{1 + (\tau_0 \cdot \omega)^2} \end{aligned} \quad (55)$$

On a :

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \frac{K}{(1 + (\tau_0 \cdot \omega)^2)} \\ \phi(\omega) &= -\operatorname{arctg}(\tau_0 \cdot \omega) \end{aligned} \quad (56)$$

Diagramme de Bode

$$\begin{aligned} A_{dB}(\omega) &= 20 \cdot \log(A(\omega)) \\ A_{dB}(\omega) &= 20 \cdot \log(K) - 10 \cdot \log\left(1 + (\tau_0 \cdot \omega)^2\right) \end{aligned} \quad (57)$$

Etudes des asymptotes

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} A_{dB}(\omega) = 20 \cdot \log(K) \quad (58)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} A_{dB}(\omega) = 20 \cdot \log\left(\frac{K}{\tau_0}\right) - 20 \cdot \log(\omega) \quad (59)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \frac{1}{\tau_0}} A_{dB}(\omega) = 20 \cdot \log(\omega) - 10 \cdot \log(2) = 20 \cdot \log\left(\frac{K}{\sqrt{2}}\right) \quad (60)$$

Représentation de Nyquist

$$x = \text{Re}(\omega) = \frac{K}{1 + (\tau_0 \cdot \omega)^2} \quad (37)$$

$$y = \text{Im}(\omega) = -\frac{K \cdot \tau_0 \cdot \omega}{1 + (\tau_0 \cdot \omega)^2} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} (\tau_0 \cdot \omega)^2 &= \frac{K}{x} - 1 &\Rightarrow & \left(x - \frac{K}{2}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{K}{2}\right)^2 \\ y &= -x \cdot \tau_0 \cdot \omega \end{aligned}$$

La représentation de Nyquist est un demi cercle de centre $\begin{pmatrix} K/2 \\ 0 \end{pmatrix}$ et de rayon $\left(\frac{K}{2}\right)$.

Détermination de K et τ_0

En utilisant les relations (27), (28), (37) et (38) on obtient :

$$\tau_0 = \frac{R_D \cdot R_{Sh} \cdot C}{R_{Sh} + R_D} \quad (62)$$

$$K = \frac{R_D \cdot R_{Sh}}{R_{Sh} + R_D} = R_p \quad (63)$$

L'impédance peut se mettre sous la forme suivante :

$$Z_{\alpha}(\omega, B) = \frac{K}{1 + i \cdot \tau_0 \cdot \omega} \quad (64)$$

$$K = R_p \quad (65)$$

$$\tau_0 = R_p \cdot C = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad (66)$$

ω_c correspond à la pulsation de coupure.

PUISSANCE ELECTRIQUE

La puissance fournie par la photopile sous illumination monochromatique de longueur d'onde (λ_i) et pour un point de fonctionnement à SF donné, s'exprime par le produit :

$$P = I \cdot V_{ph} \quad (67)$$

FACTEUR DE FORME

Le facteur de forme FF est le rapport entre la puissance maximale fournie par la photopile P_{ma} et le produit du courant de court-circuit J_{cc} par la tension en circuit ouvert V_{co} .

$$FF = \frac{P_{ma}(\lambda, \omega, S_f, S_b)}{V_{co}(\lambda, \omega, S_f, S_b) \cdot J_{cc}(\lambda, \omega, S_f, S_b)} \quad (68)$$

TRANSFORMATION D'UN COMPLEXE EN FORME POLAIRE : Cas de la vitesse de recombinaison en face arrière

Eclairage de la photopile par l'émetteur (face avant)

$$1) S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{Db_k \left[\operatorname{ch}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) - e^{-b_k H} \right] - \frac{D}{L_\omega} \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L_\omega}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) - e^{-b_k H} - L_\omega b_k \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L_\omega}\right)}$$

$$N = Db_k |Z_c| e^{i\phi_c} - Db_k e^{-b_k H} - \frac{D|R|^{1/2}}{L} |Z_s| e^{i\left(\frac{\phi}{2} + \phi_s\right)} \quad \text{posons } N = X + iY$$

$$X = Db_k |Z_c| \cos(\phi_c) - Db_k e^{-b_k H} - \frac{D|R|^{1/2}}{L} |Z_s| \cos\left(\frac{\phi}{2} + \phi_s\right)$$

$$Y = Db_k |Z_c| \sin(\phi_c) - \frac{D|R|^{1/2}}{L} |Z_s| \sin\left(\frac{\phi}{2} + \phi_s\right)$$

$$D = |Z_c| e^{i\phi_c} - e^{-b_k H} - b_k \frac{L}{|R|^{1/2}} |Z_s| e^{i\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right)} \quad \text{posons } D = \chi + i\rho$$

$$\chi = |Z_c| \cos(\phi_c) - e^{-b_k H} - b_k \frac{L}{|R|^{1/2}} |Z_s| \cos\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$\rho = |Z_c| \sin(\phi_c) - b_k \frac{L}{|R|^{1/2}} |Z_s| \sin\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{X + iY}{\chi + i\rho}$$

$$\frac{X + iY}{\chi + i\rho} = \left(\frac{\chi X + \rho Y}{\chi^2 + \rho^2} \right) + i \left(\frac{\chi Y - \rho X}{\chi^2 + \rho^2} \right) = F + iG$$

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 (F + iG) = |S_{B1}(\omega)| e^{i\Theta_{S_{B1}}(\omega)}$$

$$|S_{B1}(\omega)| = \left[\left(\sum_{k=1}^3 F \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^3 G \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Theta_{S_{B1}}(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{k=1}^3 G}{\sum_{k=1}^3 F} \right]$$

$$2) S_{B2}(\omega) = - \frac{D}{L_{\omega}} \operatorname{th} \left(\frac{H}{L_{\omega}} \right)$$

$$S_{B2}(\omega) = - \frac{D |R|^{\frac{1}{2}} |Z_s|}{L |Z_c|} e^{i \left(\frac{\phi}{2} + \phi_s - \phi_c \right)}$$

$$S_{B2}(\omega) = |S_{B2}(\omega)| e^{i\Theta_{S_{B2}}(\omega)}$$

$$|S_{B2}(\omega)| = \frac{D |R|^{\frac{1}{2}} |Z_s|}{L |Z_c|}$$

$$\Theta_{S_{B2}}(\omega) = \left(\frac{\phi}{2} + \phi_s - \phi_c \right)$$

Eclaircissement de la photopile par la face arrière

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{D}{L_{\omega}} \cdot \frac{\left[\operatorname{sh} \left(\frac{H}{L_{\omega}} \right) + L_{\omega} b_k \operatorname{ch} \left(\frac{H}{L_{\omega}} \right) \right] e^{-b_k H} - L_{\omega} b_k}{1 - \left[\operatorname{ch} \left(\frac{H}{L_{\omega}} \right) + L_{\omega} b_k \operatorname{sh} \left(\frac{H}{L_{\omega}} \right) \right] e^{-b_k H}}$$

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{\left[\frac{D |R|^{\frac{1}{2}}}{L} |Z_s| e^{i \left(\phi_s + \frac{\phi}{2} \right)} + D b_k |Z_c| e^{i \phi_c} \right] e^{-b_k H} - D b_k}{1 - \left[|Z_c| e^{i \phi_c} + \frac{b_k L |Z_s|}{|R|^{\frac{1}{2}}} e^{i \left(\phi_s - \frac{\phi}{2} \right)} \right]}$$

$$X = \left[\frac{D |R|^{\frac{1}{2}}}{L} |Z_s| \cos \left(\phi_s + \frac{\phi}{2} \right) + D b_k |Z_c| \cos(\phi_c) \right] e^{-b_k H} - D b_k$$

$$Y = \left[\frac{D|R|^{\frac{1}{2}}}{L} |Z_s| \sin\left(\phi_s + \frac{\phi}{2}\right) + Db_k |Z_c| \sin(\phi_c) \right] e^{-b_k H}$$

$$\chi = 1 - \left[\frac{b_k L |Z_s|}{|R|^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right) + |Z_c| \cos(\phi_c) \right] e^{-b_k H}$$

$$\rho = - \left[\frac{b_k L |Z_s|}{|R|^{\frac{1}{2}}} \sin\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right) + |Z_c| \sin(\phi_c) \right] e^{-b_k H}$$

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{X(\omega) + iY(\omega)}{\chi(\omega) + i\rho(\omega)}$$

$$\frac{X + iY}{\chi + i\rho} = \left(\frac{\chi X + \rho Y}{\chi^2 + \rho^2} \right) + i \left(\frac{\chi Y - \rho X}{\chi^2 + \rho^2} \right) = F + iG$$

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 [F(\omega) + iG(\omega)] = |S_{B1}(\omega)| e^{i\Theta_{S_{B1}}(\omega)}$$

$$|S_{B1}(\omega)| = \left[\left(\sum_{k=1}^3 F(\omega) \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^3 G(\omega) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Theta_{S_{B1}}(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{k=1}^3 G(\omega)}{\sum_{k=1}^3 F(\omega)} \right]$$

Eclairage simultané des deux faces de la photopile

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{D}{L_\omega} \cdot \frac{\left\{ \begin{array}{l} e^{-b_k H} \left[\operatorname{sh}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) + L_\omega b_k \left\{ 1 + \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) \right\} \right] \\ - L_\omega b_k \left[1 + \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) \right] + \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) \end{array} \right\}}{\left\{ \begin{array}{l} e^{-b_k H} \left[1 - \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) - L_\omega b_k \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) \right] \\ + 1 - \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) + L_\omega b_k \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L_\omega}\right) \end{array} \right\}}$$

$$X = \left\{ \begin{array}{l} e^{-b_k H} \left[\frac{D|R|^{\frac{1}{2}}}{L} |Z_s| \cos\left(\phi_s + \frac{\phi}{2}\right) + Db_k \{1 + |Z_c| \cos(\phi_c)\} \right] \\ - Db_k [1 + |Z_c| \cos(\phi_c)] + \frac{D|R|^{\frac{1}{2}}}{L} |Z_s| \cos\left(\phi_s + \frac{\phi}{2}\right) \end{array} \right\}$$

$$Y = \left\{ \begin{array}{l} e^{-b_k H} \left[\frac{D|R|^{\frac{1}{2}}}{L} |Z_s| \sin\left(\phi_s + \frac{\phi}{2}\right) + Db_k |Z_c| \sin(\phi_c) \right] \\ - Db_k |Z_c| \sin(\phi_c) + \frac{D|R|^{\frac{1}{2}}}{L} |Z_s| \sin\left(\phi_s + \frac{\phi}{2}\right) \end{array} \right\}$$

$$\chi = \left\{ \begin{array}{l} e^{-b_k H} \left[1 - |Z_c| \cos(\phi_c) - \frac{Lb_k |Z_s|}{|R|^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right) \right] \\ + 1 - |Z_c| \cos(\phi_c) + \frac{Lb_k |Z_s|}{|R|^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right) \end{array} \right\}$$

$$\rho = \left\{ \begin{array}{l} e^{-b_k H} \left[-|Z_c| \sin(\phi_c) - \frac{Lb_k |Z_s|}{|R|^{\frac{1}{2}}} \sin\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right) \right] \\ - |Z_c| \sin(\phi_c) + \frac{Lb_k |Z_s|}{|R|^{\frac{1}{2}}} \sin\left(\phi_s - \frac{\phi}{2}\right) \end{array} \right\}$$

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 \frac{X(\omega) + iY(\omega)}{\chi(\omega) + i\rho(\omega)}$$

$$\frac{X + iY}{\chi + i\rho} = \left(\frac{\chi X + \rho Y}{\chi^2 + \rho^2} \right) + i \left(\frac{\chi Y - \rho X}{\chi^2 + \rho^2} \right) = F + iG$$

$$S_{B1}(\omega) = \sum_{k=1}^3 [F(\omega) + iG(\omega)] = |S_{B1}(\omega)| e^{i\Theta_{S_{B1}}(\omega)}$$

$$|S_{B1}(\omega)| = \left[\left(\sum_{k=1}^3 F(\omega) \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^3 G(\omega) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Theta_{S_{B1}}(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{k=1}^3 G(\omega)}{\sum_{k=1}^3 F(\omega)} \right]$$

SUJET :

**ETUDE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE
SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE : DETERMINATION DES PARAMETRES
ELECTRIQUES**

M. Mor NDIAYE

THESE DE DOCTORAT D'ETAT EN PHYSIQUE

Soutenue le **04 Décembre 2010**

Jury :

Président :	Grégoire SISSOKO (Directeur)	Professeur Titulaire	FST/UCAD
Membres :	Amadou Seidou MAIGA (Co-directeur)	Maître de Conférences	UFR/SAT, UGB, St Louis
	Alhadi WEREME (Rapporteur)	Maître de Recherche	IRSAT-CNRST, BURKINA
	Mamadou L. SOW (Rapporteur)	Maître de Conférences	FST/UCAD
	Senghane MBODJI	Docteur d'Etat Chargé d'Enseignements	U. Bambey
	Issa DIAGNE	Docteur d'Etat Assistant	FST/UCAD
	Birame DIENG	Docteur d'Etat Maître Assistant Associé	U. Bambey

Résumé :

Une étude bibliographe sur les techniques et les méthodes de détermination des paramètres électriques en régime dynamique fréquentiel a été présentée dans le chapitre I.

Dans le chapitre II, l'étude théorique de la photopile, en régime dynamique fréquentiel, sous éclairage monochromatique est faite pour un éclairage par la face arrière et simultanément les deux faces. Cette étude a permis d'établir, en fonction de la fréquence, de la longueur d'onde, des vitesses de recombinaison (à la jonction et en face arrière), les expressions de la densité des porteurs minoritaires, du photocourant et de la phototension.

Les caractéristiques densité de photocourant-phototension ont permis de déterminer les résistances shunt et série

Les diagrammes de Nyquist et de Bode des vitesses de recombinaison ont permis de proposer deux modèles électriques équivalents aux phénomènes observés.

Les expressions du photocourant de court-circuit, de la phototension en circuit ouvert et de la vitesse de recombinaison en face arrière ont été établies.

Dans la dernière partie, la détermination des paramètres électriques de la photopile comme la résistance série (R_s), la résistance shunt (R_{sh}), l'impédance (Z), la fréquence de coupure (ω_c) et la capacité (C) par l'intermédiaire des diagrammes de Nyquist du module de l'impédance et de Bode de la phase et du module de l'impédance, nous a permis de proposer deux modèles électriques équivalents de la photopile. La puissance électrique et le facteur de forme de la photopile ont été aussi déterminés.

Les caractéristiques courant-tension, la puissance en fonction de la tension, de la vitesse de recombinaison S_f et en fonction de la longueur d'onde ont été présentés pour différentes valeurs de la fréquence de modulation.

Mots clés : Photopile bifaciale - Photocourant - Phototension - Vitesse de recombinaison - Modèles électriques équivalents - Impédance - Résistance série - Résistance shunt - Capacité - Puissance - Facteur de forme - fréquence - longueur d'onde.