

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes  
de MASTER ACADEMIQUE**  
Filière : Génie Electrique  
Spécialité : **MATERIAUX ET DISPOSITIFS  
ELECTRONIQUES ET PHOTOVOLTAIQUES.**

*Présenté par*  
**Said MOKHTARI  
Said TIGUERCHA**

Thème  
**Simulation d'une structure PIN a l'aide  
du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS  
pour application photovoltaïque**

*Mémoire soutenu publiquement le 09/06/2015 devant le jury composé de :*

**Mr Mohammed Said BELKAID**  
Professeur, UMMTO, FGEI, Président

**Mme Djedjiga HATEM**  
Maitre de Conférences B, UMMTO, FGEI, Encadreur

**Mme Dalila HOCINE**  
Maitre de Conférences B, UMMTO, FGEI, Examineur

**Mr Rachid ZIRMI**  
Maitre de Conférence B, UMMTO, FGEI, Examineur

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTONIQUE

**Titre:** « Simulation d'une structure PIN à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS pour application photovoltaïque »

**Résumé :**

De nombreux travaux de recherche visent à développer de nouvelles structures permettant d'optimiser les cellules et améliorer leur efficacité et diminuer leurs prix en agissant sur le prix de fabrication. L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans ce processus, en faisant un bon choix pour la structure des dispositifs et l'optimisation des épaisseurs des différentes couches constituant celle-ci. Bien que les cellules solaires à base de la jonction PN soient les plus exploitées. Une des voies d'exploration de nouvelles structures électroniques des cellules solaires est ouverte telle que la structure PIN.

Dans notre travail, nous avons opté pour la simulation d'une structure de type PIN afin d'optimiser les épaisseurs des couches de la structure, de telle sorte à avoir une meilleure propagation de l'onde électromagnétique, ce qui engendre une meilleure propagation de l'énergie absorbée dans la structure donc une meilleure absorption.

**Mots-clés :**

Cellule solaire, Structure PIN, Simulation, COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 Optimisation des épaisseurs, Onde électromagnétique, Amélioration du rendement.

# REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage de terminer nos études et élaborer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes sans lesquelles ces années d'études n'auraient été que le pâle reflet de celles que nous avons passées.

Nos sincères remerciements à notre encadreur M<sup>me</sup> HATEM Djedjiga qui nous a bien encadré et pour nous avoir encouragé tout le long de notre travail.

Nous tenons à remercier le doyen de notre faculté qui nous a assuré les meilleures conditions de travail et de nous avoir accueillis au sein de son laboratoire de recherche.

Nous remercions également les membres du jury, Mr BELKAID Mohammed Saïd président jury, M<sup>me</sup> HOCINE Dalila et Mr ZIRMI Rachid pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons tout particulièrement à exprimer notre profonde gratitude à Mr ZIRMI Rachid et aux membres du laboratoire LATAGE, spécialement M<sup>elle</sup> SALEM Dalila, sans oublier Mr CHATRI Ali et Mr SAMER Karim pour leurs aides précieuses et leurs soutiens.

MOKHTARI Saïd et TIGUERCHA Saïd

# dédicaces

- ✂ A la mémoire de ma grande mère qui resteras gravée dans mon cœur en je ne t'oublierais jamais « reposes en paix »
- ✂ A Mes très chers parents, pour leur sacrifice et leur dévouement pour mon bonheur.
- ✂ A Mes frères et sœurs pour leurs soutiens et leurs amours.
- ✂ A Mon cœur la petite Mayline.
- ✂ A Tous mes amis de la promotion, sans oublier ceux de l'ENST.
- ✂ A mon binôme SAID TIGUERCHA.
- ✂ A Tous ceux qui m'aiment.

Je dédie ce travail

SAID.M

# Dédicaces

✂ A Mes très chers parents, ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices que vous me contentez, toute la confiance que vous m'accordez et tout l'amour dont vous m'entourez.

✂ A celle symbole de beauté de fierté et de générosité ma grand-mère tu resteras gravée dans mon cœur en je ne t'oublierai jamais « reposes en paix »

✂ A Mes frères AHMED et son épouse ainsi que leur fils ABDOU et SMAIL, OMAR et MOHAMED, pour leurs soutiens et leurs amours.

✂ A mes grands-parents adorés

✂ A mes tentes : NADJIA, OUARDIA et son époux MUSTEFA, HOURIA, AMEL, MOUNIA et son époux SALAH ainsi que leur fille HANANE et SIHEM.

✂ A mon oncle KARIM et toute sa petite famille

✂ A ma tante SAADIA et ses fils AMIROUCHE et MOUHAMED

✂ A Tous mes amis de la promotion et les autres et sans oublier ceux de l'université de BLIDA.

✂ A tous ceux qui m'aiment

✂ A mon ami et binôme SAID MOKHTARI

Je dédie ce travail

SAID. T

---

---

## *Contenu*

Introduction .....	1
I. Cellule solaire .....	3
I.1. Présentation de la cellule solaire.....	3
I.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	3
I.3. Paramètres des cellules solaires .....	4
I.3.a. Caractéristique I(V) d'une cellule solaire.....	4
i) Le courant de court-circuit .....	5
ii) Tension du circuit ouvert $V_{co}$ .....	5
iii) Point de puissance maximale .....	6
iv) Facteur de forme.....	6
v) Le rendement .....	7
I.3.b Circuit électrique équivalent .....	7
a) Dans le cas idéal .....	7
b) Dans le cas réel .....	7
I.4. Les différentes technologies.....	9
I.5. Structures électroniques .....	11
I.5.1 Structure métal/semi-conducteur (M/Sc) .....	11
a) contact Ohmique .....	11
b) Contact redresseur ou Schottky .....	12
I.5.2 La structure MIS.....	15
a) Cas d'une structure MIS où le semi-conducteur est de type N .....	15
b) Cas d'une structure MIS où le semi-conducteur est de type P.....	16
I. 5.3 Jonction P-N.....	18
a) Jonction P-N à l'équilibre thermodynamique et sous polarisation .....	18
I. Description du logiciel.....	22

II. Modelés physiques.....	23
III. Procédure de simulation.....	24
a) Lancement du logiciel.....	25
b) Sélection de la dimension d'espace.....	25
c) Choix de la physique.....	26
d) Sélectionner l'étude.....	27
e) Définir la géométrie.....	27
f) Choix des matériaux.....	28
g) Maillage.....	28
h) Lancement de la simulation et analyse des résultats.....	29
IV. Modèle numérique.....	33
a) Optimisation de la répartition de l'énergie en faisant varier l'épaisseur de la couche n.....	37
b) Optimisation de la répartition de l'énergie en faisnt varier l'épaisseur de la couche p.....	42
c) Optimisation de la répartition de l'énergie en faisnt varier l'épaisseur de la couche i.....	47
Conclusion.....	61

---

## *Liste des figures*

Figure I-1. Présentation schématique d'une cellule solaire conventionnelle.....	3
Figure I-2. Schéma de principe d'une cellule solaire.....	4
Figure I-3. Caractéristiques (I/V) d'une cellule photovoltaïque (a)sous-éclairage, (b) dans le noir.....	4
Figure I-4. Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque idéale sous éclairement. ...	7
Figure I-5. Le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque réelle sous éclairage. ....	8
Figure I-6. Organigramme des différentes technologies.....	9
Figure I-7. Contact Ohmique entre un semi-conducteur et un métal : (a) de type p, (b) de type n.....	12
Figure I-8. Contact Schottky entre un sc et un métal :(a) type p, (b) type n.....	13
Figure I-9. Mécanisme photovoltaïque dans une structure Métal/SC.....	14
Figure I-10. Structure MIS où le semi-conducteur est de type N Cas où $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$ .....	15
Figure I-11. Structure MIS où le semi-conducteur est de type N Cas où $q\Phi_m = q\Phi_{sc}$ .....	15
Figure I.12. Structure MIS où le semi-conducteur est de type N Cas où $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$ .....	16
Figure I-13. Structure MIS où le semi-conducteur est de type P ; cas où $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$ .....	16
Figure I.14. Structure MIS où le semi-conducteur est de type P ; cas où $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$ . ....	17
Figure I-15. Jonction p-n à l'équilibre (a) et sous polarisation directe (b) ou inverse(c).....	19
Figure I.16. La représentation du champ électrique dans la jonction PN et PIN. ....	21
Figure II-1. Les icones de COMSOL MULTIPHYSICS 4.4.....	22
Figure II-2. Les différents modèles de simulations sur COMSOL MULTIPHYSICS.....	23
Figure II-3. La fenêtre de lancement du logiciel.....	25
Figure II-4. Les différentes dimensions de simulation.....	25
Figure II-5. Le choix de la physique à utiliser. ....	26
Figure II-6. Le choix de l'étude. ....	27

Figure II-7. Création d'une géométrie voulue.....	27
Figure II-8. Le choix de devers matériaux. ....	28
Figure II-9. Exemple sur le maillage.....	28
Figure II-10. Exemple de la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau....	29
Figure II-11. Représentation de la cellule a structure PIN.....	30
Figure II-12. Le maillage de la jonction PIN. ....	31
Figure II-13. L'indices de réfraction (a) et le coefficient d'extinction (b) de silicium (Si).....	32
Figure II-14. Les ports des frontière de la cellules.....	33
Figure II-15. Rayonnement incidents, réfléchis et transmis entre des milieux d'indices de réfractations différents .....	34
Figure III-1. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/10). ....	36
Figure III-2. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/20). ....	37
Figure III-3. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/30). ....	37
Figure III-4. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/40). ....	38
Figure III-5. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/50). ....	38
Figure III-6. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/60). ....	39
Figure III-7. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/70). ....	39
Figure III-8. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/80). ....	40
Figure III-9. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/90). ....	40
Figure III-10. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/100). ....	41
Figure III-11. Structure PIN: (P/I/N : 20/10/10). ....	41
Figure III-12. Structure PIN: (P/I/N : 30/10/10). ....	42
Figure III-13. Structure PIN: (P/I/N : 40/10/10). ....	42
Figure III-14. Structure PIN: (P/I/N : 50/10/10). ....	43
Figure III-15. Structure PIN: (P/I/N : 60/10/10). ....	43
Figure III-16. Structure PIN: (P/I/N : 70/10/10). ....	44
Figure III-17. Structure PIN: (P/I/N : 80/10/10). ....	44

Figure III-18. Structure PIN: (P/I/N : 90/10/10).	45
Figure III-19. Structure PIN: (P/I/N : 100/10/10).	45
Figure III-20. Structure PIN: (P/I/N : 10/20/10).	46
Figure III-21. Structure PIN: (P/I/N : 10/30/10).	47
Figure III-22. Structure PIN: (P/I/N : 10/40/10).	47
Figure III-23. Structure PIN: (P/I/N : 10/50/10).	48
Figure III-24. Structure PIN: (P/I/N : 10/60/10).	48
Figure III-25. Structure PIN: (P/I/N : 10/70/10).	49
Figure III-26. Structure PIN: (P/I/N : 10/80/10).	49
Figure III-27. Structure PIN: (P/I/N : 10/90/10).	50
Figure III-28. Structure PIN: (P/I/N : 10/100/10).	50
Figure III-29. Structure PIN: (P/I/N : 10/110/10).	51
Figure III-30. Structure PIN: (P/I/N : 10/120/10).	51
Figure III-31. Structure PIN: (P/I/N : 10/130/10).	52
Figure III-32. Structure PIN: (P/I/N : 10/140/10).	52
Figure III-33. Structure PIN: (P/I/N : 10/150/10).	53
Figure III-34. Structure PIN: (P/I/N : 10/160/10).	53
Figure III-35. Structure PIN: (P/I/N : 10/170/10).	54
Figure III-36. Structure PIN: (P/I/N : 10/180/10).	54
Figure III-37. Structure PIN: (P/I/N : 10/190/10).	55
Figure III-38. Structure PIN: (P/I/N : 10/200/10).	55
Figure III-39. Structure PIN: (P/I/N : 50/130/100).	57
Figure III-40. Structure PIN(P/I/N : 60/130/90).	57
Figure III-41. Structure PIN: (P/I/N : 60/130/100).	58
Figure III-42. Structure PIN: (P/I/N : 70/150/70).	58
Figure III-43. Structure PIN: (P/I/N : 90/130/80).	59
Figure III-44. Structure PIN: (P/I/N : 90/140/80).	59

---

## *Liste des tableaux*

Tableau I-1. La comparaison entre les différentes technologies.....	10
Tableau II-1. Les différents paramètres de la simulation.....	31
Tableau III-1. Les meilleurs des épaisseurs pour les couches n, p et i.....	56

## *Liste des abréviations*

L'abréviation	Signification
$e^-$	Electrons
$h^+$	Trous
$E_g$	Energie du gap
$I(v)$	Courant de court-circuit
$J(v)$	Densité de courant
$F(\lambda)$	Flux de photon
$V_{CO}$	Tension de circuit ouvert
$P_{max}$	Puissance maximale
$J_{max}$	Densité du courant maximale
FF	Facteur de forme
$\eta$	Le rendement
SC	Semi-conducteur
ZCE	Zone de charge d'espace
BC	Bande de conduction
BV	Bande de valence
T	La température en kelvin
q	La charge d'un électron
K	Constante de Planck
V	Barriere de potentiel
$I_s$	Le courant de saturation
$F(\lambda)$	Flux de photon reçu
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion
$\eta_Q$	Rendement quantique
$I_{ph}$	Courant de photon
$\eta$	Rendement de la conversion
$P_i$	Puissance incidente
$R_s$	Résistance série
$R_{sh}$	Résistance shunt
$q\Phi_{sc}$	Travail de sortie d'un semi-conducteur
$q\Phi_m$	Travail de sortie d'un métal
$\Delta E_{ms}$	Barriere d'énergie entre le métal et le semi-conducteur
$A_{Esc}$	Affinité électronique d'un semi-conducteur
MIS	La jonction Métal/ Isolant/ Semi-conducteur
MS	La jonction Métal/Semi-conducteur
PIN	Dopée p/ Intrinsèque/ Dopée n
AC	Alternatif courant
DC	Direct courant
n	Indice de réfraction
K	Coefficient d'extinction
$\epsilon_r$	Permittivité relative
E	Champ électrique
$\mu_r$	La mobilité relative
$K_0$	Vecteur d'onde
$\omega$	Vitesse angulaire
$E_0$	La permittivité absolue

$\sigma$	Conductivité électrique
$r_n$	Coefficient de réfraction
$t_n$	Coefficient de transmission
$\eta_A$	Efficacité d'absorption
$\eta_{TC}$	Efficacité de transfert
$h\nu$	Energie des photons
$e_n$	Epaisseur de la couche n
$e_p$	Epaisseur de la couche p
$e_i$	Epaisseur de la couche i

# *Introduction*

## Introduction

L'énergie solaire est l'énergie renouvelable par excellence. Respectueuse de l'environnement, elle présente de nombreux avantages spécifiques en raison notamment de l'épuisement prévisible des ressources d'énergies fossiles et l'accroissement des problèmes liés à la dégradation de l'environnement. Elle permet de produire de l'électricité par transformation du rayonnement solaire grâce à des cellules solaires, reliées entre-elles pour former un module solaire photovoltaïque. Plusieurs travaux de recherche visent à développer de nouvelles structures permettant d'optimiser ces cellules, améliorer leur efficacité et diminuer leurs coûts de fabrication. Bien que les cellules solaires à base de la jonction PN soient les plus exploitées, une des voies d'exploration de nouvelles structures électroniques des cellules solaires est ouverte telle que les cellules à multi-jonction, cellule composite, la structure PIN...

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans ce processus, en faisant un bon choix pour la structure des dispositifs et l'optimisation des épaisseurs des différentes couches constituant celle-ci. L'objectif d'optimisation des épaisseurs c'est de contribuer à l'amélioration du rendement de la conversion photovoltaïque en maximisant l'absorption et en augmentant la densité de courant délivrée.

Depuis les années 70, la simulation numérique est l'un des moteurs de l'innovation scientifique et industrielle. Car, de nombreuses problématiques industrielles exigent des nouvelles techniques de simulation. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques et leurs prises en compte en amont du processus de définition des produits ont abouti à l'amélioration des performances, de la durée de vie et des coûts de possession. Depuis 1998, COMSOL répond à ces attentes en apportant une solution innovante et pluridisciplinaire. Il combine puissance et souplesse pour simuler des applications impliquant une ou plusieurs phénomènes physiques.

Dans notre travail nous nous sommes focalisés sur l'amélioration de mécanisme d'absorption en assurant une meilleure répartition d'énergie lumineuse dans la structure de type PIN.

Notre manuscrit est structuré de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les cellules solaires, les structures électroniques de base, ainsi que les différentes technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque.

Le deuxième chapitre, est consacré à la description du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 et la présentation des procédures de simulation de notre structure.

Enfin, le troisième chapitre, quand à lui est basé sur notre modèle numérique cité dans le deuxième chapitre, nous avons lancé une série de simulation pour voir la répartition de l'onde électromagnétique au sein de la structure PIN en faisant varier les épaisseurs de chaque couches (n, p et i) afin de trouver les meilleurs résultats.

# CHAPITRE I

## *Les cellules solaires*

### *Plan*

- Cellule solaire
  - Présentation de la cellule solaire
- Principe de fonctionnement d'une cellule solaire
  - Paramètre des cellules solaires
- Caractéristique I(V) d'une cellule solaire
  - Circuit électrique équivalent
  - Les différentes technologies
  - Structures électroniques
- Structure métal/semi-conducteur ou M/Sc
  - Contact redresseur ou Schottky
    - La structure MIS
    - La jonction P-N

*Mot clé : cellule solaire, semi-conducteur, paramètre photovoltaïque, structure électronique, jonction PIN*

*But : Ce chapitre a pour but de présenter le principe d'une cellule solaire et les différentes structures électroniques qui peuvent servir à sa réalisation.*

### I. Cellule solaire

#### I.1. Présentation de la cellule solaire

La cellule solaire est un composant optoélectronique qui a pour rôle de transformer l'énergie lumineuse provenant du soleil à une énergie électrique. La structure la plus simple d'une cellule solaire est basée sur une jonction constituée de deux zones dopées différemment; soit du même matériau (homo-jonction), ou bien de deux matériaux différents (hétérojonction) [1].

En effet, cette transformation de la lumière en énergie électrique est un processus appelée effet photovoltaïque, découvert par E. Becquerel en 1839 [2], suite à une expérience qui a été faite par le physicien où il a remarqué une différence de potentielle qui apparaisse entre deux électrodes de platine plongé dans une solution contenant de sel d'halogénure de métal lorsque le dispositif est éclairé [3].

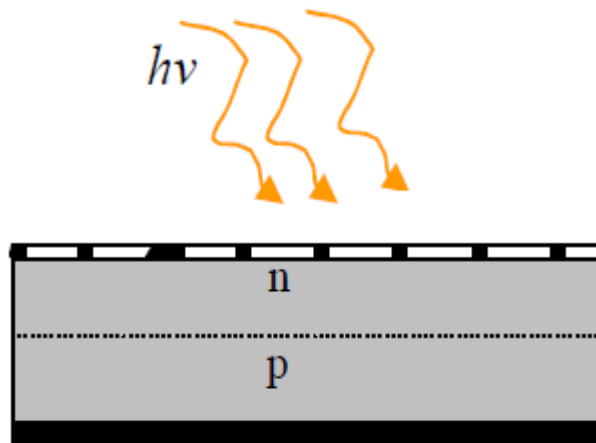


Figure I-1. Présentation schématique d'une cellule solaire conventionnelle.

#### I.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Lorsqu'une cellule solaire est soumise à un éclairage des photons qui ont une énergie ( $h\nu$ ) supérieure ou égale à l'énergie des matériaux (semi-conducteurs) appelés énergie de gap ( $E_g$ ), il se produit une transformation de cette énergie lumineuse en énergie électrique. La conversion de cette énergie se fait en quatre étapes principales qui sont :

- Absorption et création des paires électrons, trous ( $e^-$ ,  $h^+$ ) ;
- Séparation des paires, sous l'effet d'un champ induit ;
- Transport de charge vers les électrodes ;
- Collection de charges.

La figure I-2 nous présente un schéma de principe de fonctionnement d'une cellule solaire conventionnelle:

ZCE : Zone de charge d'espace ;

$E_i$  : Champ interne ;

$I_{ph}$  : Le photo courant ;

$R_{ch}$  : Charge externs.

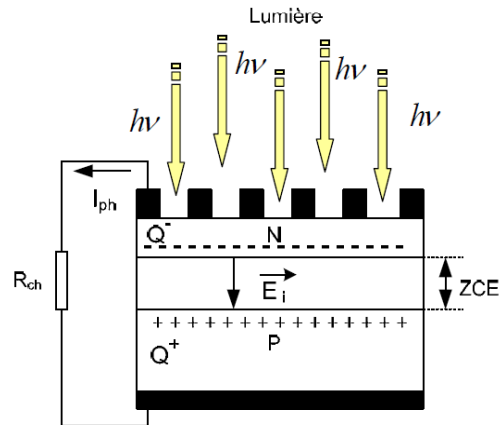


Figure I-2. Schéma de principe d'une cellule solaire. [5]

### I.3. Paramètres des cellules solaires

#### I.3.a. Caractéristique I(V) d'une cellule solaire

Le tracé de la caractéristique courant-tension I(V) ou J(V) (avec J, la densité de courant) permet d'extraire les différents paramètres photovoltaïques qui permettent d'évaluer les performances des dispositifs. La Figure I-3, représente schématiquement une caractéristique courant-tension à l'obscurité et sous éclairement.

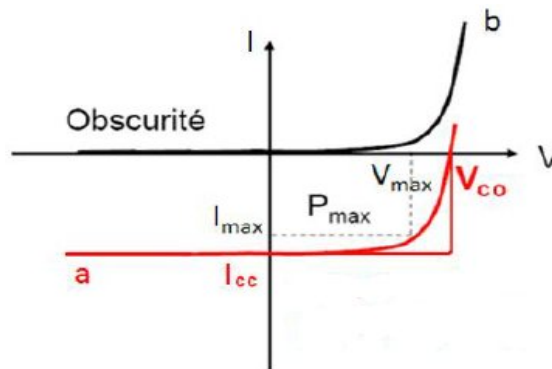


Figure I-3. Caractéristiques (I/V) d'une cellule photovoltaïque  
(a) sous-éclairage, (b) dans le noir. [4]

Dans l'obscurité, la cellule photovoltaïque se comporte comme une diode classique (jonction PN). Selon que la tension appliquée est supérieure ou inférieure à une tension de seuil; la diode est respectivement passante ou bloquante. Le courant  $I_d$  dans la diode s'écrit comme suit :

$$= (\exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1) \dots \dots \dots [I-1]$$

Avec  $I_s$ : Le courant de saturation ;

$q$  : la charge ;

$V$  : barrière de potentiel ;

$k$ : constantes de Planck d'où  $k = 6,62606957 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$  ;

$T$ : température en kelvin.

Quand la cellule solaire est soumise à un éclairage, des photons sont absorbés au sein de la couche active, ce qui engendre la génération d'un photo-courant. La caractéristique courant/tension  $I(V)$ , ou bien la caractéristique densité de courant/tension  $J(V)$  de la cellule sous éclairage permet d'extraire les paramètres photovoltaïques, qui peuvent être définis comme suite:

**i) Le courant de court-circuit**

On appelle courant de court-circuit ou densité du courant de court-circuit le courant qui circule dans une cellule solaire soumise à un flux de photons  $F(\lambda)$  sans application de tension.

Il est donné par la relation I-4:

$$= \int (F(\lambda) [1 - R(\lambda)] \eta_Q) \dots \dots \dots [I-4]$$

Avec :  $F(\lambda)$  : le flux de photons reçu par la cellule.

$R(\lambda)$  : le coefficient de réflexion de la surface.

$\eta_Q$ : le rendement quantique.

**ii) Tension du circuit ouvert  $V_{co}$**

La tension du circuit-ouvert, notée  $V_{co}$  correspond à la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule sous éclairage lorsque celle-ci ne débite pas de courant dans le circuit extérieur.

Son expression est donnée par l'équation I-5:

$$V = - \ln\left(\frac{I}{I_{ph}} - 1\right) \dots\dots\dots [I-5]$$

Pour un fort éclairement ( $I_{ph} \gg I_s$ ):

$$= - \ln\left(\frac{I}{I_{ph}}\right) \dots\dots\dots [I-6]$$

### iii) Point de puissance maximale

La puissance électrique maximale  $P_{max}$  délivrée par une cellule photovoltaïque correspond au produit de la tension maximale et le courant maximal mesurés aux bornes de la cellule :

$$p = \max(V \cdot I) = V_{max} \cdot I_{max} \dots\dots\dots [I-7]$$

On utilise généralement la densité du courant ou lieu du courant donc sa serai :

$$p = V_{max} \cdot J_{max} \dots\dots\dots [I-8]$$

Graphiquement,  $J_{max}$  et  $V_{max}$  désignent les coordonnées du courant et de la tension qui définissent la puissance maximale délivrée par la cellule, et qui correspond à la surface du rectangle défini dans le quatrième quadrant de la courbe  $I(V)$  (Figure I-3). Plus la cellule solaire montre un comportement idéal, plus ce rectangle se rapproche du rectangle défini à partir de  $V_{co}$  et  $I_{cc}$  (puissance optimale).

### iv) Facteur de forme

Le facteur de forme (FF), nommé aussi facteur de remplissage (fill factor), est le rapport entre les surfaces de puissance maximales réelles ( $P_{max}$ ) et optimale ( $V_{co} \cdot J_{cc}$ ).

$$= \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot J_{cc}} = \frac{V_{mp} \cdot J_{mp}}{V_{co} \cdot J_{cc}} \dots\dots\dots [I-9]$$

Pratiquement, le facteur de forme est toujours inférieur à 1.

**v) Le rendement**

Le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$  s'exprime par le rapport entre la puissance maximale délivrée et la puissance incidente (voir équation I-10):

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_i} \dots \dots \dots [I-10]$$

D'où  $P_i$  est la puissance lumineuse incidente ( $W/m^2$ ).

**I.3.b Circuit électrique équivalent**

**a) Dans le cas idéal**

La cellule solaire idéale sous éclairage est équivalente à une source de courant mise en parallèle avec une diode.

La figure I-4 représente le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque idéale sous éclairage.

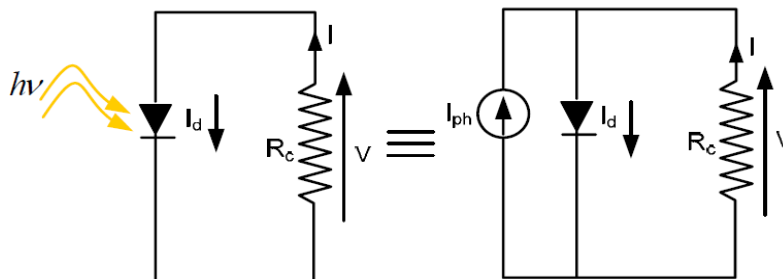


Figure I-4. Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque idéale sous éclairage [5].

Le courant délivré par la cellule peut s'écrire comme suit:

$$I = I_{ph} - I_0 \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) - \dots \dots \dots [I-2]$$

**b) Dans le cas réel**

Dans le cas réel, nous devons prendre en considération, les pertes en tension représentés par une résistance série et les pertes en courant représentés par une résistance shunt.

La figure I-5 montre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque réelle sous éclairage.

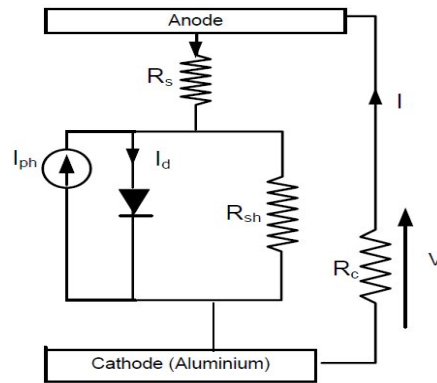


Figure I-5. Le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque réelle sous éclairage. [5]

L'équation déterminant le courant délivré dans ce cas est donnée par l'équation I-3 :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{n k T} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} - I_{R_c} \quad \text{[I-3]}$$

Avec :  $I_{ph}$  : est le photo-courant généré ;

$I$ : le courant de circuit extérieur ;

$R_s$ : La résistance série dépend de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact SC-Métal ;

$R_{sh}$ : La résistance shunt correspond à la présence de courant de fuite dans la diode ;

$n$  : facteur d'idéalité en générale  $n=1$ .

### I.4. Les différentes technologies

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque (plusieurs types de cellules solaires). L'organigramme figure I-6 résume les principales technologies.

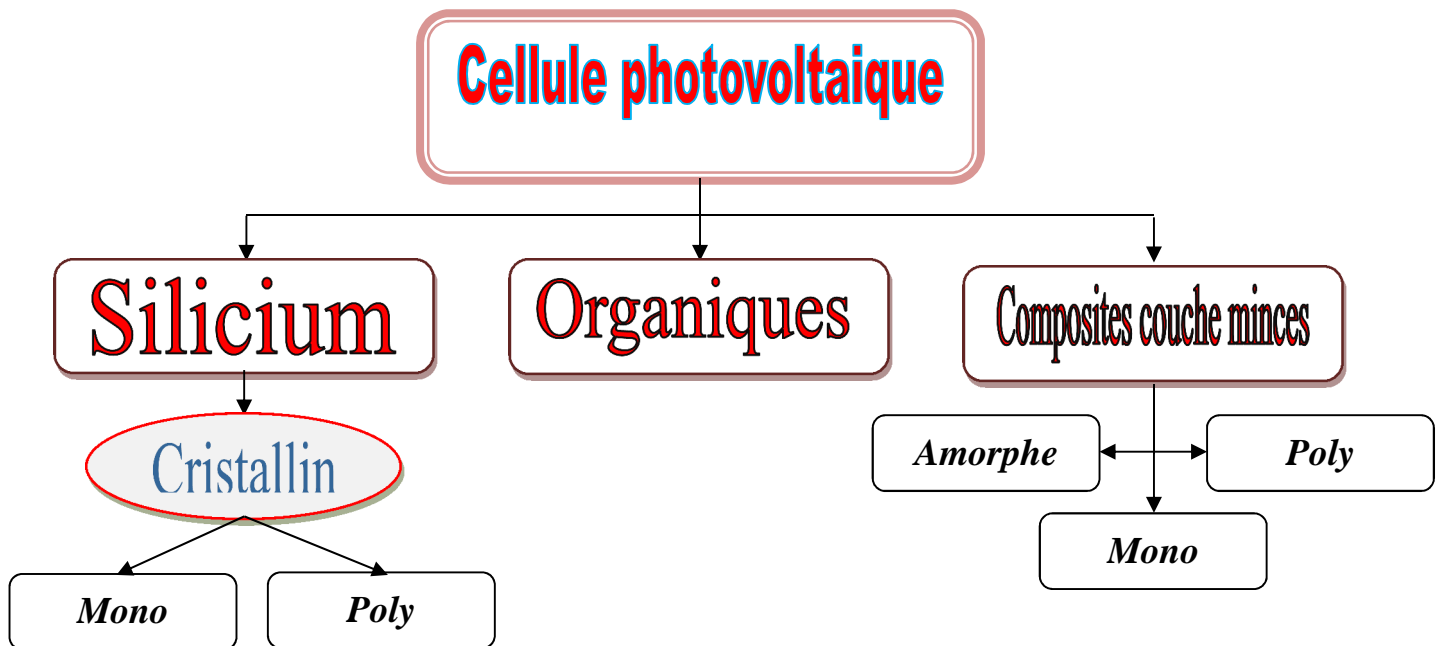


Figure I-6. Organigramme des différentes technologies.

Plus de 80% de la production mondiale basé sur la technologie du silicium comparé aux différentes technologies, elle reste toujours la mieux maitrise jusqu'à nos jours.

Le tableau I-1. Montre la comparaison entre ces différentes technologies.

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
<b>Silicium mono cristallin</b>	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
<b>Silicium poly cristallin</b>	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
<b>Amorphe</b>	5 à 8% (13% en laboratoire)	Rechercher	* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
<b>Composite mono cristallin (GaAs)</b>	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
<b>Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuiGaSe2, etc.)</b>	8% (16% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
<b>Organique</b>	1-11% en laboratoire	Quelques jours	*flexibles. * léger et facile à manier.	Appareils électroniques

Tableau I-1. La comparaison entre les différentes technologies [6].

### I.5. Structures électroniques

Il existe plusieurs structures électroniques qui peuvent-être utilisées comme cellule solaire parmi ces structures:

#### I.5.1 Structure métal/semi-conducteur (M/Sc)

##### a) Contact Ohmique

Un semi-conducteur (SC) de type p peut former un contact ohmique avec un métal lorsque le travail de sortie du SC ( $q\Phi_{sc}$ ) est inférieur au travail de sortie du métal ( $q\Phi_m$ ) soit  $q\Phi_{sc} < q\Phi_m$ .

Après la mise en contact, les électrons diffusent de la bande de valence (BV) du SC vers le métal jusqu'à égalisation des niveaux de Fermi. Le SC s'enrichit en porteurs majoritaires (trous) à l'interface avec le métal. Le SC se charge positivement et le métal se charge négativement. Comme les charges stockées sont mobiles, la zone d'accumulation dans le SC est de faible épaisseur ( $w$ ). Il n'existe pas de barrière de potentiel entre le SC et le métal, et le courant passe dans les deux sens.

Le contact entre un métal et un SC de type n, peut être ohmique quand le travail de sortie du SC  $q\Phi_{sc}$  est supérieur au travail de sortie  $q\Phi_m$  du métal ( $q\Phi_{sc} > q\Phi_m$ ). Il n'y a pas de formation de zone de charges d'espace, les électrons doivent être transférés du métal vers le SC pour équilibrer les niveaux de Fermi. Une zone d'accumulation d'électrons est formée dans le SC, près de l'interface, d'extension spatiale faible. Quelle que soit la tension externe appliquée, aucune barrière d'énergie ne s'élève contre le courant. La barrière d'énergie entre le métal et le SC est  $\Delta E_{ms} = q\Phi_{sc} - A_{Esc}$  où  $A_{Esc}$  désigne l'affinité électronique du semi-conducteur qui est la différence d'énergie entre le bas de la bande de conduction du semi-conducteur ( $E_c$ ) et le niveau du vide.

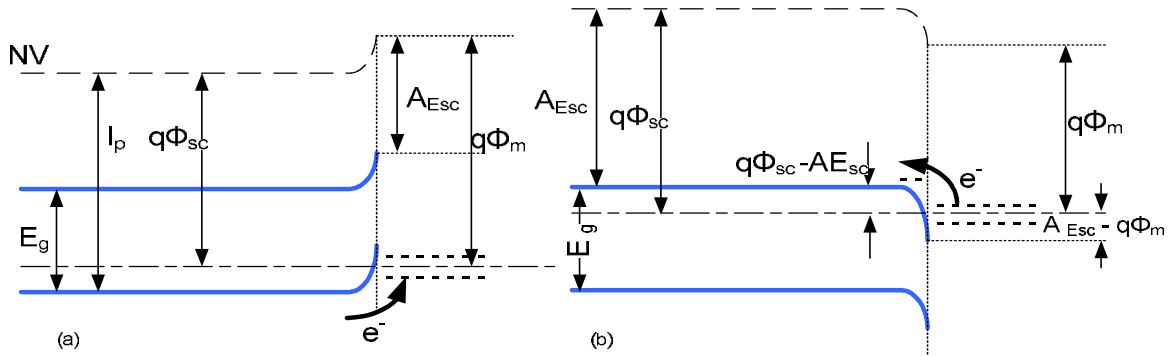


Figure I-7. Contact Ohmique entre un semi-conducteur et un métal : (a) de type p,  
(b) de type n.

**b. Contact redresseur ou Schottky**

Un SC de type p forme un contact redresseur (Schottky) avec un métal si le travail de sortie du SC-p ( $q\Phi_{sc}$ ) est supérieur à celui de métal ( $q\Phi_m$ ). Une fois en contact, les électrons du métal s'écoulent dans la BV du SC (sur les niveaux libres), et font disparaître les trous. On observe une migration des porteurs jusqu'à égalisation des niveaux de Fermi.

Dans le SC, une zone appauvrie en trous se crée, et il apparaît ainsi une zone de charge d'espace (ZCE) négative due aux accepteurs ionisés. La largeur de la ZCE est d'autant plus grande que la concentration en accepteurs est faible par rapport à la densité électronique du métal.

Le métal se charge positivement, d'où la création d'un champ interne dirigé du métal vers le SC qui s'oppose au mouvement. A l'équilibre (alignement des niveaux de Fermi), les trous du métal voient la barrière:

$$\Delta E_{ms} = E_g + A_{Esc} - q\Phi_m \dots \dots \dots [I-11]$$

Quant aux trous du SC, la barrière d'énergie est égale à :

$$qV_d = q(\Phi_{sc} - \Phi_m) \dots \dots \dots [I-12]$$

Pour un SC de type n, le contact avec un métal est de type Schottky si  $q\Phi_{sc}$  est inférieur à  $q\Phi_m$ .

A la mise en contact, les électrons du SC diffusent vers le métal jusqu'à égalisation des niveaux de Fermi. Il se crée une zone de déplétion à l'interface SC/Métal qui produit une courbure des bandes d'énergie au voisinage de l'interface. Une barrière de potentiel s'établit à l'interface SC/Métal pour un électron allant du SC vers le métal:

$$\Delta E_{sm} = q(\Phi_m - \Phi_{sc}) = qV_d \dots\dots\dots [I-13]$$

Cette barrière va empêcher la diffusion des électrons du SC vers le métal. La barrière de potentiel du contact SC/Métal qui empêche la diffusion des électrons du métal vers le SC s'exprime par:

$$\Delta E_{ms} = q\Phi_m - A_{ESC} \dots\dots\dots [I-14]$$

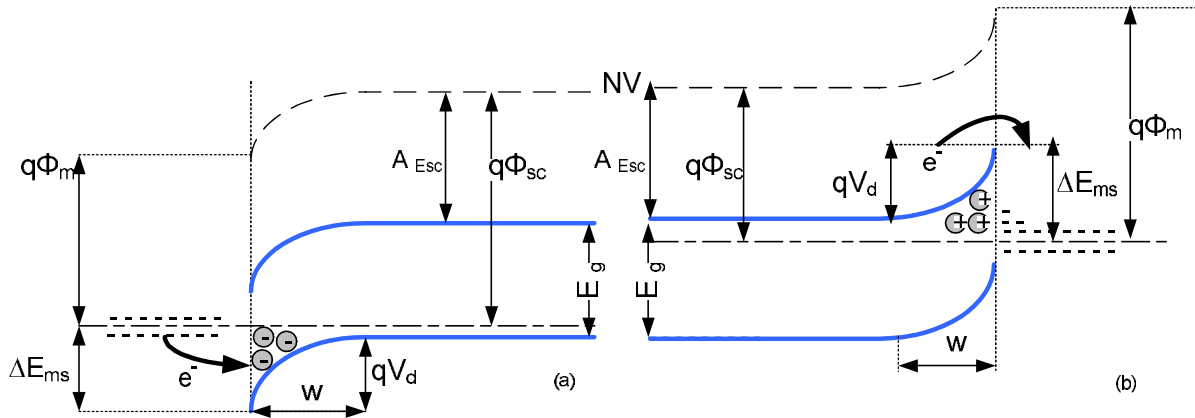


Figure I-8. Contact Schottky entre un sc et un métal :(a) type p, (b) type n

Par extension, on appelle diode Schottky, un dispositif comprenant un semi-conducteur pris-en entre deux électrodes métalliques, dont une forme un contact Schottky avec le semi-conducteur.

Lorsque l'on éclaire une diode de type Schottky du côté du contact rectifiant, trois processus se manifestent formant la base de la conversion photovoltaïque :

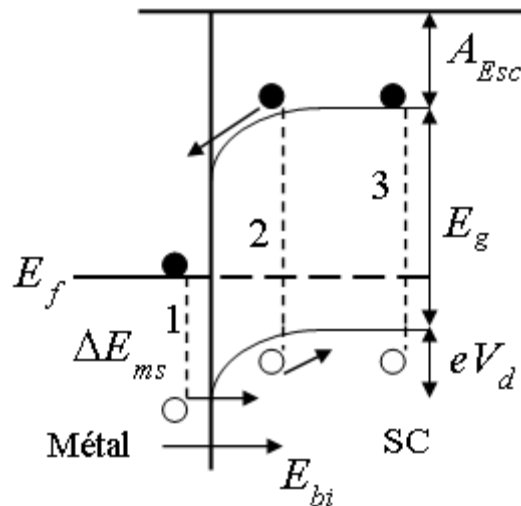


Figure I-9. Mécanisme photovoltaïque dans une structure Métal/SC.

- (1) la lumière peut être absorbée par le métal. Il y a génération de trous dans le métal capable de passer la barrière  $\Delta E_{ms}$  ; c'est la photoémission dont la contribution est faible, par rapport aux deux autres processus.
- (2) la lumière ( $h\nu \geq E_g$ ) peut être absorbée dans la zone de déplétion de charge. Il y a création de paires « électron-trou » puis séparation de ces paires par le champ interne  $E_{bi}$ .
- (3) la lumière peut être enfin absorbée au cœur du matériau. Il y a génération de paires « électron-trou » et diffusion vers la jonction pour y être séparées.

Pour ces trois contributions, la dernière étape est la diffusion des porteurs de charges jusqu'aux électrodes pour y être collectés.

I.5.2 La structure MIS

Cas d'une structure MIS où le semi-conducteur est de type N

a) Cas où  $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$

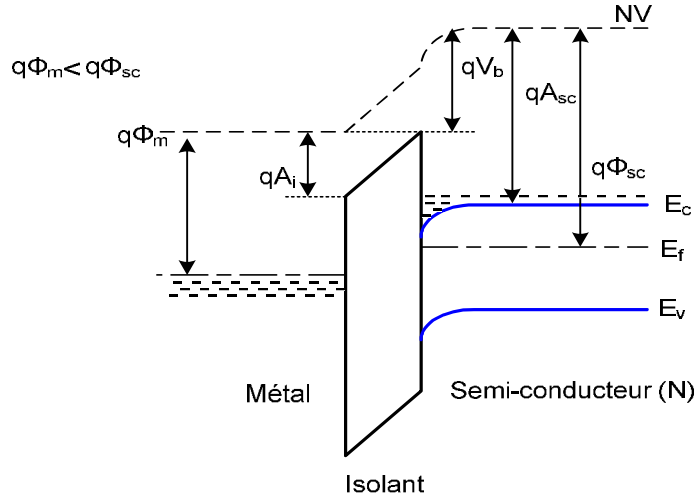


Figure I-11. Structure MIS où le semi-conducteur est de type N Cas où  $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$ .

Les électrons se déplacent du métal et s'accumulent dans le semi-conducteur. Les charges positives résultent d'un départ d'électrons de la surface du métal et les charges négatives de l'accumulation des électrons du côté semi-conducteur. La bande de valence et la bande de conduction se courbent vers le bas. Le semi-conducteur est en régime d'accumulation.

b) Cas où  $q\Phi_m = q\Phi_{sc}$

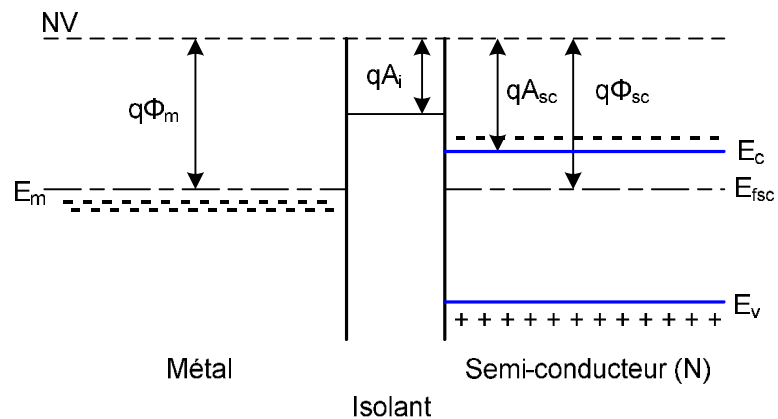


Figure I-12. Structure MIS où le semi-conducteur est de type N Cas où  $q\Phi_m = q\Phi_{sc}$ .

c) Cas où  $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$

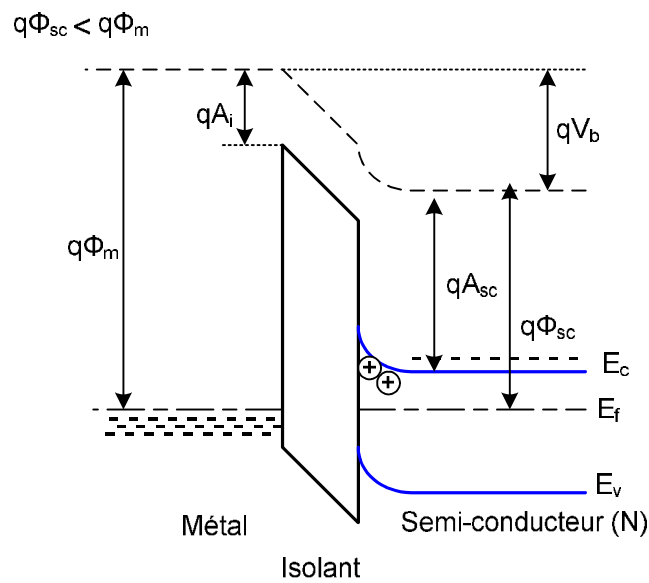


Figure I.13. Structure MIS où le semi-conducteur est de type N Cas où  $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$ .

Dans ce cas, les électrons passent du semi-conducteur vers le métal. Ceci implique l'apparition de charges positives fixes du côté semi-conducteur près de l'interface. Donc il apparaît un déficit en porteurs majoritaires et les bandes d'énergies se courbent vers le haut. Ce régime est appelé « régime déplétion ».

### Cas d'une structure MIS où le semi-conducteur est de type P

a) Cas où  $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$

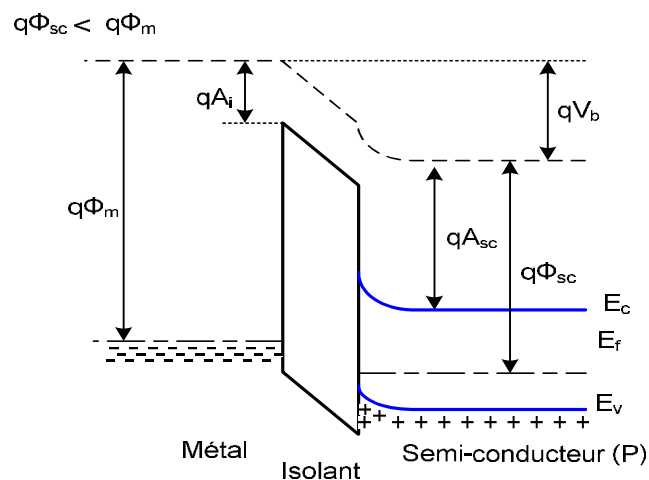


Figure I-14. Structure MIS où le semi-conducteur est de type P ; cas où  $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$ .

Les électrons passent du semi-conducteur vers le métal d'où l'augmentation de la densité des trous de côté semi-conducteur. Il se crée alors une zone de charge positive du côté semi-conducteur, entraînant ainsi une courbure de bandes d'énergie vers le haut. C'est le régime d'accumulation.

b) Cas où  $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$

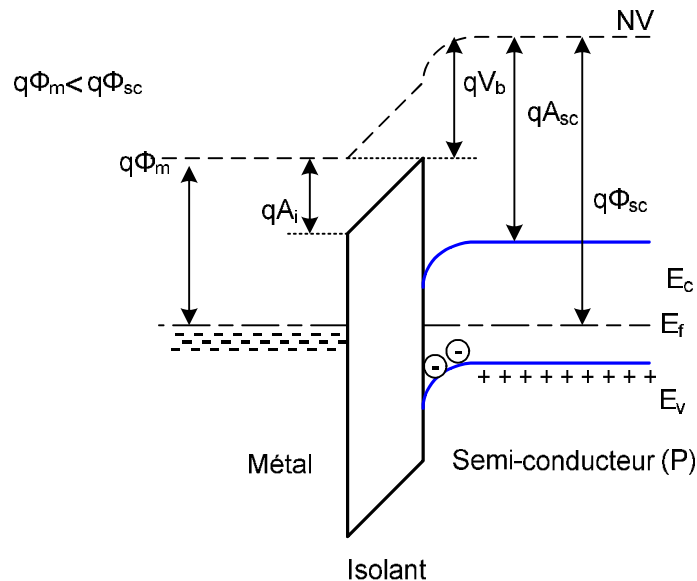


Figure I.15. Structure MIS où le semi-conducteur est de type P ; cas où  $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$ .

Il est plus facile dans ce cas, aux électrons de passer du métal vers le semi-conducteur que du semi-conducteur vers le métal. Une fois que les électrons arrivent dans le semi-conducteur, ils se recombinent avec les trous qui sont les porteurs majoritaires, il y'aura donc apparition d'une zone désertée en porteurs majoritaires, c'est le régime de déplétion.

Si  $q\Phi_m \ll q\Phi_{sc}$  les charges négatives qui apparaissent dans le semi-conducteur sont dues à la recombinaison à l'interface Isolant/Semi-conducteur des trous avec les électrons qui arrivent du métal, les ions accepteurs ne seront plus compensés. C'est le régime d'inversion.

I. 5.3 Jonction P-N

a. Jonction P-N à l'équilibre thermodynamique et sous polarisation

Lorsque deux SCs de type *n* et *p* sont mis en contact, des courants de diffusion de trous et d'électrons apparaissent au voisinage de la jonction. La diffusion des porteurs majoritaires des deux zones crée une barrière de potentiel qui s'oppose à ces courants de diffusion. De plus, il se crée de chaque côté de la jonction une zone vide de charges majoritaires, appelée zone de déplétion, de largeur *W*. Le champ électrique interne  $E_{bi}$  est dirigé du SC-n vers le SC-p et s'oppose alors à la diffusion des autres électrons du SC-n. Hors de la zone de déplétion, le champ électrique est considéré comme constant. A l'équilibre, la barrière de potentiel due au champ interne  $V_{bi}$  s'exprime alors par :

$$qV_{bi} = q(\Phi_{sc-p} - \Phi_{sc-n}) \dots\dots\dots [I-15]$$

Les courants de diffusion et de dérive dans une jonction P-N à l'équilibre s'annulent. Les courants de diffusion sont composés du flux d'électrons (respectivement de trous) majoritaires du SC-n (resp. SC-p) allant vers le SC-p (resp. SC-n), qui peuvent surmonter la barrière  $qV_{bi}$ . Les courants de dérive sont dus aux flux d'électrons minoritaires de SC-p (resp. de trous minoritaire du SC-n) qui descendent simplement cette même barrière pour aller vers le SC-n (resp. le SC-p).

Pour obtenir un courant dans une jonction P-N, il est nécessaire soit d'abaisser la barrière de potentiel en polarisant la jonction, soit d'apporter une énergie suffisante aux porteurs par voie thermique ou radiative pour passer la bande interdite du SC, et enfin de collecter ces charges avant leur recombinaison. Remarquons que le rendement des cellules photovoltaïques inorganiques diminue avec l'élévation de la température, les électrons remplissant progressivement la bande interdite, et limite donc l'effet de jonction p-n.

La Figure suivante montre une jonction P-N à l'équilibre (a) et sous l'effet d'une polarisation extérieure (b et c).

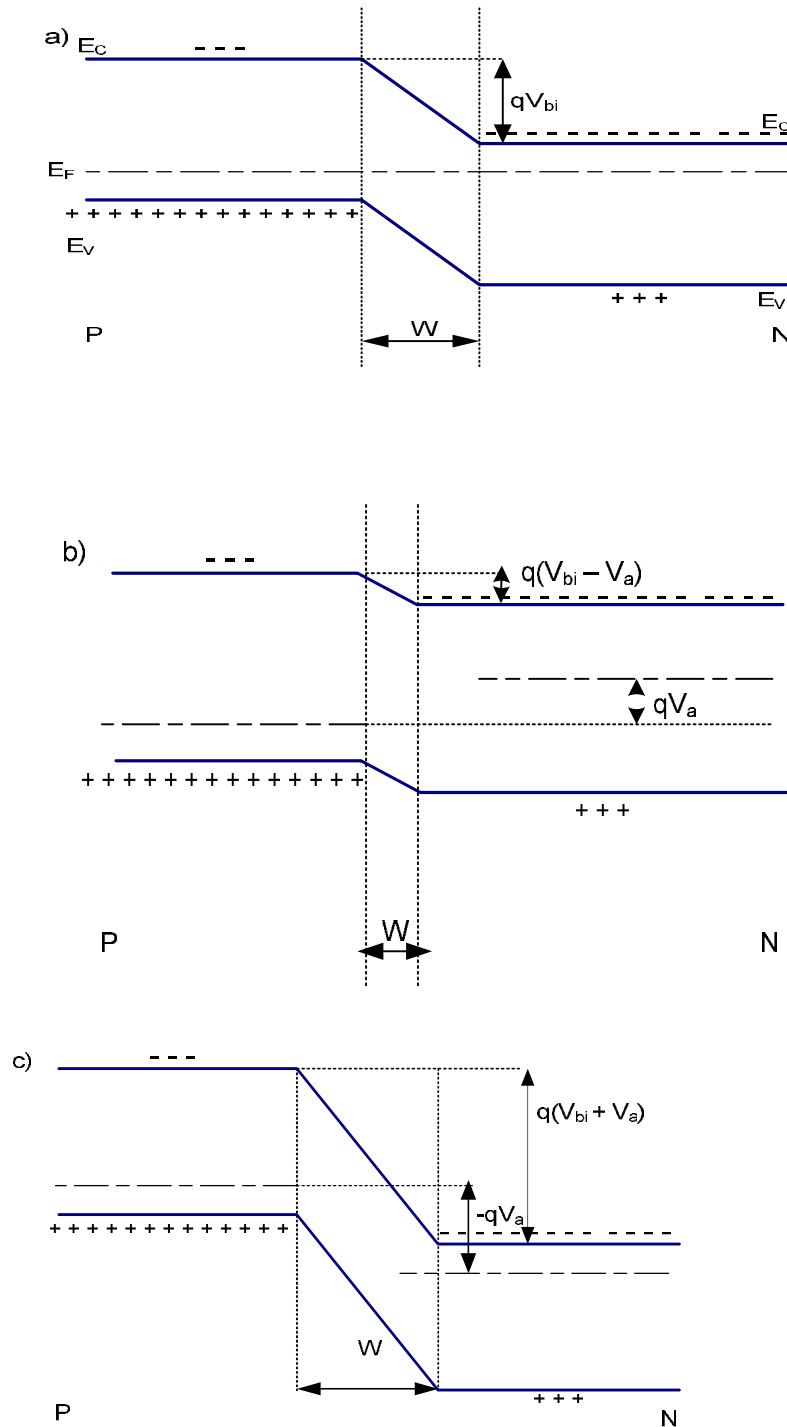


Figure I-10. Jonction p-n à l'équilibre (a) et sous polarisation directe (b) ou inverse(c)

Sous polarisation directe, la barrière de potentiel et la zone de déplétion diminuent et sous polarisation inverse, les effets sont opposés.

Si une polarisation inverse est appliquée, elle supporte le champ interne. Une polarisation directe s'oppose par contre à ce champ. Ce sont les porteurs minoritaires descendant les barrières d'énergie (courant de dérive), qui créent le champ électrique

s'opposant au champ interne et qui réduisent ainsi le potentiel  $V_{bi}$ . Pour ce type de diode, une polarisation directe appliquée tend donc à diminuer  $V_{bi}$ . Par conséquent, la tension maximale en circuit ouvert  $V_{co}$  extraite de la diode est inférieure ou égale à  $V_{bi}$ . Or la barrière de potentiel est liée au matériau par :

$$qV_{bi} = q(\Phi_{sc-p} - \Phi_{sc-n}) \dots\dots\dots [I-16]$$

Plus précisément, l'origine de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  peut être associée à la différence de potentiel interne de la jonction.

On appelle ainsi diode à jonction p-n, un dispositif comprenant deux semi-conducteurs en contact, pris entre deux électrodes métalliques formant chacune un contact ohmique avec le semi-conducteur.

Dans notre travail de mémoire, nous allons nous intéresser à une structure de type PIN (objet de simulation) qui peut être réalisé en insérant une couche intrinsèque entre la zone N et la zone P d'une jonction PN.

Par rapport à la jonction PN, la structure PIN possède une région centrale ( $W_i$ ) où le champ électrique est constant. En absence de polarisation, le champ électrique est trapézoïdal. La hauteur de la barrière de potentiel est plus grande que dans une jonction PN.

Il y apparition d'une zone de charge d'espace ZCE négative du côté P et d'une ZCE positive du côté N, et cela augmente la tension de diffusion par rapport à la ZCE de la jonction PN; comme le montre les deux équations suivantes :

$$(\quad) = \quad + \quad + \quad \dots\dots\dots [I.17]$$

$$(\quad) = \quad + \quad \dots\dots\dots [I.18]$$

La figure I.16 montre la différence de champ électrique ( $E_M$ ) entre la jonction PN et la structure PIN.

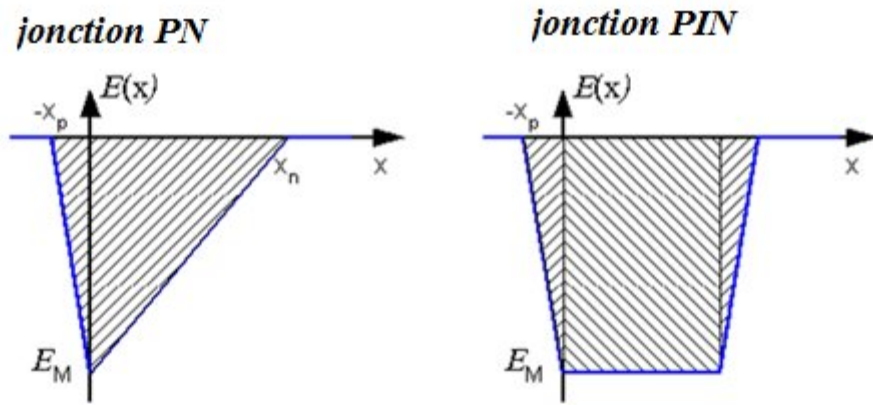


Figure I.16. La représentation du champ électrique dans la jonction PN et PIN [7].

# CHAPITRE III

## *Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHYSICS 4.4*

### *Plan*

- Description du logiciel
- Modèles physiques
- Procédure de simulation
- Lancement du logiciel
- Sélection de la dimension d'espace
  - Choix de la physique
  - Sélectionner l'étude
  - Définir la géométrie
  - Choix des matériaux
  - Maillage
- Lancement de la simulation et analyse des résultats
  - Modèle numérique

*Mots clés : COMSOL MULTIPHYSICS 4.4, Simulation, Maillage, Modèle numérique, Structure PIN, Indices de réfraction, Coefficient d'extinction.*

*But : Ce chapitre présente un aperçu sur le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 ainsi que les différentes étapes de simulation de la structure PIN destinée à l'application photovoltaïque.*

## ***Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHYSICS 4.4***

---

### **I. Description du logiciel**

COMSOL MULTIPHYSICS (ex : FEMLAB), est un logiciel d'analyse par éléments finis, qui a diverses applications en physique et en ingénierie. COMSOL MULTIPHYSICS offre aussi une vaste et bonne gérance d'interface MATLAB et ses boîtes à outils pour une grande variété de programmation et de post procédures possible. Une interface similaire est offerte par COMSOL Script, en plus de la physique classique à base d'interfaces utilisateur. COMSOL Multi Physique permet également d'entrer dans des systèmes couplés d'équations aux dérivées partielles (EDP) ; elles peuvent être saisies directement ou en utilisant la soi-disant forme faible. COMSOL a été lancé par les étudiants diplômés à GERMUND DAHLQUIST reposant sur des codes mis au point pour un cours universitaire à l'Institut Royal de Technologie (KTH), à STOCKHOLM, en SUEDE [8].

Dans notre simulation, nous avons choisis de travailler avec le COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 qui a de divers fonctionnalités.

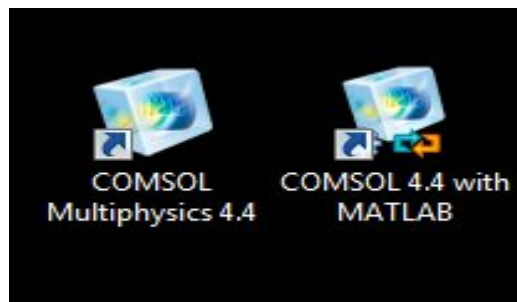


Figure II-1. Les icônes de COMSOL MULTIPHYSICS 4.4.

## Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHYSICS 4.4

---

### I. Modelés physiques

Il existe plusieurs modèles d'application spécifiques pour COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 comme le montre la figure II-2.



Figure II-2. Les différents modèles de simulations sur COMSOL MULTIPHYSICS.

- Modèle AC/DC : les interfaces d'AC/DC sont employées pour calculer les champs électriques et magnétiques dans les systèmes statiques et de basse fréquence.

- Modèle Acoustique : les interfaces d'acoustique sont employées pour calculer la propagation des champs acoustiques dans de diverses conditions dans le domaine de fréquence et de temps.

- Modèle Transport d'espèces chimiques : les interfaces de transport d'espèce chimiques sont employées pour calculer les champs de concentration des espèces chimiques dans les solutions.

- Modèle Electrochimie : la branche d'électrochimie contient les interfaces génériques de physique pour modeler des distributions potentielles et courantes en cellules électrochimiques.

- Modèle Ecoulement fluide : les interfaces de flux de fluide sont employées pour simuler des champs d'écoulement et de pression des liquides et des gaz.

## ***Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHISICS 4.4***

---

- Modèle Transfert de chaleur : les interfaces de transfert thermique sont employées pour calculer la température et les champs radiatifs d'intensité. Les interfaces de COMSOL calculent également d'autres champs physiques comme la vitesse, la pression ou les champs électromagnétiques.

- Modèle Optique : les interfaces de système optique sont employées pour calculer les champs électriques et magnétiques pour des systèmes dont la longueur d'onde est comparable ou plus petite que le dispositif ou le système étudié.

- Modèle Plasma : la branche de plasma contient des interfaces de physique pour modéliser de plasma.

- Modèle Radio fréquence : les interfaces de fréquence par radio sont employées pour calculer les champs électriques et magnétiques dans les systèmes à haute fréquence.

- Modèle Mécanique des structures : la branche structurale de mécanique contient des interfaces de physique pour analyser des déformations, des efforts, et des contraintes des structures pleines.

- Modèle Semi-conducteur : la branche de semi-conducteur contient l'interface de semi-conducteur, qui résout l'équation de Poisson pour le potentiel électrique et les équations de diffusion de dérive pour l'électron et les trous dans un matériel de semi-conducteur.

- Modèle Mathématiques : la branche de mathématiques contient des interfaces pour l'analyse de sensibilité, modélant les mailles mobiles et les géométries déformées, et plus [9].

### **II. Procédure de simulation**

Les étapes essentielles à suivre pour une conception d'une structure sur COMSOL MULTIPHISICS 4.4 sont :

- Sélectionner la dimension d'espace ;
- Sélectionner la physique ;
- Sélectionner l'étude ;
- Définir la géométrie ;
- Sélectionner les matériaux ;
- Maillage ;
- Lancer la simulation ;
- Traiter et analyser les résultats.

## Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHYSICS 4.4

### a) Lancement du logiciel

Pour lancer le logiciel on clique sur l'icône de COMSOL MULTIPHYSICS, la fenêtre du logiciel s'ouvre.



Figure II-3. La fenêtre de lancement du logiciel.

### b) Sélection de la dimension d'espace

Il existe plusieurs dimensions d'espace, nous choisissons une dimension spécifique pour chaque étude.



Figure II-4. Les différentes dimensions de simulation.

## Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHISICS 4.4

---

### c) Choix de la physique

Après la sélection de la dimension d'espace, on procède au choix de la physique à utiliser selon la simulation qu'on va faire, la figure II-5 montre les différentes physiques existantes dans le logiciel.



Figure II-5. Le choix de la physique à utiliser.

## Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHISICS 4.4

### d) Sélectionner l'étude

La rubrique d'étude nous permet de sélectionner ou bien de définir un domaine d'étude approprié à la physique utilisé.

### Sélectionner l'étude

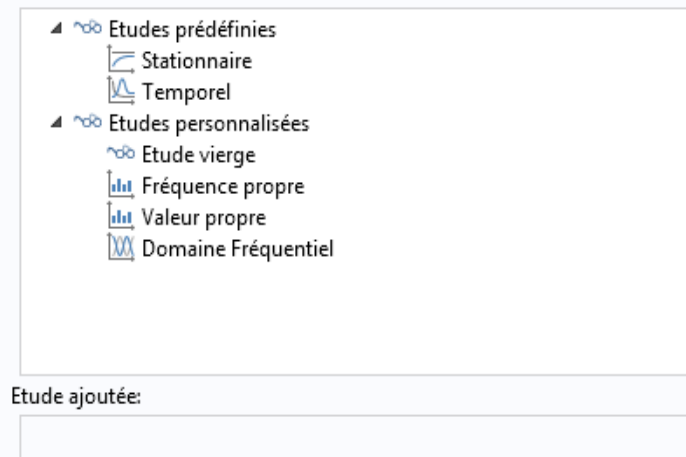


Figure II-6. Le choix de l'étude.

### e) Définir la géométrie

Une fois le domaine physique et le domaine d'étude ont été choisis, on commence à déterminer la géométrie de notre structure. La figure II-7 montre l'interface de travail qui nous permet d'obtenir la géométrie voulue.

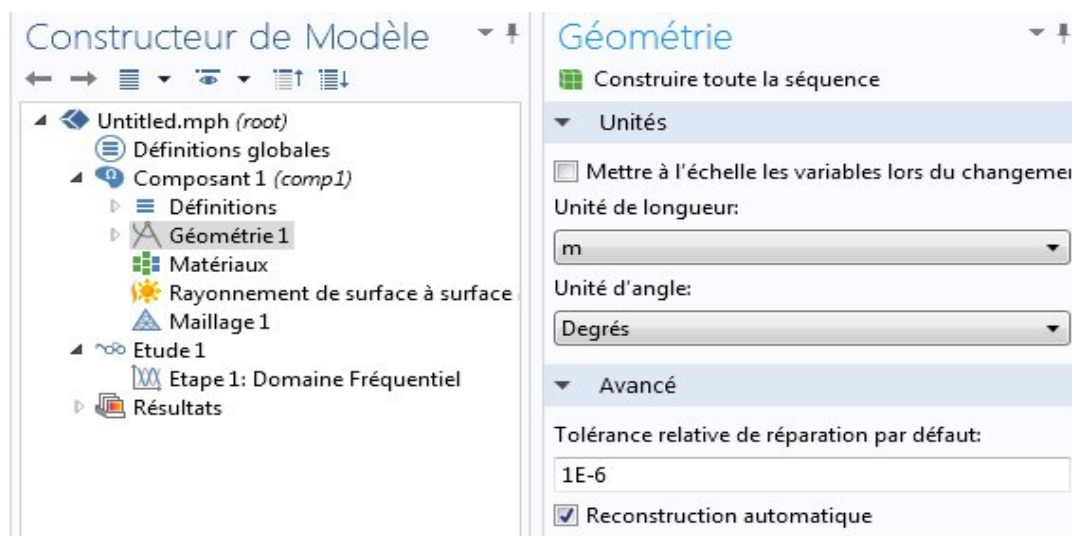


Figure II-7. Création d'une géométrie voulue.

## Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHISICS 4.4

### f) Choix des matériaux

La rubrique de choix des matériaux comporte une large gamme de matériaux qui sont disponible sur le logiciel, et du même, ce logiciel nous offre une possibilité de créer un matériau en lui associant toutes les caractéristiques disponible dans les études théoriques.

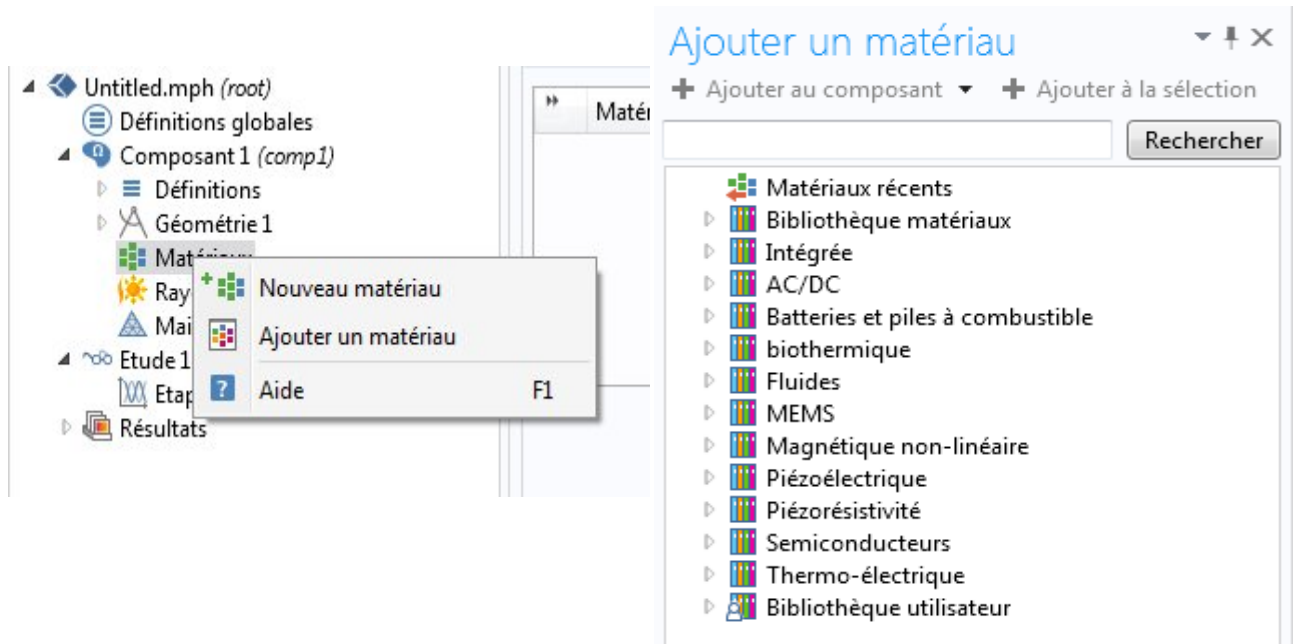


Figure II-8. Le choix de devers matériaux.

### g) Maillage

Le maillage correspond à la discrétisation spatiale de la géométrie en volumes élémentaires appelés mailles. Le maillage est réalisé automatiquement par le logiciel. On peut utiliser les tailles prédéfinies extra grossier ; grossier ; normal ; fine ou extra fine...etc.

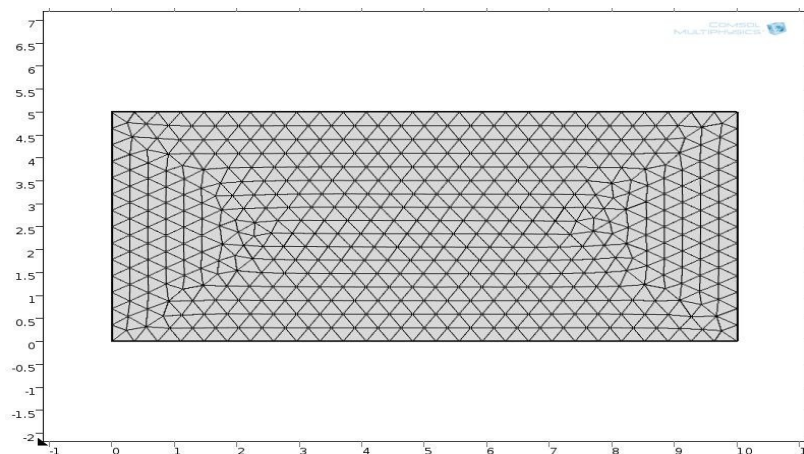


Figure II-9. Exemple sur le maillage.

### h) Lancement de la simulation et analyse des résultats

Le lancement de la simulation se fait une fois que toutes les étapes citées au part avant sont réalisées. Le logiciel compile toutes les données, et nous donne à la fin tous les résultats obtenu lors de la simulation.

- Exemple d'un résultat obtenu

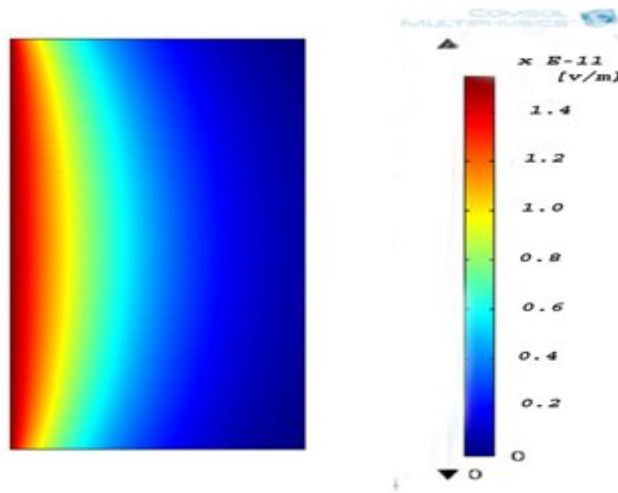


Figure II-10. Exemple de la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau.

## Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHISICS 4.4

Notre travail consiste à faire une simulation de la cellule solaire à structure PIN, et pour cela, nous procédons premièrement au choix de la dimension d'espace qui est de deux dimensions (2D). Ensuite nous sélectionnons une physique bien déterminé pour notre structure suivi d'une étape d'étude qui consiste à sélectionner une étude prédéfinie ou bien une étude personnalisée.

Après le choix de la dimension d'espace, de la physique et l'étude, nous procédons à la création de la structure suivie par l'étape du maillage.

La figure II-11 montre la géométrie de la cellule solaire.

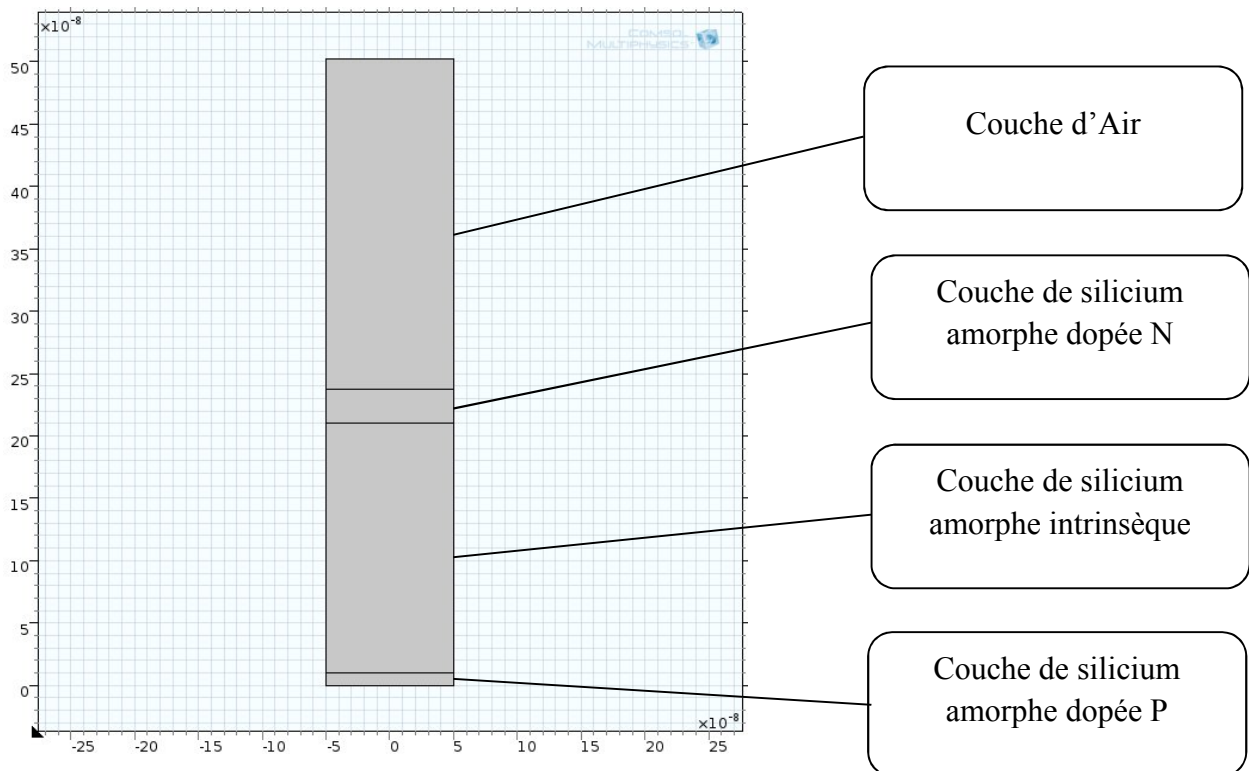


Figure II-11. Représentation de la cellule a structure PIN.

Comme le maillage correspond à la discrétisation spatiale de la géométrie en volumes élémentaires (appelés mailles), définis par des points (appelés nœuds). Ces nœuds constituent les connexions entre les mailles.

## Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHYSICS 4.4

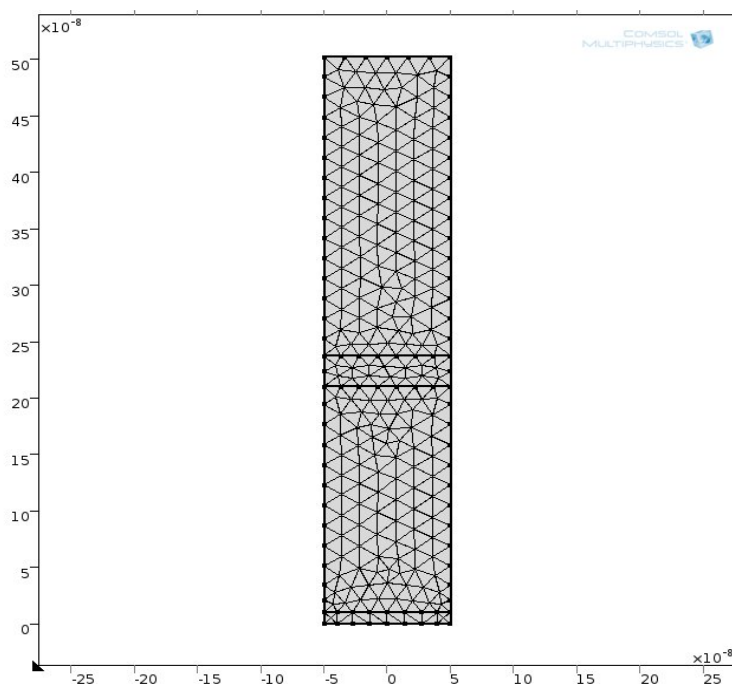


Figure II-12. Le maillage de la jonction PIN.

Une fois que l'étape du maillage est achevée, on lance la simulation en variant certains paramètres.

Le tableau II-1 présente une liste des paramètres tenus en compte avant notre simulation.

### *Paramètres de simulation*

Nom	Expression
mun_si	1500[cm <sup>2</sup> /(V*s)]
mup_si	450[cm <sup>2</sup> /(V*s)]
X_si	4.05[eV]
Eg_si	1.75[eV]
Ni	1e10[1/cm <sup>3</sup> ]
epsilon_r_si	11.7
Taun	0.1[us]
Taup	0.1[us]

Tableau II-1. Les différents paramètres de la simulation.

## **Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHISICS 4.4**

Notre simulation nécessite une base de données (data base) des indices de réfraction « n » et du coefficient d'extinction « k » de chaque matériau utilisé pour notre structure. La figure II-13 représente la variation des paramètres (n, k) du matériau utilisé en fonction de la longueur d'onde.

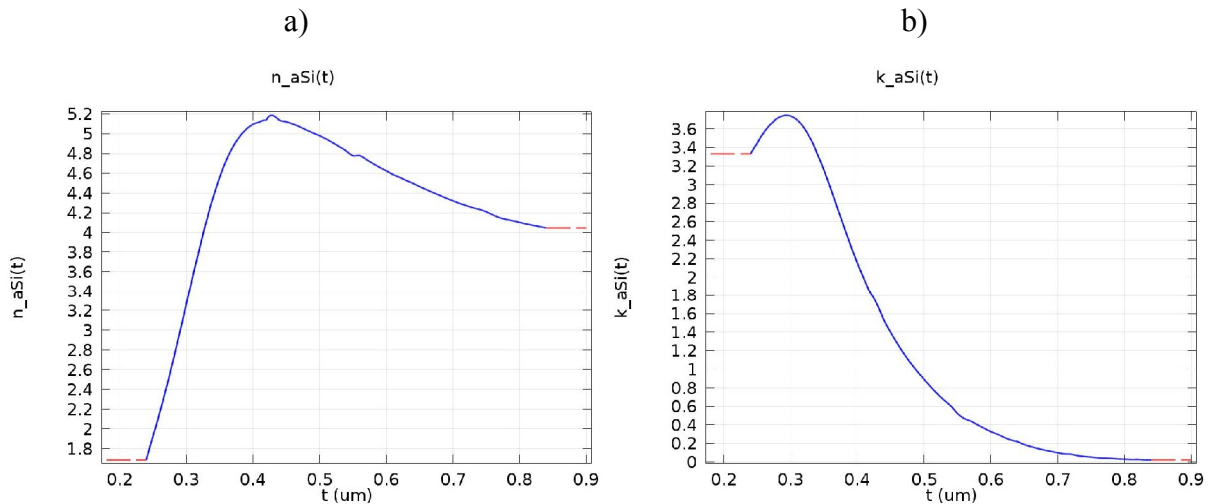


Figure II-13. L'indices de réfraction (a) et le coefficient d'extinction (b) de silicium (Si) [10].

### **Modèle numérique**

Notre modèle numérique est basé sur l'étude de la propagation d'une onde électromagnétique à l'intérieur d'une cellule solaire.

On lance la simulation d'une cellule solaire de type PIN afin d'optimiser les épaisseurs des différentes couches de celle-ci qui offre une meilleure répartition d'énergie dans la structure. Nous avons utilisé le modèle optique de la version 4.4 de COMSOL pour la résolution de l'équation [II-1] suivante :

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla E) - \mu_r \nabla \times (\mu_r \nabla \times E) = \dots \dots \dots [II-1]$$

- $\epsilon_r$  : La permittivité relative ;
- $E$  : Champ électrique ;
- $\mu_r$  : La mobilité relative ;
- $K_0$  : vecteur d'onde ;
- $\omega$  : vitesse angulaire ;
- $\epsilon_0$  : La permittivité absolu ;
- $\sigma$  : conductivité électrique du matériaux.

## Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHYSICS 4.4

Notre modèle est appliqué à une structure d'une surface plane. Une onde plane est produite à la limite du bord 1 (bord d'incidence), voir la figure II-14.

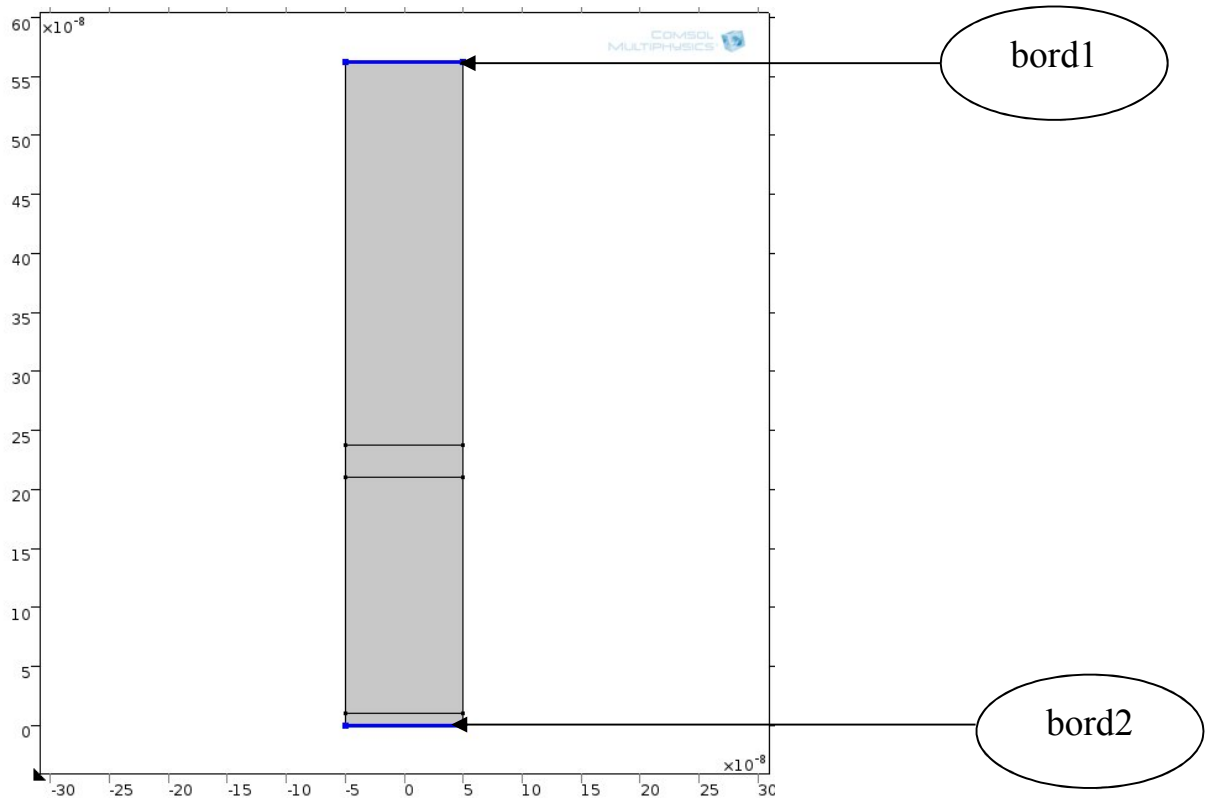


Figure II-14. Les ports des frontière de la cellules.

Le bord supérieur est considéré comme la source, les conditions aux limites au niveau des interfaces de la structure assurent que la vague est transposée au bord inférieur avec le déphasage approprié.

## **Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHISICS 4.4**

L'onde se réfracte à chaque interface selon la loi de SNELL-DESCARTES, cela doit être pris en compte dans les conditions aux limites de Floquet à travers la première et la seconde interface, les coefficients de réflexion et de transmission à chaque interface (voir la figure II-15) sont donnés par les équations [II-2 a II-5]

$$= \frac{2n_1 n_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{n_1^2 \cos \theta_2 + n_2^2 \cos \theta_1} \dots \dots \dots \text{ [II-2]}$$

$$= \frac{n_2^2 \cos^2 \theta_1 - n_1^2 \cos^2 \theta_2}{n_2^2 \cos^2 \theta_1 + n_1^2 \cos^2 \theta_2} \dots \dots \dots \text{ [II-3]}$$

$$= \frac{2n_1 n_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{n_1^2 \cos \theta_2 + n_2^2 \cos \theta_1} \dots \dots \dots \text{ [II-4]}$$

$$= \frac{n_2^2 \cos^2 \theta_1 - n_1^2 \cos^2 \theta_2}{n_2^2 \cos^2 \theta_1 + n_1^2 \cos^2 \theta_2} \dots \dots \dots \text{ [II-5]}$$

$n_1$  : Indice de réfraction de l'Air ;

$n_2$  : Indice de réfraction du silicium ;

$r_n$  : Coefficient de réflexion ;

$t_n$  : Coefficient de transmission.

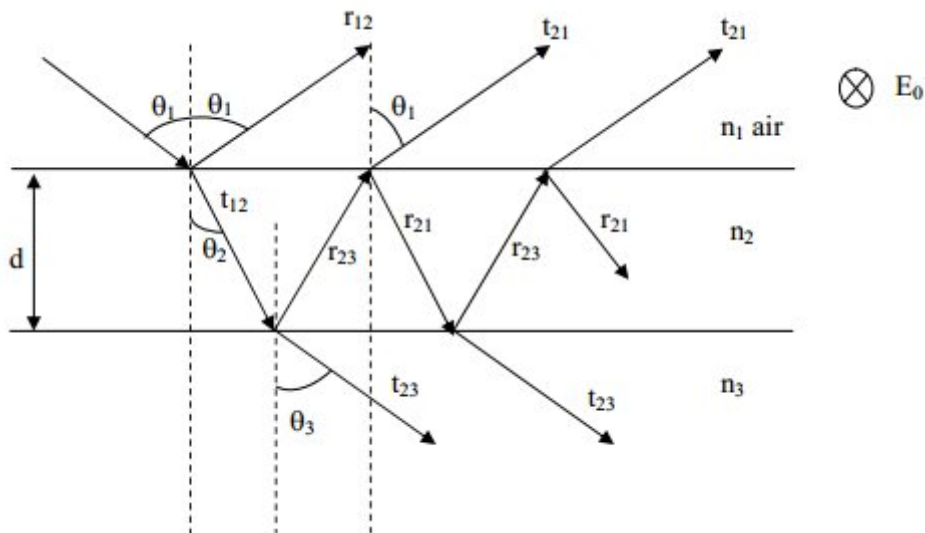


Figure II-15. Rayonnement incidents, réfléchis et transmis entre des milieux d'indices de réfractions différents [11].

## **Chapitre II : Procédures de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL MULTIPHISICS 4.4**

---

Le rendement global de la conversion photovoltaïque peut être exprimé par la relation suivante:

$$= \eta_A * FF * \frac{eV_{max}}{h\nu} \quad [12]$$

On constate qu'il est en fonction de l'efficacité d'absorption  $\eta_A$ , de l'efficacité de transfert de charges  $\eta_{TC}$ , du facteur de forme  $FF$  et du rapport entre l'énergie des photons absorbés et l'énergie extraite  $eV_{max} / h\nu$ .

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans ce processus en faisant un bon choix pour la structure des dispositifs et l'optimisation des épaisseurs des différentes couches constituant celle-ci.

L'objectif d'optimisation des épaisseurs c'est de contribuer à l'amélioration du rendement de la conversion photovoltaïque en maximisant l'absorption et en augmentant la densité de courant délivrée. En se basant sur notre modèle numérique cité précédemment, nous avons lancé une série de simulations pour la répartition de l'énergie au sein de la structure PIN en faisant varier les épaisseurs de chaque couche (n, p et i).

Les résultats obtenus et les discussions seront présentés dans le prochain chapitre.

# CHAPITRE III

## *Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN*

### *Plan*

- **Optimisation de la répartition de l'énergie en faisant varier l'épaisseur de la couche n.**
- **Optimisation de la répartition de l'énergie en faisant varier l'épaisseur de la couche p.**
- **Optimisation de la répartition de l'énergie en faisant varier l'épaisseur de la couche i.**

*Mot clé : Structure PIN, Répartition d'énergie, Rendement d'absorption.*

*But : Dans ce chapitre nous présentons nos résultats de simulation et nous donnons les meilleures combinaisons possibles à réaliser.*

## Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

Premièrement, nous avons varié les épaisseurs des couches n, p et i indépendamment :

- Variation de l'épaisseur de la couche n en fixons celles des couches p et i ;
- Variation de l'épaisseur de la couche p en fixons celles des couches n et i ;
- Variation de l'épaisseur de la couche i en fixons celles des couches n et p.

Dans notre simulation l'objectif principale c'est d'avoir une répartition optimale de l'énergie dans la zone de charge d'espace (ZCE) ou bien tout près de celle-ci du moment que la séparation des paires électrons trous s'effectue dans cette zone. En tenant compte aussi de la réalisabilité de la structure à l'aide des différentes techniques de dépôts.

Les résultats obtenus au cours de nos simulations sont représentés dans les figures III-1 jusqu'à III-38

Les valeurs des épaisseurs de toutes les structures simulées ont été prises par rapport à une cellule solaire, dont les épaisseurs de ses couches ont servi comme valeurs initiale pour notre simulation (voir figure III-1).

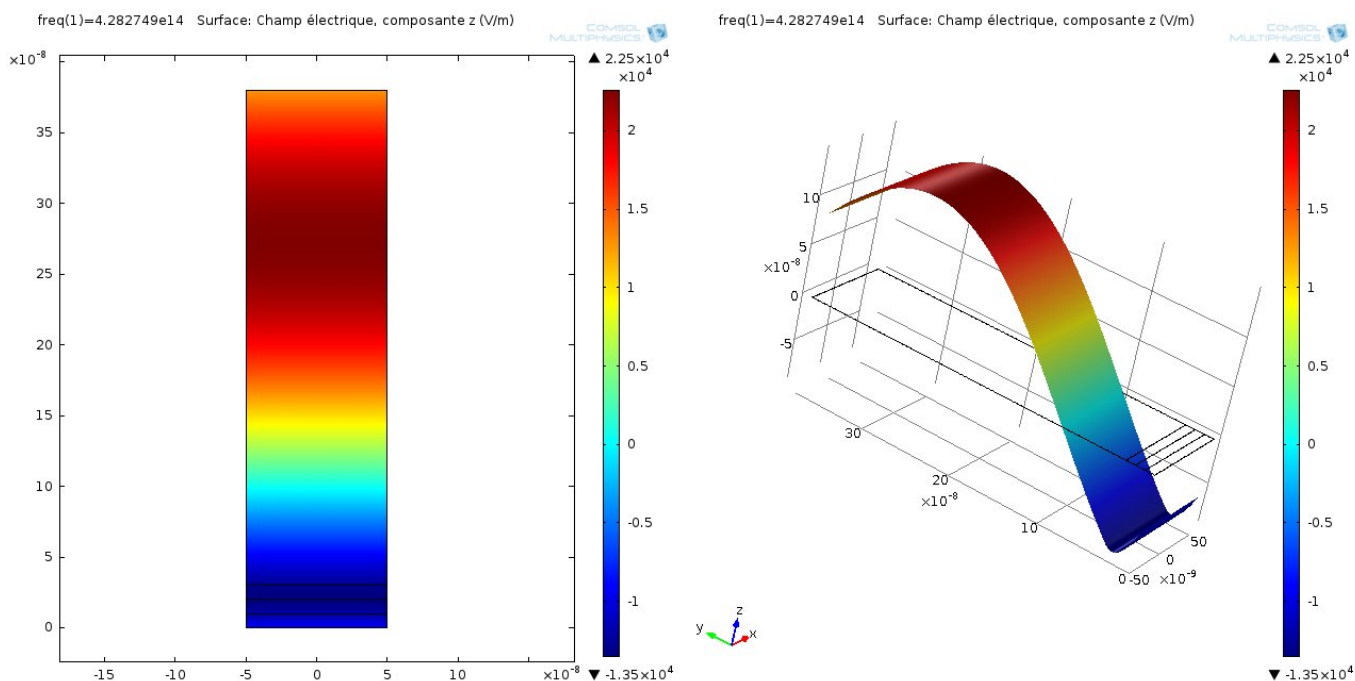


Figure III-1. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

a) Optimisation de la répartition de l'énergie en faisant varier l'épaisseur de la couche n.

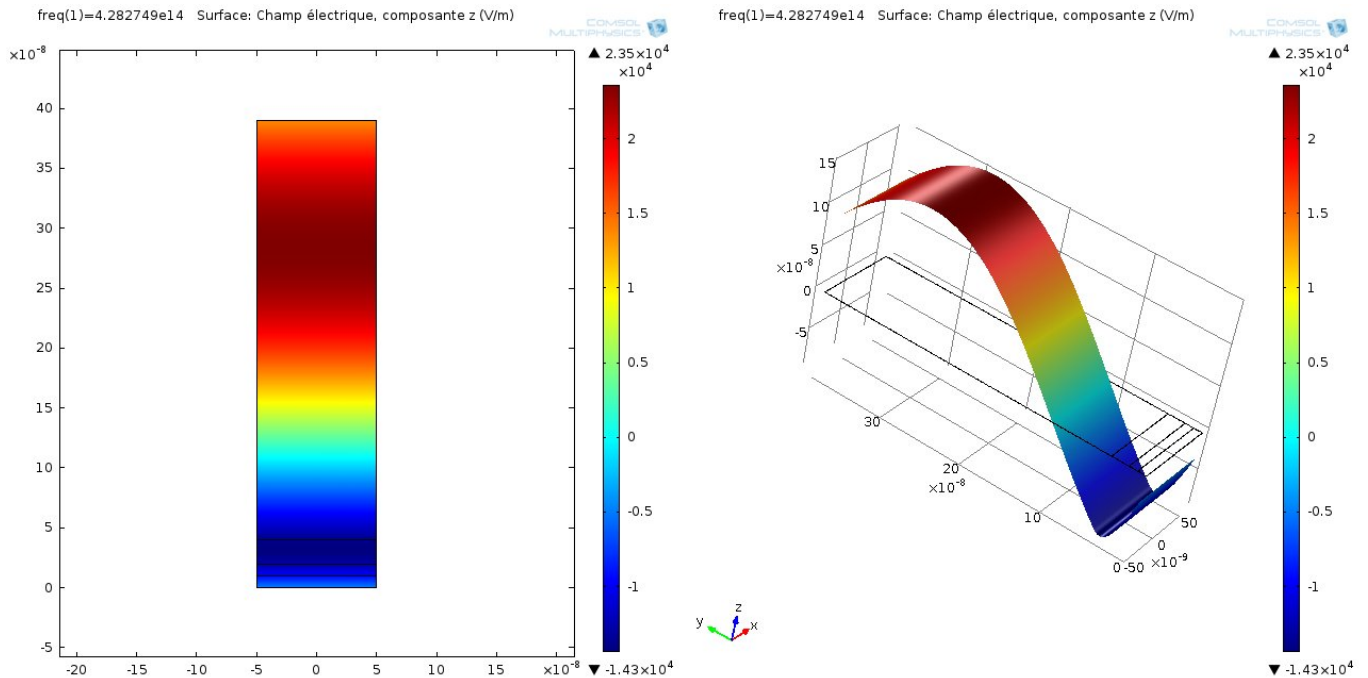


Figure III-2. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/20).

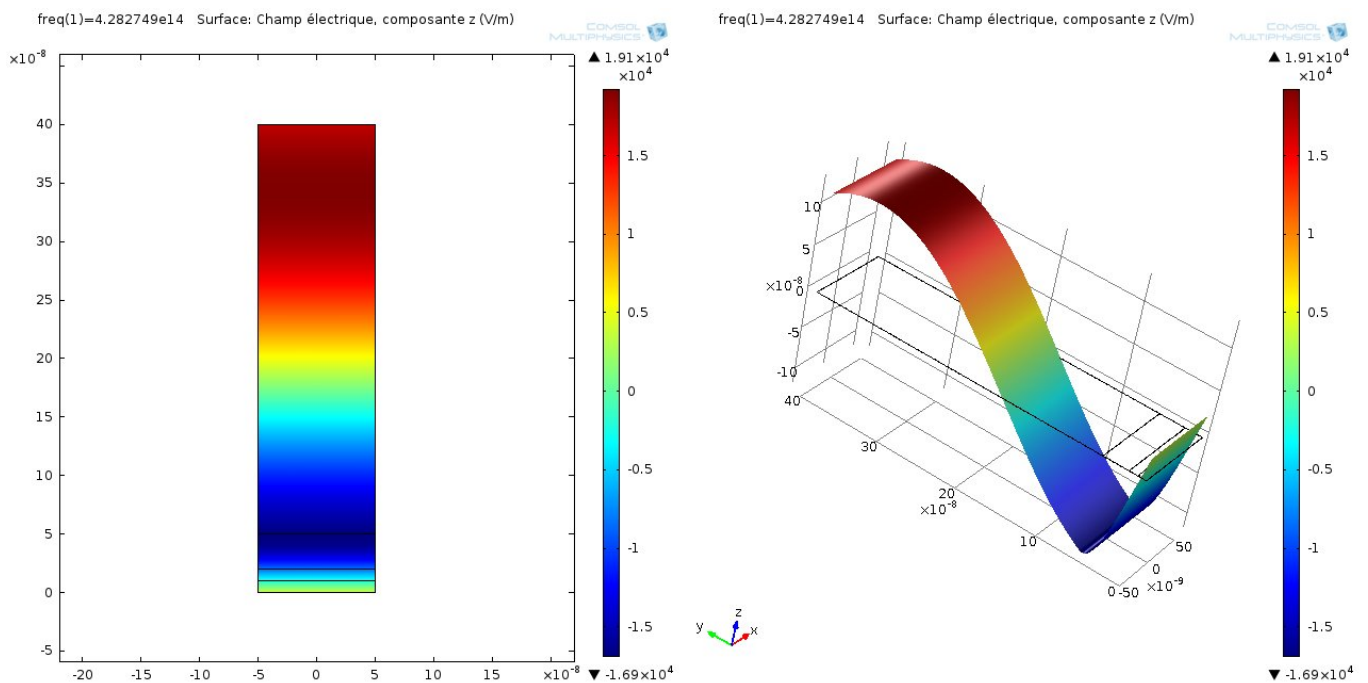


Figure III-3. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/30).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

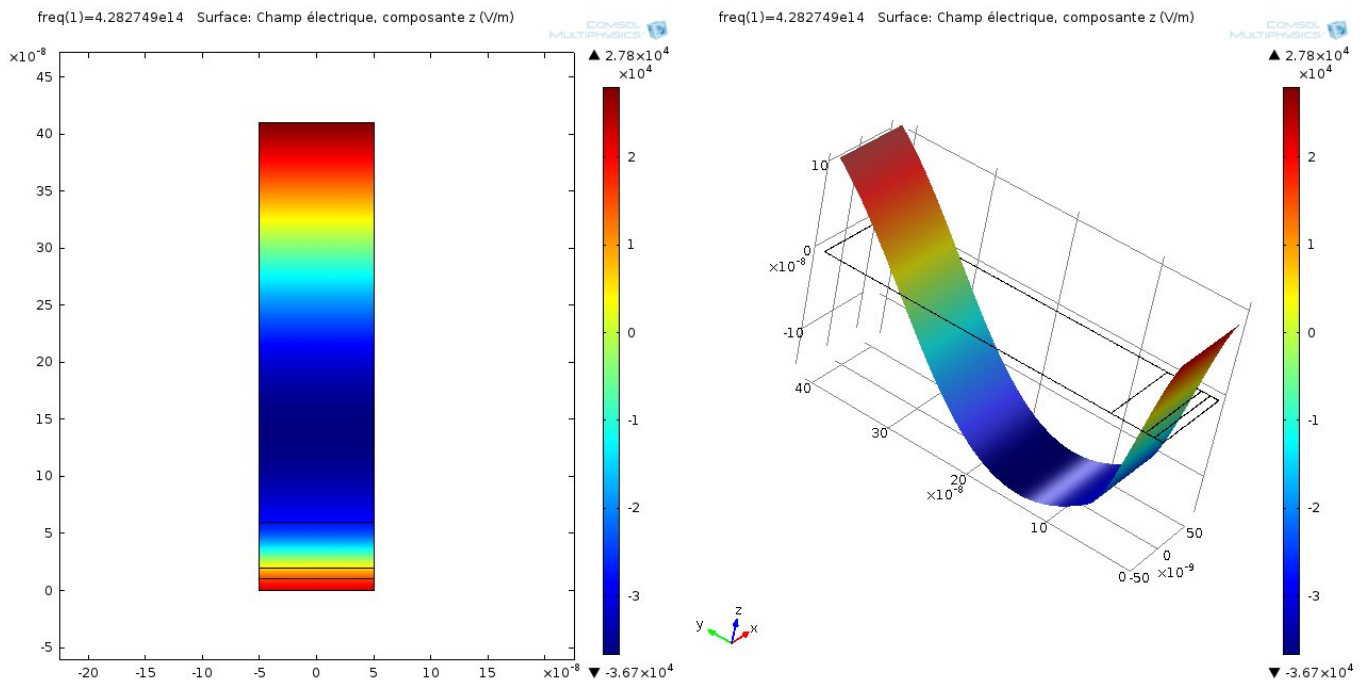


Figure III-4. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/40).

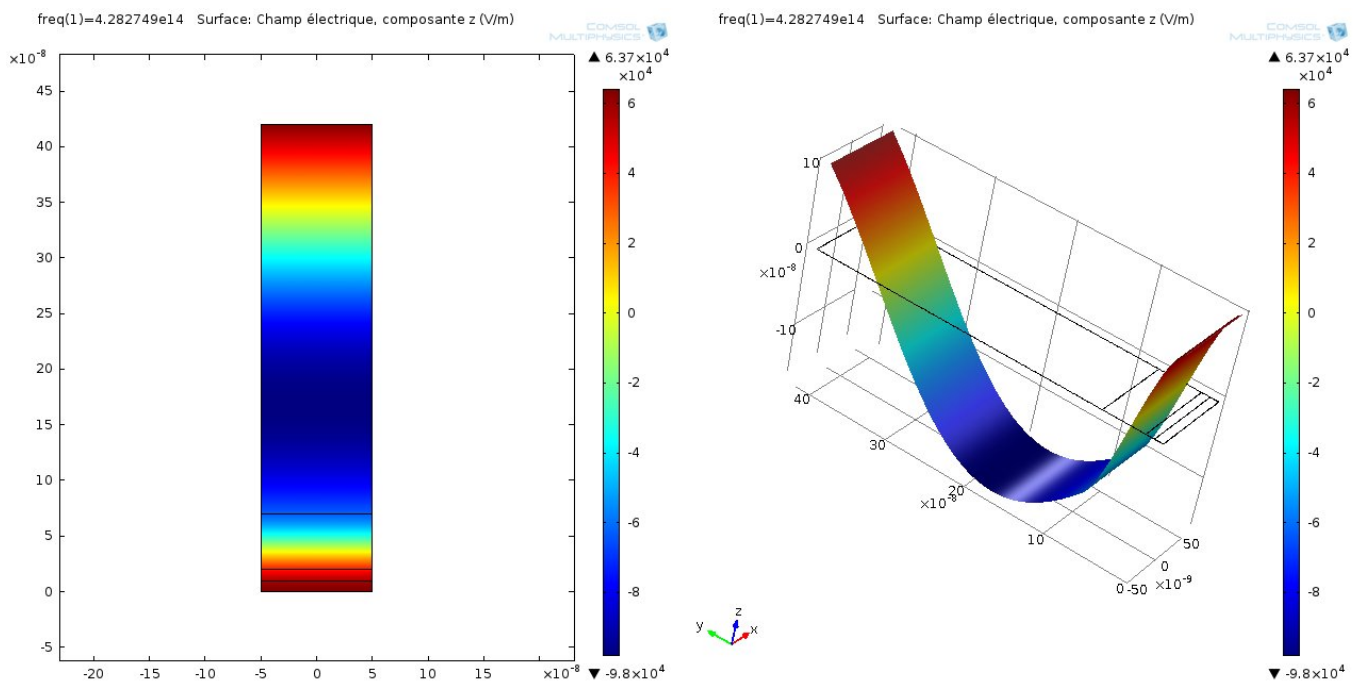


Figure III-5. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/50).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

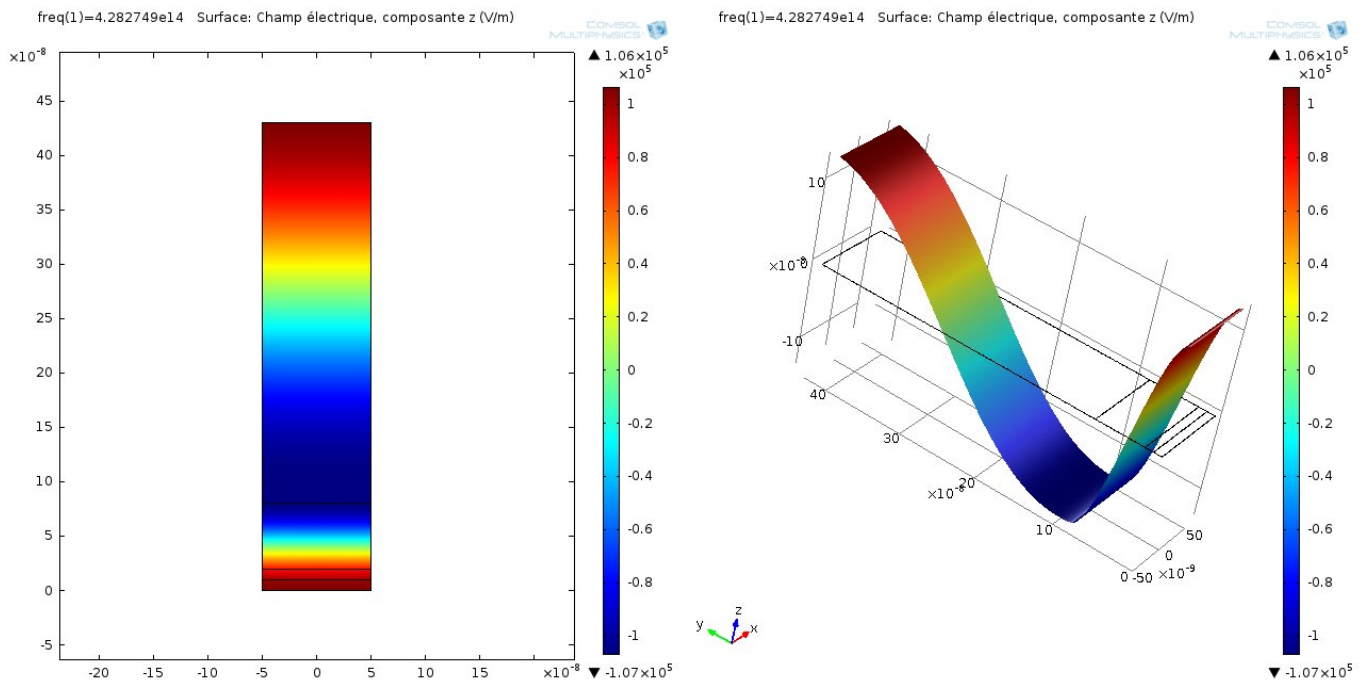


Figure III-6. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/60).

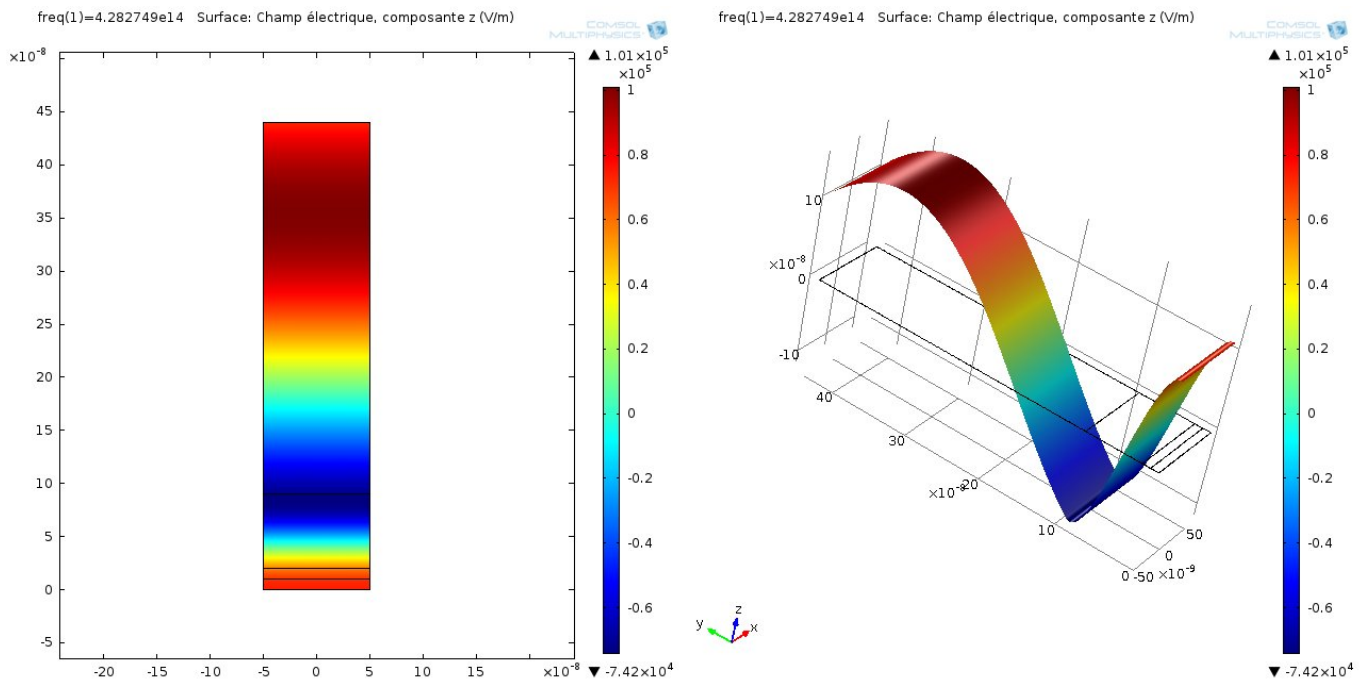


Figure III-7. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/70).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

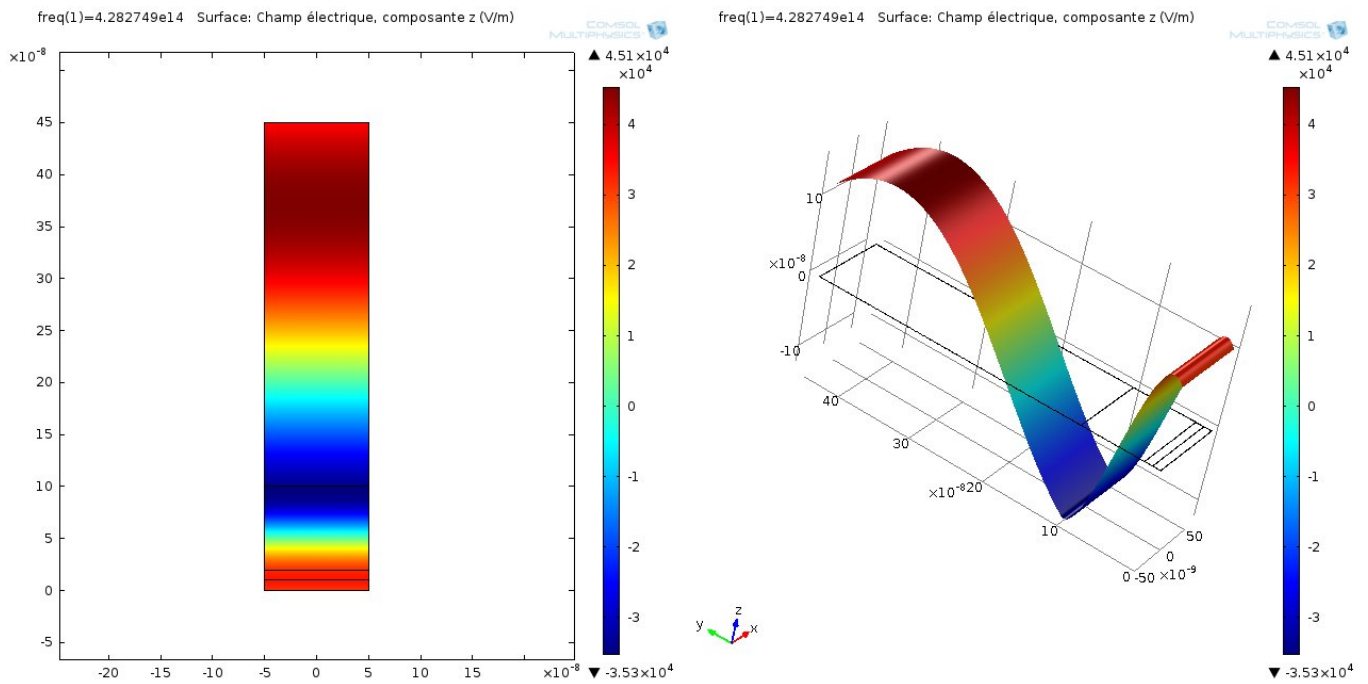


Figure III-8. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/80).

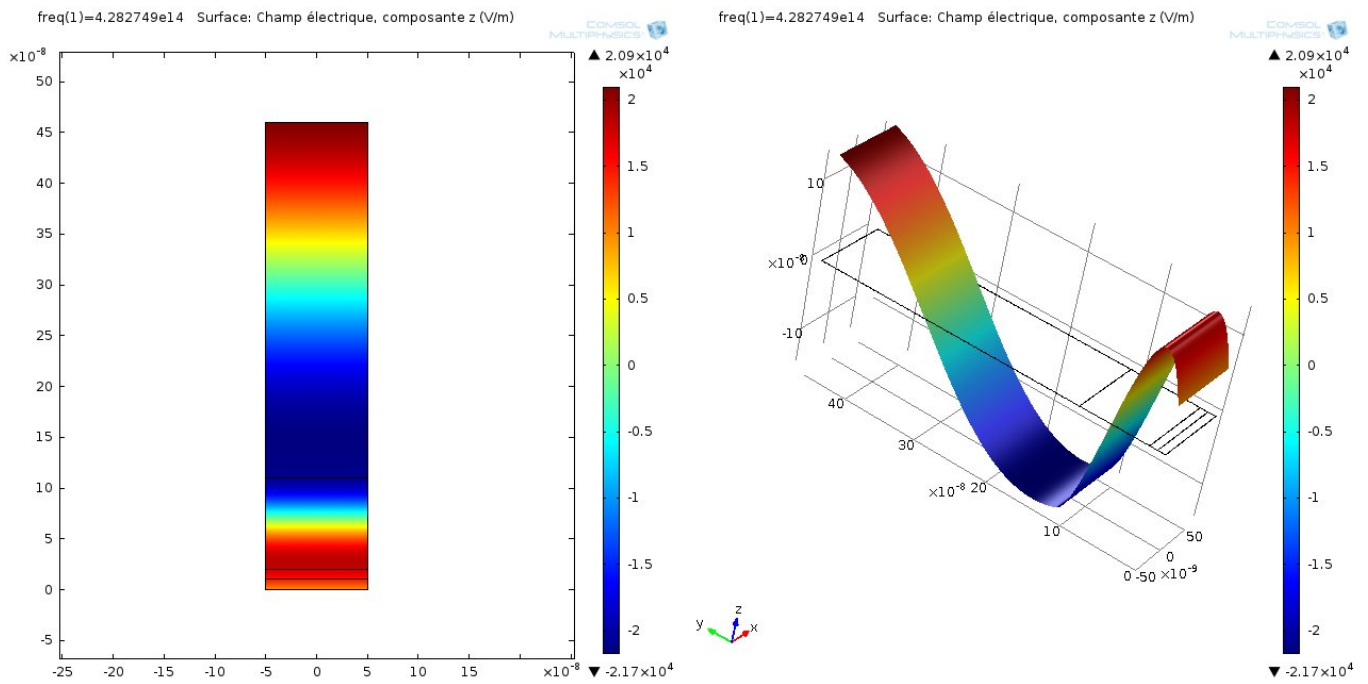


Figure III-9. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/90).

## Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

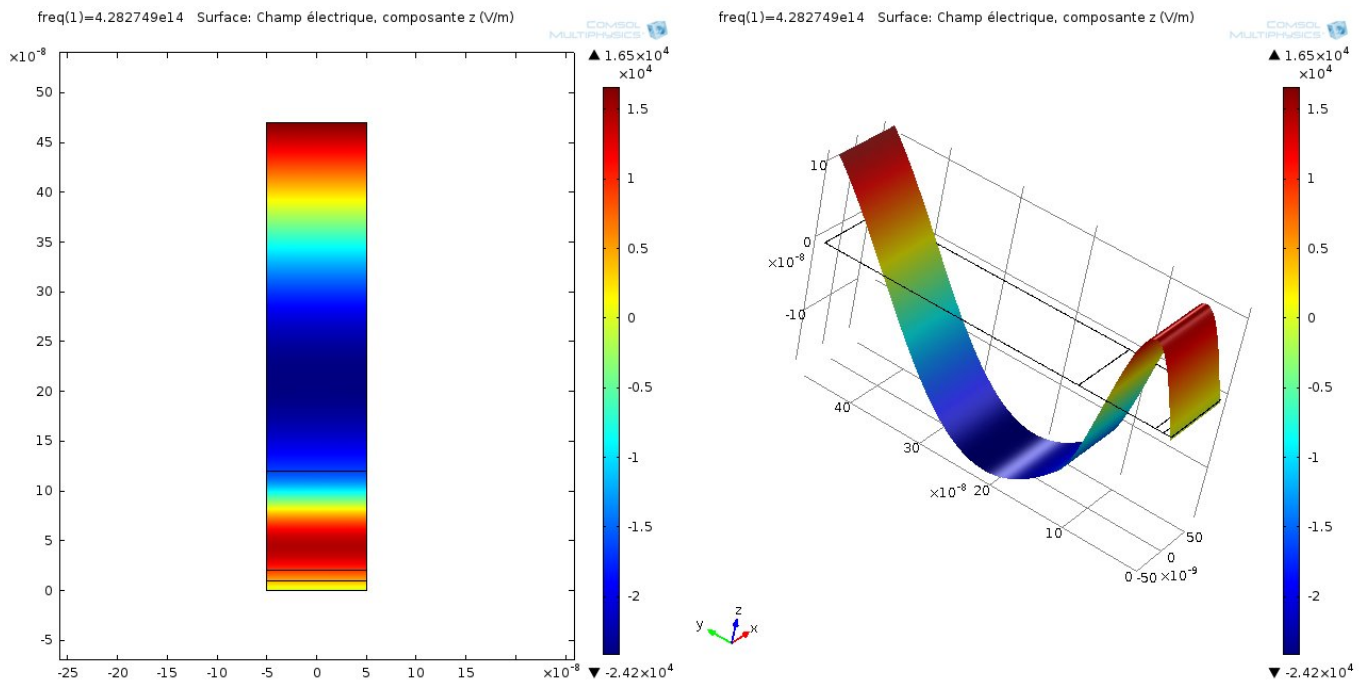


Figure III-10. Structure PIN: (P/I/N : 10/10/100).

En comparant les résultats obtenus en faisant varier l'épaisseur de la couche n ( $\epsilon_n$ ) nous avons remarqué que :

Le champ électromagnétique dans la ZCE est pratiquement nul pour les épaisseurs allant de 10 à 30 nm.

- Une légère répartition commence à apparaître à partir de  $\epsilon_n = 40$  nm.
- La meilleure distribution d'énergie est obtenu pour l'épaisseur  $\epsilon_n = 90$  nm.
- Au-delà d'une épaisseur  $\epsilon_n = 100$  on a une atténuation du champ électromagnétique dans la ZCE.

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

## b) Optimisation de la répartition de l'énergie en faisant varier l'épaisseur de la couche p

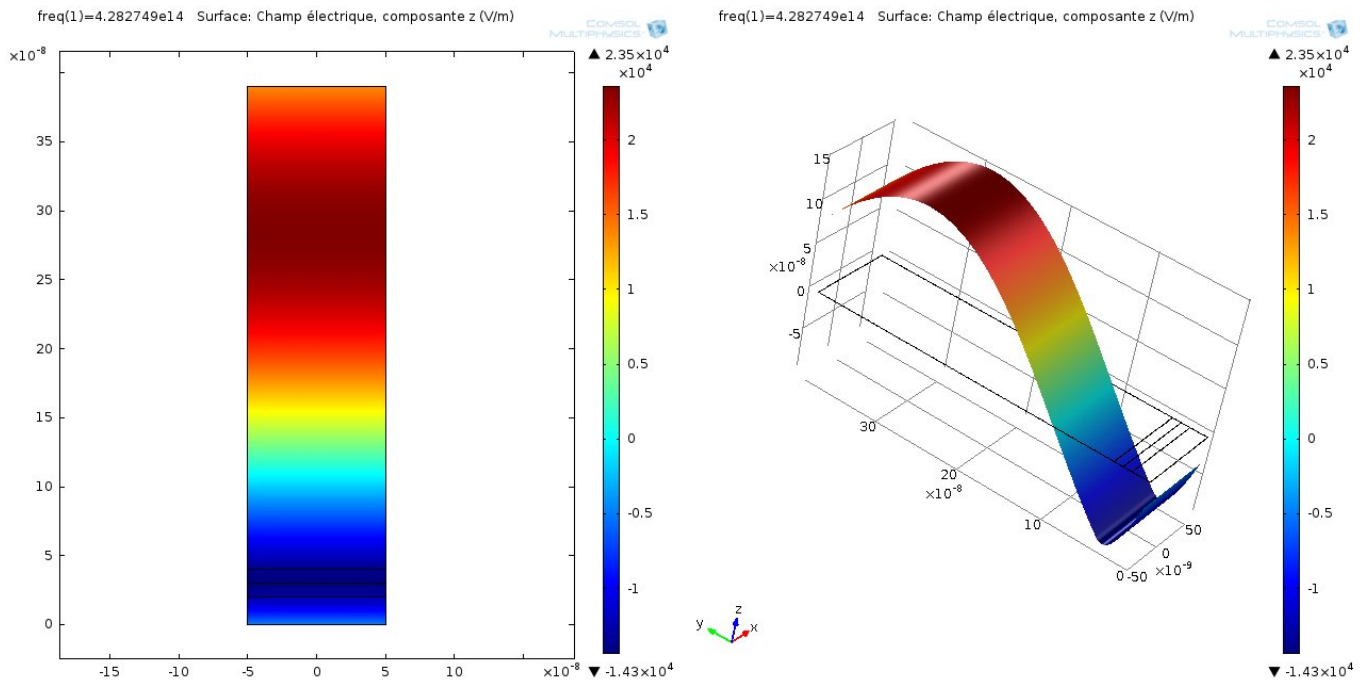


Figure III-11. Structure PIN: (P/I/N : 20/10/10).

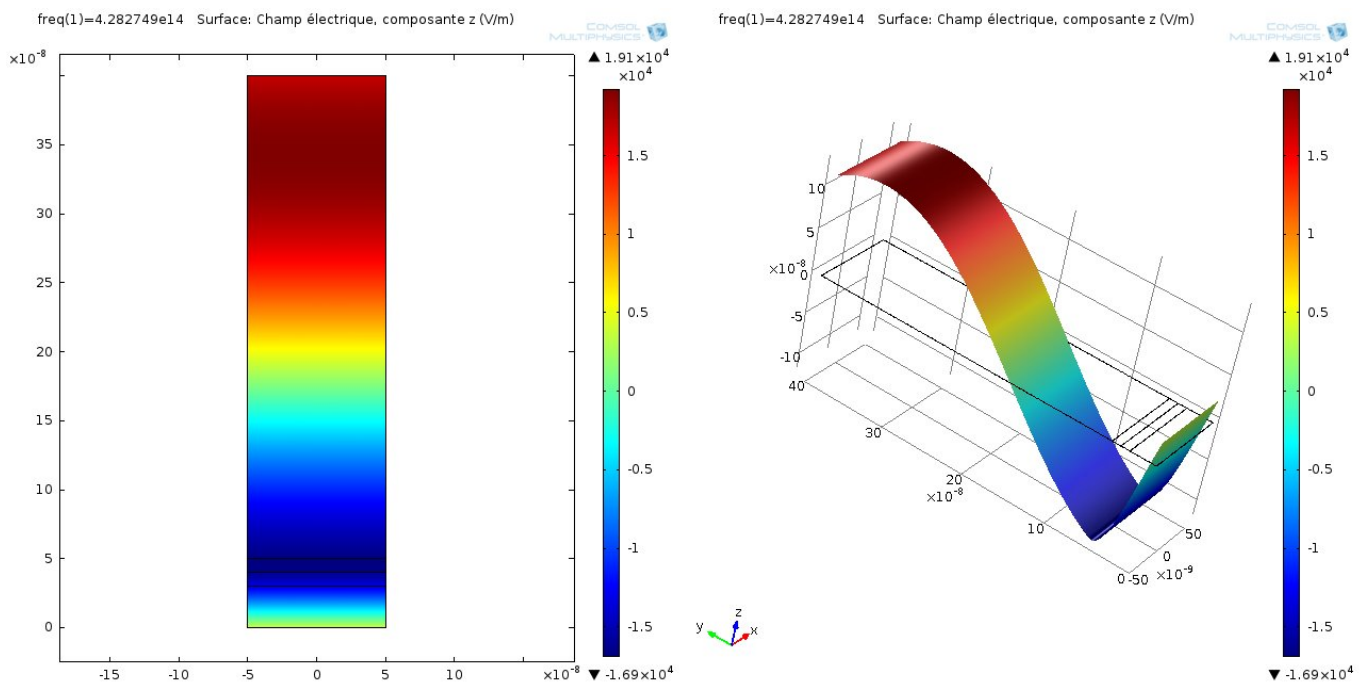


Figure III-12. Structure PIN: (P/I/N : 30/10/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

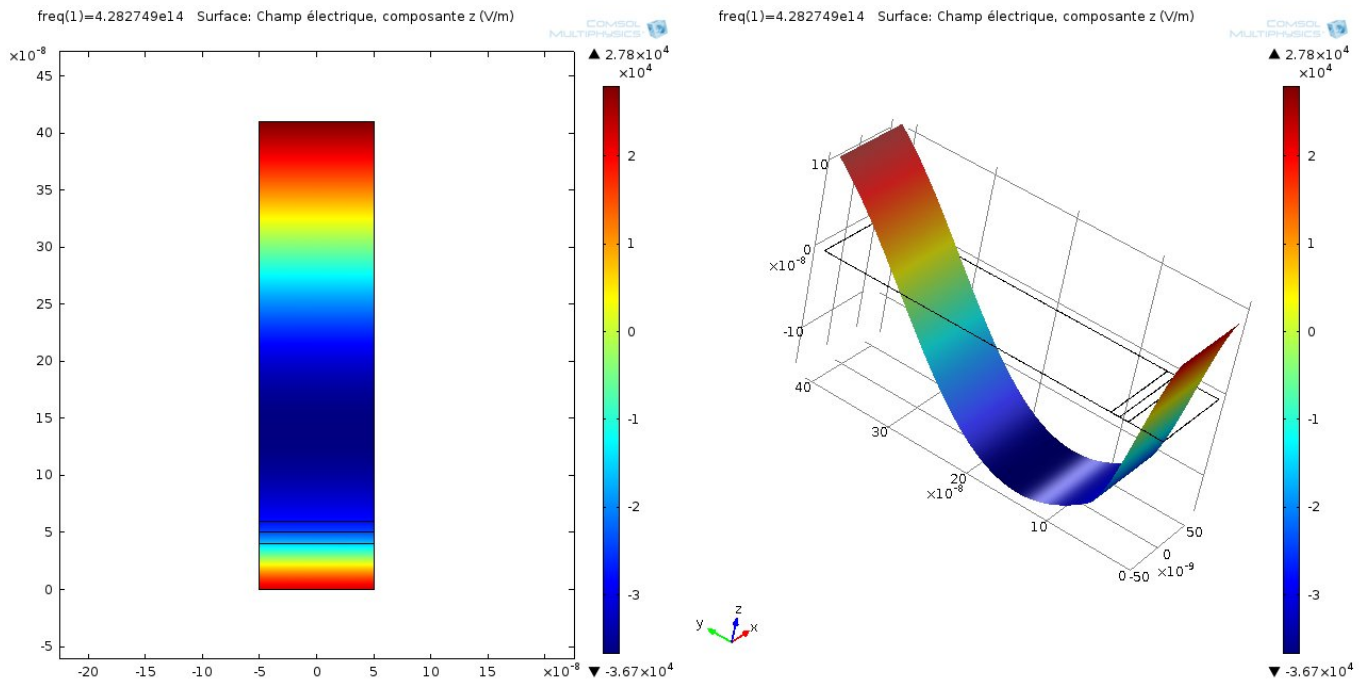


Figure III-13. Structure PIN: (P/I/N : 40/10/10).

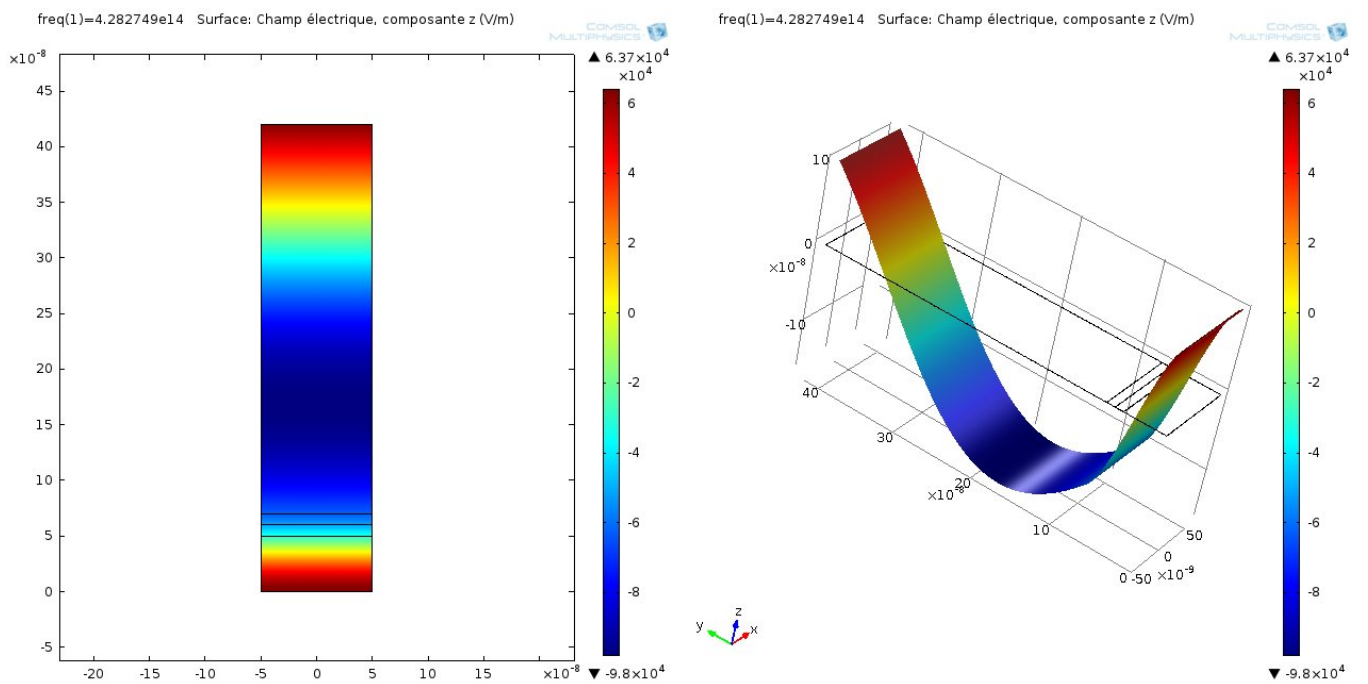


Figure III-14. Structure PIN: (P/I/N : 50/10/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

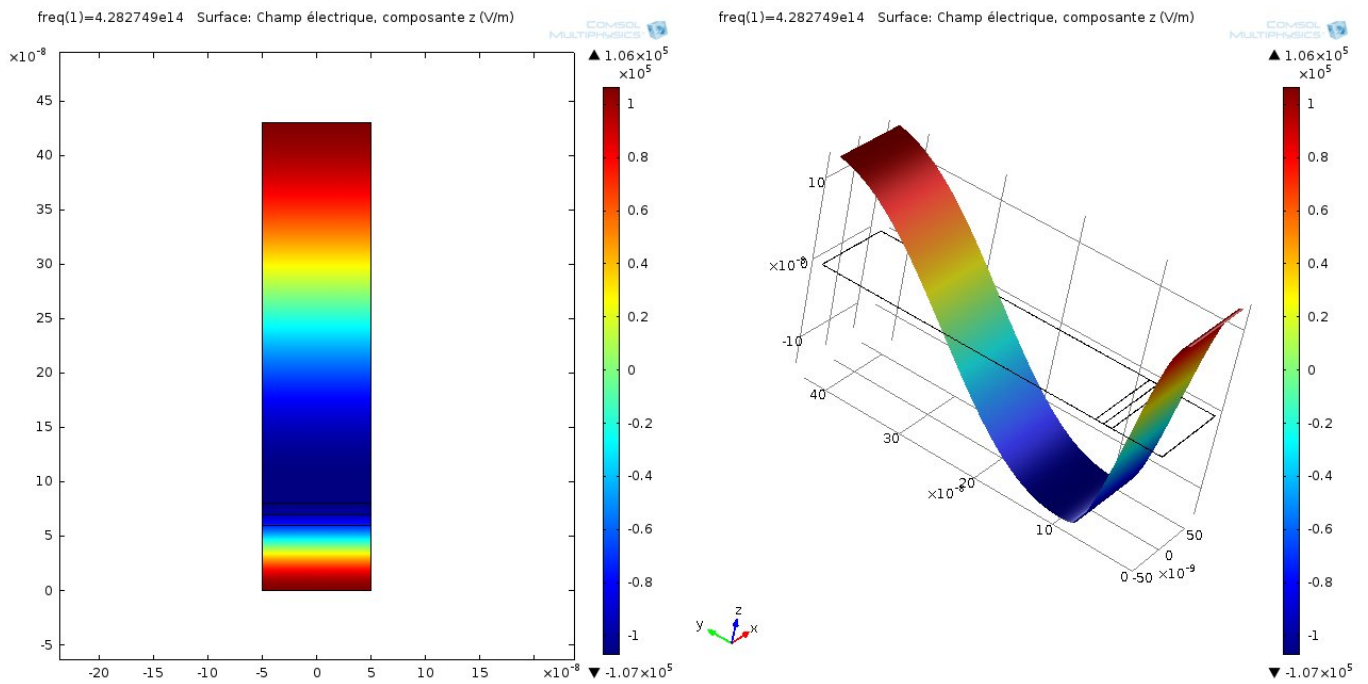


Figure III-15. Structure PIN: (P/I/N : 60/10/10).

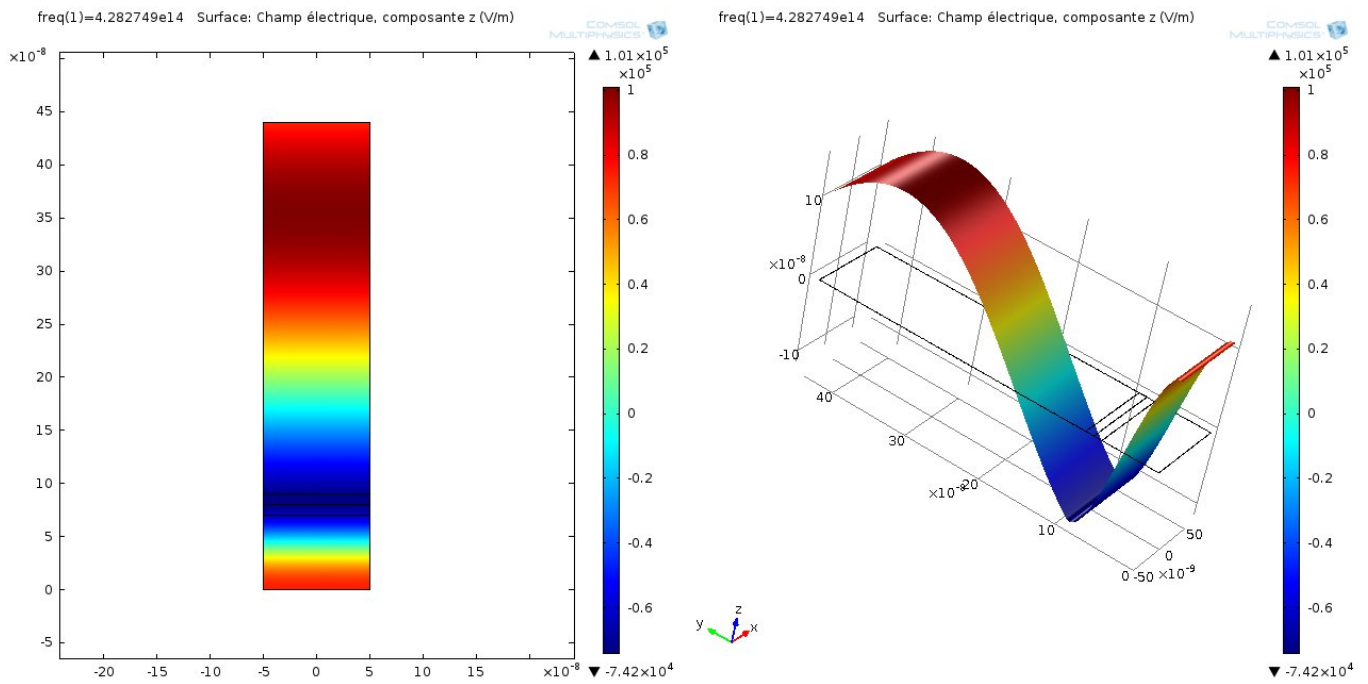


Figure III-16. Structure PIN: (P/I/N : 70/10/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

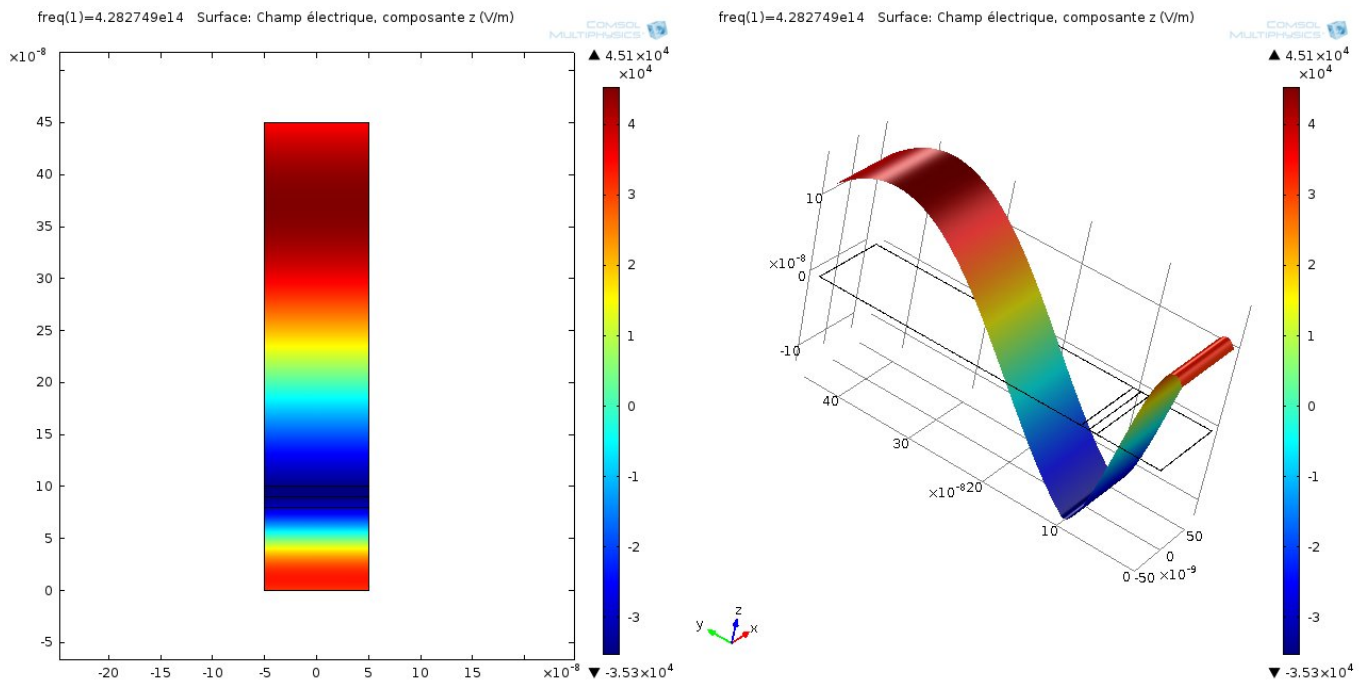


Figure III-17. Structure PIN: (P/I/N : 80/10/10).

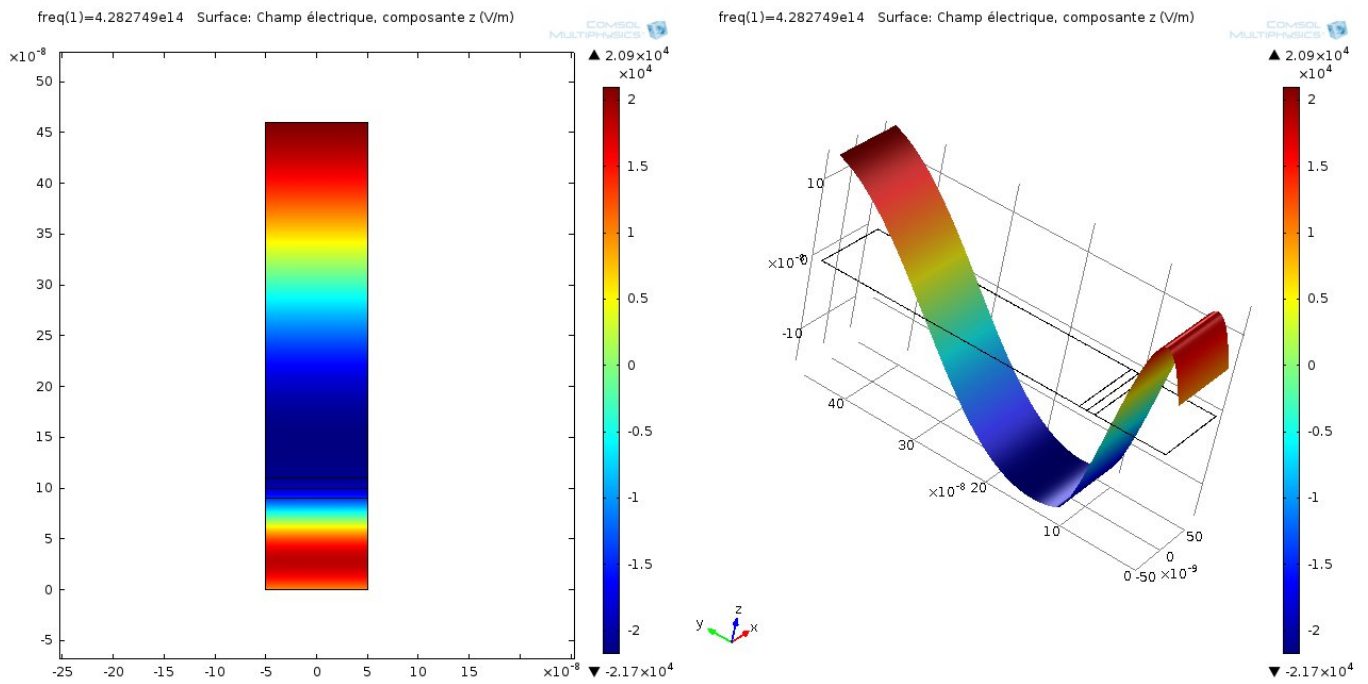


Figure III-18. Structure PIN: (P/I/N : 90/10/10).

## Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

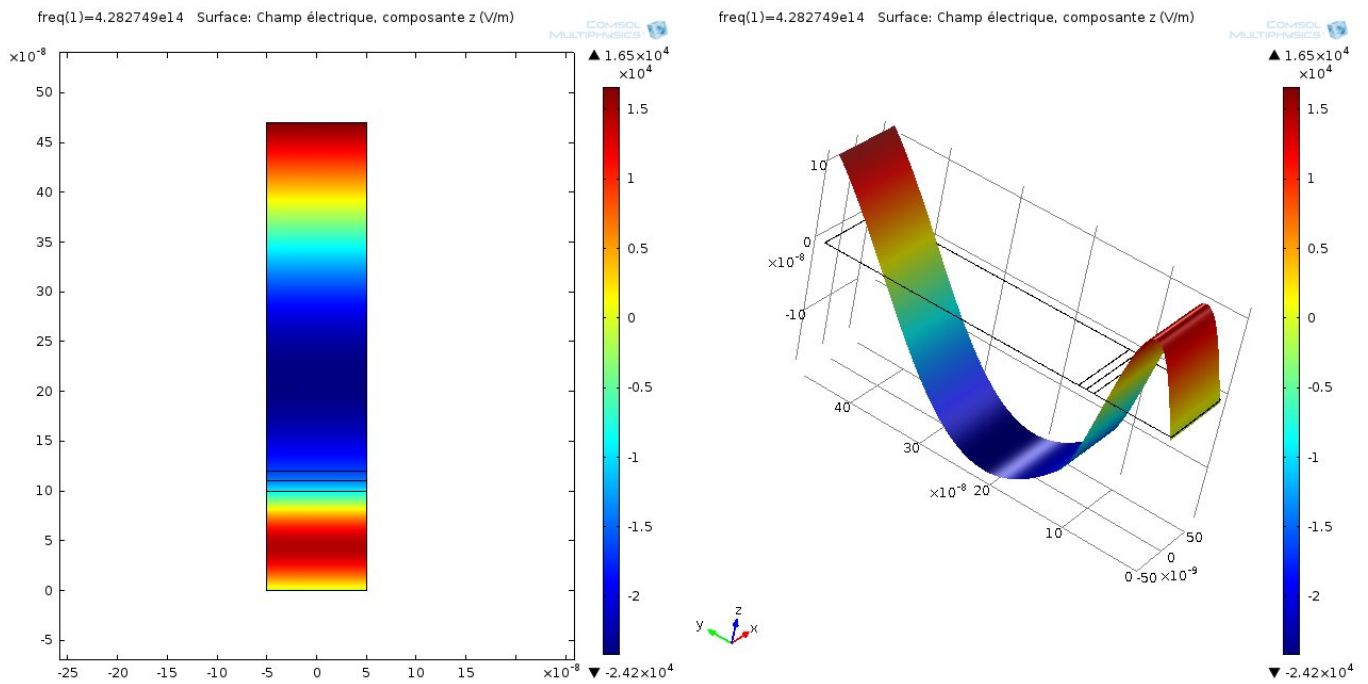


Figure III-19. Structure PIN: (P/I/N : 100/10/10).

En faisant varier l'épaisseur de la couche p ( $e_p$ ), nous avons constaté que les meilleures amplitudes du champ électromagnétique dans la ZCE sont obtenues pour les épaisseurs :

$$e_p = 40 \text{ nm ;}$$

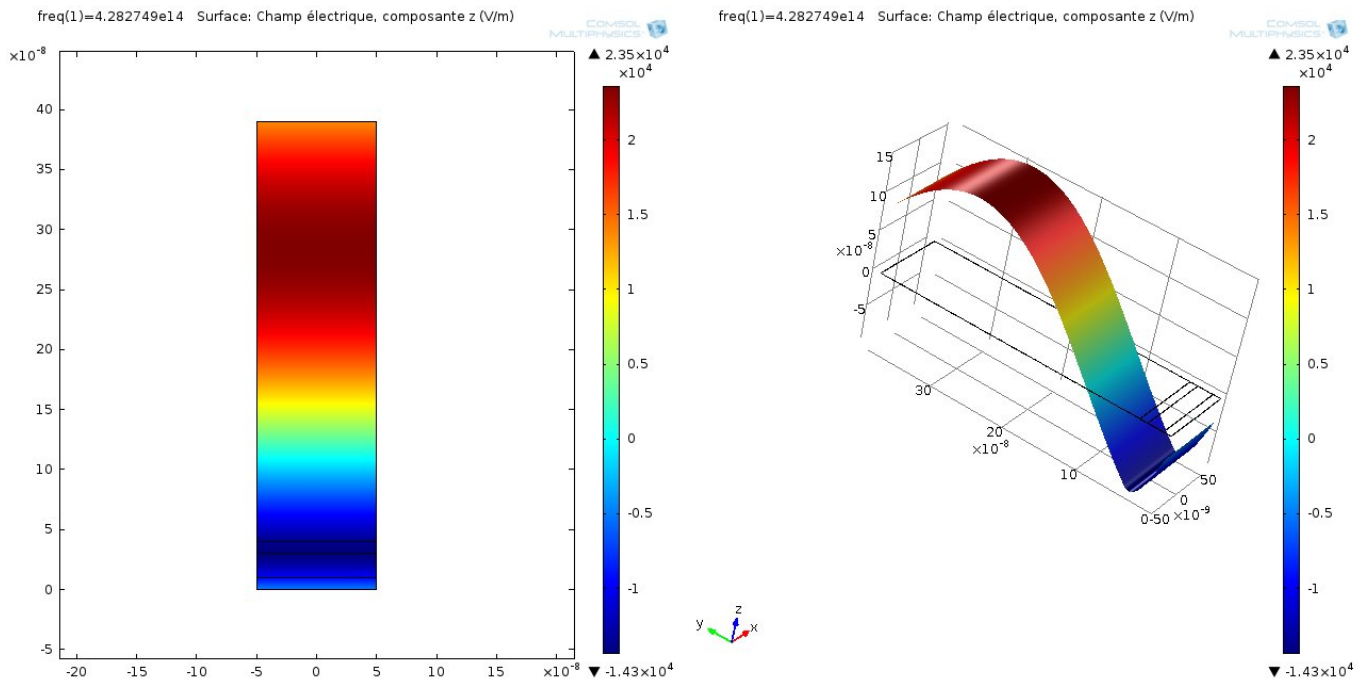
$$e_p = 50 \text{ nm ;}$$

$$e_p = 60 \text{ nm ;}$$

$$e_p = 100 \text{ nm.}$$

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

## c) Optimisation de la répartition de l'énergie en faisant varier l'épaisseur de la couche i



popout

Figure III-20. Structure PIN: (P/I/N : 10/20/10).

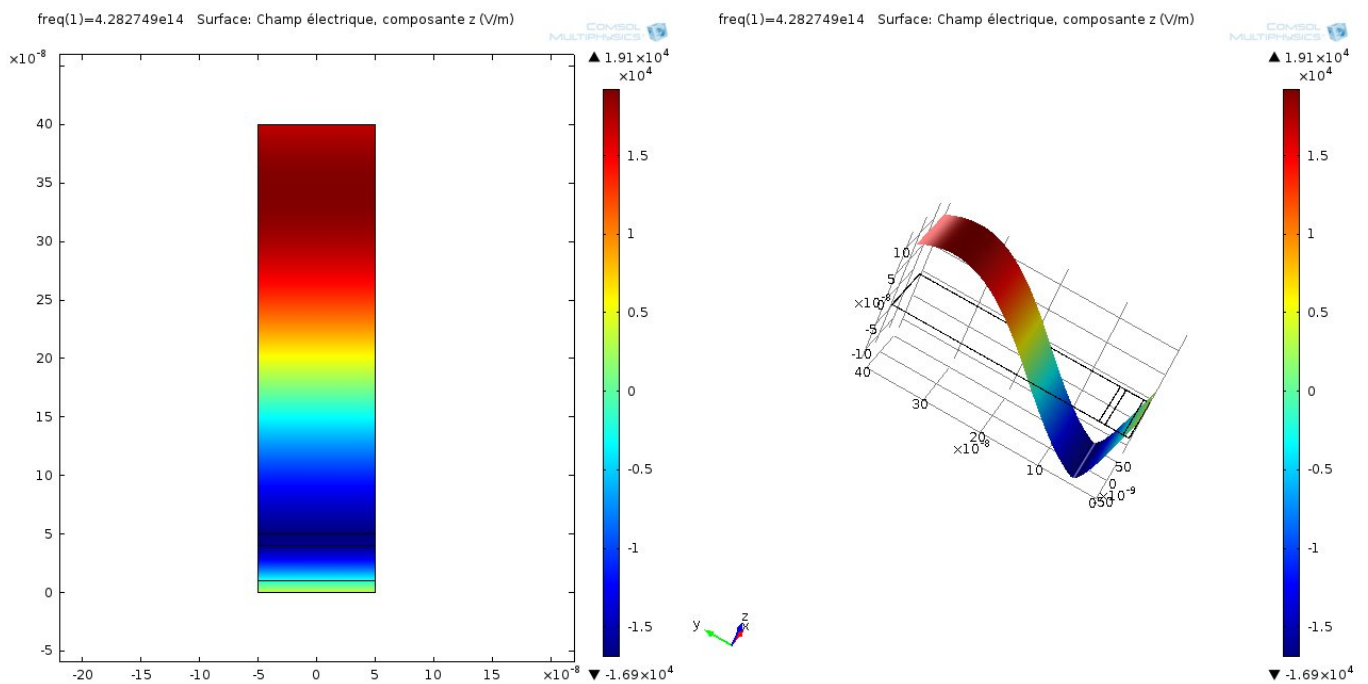


Figure III-21. Structure PIN: (P/I/N : 10/30/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

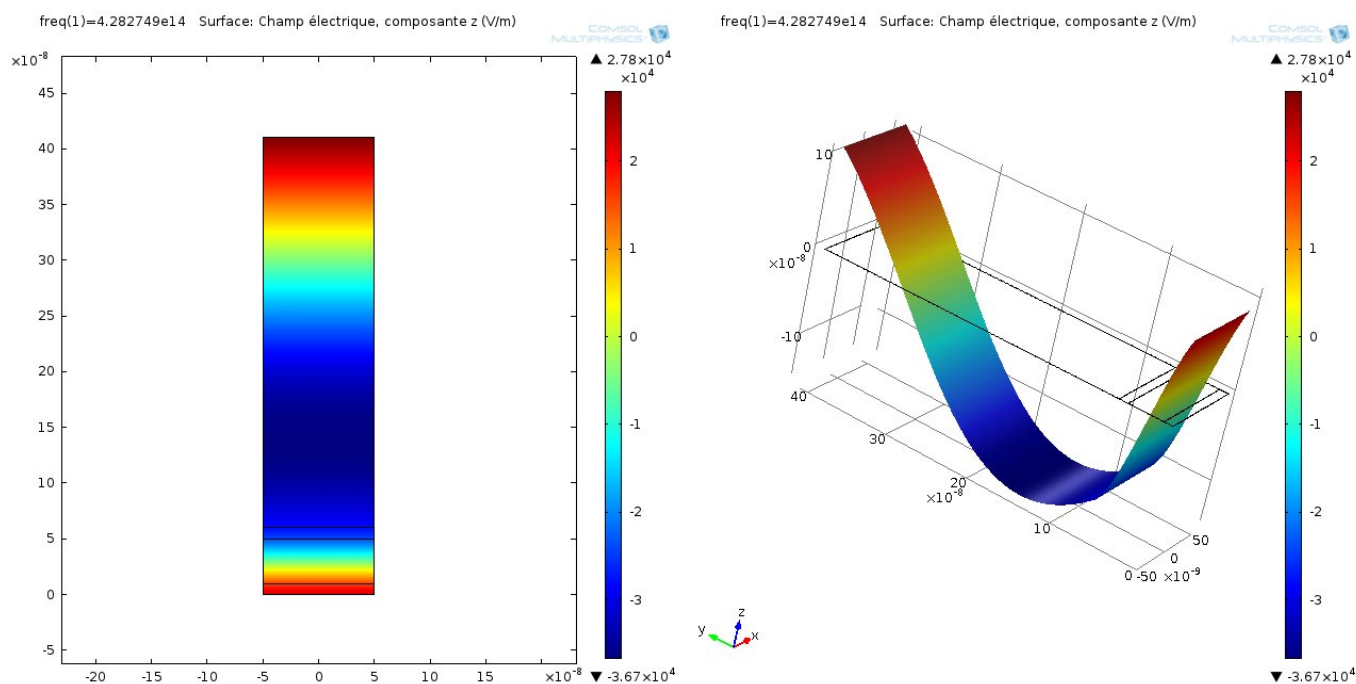


Figure III-22. Structure PIN: (P/I/N : 10/40/10).

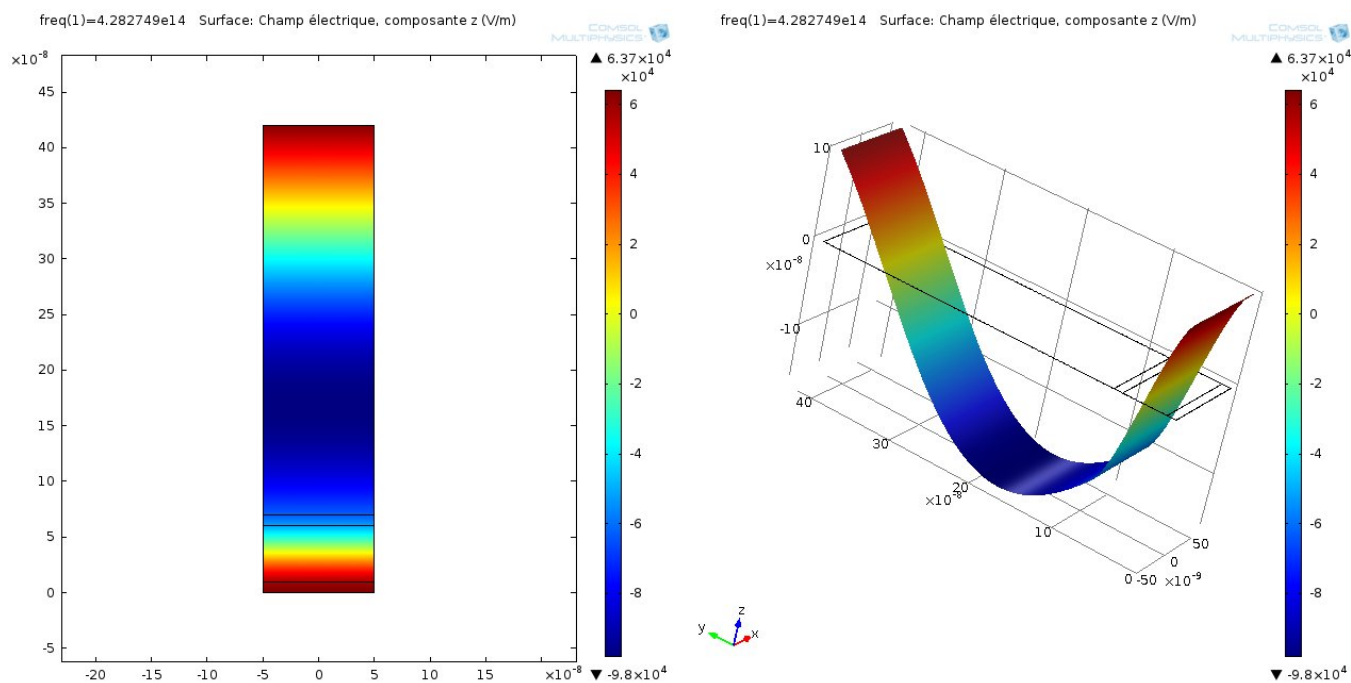


Figure III-23. Structure PIN: (P/I/N : 10/50/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

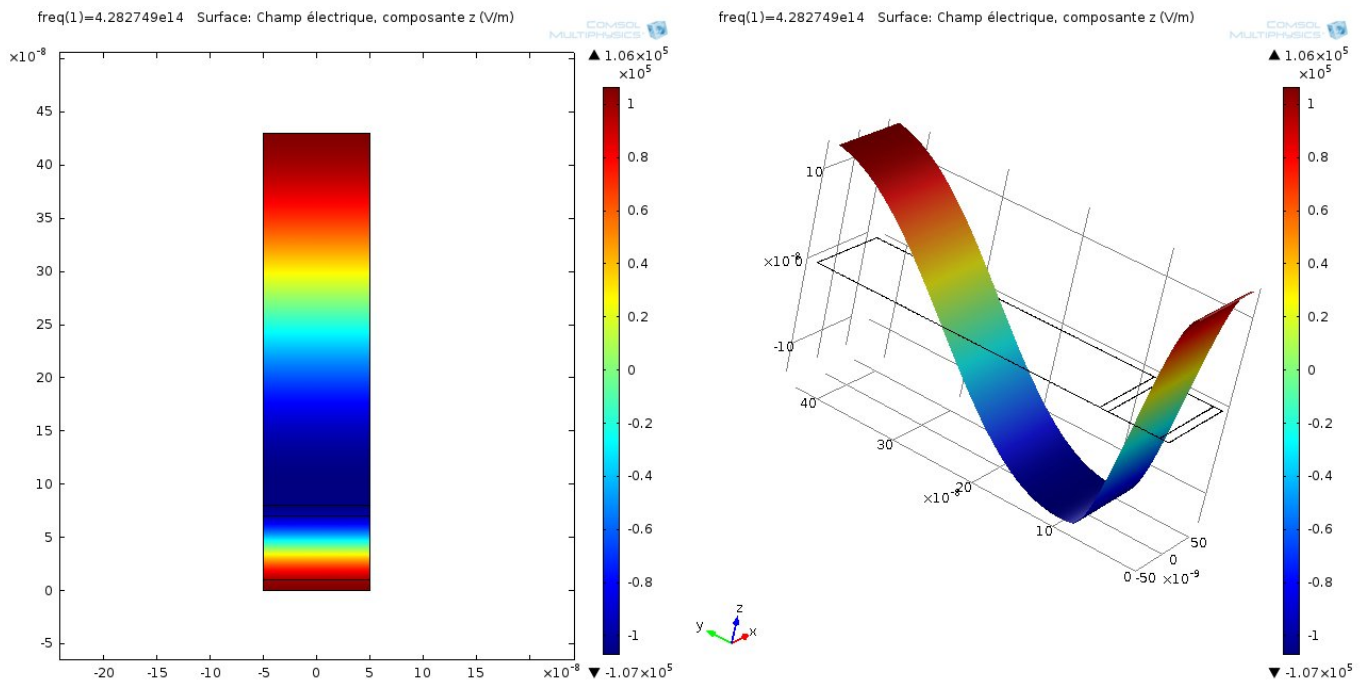


Figure III-24. Structure PIN: (P/I/N : 10/60/10).

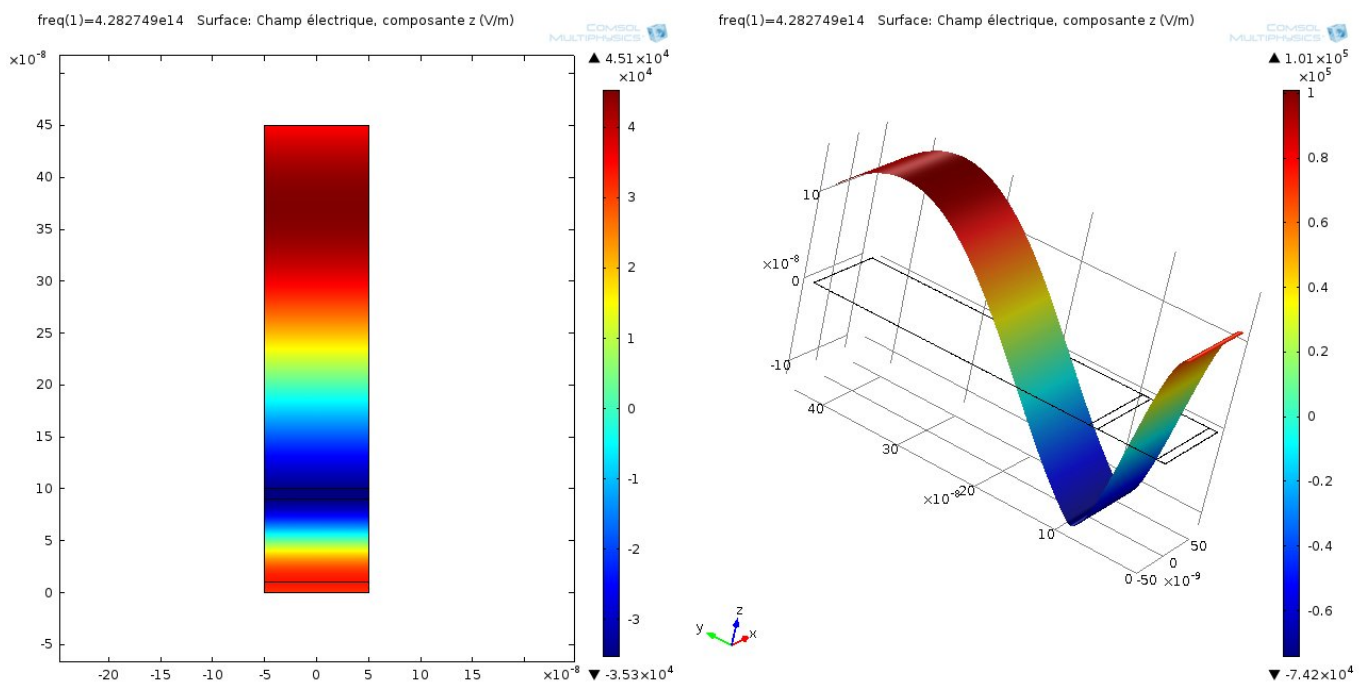


Figure III-25. Structure PIN: (P/I/N : 10/70/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

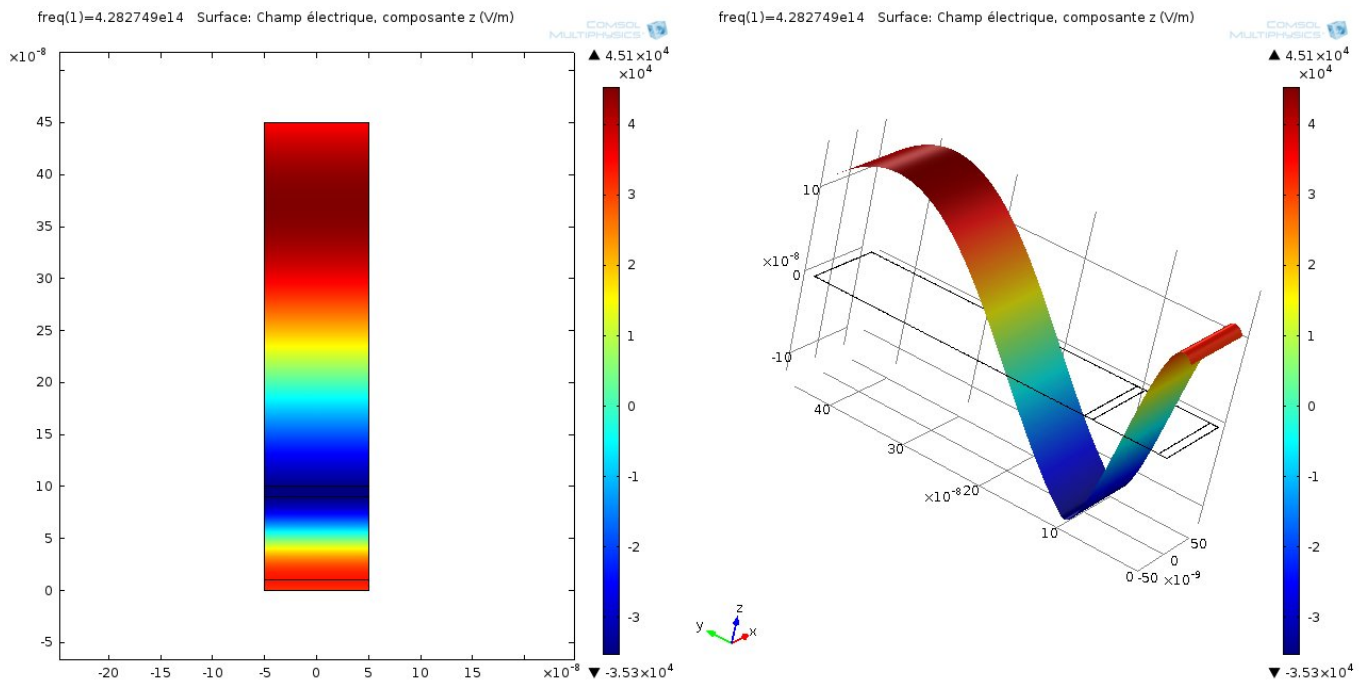


Figure III-26. Structure PIN: (P/I/N : 10/80/10).

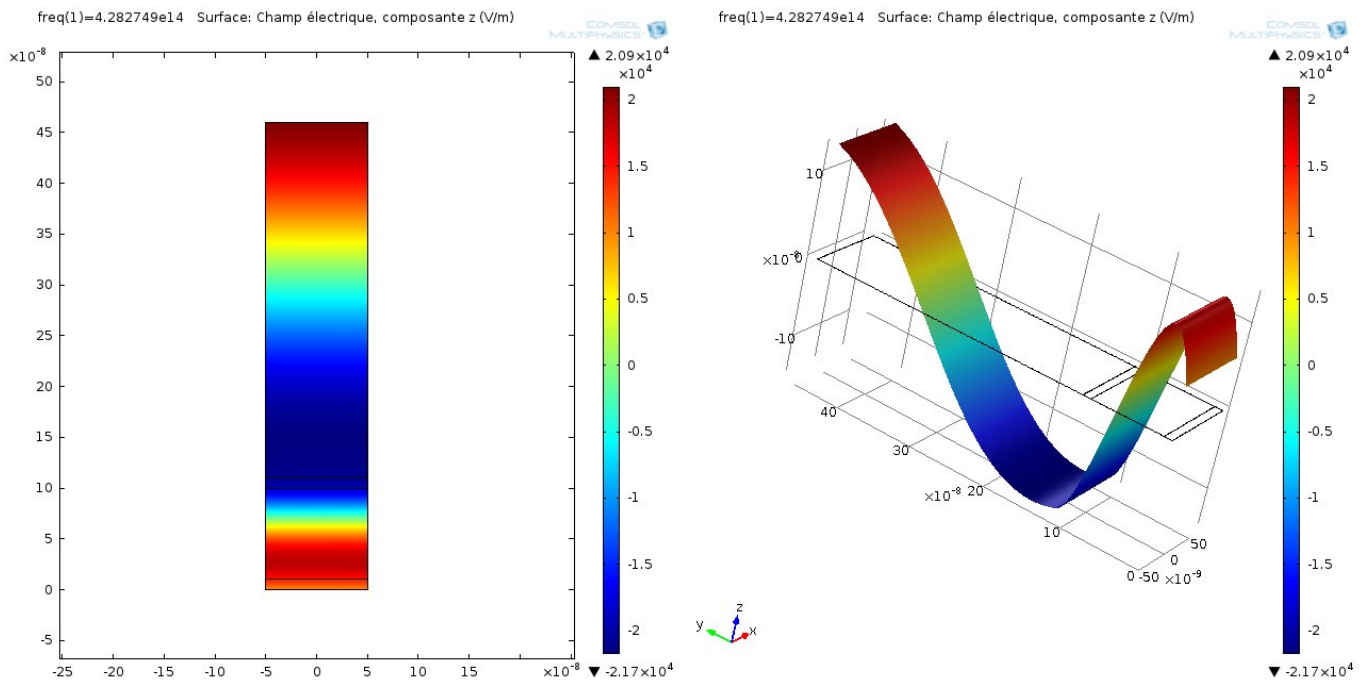


Figure III-27. Structure PIN: (P/I/N : 10/90/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

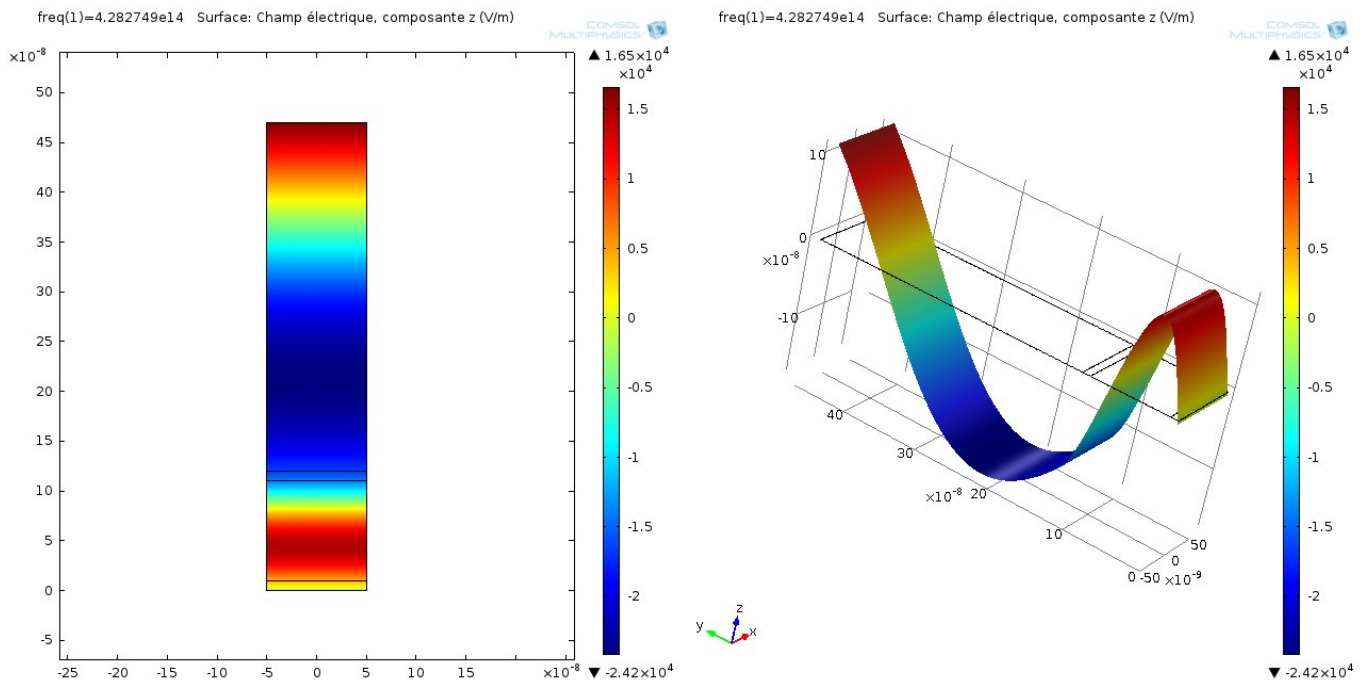


Figure III-28. Structure PIN: (P/I/N : 10/100/10).

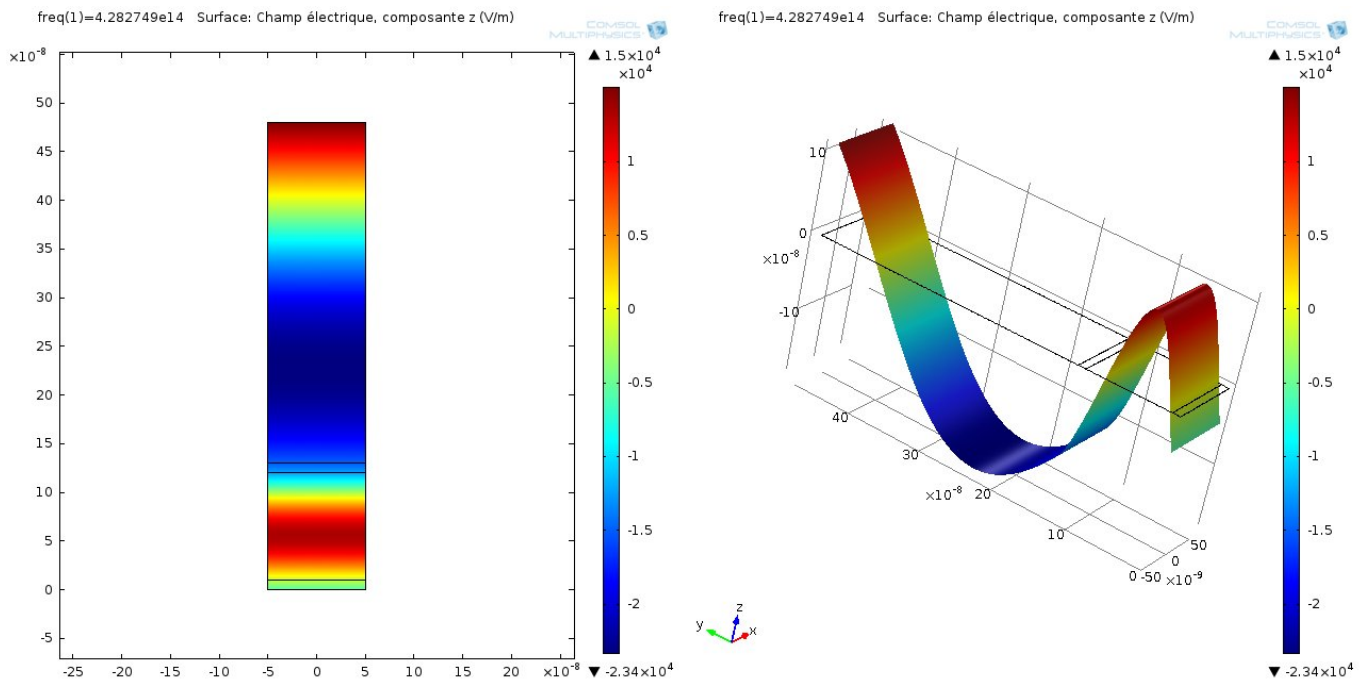


Figure III-29. Structure PIN: (P/I/N : 10/110/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

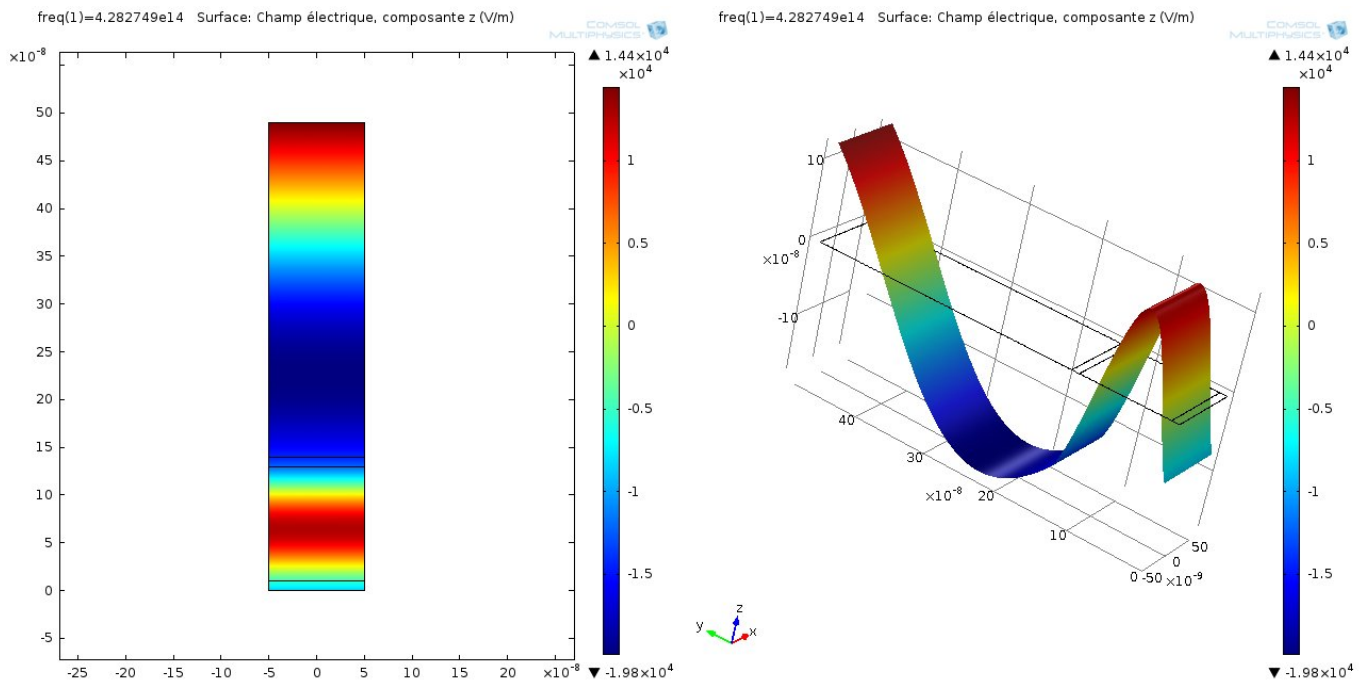


Figure III-30. Structure PIN: (P/I/N : 10/120/10).

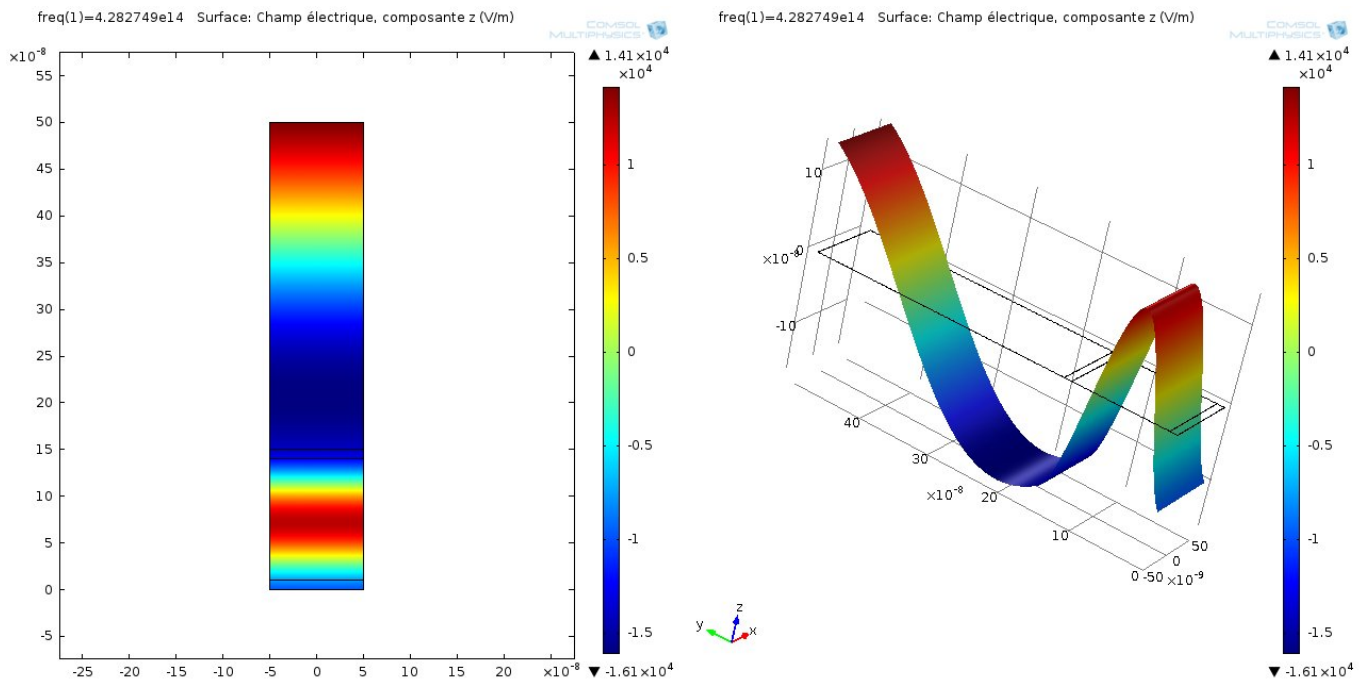


Figure III-31. Structure PIN: (P/I/N : 10/130/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

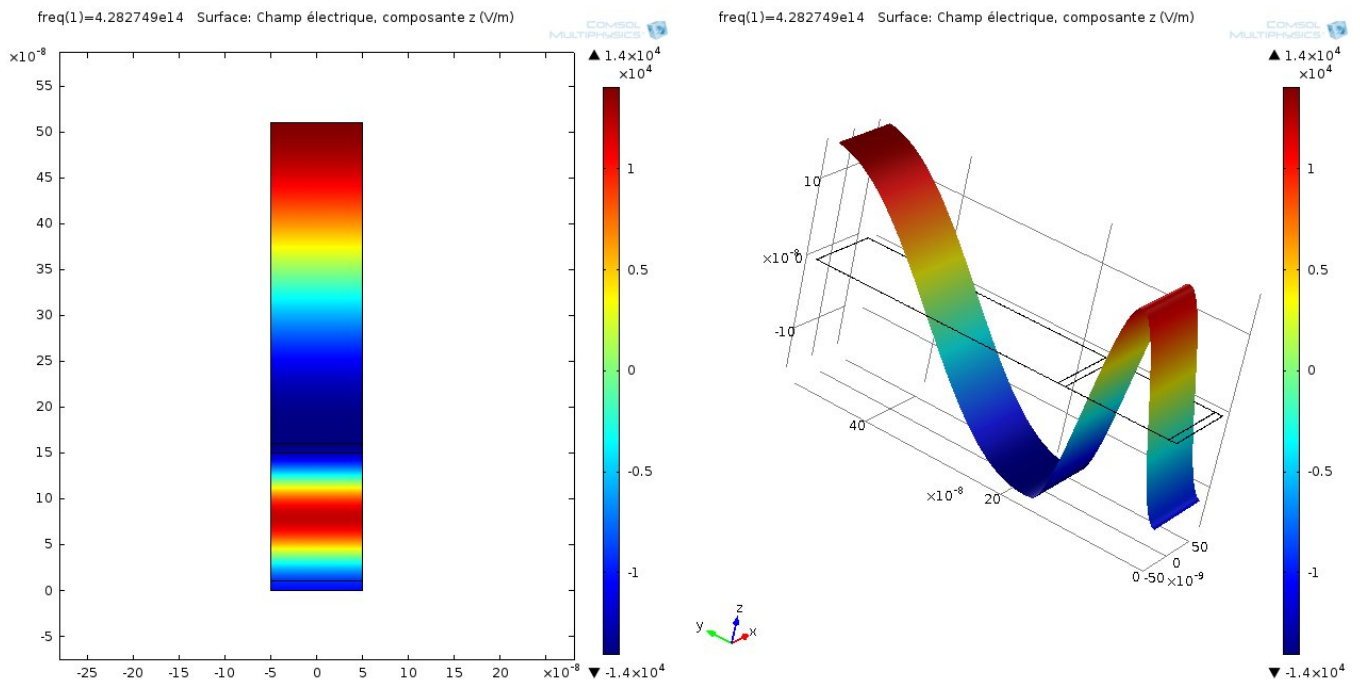


Figure III-32. Structure PIN: (P/I/N : 10/140/10).

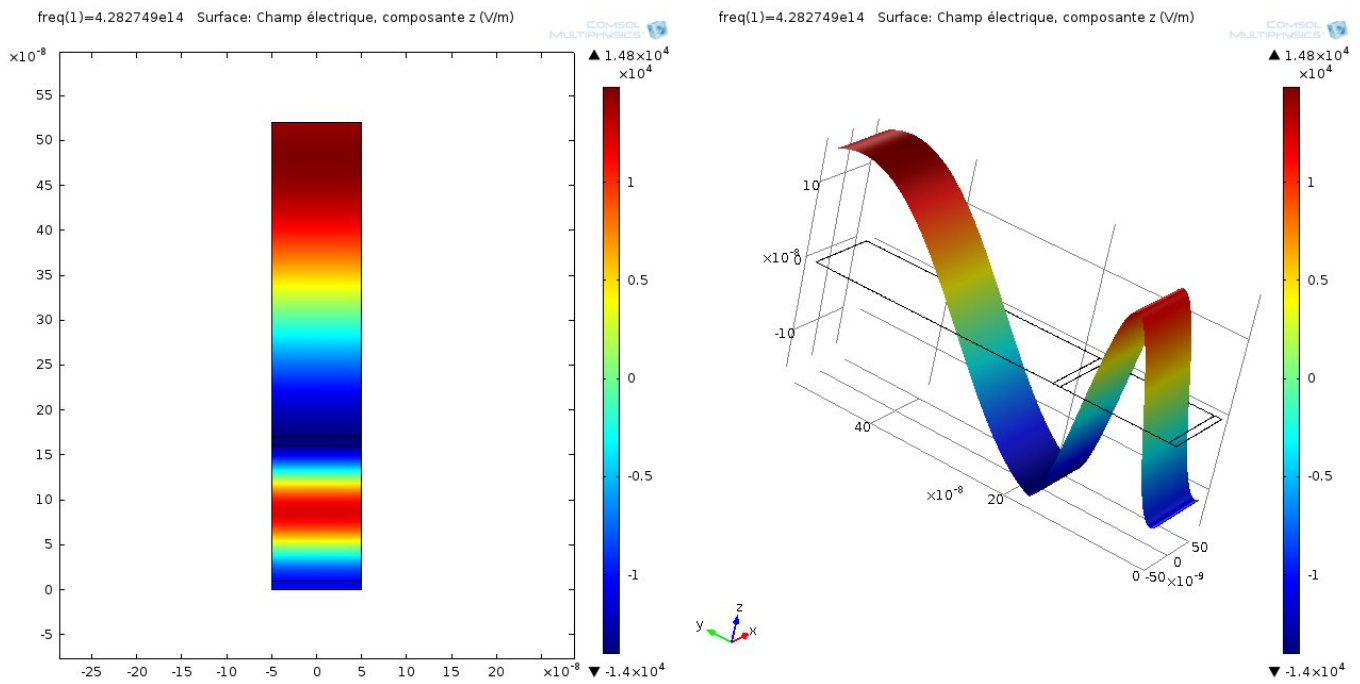


Figure III-33. Structure PIN: (P/I/N : 10/150/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

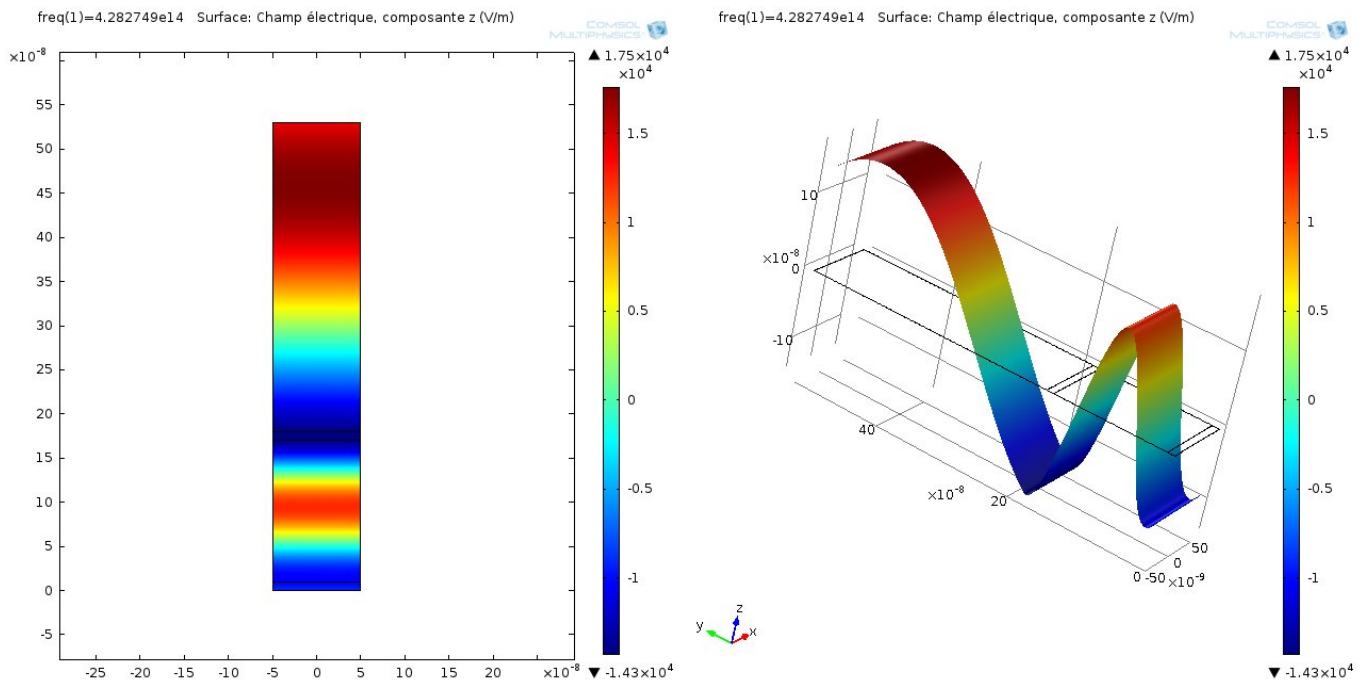


Figure III-34. Structure PIN: (P/I/N : 10/160/10).

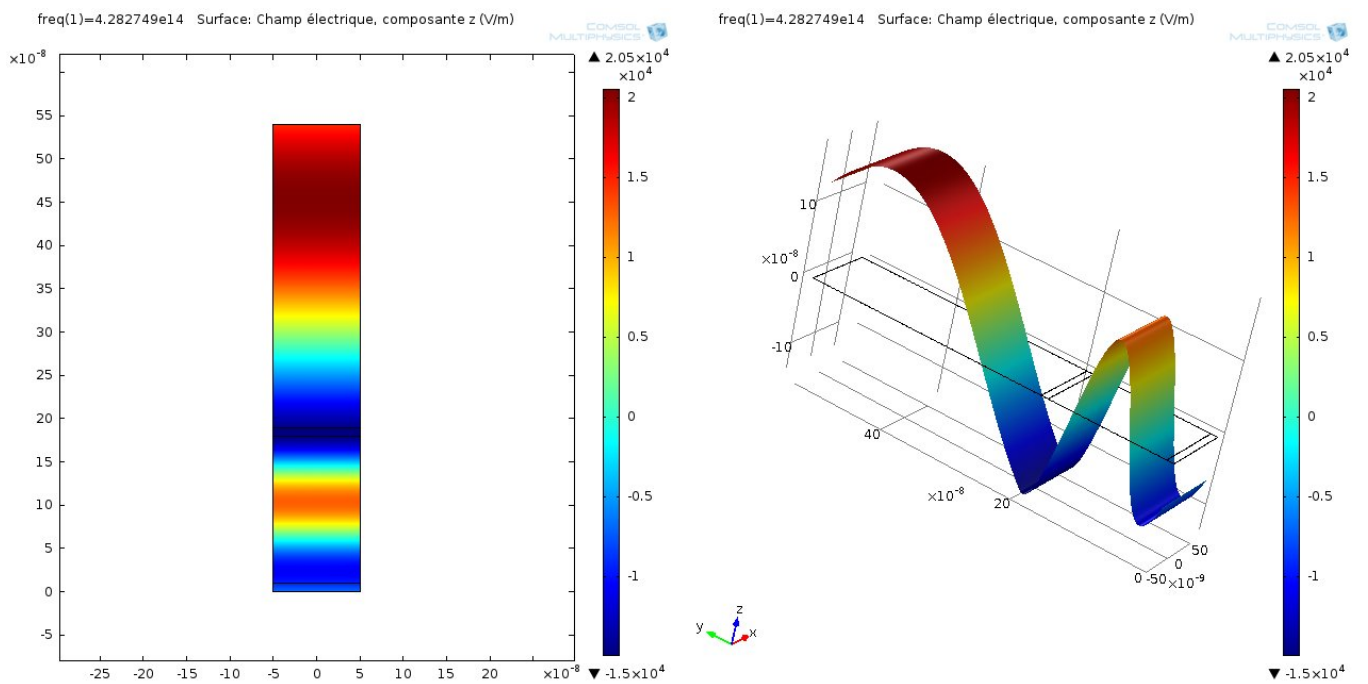


Figure III-35. Structure PIN: (P/I/N : 10/170/10).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

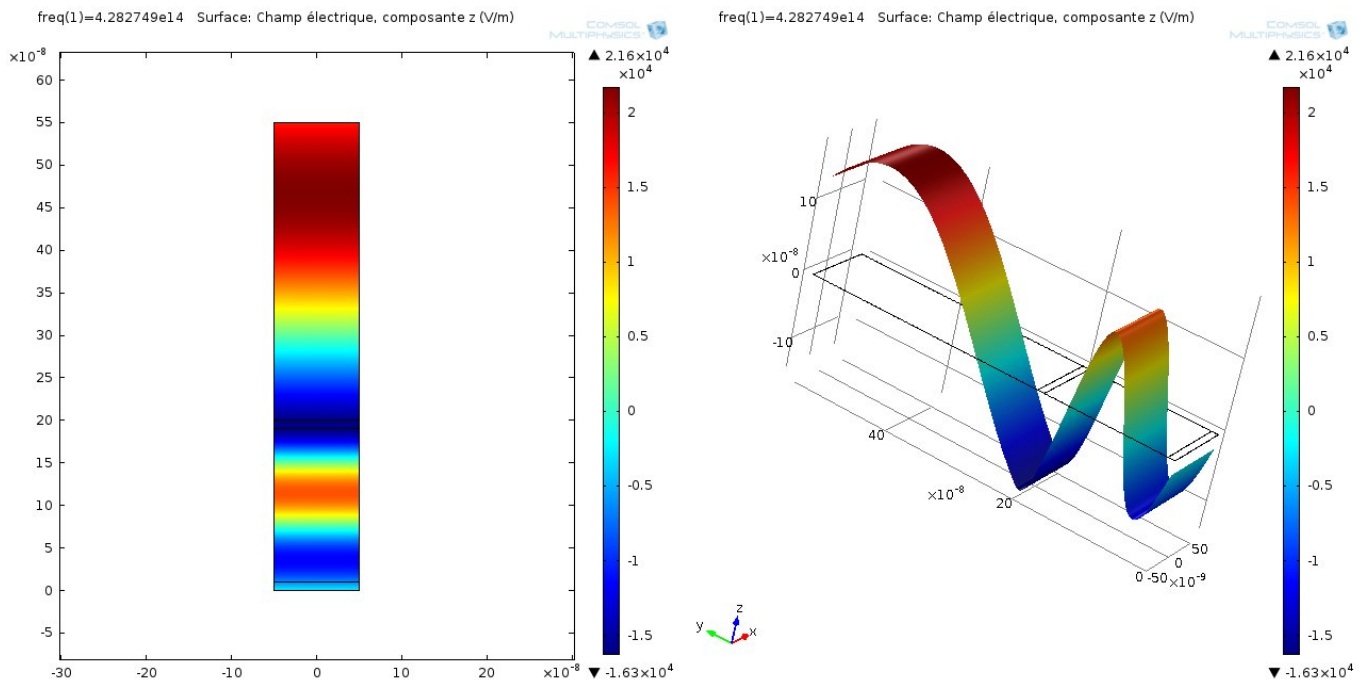


Figure III-36. Structure PIN: (P/I/N : 10/180/10).

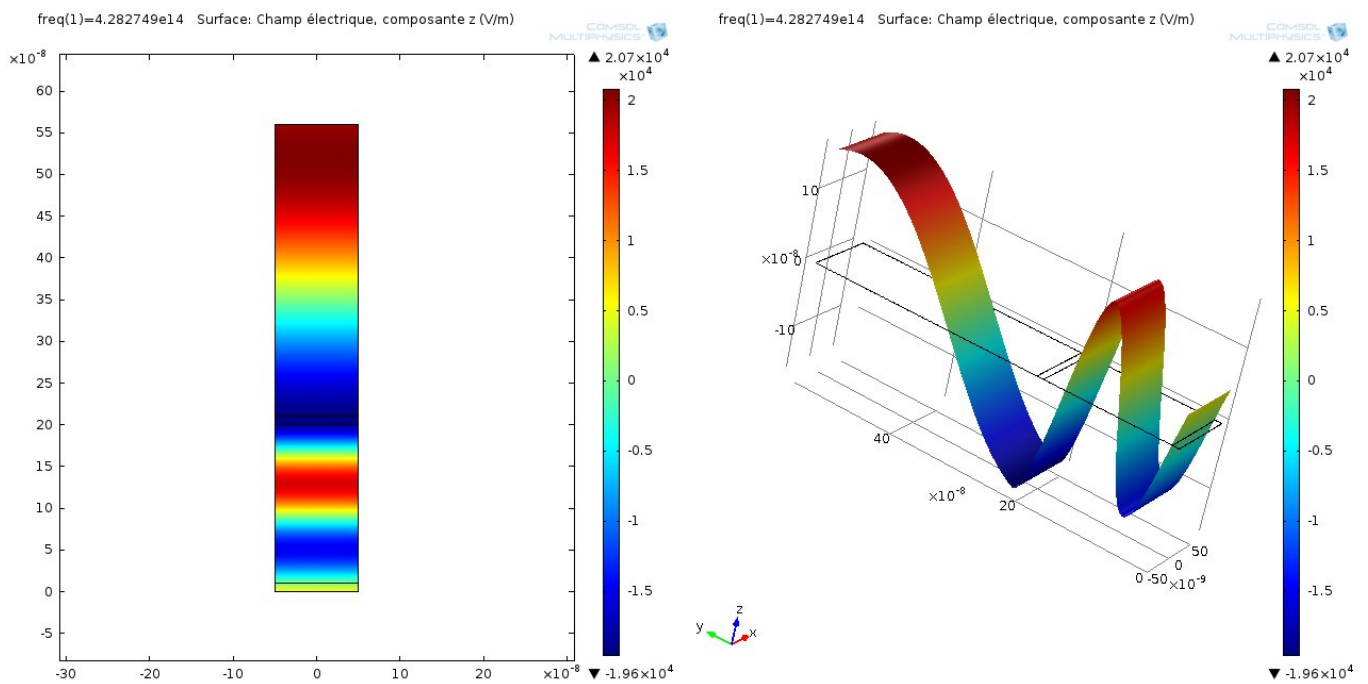


Figure III-37. Structure PIN: (P/I/N : 10/190/10).

## Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

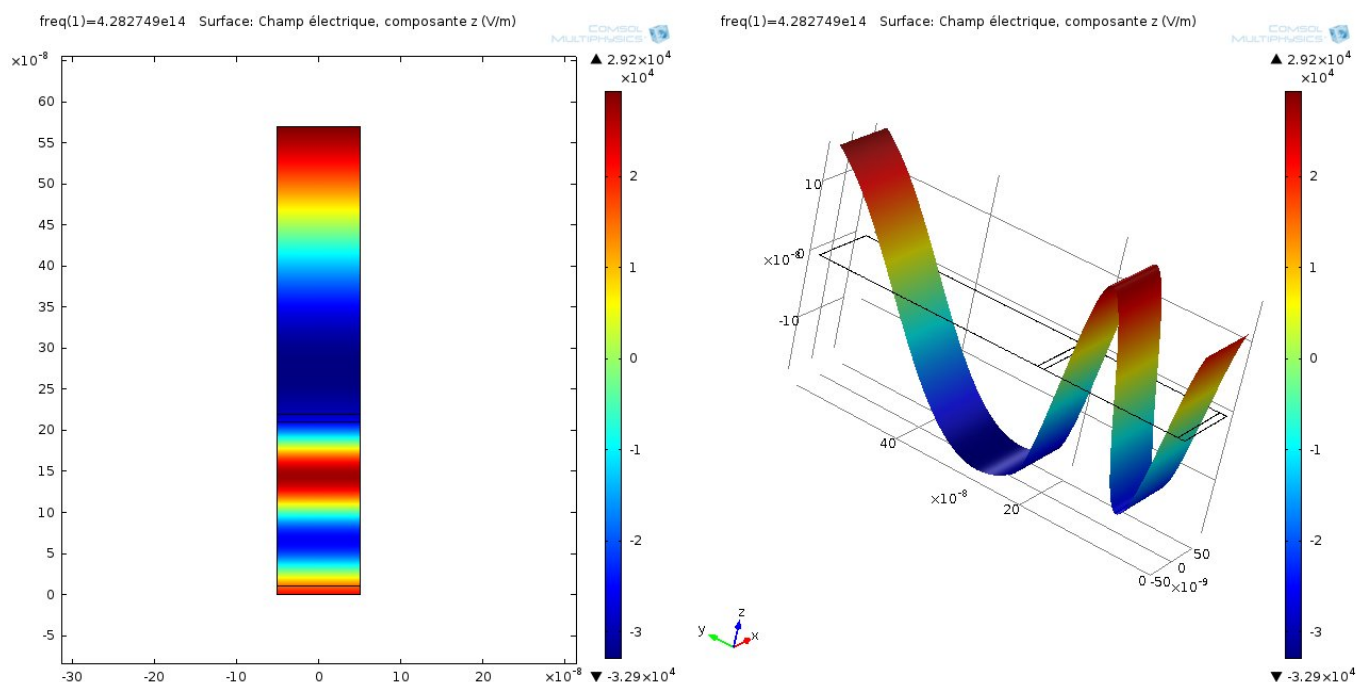


Figure III-38. Structure PIN: (P/I/N : 10/200/10).

En comparant les résultats obtenus en faisant varier l'épaisseur de la couche i ( $e_i$ ) on remarque que :

- Le champ électromagnétique dans la ZCE est pratiquement nul pour les épaisseurs allant de 10 à 30 nm.
- pour des épaisseurs  $e_i$  allant de 40nm jusqu'à 90nm, une répartition non nul de l'énergie du côté p apparaisse.
- Pour les épaisseurs allant de 100nm jusqu'à 140nm, le maximum d'énergie dans la structure est localisé dans la zone intrinsèque, et tout près du la ZCE du côté n et p.
- A partir de  $e_i = 150$ nm jusqu'à  $e_i = 180$ nm, la meilleur répartition est localisée au centre de la zone intrinsèque et il s'éloigne du côté p et n.

### ***Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.***

---

A la fin de la première série de simulation nous avons remarqué que les meilleurs résultats pour la répartition adéquate d'énergie dans la structure sont obtenus pour les épaisseurs représentées dans le tableau III-1.

Epaisseur de n (nm)	Epaisseur de p (nm)	Epaisseur de i (nm)
60	50	90
70	60	100
80	70	110
90	80	120
100	90	130
/	/	140
/	/	150

Tableau III-1. Les meilleurs des épaisseurs pour les couches n, p et i.

Nous avons aussi constaté qu'il existe plusieurs combinaisons offrant une bonne répartition du champ électrique le long de notre structure, ce qui veut dire, une bonne répartition de l'énergie absorbée, qui engendre un meilleur rendement d'absorption, donc une amélioration du rendement de la conversion photovoltaïque.

A partir de ces résultats, nous avons tiré toutes les combinaisons possibles et effectué une nouvelle série de simulation.

Les meilleurs résultats de propagation sont obtenus pour les combinaisons : (P/I/N : 50/130/100), (P/I/N : 60/130/90), (P/I/N : 70/150/70), (P/I/N : 90/130/80), (P/I/N : 90/140/80). ( voir les figures III- 39 jusqu'à III- 44).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

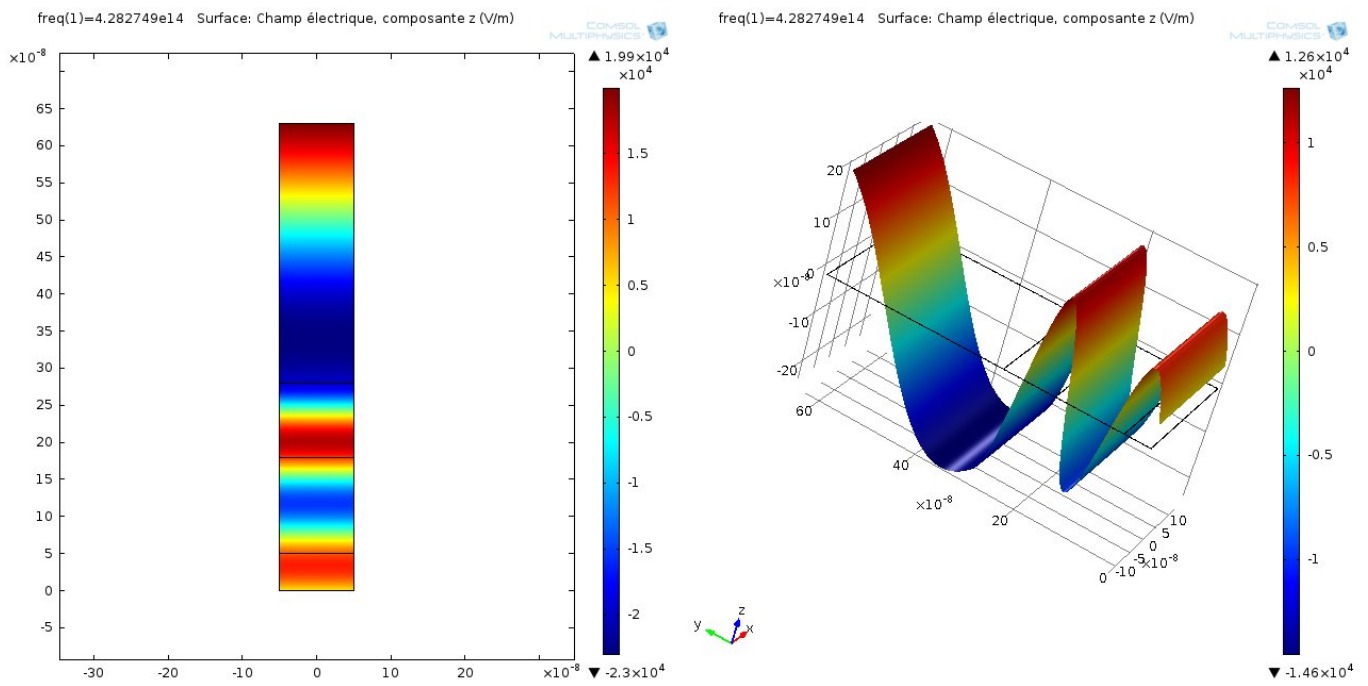


Figure III-39. Structure PIN: (P/I/N : 50/130/100).

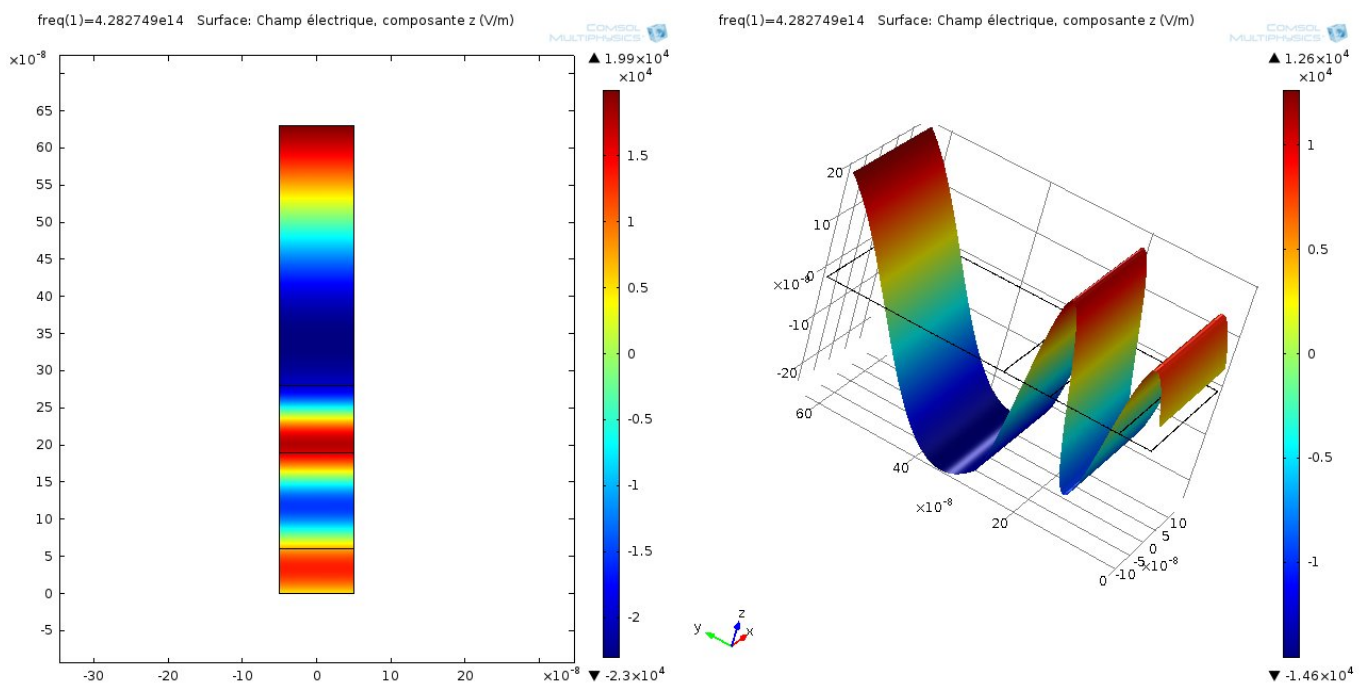


Figure III-40. Structure PIN(P/I/N : 60/130/90).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

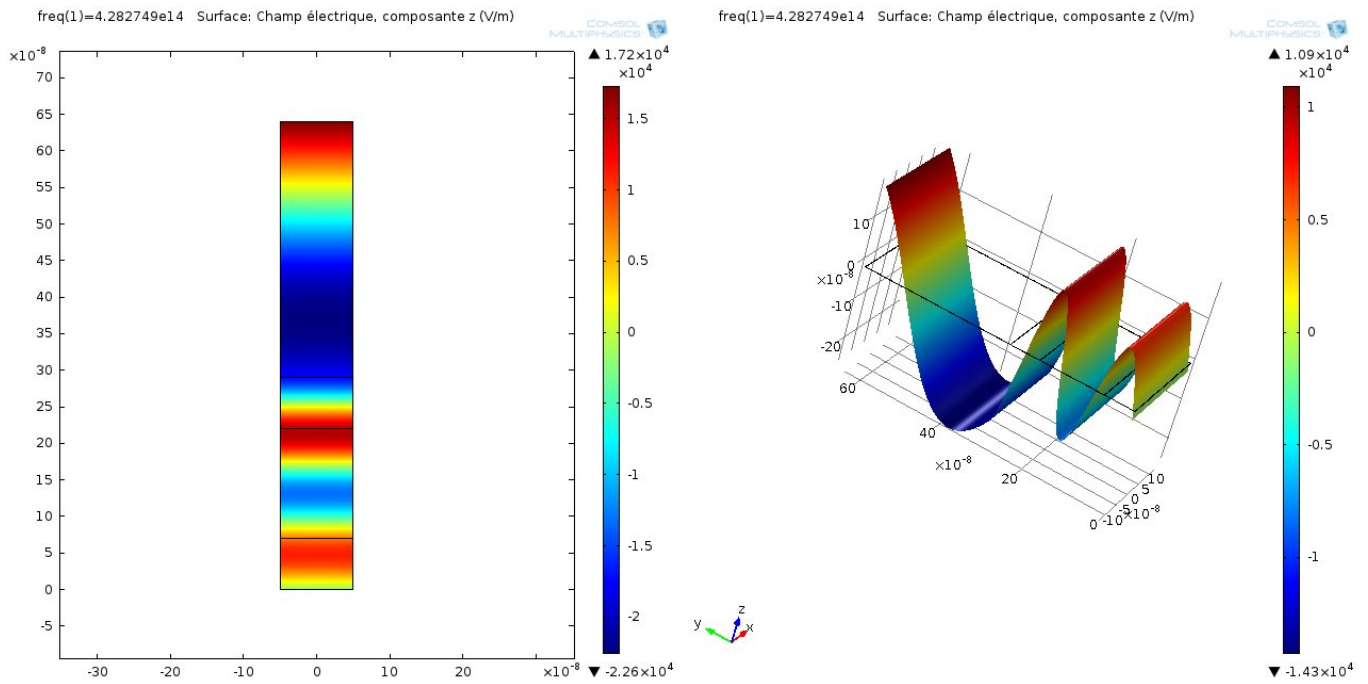


Figure III-42. Structure PIN: (P/I/N : 70/150/70).

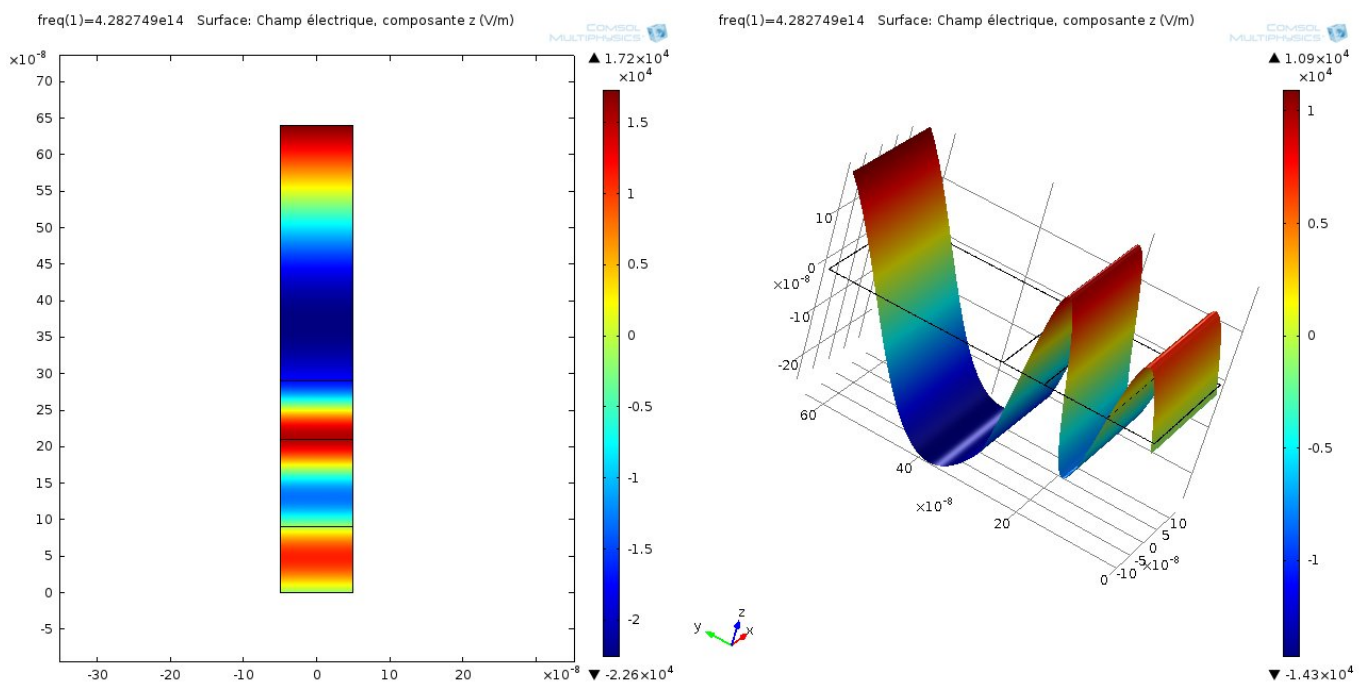


Figure III-43. Structure PIN: (P/I/N : 90/130/80).

# Chapitre III : Etude de la répartition d'une onde électromagnétique dans la cellule solaire à structure PIN.

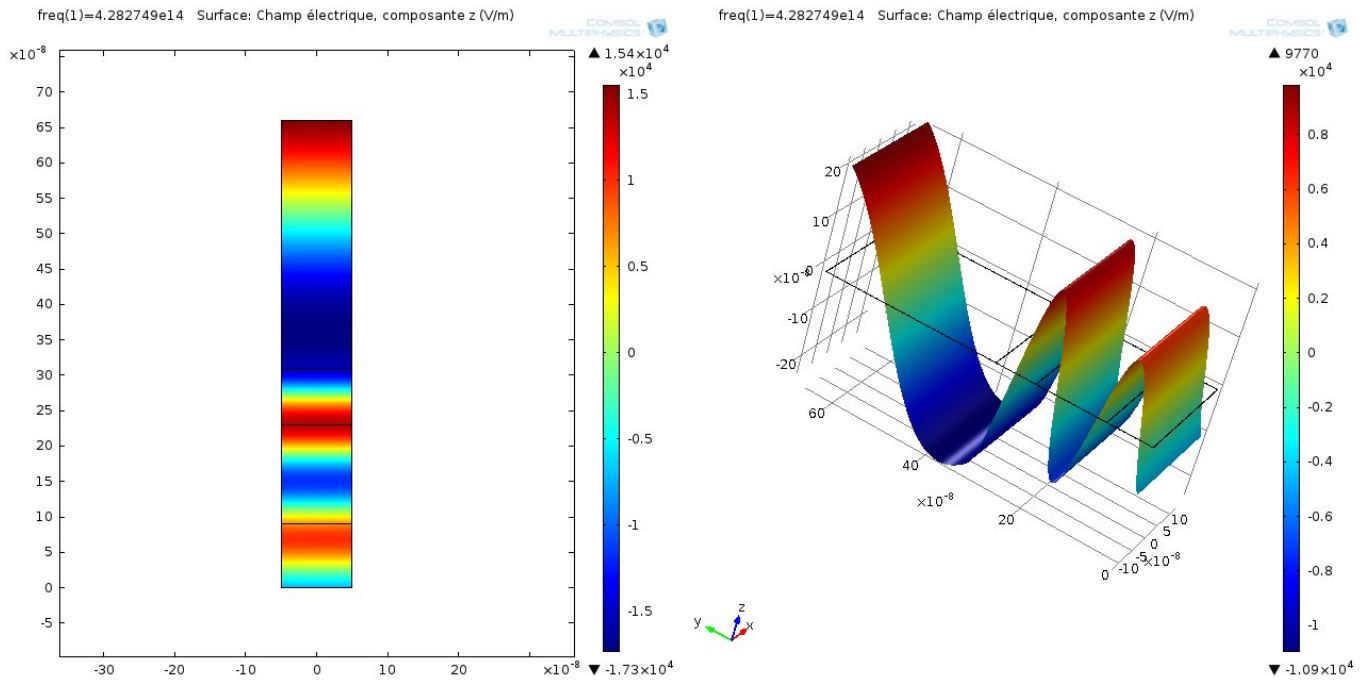


Figure III-44. Structure PIN: (P/I/N : 90/140/80).

*Conclusion*

### Conclusion

Le rendement global de la conversion photovoltaïque dépend de l'efficacité d'absorption, de l'efficacité de transfert de charges, du facteur de forme et du rapport entre l'énergie des photons absorbés et l'énergie extraite.

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans ce processus en faisant un bon choix pour la structure des dispositifs et l'optimisation des épaisseurs des différentes couches constituant celle-ci.

L'objectif d'optimisation des épaisseurs c'est de contribuer à l'amélioration du rendement de la conversion photovoltaïque en maximisant l'absorption et en augmentant la densité de courant délivrée.

Dans ce présent travail et en se basant sur notre modèle numérique cité dans le deuxième chapitre, nous avons simulé une cellule solaire à structure PIN à l'aide du logiciel de simulation COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 afin d'optimiser les épaisseurs des couches de la structure PIN respectivement, et de tel sort à avoir une meilleure propagation de l'onde électromagnétique, ce qui engendre une meilleure propagation de l'énergie absorbée dans la structure donc une meilleure absorption.

Sachant que l'objectif principale c'est d'avoir une répartition optimale de l'énergie dans la zone de charge d'espace (ZCE) ou bien tout près de celle-ci du moment que la séparation des paires électrons trous s'effectue dans cette zone.

En tenant compte aussi de la réalisabilité de la structure à l'aide des différentes techniques de dépôts ; les meilleurs résultats de propagation sont obtenus pour les combinaisons : (P/I/N : 50/130/100), (P/I/N : 60/130/90), (P/I/N : 70/150/70), (P/I/N : 90/130/80), (P/I/N : 90/140/80).

Comme perspectives, il serait intéressant de lancer de nouvelles simulations pour déterminer les paramètres photovoltaïques en tenant compte de nos résultats obtenus dans le cadre d'optimisation de la propagation de l'énergie au sein de nos structures. Cette étape va nous permettre de choisir la meilleure combinaison parmi celles trouvées.

## *Références bibliographiques*

- [1] : « Les piles solaires, le composant et ces applications » Edition. Masson (1985).
- [2] : M. Belhadj. Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome. Mémoire de Magister. Centre Universitaire De Bechar. 2007-2008.
- [3] : A. Martin, K. Enery, Y. Hishikawa, W. Warta. Prog. Photovolt. 2009
- [4] : M. Hussein MELHEM. Nouvelles électrodes poreuses de TiO<sub>2</sub> à base de nano-cristaux synthétisés par pyrolyse laser pour cellules solaires sensibilisées à colorant à l'état solide. UNIVERSITÉ DE LIMOGES. 2011.
- [5] : D. HATEM. Etude de structures électroniques à base de matériaux organiques pour cellules solaires à conversion photovoltaïque. Mémoire de magister. UMMTO. 2009.
- [6] : B. Flèche - D. Delagnes. Energie solaire photovoltaïque.doc. Juin 2007.
- [7] : B. BOITTIAUX. Les diodes semi-conductrices : les diodes particulières, Diode P.I.N 2004.
- [8] : M. Mesrouk. Etude d'une électrode tri-couches à base de TCO /Métal /TCO pour une cellule solaire organique. Mémoire de magister. UMMTO. 2013.
- [9] : base de données du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS 4.4.
- [10] : <http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material>.
- [11]: N. Boubrik. Comparaison des effete antireflets du SnO<sub>2</sub> et ZnO utilisés comme couches antireflet sur les propriétés de la cellule solaire à homo-jonction. Mémoire de magister. UMMTO. 2013.
- [12] : S. Alem-Boudjemline, 'Réalisation et Caractérisation des Cellules Photovoltaïques Plastiques', Thèse de Doctorat, Université Paris XI, Orsay, France, 2004.