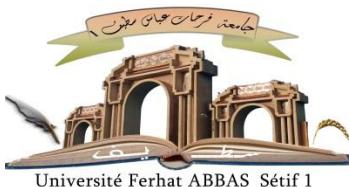


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Ferhat ABBAS Sétif 1

UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF1  
UFAS1 (ALGERIE)

N° d'ordre : .....

Série : .....

## THÈSE

Présenté à l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision  
Pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**  
Option : Optique Appliquée

*Présenté et soutenu par*  
Mr. Tahar GHADBANE

### THEME

# Cristaux photoniques et métamatériaux Etude et simulation de la bande interdite photonique

Soutenu le : 15/12/2025

DEVANT LE JURY :

Nabil BELKHIR	Pr. à U. F.A. SETIF	Président
Hocine GUESSAS	Pr. à U. F.A. SETIF	Rapporteur
Zinelabiddine MEZACHE	MCA à U. F.A. SETIF	Examinateur
Hamza BENNACER	Pr. à U M'sila	Examinateur
Moufdi HADJAB	MCA. à U M'sila	Examinateur

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère et profonde gratitude à l'ensemble des membres du Jury qui m'ont fait l'honneur de prendre part à l'évaluation de ce travail. Leur expertise, leurs critiques constructives et le temps qu'ils ont consacré à l'étude de cette thèse ont été essentiels pour garantir la rigueur scientifique et la qualité de ce travail.

Mes remerciements les plus respectueux s'adressent tout particulièrement :

- **À Monsieur Nabil BELKHIR, Professeur à l'Université de Sétif**, pour avoir accepté de présider cette soutenance de Doctorat en Sciences. Sa disponibilité, son soutien et ses conseils avisés ont grandement contribué à l'enrichissement scientifique de cette recherche.
- **À Monsieur Hocine GUESSAS, Professeur à l'Université de Sétif**, qui a bien voulu assumer la tâche de Rapporteur et qui a été **mon Directeur de thèse**. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance la plus profonde pour son encadrement exemplaire, sa patience, sa disponibilité et ses conseils éclairés tout au long de ce travail. Sa guidance scientifique a été déterminante dans la définition de la problématique, la mise en œuvre des méthodes et l'interprétation des résultats. Ses encouragements constants et sa confiance m'ont permis de surmonter les difficultés et d'atteindre les objectifs scientifiques de cette thèse.
- **À Monsieur Hamza BENNACER, Professeur à l'Université de Sétif**, pour avoir accepté d'être Examinateur. Son expertise a été précieuse pour approfondir certains aspects techniques et scientifiques.
- **À Monsieur Zinelabiddine MEZACHE, MCA à l'Université de Sétif**, pour avoir accepté d'être Examinateur. Ses observations rigoureuses ont enrichi la qualité globale de ce travail.
- **À Monsieur Moufdi HADJAB, MCA à l'Université de M'sila**, pour avoir accepté d'être Examinateur. Sa lecture attentive et ses commentaires avisés ont été d'un grand apport.

Enfin, je remercie toutes les personnes et collègues qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette recherche, par leur soutien, leurs discussions scientifiques enrichissantes et leur encouragement moral.

Que chacun trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon respect le plus sincère.

# Table des matières

REMERCIEMENTS-----	I
TABLE DES MATIERES-----	II
LISTE DES FIGURES -----	V
LISTE DES TABLEAUX-----	XII
LISTE DES ABREVIATIONS -----	XIV
<b>Introduction générale-----</b>	<b>1</b>
<b>Première partie : Synthèse bibliographique-----</b>	<b>6</b>
<b>Chapitre I Métamatériaux et Cristaux photoniques-----</b>	<b>7</b>
I.1    Introduction -----	7
I.2    Electromagnétisme et matériaux. -----	7
I.2.1.    Équations de Maxwell et formalisme. -----	7
I.2.2.    Classification des matériaux en fonction de leurs permittivité et perméabilité-----	8
I.3    Modélisation analytique -----	12
I.4    Focalisation -----	15
I.5    Les cristaux photoniques-----	16
I.5.1.    Définition -----	16
I.5.2.    Caractéristiques-----	17
I.6    Applications-----	17
I.6.1.    Collimation -----	18
I.6.2.    Ultra-réfraction : l'effet super-prisme. -----	20
I.6.3.    Réfraction négative -----	20
I.7    Conclusion-----	22
<b>Chapitre II Méthodes Numériques Et Outils de simulation -----</b>	<b>24</b>
II.1    Introduction -----	24
II.2    Méthode des ondes planes-----	24
II.2.1.    Application aux matériaux composites-----	27
II.2.2.    Maillage -----	29
II.3    Méthode des différences finies temporelles (FDTD) -----	30
II.3.1.    Principe de la méthode -----	31
II.3.2.    Discrétisation des équations de Maxwell et algorithme de Yee -----	33
II.3.3.    Algorithme FDTD -----	36
II.3.4.    Condition de stabilité-----	36
II.3.5.    Dispersion numérique-----	37
II.4    Outils de simulation -----	37
II.4.1.    La structure périodique bidimensionnelle -----	37
II.5    Méthode de calcul -----	38
II.6    Polarisation Transverse Electrique (TE) et Transverse Magnétique (TM) -----	39
II.7    Réseau réciproque et zone de Brillouin -----	39
II.8    Diagramme de bande :-----	40
II.9    Notion de bande interdite photonique-----	41
II.10    La ligne de lumière-----	45
II.11    Courbes iso-fréquences -----	46
II.12    Cartes des bandes interdites-----	49
II.13    Conclusion-----	51
<b>Deuxième partie : Résultats de simulation -----</b>	<b>52</b>
<b>Chapitre III     Simulation des structures à cristaux photoniques connectées. -----</b>	<b>54</b>
III.1    Introduction -----	54
III.2    Simulations de la structure bidimensionnelle -----	55
III.2.1.    Méthode de calcul -----	55

III.3	Simulation des structures à cristaux photoniques connectées.	57
III.3.1.	Structure triangulaire connectée pour le Silicium (Si) dans le domaine de télécommunication.	57
III.4	Structure de bande TE et TM	60
III.5	Structure de la Bande interdite commune	62
III.5.1.	Diagramme de bandes pour $f = 65,52\%$ .	62
III.5.2.	Diagramme de bandes pour $f = 73,46\%$ .	66
III.5.3.	Diagramme de bandes pour $f = 81,85\%$ .	70
III.6	Structure carrée connectée pour le Silicium (Si) dans le domaine de télécommunication.	75
III.6.1.	Calcul du facteur de remplissage.	75
III.7	Structure de la Bande interdite commune	78
III.7.1.	Diagramme de bandes pour $f = 81,85\%$ .	78
III.8	Structure triangulaire connectée pour l'arséniure de gallium (GaAs) dans le domaine de télécommunication.	82
III.8.1.	Calcul du facteur de remplissage.	82
III.9	Structure de bande pour l'arséniure de gallium (GaAs)	84
III.9.1	Structure de bande TE et TM	84
III.9.2.	Diagramme de bandes pour $f = 65,52\%$ .	85
III.9.3.	Diagramme de bandes pour $f = 73,46\%$ .	89
III.9.4.	Diagramme de bandes pour $f = 81,85\%$ .	90
III.10	Structure carrée connectée pour l'arséniure de gallium (GaAs) dans le domaine de télécommunication.	92
III.10.1.	Calcul du facteur de remplissage.	92
III.10.2.	Diagramme de bandes pour $f = 81,85\%$ .	95
III.11	Structure triangulaire connectée pour le Niobate de lithium (LiNbO <sub>3</sub> ) dans le domaine de télécommunication.	99
III.11.1.	Calcul du facteur de remplissage.	99
III.12	Structure carrée connectée pour le Niobate de lithium (LiNbO <sub>3</sub> ) dans le domaine de télécommunication.	105
III.12.1.	Calcul du facteur de remplissage.	105
III.13	Conclusion	109
<b>Chapitre IV</b>	<b>Simulation des structures à cristaux photoniques déconnectées.</b>	<b>112</b>
IV.1	Introduction	112
IV.2	Méthode de calcul	112
IV.3	Structure triangulaire déconnectée pour le Silicium (Si) dans le domaine de télécommunication.	112
IV.3.1.	Calcul du facteur de remplissage.	112
IV.3.2.	Calcul de la Bande interdite	113
IV.4	Structure de bande TE et TM.	114
IV.4.1.	Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour $f = 14,51\%$ .	116
IV.4.2.	Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour $f = 51,01\%$ .	119
IV.4.3.	Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour $f = 73,46\%$ .	121
IV.5	Structure carrée déconnectée pour le Silicium (Si) dans le domaine de télécommunication.	124
IV.5.1.	Calcul du facteur de remplissage.	124
IV.5.2.	Calcul de la Bande interdite	124
IV.5.3.	Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour $f = 14,51\%$ .	127
IV.5.4.	Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour $f = 51,01\%$ .	129
IV.6	Structure triangulaire déconnectée pour l'arséniure de gallium (GaAs) dans le domaine de télécommunication.	132
IV.6.1.	Calcul du facteur de remplissage.	132
IV.7	Structure carrée déconnectée pour l'arséniure de gallium (GaAs) dans le domaine de télécommunication.	136
IV.7.1.	Calcul du facteur de remplissage.	136

IV.8	Structure triangulaire déconnectée pour le Niobate de lithium (LiNbO <sub>3</sub> ) dans le domaine de télécommunication.	139
IV.8.1.	Calcul du facteur de remplissage.	139
IV.9	Structure carrée déconnectée pour le Niobate de lithium (LiNbO <sub>3</sub> ) dans le domaine de télécommunication.	143
IV.9.1.	Calcul du facteur de remplissage.	143
IV.10	Conclusion	146
<b>Chapitre V</b>	<b>Évaluation et Optimisation des Structures de Cristaux Photoniques 2D</b>	<b>148</b>
V.1	Comparaison des Structures triangulaires et carrées connectées et déconnectées pour le silicium	148
V.1.1.	Structure triangulaire et carrée connectée et déconnectée pour le Silicium (Si)	148
V.1.2.	Structure triangulaire et carrée connectée et déconnectée pour l'arséniure de gallium (GaAs)	150
V.1.3.	Structure triangulaire et carrée connectée et déconnectée pour le Niobate de lithium (LiNbO <sub>3</sub> )	151
V.2	Conclusion	153
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>		<b>155</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES</b>		<b>158</b>
Résumé		163
<b>ANNEXES</b>		<b>165</b>

# Liste des figures

## Chapitre I

Figure I. 1 Représentation des matériaux en fonction des parties réelles de leurs paramètres constitutifs.....	9
Figure I.2. (a) Cas correspondant à une propagation main droite et (b) main gauche.....	9
Figure I.3. Evolution typique de la perméabilité effective (partie réelle) d'un résonateur en anneau fendue (SRR) en fonction de la pulsation présenté à gauche. ....	11
Figure I.4. Evolution de la permittivité complexe de l'or suivant le modèle de Drude ( $\omega_p=2175$ THZ, $\omega_c=6,5$ THZ). .....	13
Figure I.5. Illustration des modèles de dispersion (a) Drude, (b) Lorentz pour une fréquence plasma $\omega_p=5$ , $\omega_c=0.5$ une fréquence de résonance $\omega_0=3$ .....	14
Figure I.6. Exemple d'indice de réfraction d'un métamatériaux composé d'anneaux et de fils. La permittivité suit le modèle de Drude, la perméabilité suit le modèle de Lorentz. $\epsilon$ et $\mu<0$ pour une fréquence compris entre 2.3 et 4.1.....	14
Figure I.7. Illustrations des propriétés de la superlentille (a) focalisation, (b) et (c) amplification des ondes évanescentes.....	16
Figure I.8. Représentations schématiques de CP où l'indice de réfraction varie périodiquement suivant une, deux ou trois dimensions. Les zones rouges et jaunes représentent des régions d'indices de réfraction différents.....	17
Figure I.9. Représentation des vecteurs d'ondes passant à travers un collimateur .....	18
Figure I.10. Courbe équi-fréquence de l'air (pointillé bleu) et du réseau carré (vert).....	19
Figure I.11. Courbes équi-fréquences de l'air et du réseau correspondant à la seconde bande pour une fréquence normalisée de 0.28 .....	19
Figure I.12. Représentation d'une source ponctuelle a) dans l'air et b) dans le cristal collimateur .....	20
Figure I.13 a) Diagramme de dispersion du réseau hexagonal de période 476nm et de diamètre 347nm b) Contours iso-fréquences du même réseau dans l'espace des k .....	21
Figure I.14. Courbe de dispersion d'un cristal photonique avec les applications possibles associées aux points de fonctionnements particuliers.....	21

## Chapitre II

Figure II.1. Fragment du champ avec le maillage destiné aux calculs par la méthode des éléments finis .....	25
Figure II.2. Modélisation d'un composite périodique : (a) 2D, (b) 3D.....	27
Figure II.3. Principe du calcul de la permittivité effective d'un composite aléatoire. .....	29
Figure II.4. Maillage des cellules unité en 2D avec une inclusion de type triangle de Sierpinski. ....	30
Figure II.5. Maillage des cellules unité en 3D avec une inclusion cylindrique de hauteur finie.....	30
Figure II.6. Calcul de la dérivée de $f(x)$ en $u_0$ .....	33
Figure II.7. Cellule cubique de yee .....	34
Figure II.8. Cellule de Yee (discrétisation spatiale) à trois (à gauche) et à deux (à droite) dimensions.	34
Figure II.9. Décomposition numérique du calcul.....	35
Figure II.10. Organigramme de l'algorithme de calcul des champs par FDTD .....	36
Figure II.11 Structure périodique 2D connectée .....	38
Figure II.12. Structure périodique 2D déconnectée.....	38
Figure II.13. Récapitulatif des propriétés des modes d'un CP 2D. ....	39
Figure II.14. Représentation du réseau carré et triangulaire de période a dans l'espace direct et réciproque correspondant. La zone de Brillouin réduite est décrite par les points de haute symétrie.....	40
Figure II.15. Diagramme de bande d'un cristal PBG 2D .....	41

Figure II.16. Schéma d'un CP 2D constitué par un réseau de cylindres dans une symétrie cubique et des différentes directions de propagation de l'onde incidente.....	42
Figure II.17. a) Réseau carré et sa zone de Brillouin associée et b) Réseau triangulaire et sa zone de Brillouin associée.....	42
Figure II.18. a) Comparaison du diagramme de bandes du CP caractérisé par un contraste d'indice de réfraction égal à 1,5 (calculé par la méthode de l'approximation d'onde scalaire) avec sa réponse optique en transmission calculée par la méthode des matrices de transfert. Pour la direction de propagation 1. Diagrammes de bandes du même CP de contraste d'indice de réfraction égal à $n=2$ (b) et $n=6$ (c) pour trois directions de propagation de l'onde incidente différentes .....	44
Figure II.19. Diagramme de dispersion d'un réseau hexagonal de trous d'air dans du silicium avec $\epsilon = 11,6$ et $r/a=0,43$ pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu). Les zones hachurées marquent les PBG de chacune des polarisations. Seules les fréquences comprises entre 0,385 et 0,406 permettent l'ouverture d'une bande interdite complète. ....	45
Figure II. 20 Diagramme de bandes d'un réseau hexagonal de trous en géométrie guide d'onde avec $\epsilon = 11,6$ et $r/a=0,43$ , pour une épaisseur de guide de 220 nm. La ligne de lumière est indiquée en traits noirs. ....	46
Figure II.21. Conservation des composantes parallèles du vecteur d'onde lors du passage du milieu 1 au milieu 2 .....	46
Figure II.22. Tracé des composantes des vecteurs d'ondes à partir des courbes iso-fréquences. ....	47
Figure II.23. Diagrammes de dispersion et courbes équi-fréquences associées pour les deux modes TE et TM du réseau carré.....	48
Figure II.24. Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ( $\epsilon=12.25$ ). (a) réseau hexagonal. (b) réseau carré. ....	49

## Chapitre III

Figure III.1. Boîte de dialogue principale BandSOLVE .....	57
Figure III.2. a) Carte des bandes et b) Carte de Gap de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE .....	58
Figure III.3. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 15\%$ , (b) $f= 51\%$ , (c) $f= 82\%$ . ....	61
Figure III.4. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . ....	62
Figure III.5. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau triangulaire a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . ....	64
Figure III.6. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau triangulaire a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . ....	64
Figure III.7. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau triangulaire dans la 1 <sup>ère</sup> zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ .....	65
Figure III.8. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	65
Figure III.9. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	66
Figure III.10. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage $f= 73,46\%$ . ....	66
Figure III.11. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau triangulaire a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 73,46\%$ . ....	68

Figure III.12. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau triangulaire a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ .....	68
Figure III.13 Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ .....	69
Figure III.14. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	69
Figure III.15. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	70
Figure III.16. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ .....	70
Figure III.17. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau triangulaire a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ .....	72
Figure III.18. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau triangulaire a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ .....	72
Figure III.19. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ .....	73
Figure III.20. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	73
Figure III.21. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	74
Figure III.22. a) Carte des bandes et b) Carte de Gap de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE .....	75
Figure III.23. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f = 15\%$ , (b) $f = 51\%$ , (c) $f = 82\%$ .....	77
Figure III.24. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ .....	78
Figure III.25. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ , a) Première bande b) Deuxième bande .....	79
Figure III.26. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ , a) Première bande b) Deuxième bande .....	79
Figure III.27. Surfaces des bandes pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ , a) en polarisation TE b) en polarisation TM .....	80
Figure III.28. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ , a) Première bande b) Deuxième bande .....	80
Figure III.29. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 81,85\%$ , a) Première bande b) Deuxième bande .....	81
Figure III.30. Carte de Gap de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE .....	82

Figure III.31. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 15\%$ , (b) $f= 51\%$ , (c) $f= 82\%$ .....	85
Figure III.32. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ .....	85
Figure III.33. Contours équifréquences en polarisation TE a) Première bande b) Deuxième bande d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . .....	86
Figure III.34. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau triangulaire a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ .....	87
Figure III.35. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ .....	87
Figure III.36. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	88
Figure III.37. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	88
Figure III.38. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage $f= 73,46\%$ . ....	89
Figure III.39. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage $f= 81,85\%$ .....	90
Figure III.40. Carte de Gap de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE .....	92
Figure III.41. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 15\%$ , (b) $f= 51\%$ , (c) $f= 82\%$ ...	94
Figure III.42. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage $f= 81,85\%$ .....	95
Figure III.43. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau carré a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 81,85\%$ .....	96
Figure III.44. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau carré a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 81,85\%$ .....	96
Figure III.45. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau carré dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 81,85\%$ .....	97
Figure III.46. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau carré dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 81,85\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	97
Figure III.47. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau carré dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage $f= 81,85\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	98
Figure III.48. Carte de Gap de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE .....	99
Figure III.49. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 18.36\%$ , (b) $f=51,01\%$ , (c) $f= 78.44\%$ .....	101

Figure III.50. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau carré a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ .....	102
Figure III.51. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau carré a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ .....	102
Figure III.52. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ .....	103
Figure III.53. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	103
Figure III.54. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 65,52\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	104
Figure III.55. Carte de Gap de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE .....	105
Figure III.56. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 15\%$ , (b) $f= 51\%$ , (c) $f=$ 82% .....	107
Figure III.57. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau carré a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 72.73\%$ .....	107
Figure III.58. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau carré a) Première bande b) Deuxième bande dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 72.73\%$ .....	108
Figure III.59. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 72.73\%$ .....	108
Figure III.60. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 72.73\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	109
Figure III.61. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage $f= 72.73\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	109

## Chapitre IV

Figure IV.1. Carte de Gap de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE .....	112
Figure IV.2. Diagramme de bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 14,51\%$ , (b) $f= 51,01\%$ , (c) $f=$ 73.14% .....	115
Figure IV.3. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	116
Figure IV.4. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f=$ 14,51%. a) Première bande b) Deuxième bande .....	117
Figure IV.5. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 14,51\%$ .....	117

Figure IV.6. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 14,51\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	118
Figure IV.7. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 14,51\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	118
Figure IV.8. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 51,01\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	119
Figure IV.9. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	119
Figure IV.10. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 51,01\%$ . ....	120
Figure IV.11. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 51,01\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	120
Figure IV.12. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 51,01\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	121
Figure IV.13. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	121
Figure IV.14. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	122
Figure IV.15. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ . ....	122
Figure IV.16. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	123
Figure IV.17. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 73,46\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	123
Figure IV.18. Carte de Gap de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE.....	124
Figure IV.19. Diagramme de bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f = 14,51\%$ , (b) $f = 51,01\%$ , (c) $f = \%$ . 126	
Figure IV.20. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 14,51\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	127
Figure IV.21. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 14,51\%$ . a)	
Première bande b) Deuxième bande .....	127
Figure IV.22. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 14,51\%$ . ....	128
Figure IV.23. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f = 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	128

Figure IV.24. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	129
Figure IV.25. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	129
Figure IV.26. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	130
Figure IV.27. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 51,01\%$ . ....	130
Figure IV.28. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	131
Figure IV.29. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage $f= 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande .....	131
Figure IV.30. Carte de Gap de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE .....	132
Figure IV.31. Diagramme de bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f=14,51\%$ , (b) $f= 51,01\%$ , (c) $f=73,46\%$ .....	134
Figure IV.32. Carte de Gap de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE .....	136
Figure IV.33. Diagramme de bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 14,51\%$ , (b) $f= 51,01\%$ . ....	138
Figure IV.34. Carte de Gap de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE .....	139
Figure IV.35. Diagramme de bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 14,51\%$ , (b) $f= 51,01\%$ , (c) $f= 70,23\%$ .....	141
Figure IV.36. Carte de Gap de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE .....	143
Figure IV.37. Diagramme de bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) $f= 14,51\%$ , (b) $f= 51,01\%$ . ....	145

## Chapitre V

Figure V.1. Influence du rapport $r/a$ sur la fréquence centrale et la largeur de la plus large des bandes interdites TE et TM de la Structure (a) triangulaire connectée (b) carrée connectée (c) triangulaire déconnectée (d) carrée déconnectée pour le Silicium. ....	148
Figure V.2. Influence du rapport $r/a$ sur la fréquence centrale et la largeur de la plus large des bandes interdites TE et TM de la Structure (a) triangulaire connectée (b) carrée connectée (c) triangulaire déconnectée (d) carrée déconnectée pour l'arséniure de gallium.....	150
Figure V.3. Influence du rapport $r/a$ sur la fréquence centrale et la largeur de la plus large des bandes interdites TE et TM de la Structure (a) triangulaire connectée (b) carrée connectée (c) triangulaire déconnectée (d) carrée déconnectée pour le Niobate de lithium.....	152

# Liste des tableaux

## Chapitre III

Tableau III.1 Bande interdite TE de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium .....	59
Tableau III.2. Bande interdite TM de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium.....	60
Tableau III.3. Bande interdite commune de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium	61
Tableau III.4. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 65,52%.....	62
Tableau III.5. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 73,46%.....	67
Tableau III.6. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 81,85%.....	71
Tableau III.7. Bande interdite TE de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium.....	75
Tableau III.8. Bande interdite TM de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium .....	76
Tableau III.9. Bande interdite commune de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium .....	77
Tableau III.10. Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 81,85%.....	78
Tableau III.11. Bande interdite TE de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium.....	83
Tableau III.12.Bande interdite TM de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium.....	83
Tableau III.13. Bande interdite commune de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium.....	85
Tableau III.14. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 65,52%. .....	86
Tableau III.15. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 73,46%. .....	89
Tableau III.16. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 81,85%. .....	90
Tableau III.17. Bande interdite TE de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium	92
Tableau III.18. Bande interdite TM de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium .....	93
Tableau III.19. Bande interdite commune de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium.....	94
Tableau III.20. Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 81,85%. .....	95
Tableau III.21. Bande interdite TE de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium .....	99
Tableau III.22. Bande interdite TM de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium .....	100
Tableau III.23. Bande interdite TE de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium .....	105
Tableau III.24. Bande interdite TM de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium .....	106

## Chapitre IV

Tableau IV.1. Bande interdite TE de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium ....	113
Tableau IV.2. Bande interdite TM de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium ...	114
Tableau IV.3. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 14,51%.....	115

Tableau IV.4. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 51,01%.....	116
Tableau IV.5. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 73,46%.....	116
Tableau IV.6. Bande interdite TE de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium .....	124
Tableau IV.7. Bande interdite TM de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium.....	125
Tableau IV.8. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 14,51%.....	126
Tableau IV.9. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 51,01%.....	127
Tableau IV.10. Bande interdite TE de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium.....	132
Tableau IV.11. Bande interdite TM de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium .....	133
Tableau IV.12. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f=14,51%.....	135
Tableau IV.13. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 51,01%.....	135
Tableau IV.14. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 73,46%.....	135
Tableau IV.15. Bande interdite TE de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium .....	136
Tableau IV.16. Bande interdite TM de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium.....	137
Tableau IV.17. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f=14,51%.....	138
Tableau IV.18. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 51,01%.....	138
Tableau IV.19. Bande interdite TE de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium .....	139
Tableau IV.20. Bande interdite TM de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium .....	140
Tableau IV.21. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f=14,51%.....	141
Tableau IV.22. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f= 51,01%.....	142
Tableau IV.23. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f= 70,23%.....	142
Tableau IV.24. Bande interdite TE de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium .....	144
Tableau IV.25. Bande interdite TM de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium .....	144
Tableau IV.26. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f=14,51%.....	145
Tableau IV.27. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f= 51,01%.....	145

## Liste des abréviations

- SRR : Split Ring Resonators (résonateur en anneau fendue)
- r : rayon des tiges
- a : périodicité du réseau
- CP : Cristaux photonique
- PBG : Photonic band gap (bande interdite photonique)
- FDTD : finite difference time domain (différences finies dans le domaine temporel)
- FE : finite element (éléments finis)
- f : Facteur de remplissage
- TM : transverse magnétique
- TE : transverse électrique
- Joint : la bande interdite commune
- 1BZ : La Première Zone Brillouin
- Gap : bandes interdites
- Radius : le rayon des tiges (r) normalisé par la constante de réseau a, soit  $r/a$ .
- Si\_hex\_C : Structure triangulaire du silicium connectée.
- Si\_hex\_D : Structure triangulaire du silicium déconnectée.
- Si\_Rec\_C : Structure carrée du silicium connectée.
- Si\_Rec\_D : Structure carrée du silicium déconnectée.
- GaAs\_hex\_C : Structure triangulaire de l'arsénure de Galium connectée.
- GaAs\_hex\_D : Structure triangulaire de l'arsénure de Galium déconnectée.
- GaAs\_Rec\_C : Structure carrée de l'arsénure de Galium connectée.
- GaAs\_Rec\_D : Structure carrée de l'arsénure de Galium déconnectée.
- LiNbO<sub>3</sub>\_hex\_C : Structure triangulaire du Niobate de lithium connecté.
- LiNbO<sub>3</sub>\_hex\_D : Structure triangulaire du Niobate de lithium déconnecté.
- LiNbO<sub>3</sub>\_Rec\_C : Structure carrée du Niobate de lithium connecté.
- LiNbO<sub>3</sub>\_Rec\_D : Structure carrée du Niobate de lithium déconnecté.
- N\_Gap : Nombre de Gap.
- f\_c : fréquence centrale
- f\_min : borne inférieure de la bande interdite
- f\_max : borne supérieure de la bande interdite
- L\_Gap : Largeur de la bande interdite

## **Introduction générale**

Les matériaux artificiels, tels que les métamatériaux et les cristaux photoniques, ont émergé comme des innovations majeures en optique et en physique des matériaux. Initialement conçus pour leurs propriétés de bande interdite permettant de bloquer la propagation des ondes électromagnétiques, ces structures ont évolué vers une ingénierie plus sophistiquée de la dispersion. Au lieu de simplement empêcher la propagation, l'objectif contemporain est de la contrôler de manière précise et déterminée, en modifiant la matière à des échelles sub-longueur d'onde. Cette évolution s'appuie sur les travaux pionniers de Yablonovitch[1], qui ont mis en lumière la possibilité de créer des bandes interdites photoniques via des réseaux périodiques d'indices de réfraction. Ces bandes interdites interdisent la propagation de certaines longueurs d'onde[2–9], offrant ainsi un moyen d'améliorer l'émission spontanée et l'efficacité d'extraction de la lumière dans des dispositifs optoélectroniques actifs et passifs, comme les diodes électroluminescentes.

La naissance des cristaux photoniques, structurés à une échelle proche d'un quart ou d'une demi-longueur d'onde, a ouvert la voie à des applications performantes, notamment dans les lasers infrarouges[10] avec des cavités ultra-résonnantes et dans le guidage optique via des fibres micro-structurées[11]. Parallèlement, les métamatériaux, structurés à une échelle encore plus fine (inférieure au dixième de la longueur d'onde), ont permis d'explorer des propriétés optiques inédites. Un cristal photonique se définit comme une structure à indice de réfraction modulé périodiquement, dont la dispersion photonique ressemble à la structure de bandes électroniques dans un solide. Les versions unidimensionnelles (1D) existent depuis longtemps sous forme de réflecteurs multicouches, mais les cristaux 2D et 3D[12,13] ont récemment attiré l'attention pour leur potentiel en tant qu'isolants photoniques. Dans ces structures, la lumière se propage sous forme d'ondes de Bloch, influencées par la bande de dispersion, ce qui complique mais enrichit leur comportement.

La propagation inhabituelle de la lumière dans ces cristaux, comme une réfraction anormale près des bandes interdites[14] rend la direction de propagation très sensible à l'angle d'incidence et à la longueur d'onde. Cela peut entraîner une grande déviation du faisceau, un phénomène baptisé "superprisme". Des effets similaires ont été observés dans des guides d'ondes 1D et 2D, et des prédictions théoriques suggèrent un indice de réfraction négatif[15,16]. L'explication réside dans la structure de bandes photoniques, où la direction de propagation est déterminée par les surfaces d'équifréquence. Ainsi, les cristaux photoniques peuvent imiter des matériaux à propriétés optiques inexistantes dans les homogènes, comme des prismes hyper-dispersifs ou des milieux à indice négatif, avec des démonstrations de collimation[17,18] et de focalisation. L'introduction de défauts permet le guidage linéaire ou la création de micro-cavités résonantes, particulièrement étudiées dans les matériaux III-V pour des lasers à faible seuil. Ces propriétés ouvrent la voie à des composants d'optique intégrée innovants, avec une flexibilité dans le choix des paramètres structuraux (maille, motif, matériaux, défauts) pour adapter les longueurs d'onde ciblées.

Malgré ces avancées, plusieurs défis persistent dans le domaine des matériaux artificiels. Les métamatériaux atteignent leurs limites aux longueurs d'onde optiques en raison des pertes liées à l'utilisation de métaux comme composants, ce

qui réduit leur efficacité pour des applications pratiques. De plus, les matériaux homogènes traditionnels ne permettent pas un contrôle suffisant de la propagation des ondes électromagnétiques, limitant les performances en optoélectronique. La problématique centrale réside dans la nécessité de structurer la matière à des échelles précises pour obtenir des propriétés optiques inédites, telles que la réfraction négative, la collimation ou le superprisme tout en minimisant les pertes et en facilitant l'intégration dans des dispositifs réels. Les cristaux photoniques diélectriques bidimensionnels (2D ou 2.5D) émergent comme alternatives prometteuses, mais leur optimisation requiert une compréhension fine de l'influence des configurations structurales (connectées ou déconnectées, triangulaires ou carrées) et des matériaux (comme le silicium, l'arsénure de gallium ou le Niobate de lithium) sur les bandes interdites. Sans outils avancés, il est difficile de prédire et de valider ces comportements complexes, d'où l'importance des simulations numériques pour combler le fossé entre théorie et expérimentation. Enfin, les défis incluent la sensibilité aux paramètres (facteur de remplissage, polarisation TE/TM) et la transposition vers des applications en télécommunications, où des bandes interdites larges et stables sont essentielles pour des guides d'ondes, filtres ou cavités efficaces.

Les progrès en simulation numérique ont révolutionné ce champ, en positionnant la modélisation comme un pilier entre théorie et expérimentation. Des méthodes comme les différences finies dans le domaine temporel (FDTD) ou les éléments finis (FE) permettent d'analyser ces systèmes, mais les problèmes physiques non résolus exigent des modèles perfectionnés pour valider les théories et guider de nouvelles approches. Grâce aux avancées en nanoélectronique, l'intégration de ces dispositifs devient envisageable, mais reste conditionnée à une optimisation rigoureuse.

Ce travail de thèse vise à étudier et simuler les bandes interdites photoniques dans des cristaux photoniques, en se focalisant sur l'optimisation de leurs propriétés pour des applications en télécommunications. Plus précisément, les objectifs principaux sont les suivants :

Réaliser une synthèse bibliographique exhaustive sur les métamatériaux et cristaux photoniques, en analysant leurs propriétés électromagnétiques (permittivité, perméabilité) et les méthodes numériques pour leur modélisation.

Effectuer une étude comparative de structures connectées et déconnectées en configurations triangulaire et carrée, en utilisant des matériaux diélectriques comme le silicium (Si), l'arsénure de gallium (GaAs) et le Niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ).

Identifier, via des simulations numériques (logiciel Rsoft basé sur la méthode des ondes planes), les configurations optimisant la largeur des bandes interdites, en générant des cartes de gaps et des diagrammes de bandes pour les modes TE et TM.

Évaluer l'impact du facteur de remplissage et des paramètres structuraux sur les performances, afin de proposer des designs favorisant des phénomènes comme la réfraction négative ou le guidage optique.

Ouvrir des perspectives pour la conception de dispositifs optoélectroniques innovants, tels que des guides d'ondes, filtres ou cavités résonantes, en exploitant les bandes interdites pour un contrôle accru de la lumière.

Cette thèse est structurée en deux parties principales, chacune divisée en chapitres pour assurer une progression logique et cohérente du sujet, allant de la théorie aux applications pratiques via des simulations numériques. Elle intègre également une conclusion générale qui synthétise les Résultats et ouvre sur des perspectives futures, des annexes qui fournissent des données complémentaires détaillées (telles que des simulations supplémentaires pour chaque matériau). Pour offrir une clarté optimale au lecteur, voici un aperçu détaillé de la structure, incluant un résumé bref de chaque chapitre principal, objectifs et contributions spécifiques à l'étude des cristaux photoniques et métamatériaux, avec un focus sur la simulation de la bande interdite photonique :

La première partie, consacrée à la synthèse bibliographique, pose les bases théoriques et méthodologiques du travail en rassemblant les connaissances existantes nécessaires à la compréhension des simulations réalisées par la suite. Elle a pour objectif d'établir un socle solide en optique appliquée, en assurant le lien entre les concepts théoriques fondamentaux et les outils de modélisation utilisés en pratique.

Le premier chapitre propose une introduction générale aux matériaux artificiels et à leur évolution, en s'appuyant sur les fondements de l'électromagnétisme classique, notamment les équations de Maxwell et le formalisme vectoriel associé. Les matériaux y sont classés selon les signes et les valeurs de leur permittivité ( $\epsilon$ ) et de leur perméabilité ( $\mu$ ), en distinguant les comportements conventionnels et non conventionnels, avec des exemples illustratifs tels que les métamatériaux à indice de réfraction négatif. La modélisation analytique des réponses électromagnétiques est ensuite abordée à travers des modèles classiques, tels que les modèles de Drude et de Lorentz, permettant de décrire les réponses fréquentielles des matériaux. Le chapitre s'intéresse également aux phénomènes de focalisation, incluant les superlentilles et l'amplification des ondes évanescentes, puis définit les cristaux photoniques comme des structures périodiques, unidimensionnelles, bidimensionnelles ou tridimensionnelles, caractérisées par une modulation spatiale de l'indice de réfraction. Leurs propriétés fondamentales, telles que la propagation des ondes de Bloch et la formation de bandes de dispersion, sont détaillées. Enfin, plusieurs applications emblématiques sont présentées, notamment la collimation de faisceaux, l'ultra-réfraction associée à l'effet superprisme et la réfraction négative, illustrées par des diagrammes et des exemples de réseaux, comme les structures hexagonales. L'objectif est de mettre en évidence les avantages de ces matériaux par rapport aux milieux homogènes dans le cadre des dispositifs optoélectroniques.

Le deuxième chapitre est dédié aux outils numériques indispensables à la modélisation des structures photoniques. Il débute par une présentation des méthodes de calcul numérique comme alternatives efficaces aux approches expérimentales. La méthode des ondes planes (PWE) y est décrite pour l'étude des milieux périodiques composites, avec son application aux structures bidimensionnelles et tridimensionnelles ainsi que le calcul des permittivités effectives. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) est

ensuite développée en détail, en abordant la discréétisation spatio-temporelle, l'algorithme de Yee appliqué aux équations de Maxwell, les critères de stabilité et les effets de dispersion numérique. Les outils de simulation employés pour les structures périodiques bidimensionnelles sont présentés, notamment ceux intégrés au logiciel Rsoft. Le chapitre traite également des polarisations TE et TM, du réseau réciproque et de la zone de Brillouin avec ses points de haute symétrie ( $\Gamma$ , X, M), des diagrammes de bandes pour l'analyse de la dispersion, ainsi que de la notion de bande interdite photonique, caractérisée par l'interdiction de la propagation dans certaines plages fréquentielles. Sont également abordées la ligne de lumière pour l'identification des modes guidés, les courbes d'iso-fréquence pour l'étude de la réfraction, et les cartes de bandes interdites utilisées pour optimiser l'ouverture des gaps. Une conclusion partielle souligne l'importance de ces méthodes pour obtenir des simulations fiables et précises.

La deuxième partie du manuscrit est consacrée aux résultats de simulation. Elle applique les outils théoriques et numériques développés précédemment à des cas d'étude concrets, en vue d'optimiser les bandes interdites photoniques pour des applications en télécommunications. Cette partie met l'accent sur une analyse quantitative approfondie, fondée sur l'exploitation de diagrammes de bandes et de contours d'iso-fréquence, afin d'identifier les configurations les plus performantes.

Le troisième chapitre présente, après une introduction générale et une description de la méthode de calcul, l'étude des structures à cristaux photoniques connectées. Les simulations réalisées pour le silicium portent sur des réseaux triangulaires et carrés, avec l'établissement des diagrammes de bandes pour les modes TE et TM et l'identification de bandes interdites communes. Des analyses similaires sont menées pour l'arsénure de gallium et le Niobate de lithium, incluant le calcul du facteur de remplissage et la mise en évidence de bandes interdites de grande largeur. Les résultats obtenus permettent de dégager des configurations optimales adaptées à des applications telles que les filtres optiques.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des structures déconnectées, en s'appuyant sur la même approche de calcul. Pour le silicium, des configurations triangulaires et carrées sont analysées à travers les modes TE et TM, les diagrammes de bandes interdites et les contours d'iso-fréquence. L'étude est étendue aux matériaux GaAs et LiNbO<sub>3</sub>, avec une comparaison détaillée des structures de bandes obtenues. L'impact de ces configurations sur la dispersion et sur l'apparition de phénomènes tels que la réfraction négative est mis en évidence, et le chapitre conclut sur l'identification des architectures favorisant des bandes interdites larges et stables.

Enfin, une analyse interprétative globale est proposée à partir de la comparaison systématique des structures connectées et déconnectées, de géométries triangulaires et carrées, pour l'ensemble des matériaux étudiés (Si, GaAs et LiNbO<sub>3</sub>). Cette synthèse met en évidence les tendances générales en matière d'ouverture et de stabilité des bandes interdites et vise à dégager l'influence des paramètres structuraux sur les performances photoniques. Elle conduit à la formulation de recommandations pour la conception de structures optimisées répondant aux exigences des dispositifs photoniques avancés.

**Première partie :**  
**Synthèse bibliographique**

## Chapitre I Métamatériaux et Cristaux photoniques

### I.1 Introduction

Par définition, les métamatériaux sont des matériaux artificiels dont la structuration, à des échelles très inférieures aux longueurs d'onde de travail, permet de les assimiler à des matériaux homogènes. Cette définition, dans son expression la plus générale, montre que le concept de métamatériaux peut couvrir tous les domaines de la physique. Cette remarque est illustrée dans la littérature par les différents travaux publiés dans les domaines de l'électromagnétisme incluant l'optique, de l'acoustique, et de la mécanique de fluide[19].

La définition est donc souvent complétée par une seconde condition sur l'échelle de la structuration : celle-ci doit être grande devant l'échelle atomique. On comprend ainsi que l'échelle de conception des métamatériaux est une échelle intermédiaire, parfois dite « échelle mésoscopique ». Sa limite inférieure est de l'ordre du nanomètre, alors que sa limite supérieure correspond à une fraction de la longueur d'onde.

Bien évidemment, les métamatériaux ne présentent un intérêt que lorsqu'ils permettent soit d'accéder à des valeurs de paramètres effectifs difficiles, ou impossibles, à atteindre avec des matériaux usuels, soit d'accroître les possibilités de contrôle de ces paramètres, par exemple en termes d'anisotropie ou de gradients spatiaux.

Aussi, les cristaux photoniques ont considérablement évolué au cours de ces dernières années. Ces structures périodiques à Bandes Interdites Photoniques qui interdisent la propagation des photons dans certaines plages de fréquence, l'utilisation des cristaux photoniques à l'optoélectronique permet d'envisager de nouvelles perspectives telles que la réalisation de composants d'optique intégrée aux dimensions réduites et l'intégration de plusieurs fonctions sur un même substrat composant.

Dans ce premier chapitre, nous commencerons par rappeler brièvement les propriétés des cristaux photoniques, en particulier leurs caractéristiques de dispersion. Nous présenterons les différentes classes de cristaux photoniques.

Nous terminerons par un état de l'art et une présentation de quelques applications dans les domaines des fréquences optiques et micro-ondes.

### I.2 Électromagnétisme et matériaux.

#### I.2.1. Équations de Maxwell et formalisme.

En 1861, Maxwell synthétise quatre équations permettant de décrire les phénomènes électromagnétiques en englobant les lois découvertes par ses prédecesseurs avec les équations dites de :

- Maxwell - Gauss :  $\operatorname{div}(\vec{B}) = 0$  I-1

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$
 I-2

- Maxwell - Faraday :  $\vec{\operatorname{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  I-3

- Maxwell - Ampère :  $\vec{\operatorname{rot}}(\vec{B}) = \mu j + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  I-4

Avec :

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \\ \vec{E} = \epsilon \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{D} \end{cases}$$
 I-5

En combinant deux à deux les équations des relations (I-3) et (I-1) et (I-2) et (I-4), sachant que  $\vec{\operatorname{rot}}(\vec{\operatorname{rot}}(\vec{V})) = \vec{\operatorname{grad}}(\operatorname{div}(\vec{V})) - \Delta \vec{V}$  on obtient une équation dite de propagation pour les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  dans un milieu sans charges :

$$\mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \Delta \vec{E} = \mathbf{0}$$
 I-6-a

$$\mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \Delta \vec{H} = \mathbf{0}$$
 I-6-b

Cette équation de propagation lie des opérateurs spatiaux à des opérateurs temporels pour caractériser la dispersion du milieu[20].

### I.2.2. Classification des matériaux en fonction de leurs permittivité et perméabilité

Les caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques diffèrent suivant le milieu environnant, comme l'illustre la figure I.1.

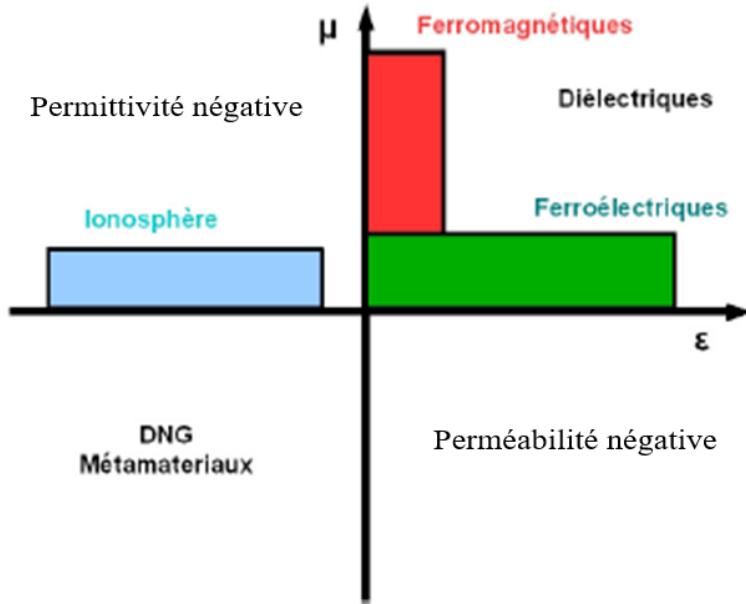


Figure I. 1 Représentation des matériaux en fonction des parties réelles de leurs paramètres constitutifs.

En effet, les propriétés de transmission classique sont obtenues pour des valeurs de permittivité relative  $\epsilon_r$  et de perméabilité relative  $\mu_r$  positives. Dans ce cadran, les matériaux présentant une forte constante diélectrique ou une forte constante magnétique sont respectivement les ferroélectriques et les ferromagnétiques. Dans ce cas, le vecteur d'onde  $\vec{k}$  et le vecteur de Poynting  $\vec{S}$  sont colinéaires et de même sens et le trièdre formé par les vecteurs  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  et  $\vec{k}$  est direct. La propagation est alors de type main droite, comme représenté sur la Figure I-2 (a)[21].

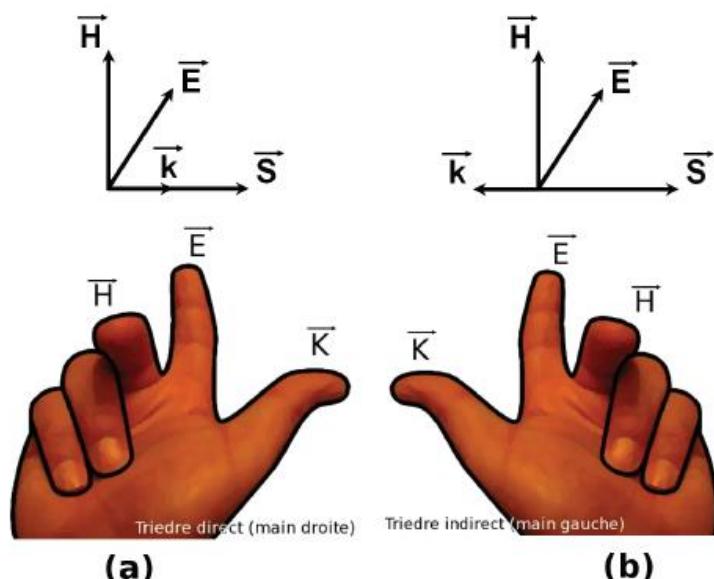


Figure I.2. (a) Cas correspondant à une propagation main droite et (b) main gauche.

En électromagnétisme classique, les ondes se propagent dans un milieu doublement positif correspondant au premier cadran de la Figure I-1. On parle dans ce cas de milieu main droite dans la mesure où la propagation peut être décrite par le trièdre direct avec les vecteurs champs électrique et magnétique et le vecteur d'onde dans le prolongement des trois doigts de la main droite. L'onde qui se propage dans le vide, présente des valeurs de  $\epsilon_r$  et  $\mu_r$  égales à 1 et la plupart des milieux de propagation auront des paramètres constitutifs relatifs du même ordre de grandeur. A titre d'exemple, les polymères fréquemment utilisés comme matériau diélectrique ont des permittivités relatives voisines de 2. En revanche, cette valeur est plus élevée dans le cas des semi-conducteurs non dopés (de l'ordre de 10). Des valeurs de  $\epsilon_r$  bien plus importantes, de l'ordre de plusieurs milliers, peuvent être obtenues pour des matériaux ferroélectriques tels que le BaSrTiO<sub>3</sub> (BST). La perméabilité des céramiques ferromagnétiques telles que les ferrites vaut quelques unités pour des fréquences supérieures au gigahertz et peut dépasser plusieurs milliers à basse fréquence.

Le quatrième cadran regroupe les milieux à permittivité relative négative. Il est connu que l'ionosphère, qui se comporte comme un plasma, présente des valeurs de  $\epsilon_r$  inférieures à zéro. De la même manière, J. B. Pendry[22] a proposé de substituer au métal un réseau de fils métalliques afin d'abaisser la fréquence plasma qui se traduit par des perméabilités négatives très importantes par effet de dilution. Ceci revient à définir un milieu effectif dont le comportement reste régi par la loi de Drude, avec une valeur de fréquence plasma essentiellement liée aux paramètres géométriques du réseau. Cette possibilité permet de disposer d'une plage fréquentielle de fonctionnement très large associée à un niveau de perte relativement faible jusqu'aux frontières de l'infrarouge. En effet, l'onde se propage entre les fils qui, en micro-ondes, peuvent être assimilés à des conducteurs parfaits. Du point de vue de la transmission, en considérant le champ électrique parallèle à l'orientation des fils, le comportement observé est de type passe-haut avec une fréquence de coupure qui correspond à la fréquence plasma.

Le troisième cadran regroupe les matériaux à perméabilité négative. Des valeurs négatives de perméabilité peuvent être observées dans certains alliages.

La perméabilité négative est obtenue par magnétisme artificiel sur des motifs d'anneaux fendus qui seront appelés par la suite Split Ring Resonators (SRR) ,excité par un champ magnétique parallèle à son axe , la caractéristique typique de ce phénomène en fonction de la fréquence suit une évolution de Lorentz (Figure I-3) ou  $\omega_0$  correspond à la pulsation de résonance pour laquelle la perméabilité effective devient négative et repasse par zéro à la pulsation  $\omega_{mp}$  désignée comme la pulsation plasma magnétique. Par analogie avec la pulsation plasma électrique. Lorsque l'on s'éloigne de cette résonance, la perméabilité effective tend vers l'unité.

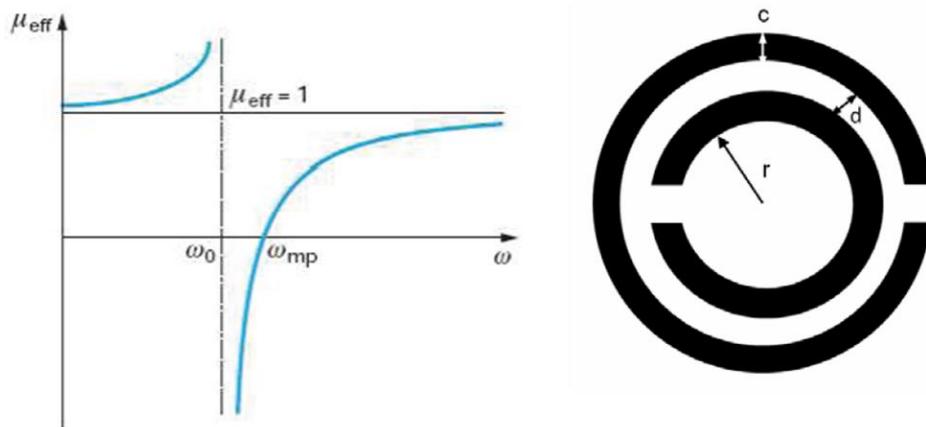


Figure I.3. Evolution typique de la perméabilité effective (partie réelle) d'un résonateur en anneau fendue (SRR) en fonction de la pulsation présenté à gauche.

En 2001, le groupe de D.R.Smith[23] a effectué la première démonstration expérimentale d'un phénomène de réfraction négative en superposant des réseaux de fils et de boucle de courant. D'un point de vue fondamental, l'utilisation des résonateurs fendus peut être étendue jusqu'au domaine de l'optique. Toutefois, à ces longueurs d'onde, les dispositifs souffrent de pertes relativement importantes. Par ailleurs, on observe un phénomène d'inertie des porteurs de charge qui entraîne une saturation de la réponse magnétique des résonateurs[19].

### I.3 Modélisation analytique

Dans la littérature, les réponses électrique et magnétique d'un matériau peuvent être généralement décrites par les modèles de Drude et de Lorentz.

D'après Drude on a :

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\omega) = \mathbf{1} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\omega_c)} \quad \text{I-7}$$

D'après Lorentz on a :

$$\boldsymbol{\mu}(\omega) = \mathbf{1} - \frac{\omega_p^2 - \omega_0^2}{\omega(\omega + j\omega_c) - \omega_0^2} \quad \text{I-8}$$

Avec :

$\omega_p$ : fréquence plasma

$\omega_c$ : la fréquence de collision (modélise la dissipation d'énergie)

$\omega_0$  : la fréquence de résonance à laquelle a lieu le maximum d'absorption

La fréquence plasma peut être écrite en fonction des paramètres de la structure :

$$\omega_p = \frac{c_0}{a \sqrt{2\pi \ln(\frac{a}{r})}} \quad \text{I-9}$$

On a aussi :

$$\omega_0 = \frac{2\epsilon_0 a^2 \omega_p^0}{r^2 \sigma^2} \quad \text{I-10}$$

D'autres relations théoriques ont été proposées par la suite pour la fréquence de plasma d'un réseau de tiges métalliques :

D'après Sarychev :

$$\omega_p = \frac{c_0}{a \sqrt{2\pi \ln(\frac{a}{\sqrt{2}r}) + \frac{\pi}{2} - 3}} \quad \text{I-11}$$

D'après Maslovski :[11]

$$\omega_p = \frac{c_0}{a \sqrt{2\pi \ln(\frac{a^2}{4r(a-r)})}} \quad \text{I-12}$$

Pour les résonateurs en anneau fendue (SRR) on a aussi :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3dc_0}{\pi^2 r^3}} \quad \text{I-13}$$

L'expression (I-7) montre que la permittivité du métal tend vers 1 lorsque la fréquence tend vers l'infini. Compte tenu de l'importance de  $\omega_p$  par rapport à  $\omega_c$  on peut considérer que la fréquence plasma correspond au passage de la permittivité par zéro. En dessous de cette valeur,  $\epsilon$  est négatif. Cette évolution de la permittivité peut être mise à profit pour synthétiser un milieu simplement négatif.

La Figure I-4 montre l'évolution de la permittivité complexe de l'or en fonction de la fréquence pour les fréquences inférieures à la fréquence plasma  $\omega_p$ , la partie réelle de la permittivité complexe est négative, s'accompagnant par un pic de la partie imaginaire dans les fréquences les plus basses. Les métaux se comportent donc comme des réflecteurs en dessous de leur fréquence plasma. Une des applications résultant de cet effet est l'établissement de liaisons radio longues distances en réfléchissant les ondes sur certaines couches de l'ionosphère.

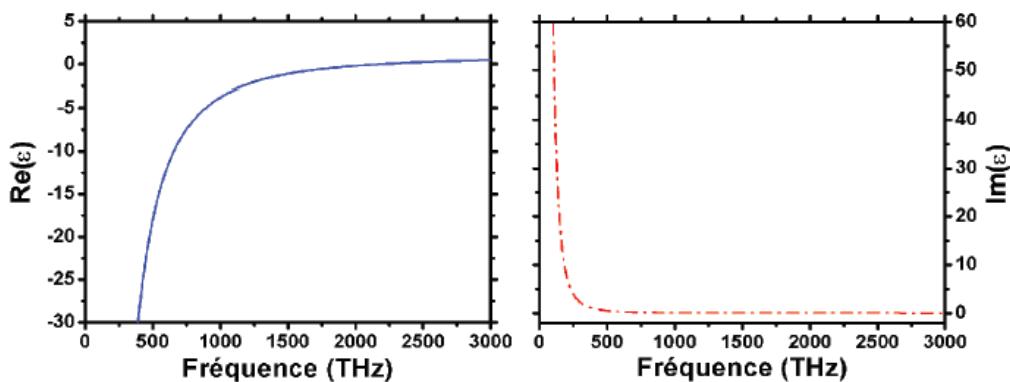


Figure I.4. Evolution de la permittivité complexe de l'or suivant le modèle de Drude ( $\omega_p=2175$  THZ,  $\omega_c=6,5$  THZ).

On peut considérer qu'un métamatériaux constitue d'une association d'un réseau de fils et d'un réseau de résonateurs en anneaux peut être décrit électriquement par un modèle de Drude et magnétiquement par le modèle de Lorentz.

On peut alors définir une fréquence plasma électrique  $\omega_{pe}$  équivalente pour  $\epsilon$  et une fréquence plasma magnétique  $\omega_{pm}$  équivalente pour  $\mu$  ainsi qu'une fréquence de résonance  $\omega_0$ .

A partir d'une géométrie appropriée des éléments constitutifs, il est alors possible d'identifier les bandes main gauche et d'adapter les trois pulsations aux valeurs désirées. Notons que le domaine d'homogénéisation est en général situé en deçà des pulsations plasma équivalentes. Ceci est illustré sur la Figure I-5 pour des valeurs de fréquences adimensionnées. Les parties réelles de  $\epsilon$  et  $\mu$  sont simultanément négatives dans l'intervalle (2,4),

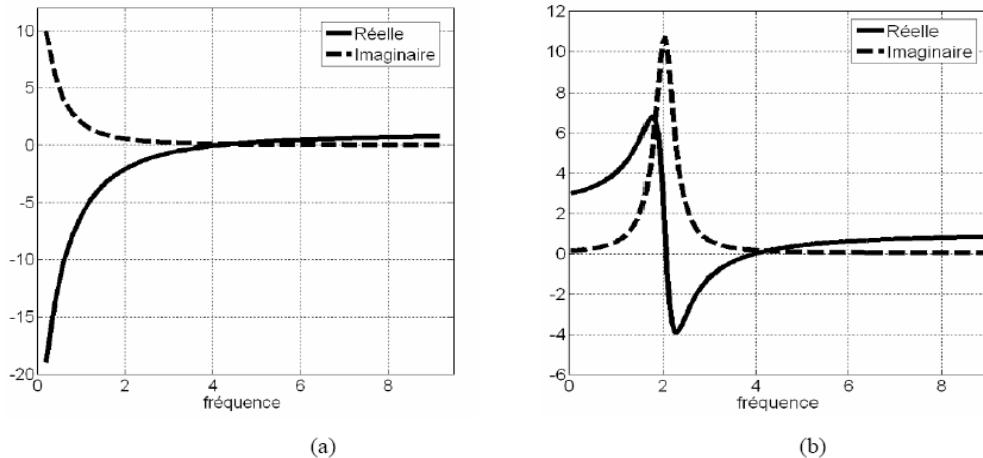


Figure I.5. Illustration des modèles de dispersion (a) Drude, (b) Lorentz pour une fréquence plasma  $\omega_p=5$ ,  $\omega_c=0.5$  une fréquence de résonance  $\omega_0=3$ .

La figure I-6 illustre l'évolution de l'indice de réfraction déduit des valeurs de  $\epsilon$  et  $\mu$  précédentes. On observe effectivement que l'indice est négatif dans la plage (2,4) pour des valeurs d'indice en valeur réelle allant de -2.8 à 0.

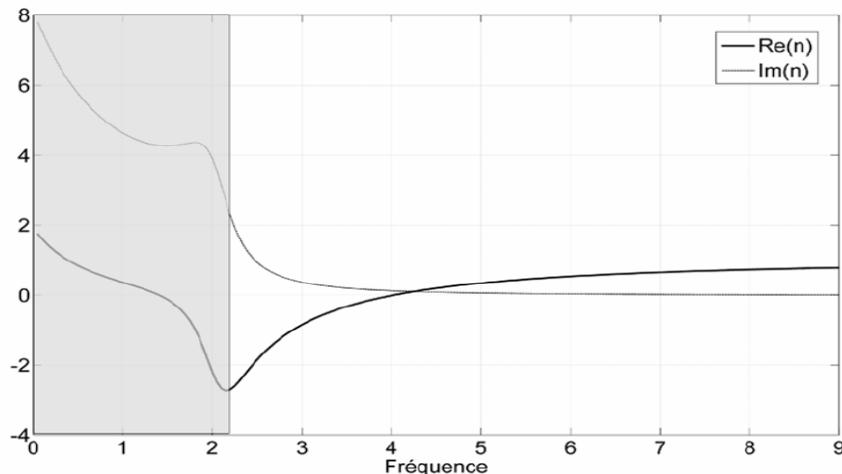


Figure I.6. Exemple d'indice de réfraction d'un métamatériaux composé d'anneaux et de fils. La permittivité suit le modèle de Drude, la perméabilité suit le modèle de Lorentz.  $\epsilon$  et  $\mu < 0$  pour une fréquence compris entre 2.3 et 4.1.

Les métamatériaux se présentent généralement comme des réseaux périodiques et il suffit de connaître les propriétés d'une cellule élémentaire pour déduire celle de l'ensemble. A partir de la structure de bande associée, plusieurs bandes soit main droite, main gauche ou interdite peuvent être identifiées. En simulant ensuite un réseau fini.

Les comportements se révèlent complexes en fonction de la fréquence, mais les métamatériaux représentent un véritable moyen appréhender les phénomènes de réfraction négative. Ils font d'ailleurs l'objet d'études extensives des micro-ondes à l'infrarouge, mais peinent à atteindre actuellement le domaine de l'optique. C'est

pourquoi dans cette gamme de fréquence, les cristaux photoniques apparaissent comme une alternative intéressante. Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels dont l'indice de réfraction est modulé périodiquement dans l'espace et dont les caractéristiques de dispersion peuvent être exploitées pour générer un indice de réfraction négatif [24].

Le travail précurseur de V. G. Veselago, publié en 1968, a montré qu'un milieu doublement négatif pouvait être décrit par un indice de réfraction négatif [25]. Cette hypothèse a été vérifiée, environ 30 ans plus tard, par la démonstration expérimentale de D. R. Smith [23]. Cette première expérience de réfraction a été largement reprise par différents groupes de recherche comme outil de description qualitatif et quantitatif[26–28]. D'un point de vue théorique, la réfraction négative est décrite par la loi de Snell-Descartes énoncée par la relation suivante :

$$\mathbf{n}_1 \sin \theta_1 = \mathbf{n}_2 \sin \theta_2 \quad \text{I-9}$$

où  $\mathbf{n}_1$  et  $\mathbf{n}_2$  sont les indices de réfraction des milieux 1 et 2 respectivement et  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , l'angle de réfraction par rapport à la normale de leur plan de jonction[19].

La valeur absolue de l'indice de réfraction qui, par convention, associe la vitesse de phase se manifestant du vide vers un milieu donné est :

$$\mathbf{n} = \frac{c_0}{v} \quad \text{I-10}$$

$$\text{Or } v = v_p = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad \text{I-11}$$

Donc :

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_p = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad \text{I-12}$$

Cet indice est aussi appelé indice de phase car il est lié à la vitesse de phase par les relations :

$$v_p = \frac{c_a}{|n_p|} = \frac{\omega}{k} \quad \text{I-13}$$

De la même manière, il est possible de définir un indice de groupe  $\mathbf{n}_g$

$$\mathbf{n}_g = \frac{c_0}{|v_g|} = c_0 \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad \text{I-14}$$

Notons que dans un milieu non dispersif, l'indice de groupe est constant et qu'il est égal à l'indice de réfraction. Par contre, pour les milieux périodiques structurés qui sont dispersifs, par définition  $\mathbf{n}_g$  varie et ne peut être utilisé pour caractériser le matériau et définir les propriétés de réfraction[24].

#### I.4 Focalisation

La possibilité de réfracter une onde avec un angle négatif signifie que l'on peut également focaliser une onde à l'aide d'une lentille plane (Figure I-7a). De plus, J. B. Pendry a montré qu'il était envisageable de descendre sous la limite de

diffraction de Rayleigh, autrement dit de focaliser une image avec une résolution inférieure à la demi-longueur d'onde. Ce phénomène est justifié par l'amplification des ondes évanescentes à l'intérieur du milieu doublement négatif (Figures I-7b et I-7c)[22] De cette démonstration théorique est né le concept de superlentille.

Malgré le grand intérêt suscité par cette découverte, on relève à ce jour peu de démonstrations expérimentales en raison des contraintes qu'implique sa mise en œuvre pratique. Tout d'abord, le principe de focalisation tel qu'illustré par la (figure I-7a) sous-entend de travailler avec un indice de réfraction à l'intérieur de la lentille exactement opposé à celui de l'environnement extérieur. Si ces indices ne sont pas égaux en valeur absolue, on n'obtient pas de point focal à l'intérieur de la lentille. Concrètement, si la lentille est interfacée avec l'air, son indice de réfraction doit être égal à -1. De plus, pour limiter les réflexions aux interfaces, il est impératif de respecter la condition d'adaptation d'impédance. Par conséquent, les paramètres effectifs de la lentille doivent respecter les deux équations suivantes :

$$\mathbf{n} = -\sqrt{\mu_{eff}\epsilon_{eff}} = -1 \text{ et } z = \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\epsilon_{eff}}} = 1$$

où  $z$  est l'impédance réduite. Cela implique que les permittivités et perméabilités effectives valent toutes deux -1. Enfin, pour les applications en focalisation, la condition d'anisotropie du milieu est primordiale. Ces difficultés expliquent pourquoi, jusqu'à présent, la plupart des démonstrations expérimentales de superlentille utilisent des cristaux photoniques, qui à défaut de travailler en régime de métamatériaux, offrent certaines facilités de conception notamment au niveau du critère d'isotropie ( $\lambda = 1.5 \mu m$ )[26].

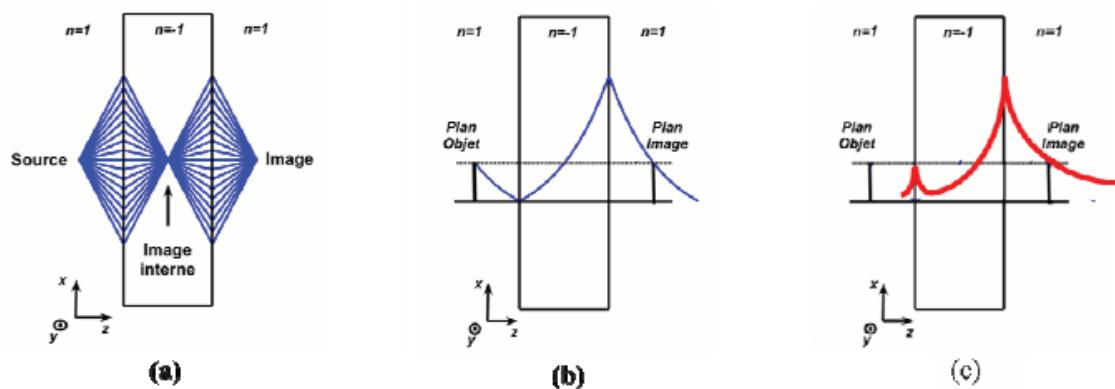


Figure I.7. Illustrations des propriétés de la superlentille (a) focalisation, (b) et (c) amplification des ondes évanescentes.

## I.5 Les cristaux photoniques

### I.5.1. Définition

Un cristal photonique (CP) est un matériau diélectrique où l'indice de réfraction est périodiquement modulé. Il s'agit d'un cristal car le matériau est constitué par un arrangement périodique de briques élémentaires diélectriques d'indice de réfraction  $n_1$  dans une matrice d'indice de réfraction  $n_2$ . Le terme photonique est ajouté car, la périodicité étant de l'ordre de la longueur d'onde de la

lumière, un CP permet de moduler la propagation des photons. Le concept de cristal photonique a été proposé en 1987 par E. Yablonovitch[1] et S. John[32].

### I.5.2. Caractéristiques

#### I.5.2.1. La dimensionnalité :

Celle-ci est déterminée par la périodicité de l'indice de réfraction. Comme le montre la Figure I-8, la périodicité d'un CP peut s'étendre à une, deux ou trois dimensions (1, 2, 3D). Un exemple de CP 1D est un empilement alterné selon un axe de couches d'indices de réfraction différents. Un CP 2D peut être réalisé par un réseau périodique de cylindres de même indice de réfraction dans une matrice d'indice de réfraction différent. Enfin l'arrangement de tiges inclinées et imbriquées forme un CP où l'indice de réfraction varie périodiquement selon les trois directions de l'espace.

#### I.5.2.2. La symétrie :

La position des briques d'un CP détermine la symétrie du réseau. Par exemple, pour un CP 3D de particules sphériques une symétrie cubique, hexagonale compacte (hc) ou cubique à face centrée (cfc) peut être obtenue.

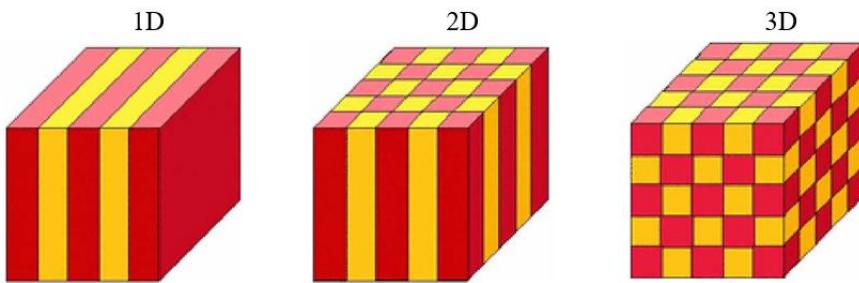


Figure I.8. Représentations schématiques de CP où l'indice de réfraction varie périodiquement suivant une, deux ou trois dimensions. Les zones rouges et jaunes représentent des régions d'indices de réfraction différents.

#### I.5.2.3. Le paramètre du réseau

C'est la distance fondamentale entre deux briques constitutives. Il détermine la région spectrale où le CP interagit avec l'onde électromagnétique.

#### I.5.2.4. Le contraste d'indice de réfraction

Ce paramètre est défini comme le rapport  $n_1/n_2$  entre les indices de réfraction des briques et de la matrice. Il offre une idée générale de la force de diffusion des deux matériaux composants du CP.

## I.6 Applications

La capacité des CP à manipuler, confiner et contrôler la lumière dans les trois directions de l'espace suscite de nombreuses applications. Celles-ci se situent principalement dans les domaines de l'informatique et de la communication, avec la fabrication de dispositifs reproduisant les principes opérationnels des différents

composants d'un circuit intégré, en utilisant les photons comme porteur d'information à la place des électrons. La lumière a en effet plusieurs avantages par rapport aux électrons. Elle peut voyager dans un matériau diélectrique plus rapidement qu'un électron dans un fil métallique ; elle peut porter une grande quantité d'information par seconde ; les interactions entre photons et matériau diélectrique sont moins importantes que celles entre électrons et matériau métallique, ce qui réduit les pertes d'énergie.

Les CPs ont été proposés pour contrôler l'émission spontanée de la lumière. Considérons qu'une entité photosensible, enfouie dans un CP, soit excitée. La transition électronique vers un niveau d'énergie plus bas ne pourra pas se faire aisément, si la fréquence du photon émis est contenue dans la bande interdite photonique complète. Le temps de vie de l'état excité pourra alors être augmenté et la vitesse d'émission spontanée modifiée[33].

### I.6.1. Collimation

Un collimateur est un composant qui permet, à partir d'une source d'onde ponctuelle, d'obtenir un faisceau d'onde dont les rayons sont parallèles. Autrement dit, pour chaque vecteur d'onde incident, les vecteurs d'ondes transmis doivent tous avoir la même direction (Figure I.9) permettant ainsi d'avoir un front d'onde plan.

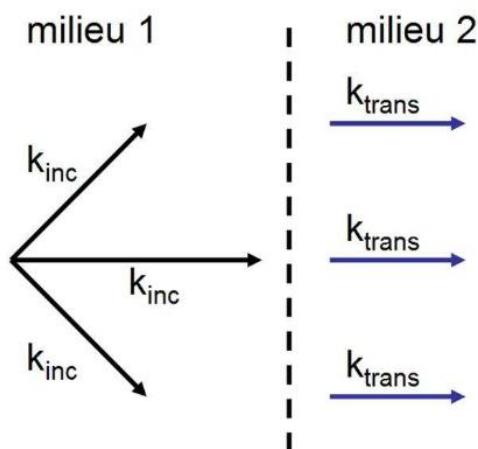


Figure I.9. Représentation des vecteurs d'ondes passant à travers un collimateur

On retrouve cette particularité dans les cristaux photoniques à maille carré pour la première bande en polarisation TM. Pour un réseau de trous de 600 nm de diamètre dans une matrice diélectrique de période 1 µm il existe des modes de Bloch pour lesquels les vecteurs d'ondes réfractés sont dirigés dans la même direction comme le montre la Figure I.10. Sur cet exemple on voit que pour une certaine gamme angulaire de vecteur d'onde incident on obtient le phénomène recherché car la courbure de la courbe iso-fréquence est nulle. A partir de ce résultat on peut dire que pour un réseau carré que l'on pivote de 45° pour avoir l'interface du cristal selon la direction Γ-M on devrait obtenir un cristal qui permet d'obtenir l'effet de collimation d'une source d'onde placée devant lui.

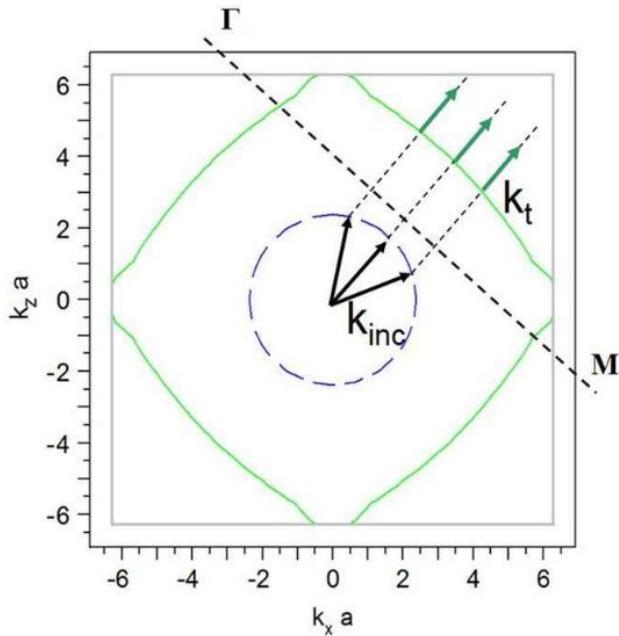


Figure I.10. Courbe équi-fréquence de l'air (pointillé bleu) et du réseau carré (vert).

On peut retrouver cette particularité également en seconde bande. Pour le même réseau la courbe iso-fréquence pour une fréquence normalisée de travail de  $0.28(\lambda a)$  est représentée Figure I.11.

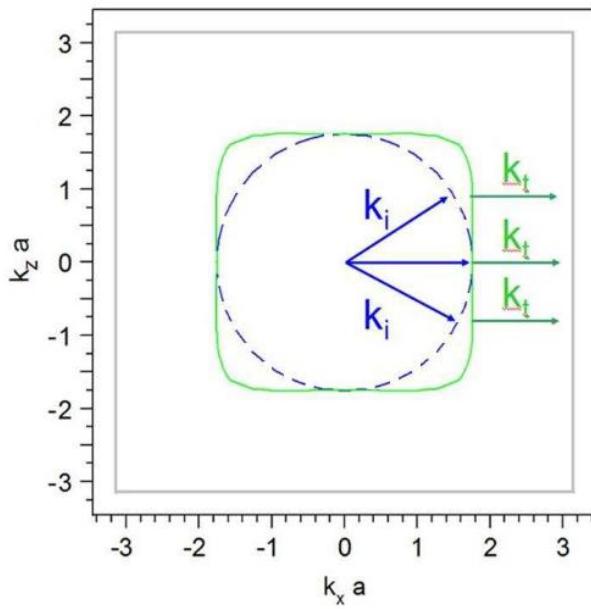


Figure I.11. Courbes équi-fréquences de l'air et du réseau correspondant à la seconde bande pour une fréquence normalisée de 0.28

Un exemple de réalisation est représenté Figure I.15. Une source d'onde circulaire est placée dans un cristal photonique collimateur. On observe alors les quatre directions de propagation attendues.

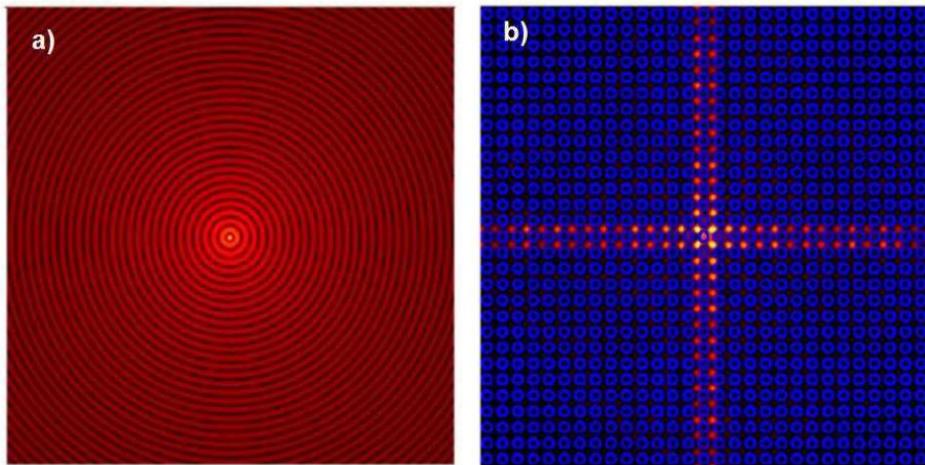


Figure I.12. Représentation d'une source ponctuelle a) dans l'air et b) dans le cristal collimateur

Les courbes iso-fréquences nous permettent ainsi de prévoir les directions de propagation d'une onde électromagnétique réfractée dans un cristal photonique. En cherchant les formes particulières de ces courbes on peut alors créer d'autres composants spécifiques tels qu'un superprisme[34].

### I.6.2. Ultra-réfraction : l'effet super-prisme.

Cet effet exploite également l'anisotropie des courbes iso-fréquences et particulièrement les formes des courbes iso-fréquences très prononcées révélant un milieu très réfractif. C'est donc un effet très sensible à la longueur d'onde de travail ainsi qu'à l'angle d'incidence des rayons. Cet effet peut être obtenu soit par une anisotropie forte du réseau à une fréquence donnée, soit par un comportement du réseau sensible à la fréquence de travail pour une incidence fixe [35].

### I.6.3. Réfraction négative

#### I.6.3.1. En première bande : AANR (All Angle Negative Refraction)

La particularité de cette approche est que l'on peut obtenir un indice de réfraction négatif à partir d'un cristal dont l'indice effectif est positif car on utilise la première bande du diagramme de dispersion[34,35]. Cette méthode est nommée AANR pour All Angle Negative Refraction ou réfraction négative pour tout angle.

#### I.6.3.2. En seconde bande : inversion de courbure de bande

La deuxième approche pour obtenir un régime de réfraction négative dans un cristal photonique est d'utiliser l'inversion de courbure de la deuxième bande [29]. En effet, sur le diagramme de bande Figure I.16, la première bande présente une pente positive donc des vitesses de phase et de groupe qui pointent dans la même direction. A l'inverse, la seconde bande présente une pente négative avec des valeurs de  $\omega$  diminuant lorsque  $k$  augmente. On se retrouve donc dans un cas où

vitesse de groupe et vitesse de phase sont de signe opposé, caractéristique d'un phénomène de réfraction négative. Comme la vitesse de phase suit la direction  $-k$  alors la vitesse de groupe suit la direction  $k$  qui est la même que la direction de l'énergie de l'onde. Si on choisit notre fréquence de travail au croisement entre la seconde bande et le cône de lumière (droite de pente  $\omega = ck$ ), on se retrouve très précisément dans le cas d'un cristal photonique à indice négatif égal à -1.

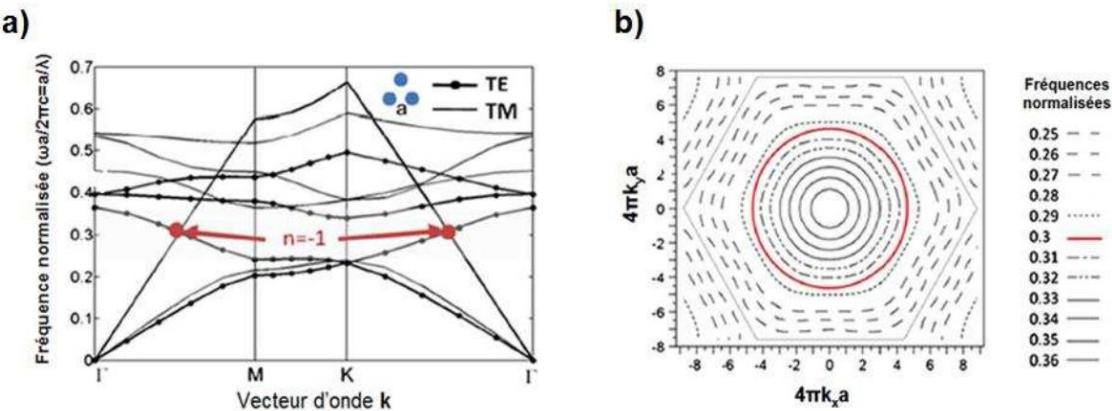


Figure I. 13 a) Diagramme de dispersion du réseau hexagonal de période 476nm et de diamètre 347nm b) Contours iso-fréquences du même réseau dans l'espace des k

De plus comme le montre la Figure I.13b, pour le choix d'un réseau triangulaire de période 476nm et des trous de 347nm de diamètre, on obtient pour ce point de fonctionnement une courbe isofréquence quasi-circulaire. L'indice de réfraction -1 est donc conservé quel que soit l'incidence de l'onde. On peut donc s'attendre dans ce cas à ce qu'une lame de cristal photonique permette d'observer le phénomène de double focalisation

Pour conclure sur les différentes applications potentielles que l'on peut obtenir grâce aux cristaux photoniques en bande permise ou interdite, la Figure I.17 représente un diagramme de bande avec chaque effet exploitable selon la particularité des branches de dispersion.

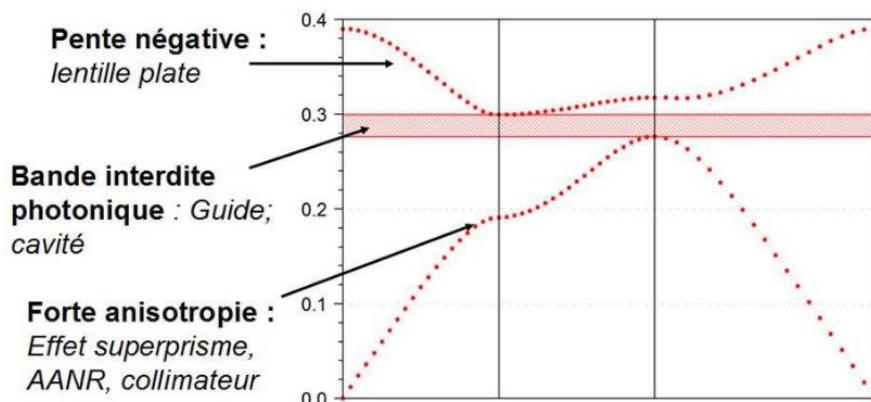


Figure I.14. Courbe de dispersion d'un cristal photonique avec les applications possibles associées aux points de fonctionnements particuliers.

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de bases associées aux métamatériaux et cristaux photoniques. Qui introduit les équations de Maxwell pour décrire la propagation électromagnétique et classifie les matériaux en fonction de leur permittivité et perméabilité. En expliquant comment les métamatériaux peuvent présenter une réfraction négative en manipulant ces propriétés. Nous avons notamment introduit les caractéristiques des relations de dispersion des cristaux photoniques bidimensionnels. Qui nous servira par la suite pour étudier et simuler ces structures. Ces structures artificielles ouvrent la voie à des dispositifs novateurs capables de manipuler la lumière de manières impossibles avec les matériaux naturels. Offrant des applications en bande permise ou interdite comme la collimation et l'ultra-réfraction, ainsi que la possibilité d'une réfraction négative.

**Méthodes Numériques  
Et  
Outils de simulation**

## Chapitre II Méthodes Numériques Et Outils de simulation

### II.1 Introduction

Avec l'évolution rapide des moyens informatiques et des logiciels de calcul scientifique, les méthodes numériques ont pris une part prédominante dans la résolution des problèmes électromagnétiques. Dans ce domaine nous pouvons classer les méthodes en deux groupes : d'une part, celles qui, comme la méthode des moments (MM), ne nécessitent pas le maillage de l'espace entourant l'objet et, d'autre part, celles qui, comme la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), et la méthode des éléments finis (FE), qui nécessitent un maillage de l'espace.

Dans le cas de la méthode des moments, la prise en compte de l'espace libre entourant l'objet analyse est en principe parfaite. Ce type de méthode pose néanmoins des problèmes difficiles à résoudre dans le cas d'un milieu fortement hétérogène. Les méthodes FDTD ou FE utilisent les équations de Maxwell dans l'espace entièrement discrétilisé. Un avantage notable de ces méthodes réside dans le fait qu'elles sont à même de prendre en compte des structures fortement hétérogènes. Cependant leur problème principal est lié à la taille du maillage de l'espace. De multiples études ont été menées pour tenter de remédier à ce problème. Ainsi de nombreuses méthodes ont permis de réduire, sans perte sensible de précision, l'espace à discrétiliser[38].

### II.2 Méthode des ondes planes

La méthode des ondes planes était la première méthode utilisée pour la détermination des modes propres et du diagramme de dispersion des structures périodiques de dimensions infinies inspirée de la méthode de calcul de bande utilisée en physique du solide pour les matériaux à bande interdite électronique. Elle est basée sur la décomposition de la permittivité et des ondes de Bloch sur une base de Fourier utilisant les vecteurs réciproques du cristal[39].

Cette méthode est l'une des méthodes les plus employées aujourd'hui pour résoudre des équations aux dérivées partielles, et notamment les équations de Maxwell qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Elle est basée sur la technique d'approximation par éléments finis qui permet d'approcher une fonction polynôme dans un espace donné à partir de la connaissance des valeurs en certains noeuds du domaine. Il faut pour cela diviser le domaine d'étude de ces fonctions en sous-domaines élémentaires appelés éléments. Ces fonctions locales ont l'avantage d'être plus simple que celles que l'on pourrait éventuellement utiliser pour représenter la totalité du domaine de calcul. Grâce à la diversité des éléments pouvant être employés, notamment les triangles en 2D ou les tétraèdres en 3D, cette méthode est très répandue pour la modélisation de géométries complexes. Le caractère répétitif de la méthode qui consiste à appliquer le même opérateur sur chaque élément a rendu cette méthode très efficace. Cette méthode exige un traitement particulier des équations qui sont transformées à l'aide d'une formulation intégrale, puis discrétilisées pour aboutir à un système d'équations

algébriques. La méthode est robuste mais nécessite généralement des moyens de calculs importants.

La méthode FE utilise une approximation par parties de la fonction inconnue, pour résoudre une équation différentielle. L'équivalence physique peut être utilisée pour trouver une solution de l'équation aux dérivées partielles. Cependant, la complexité des géométries des systèmes considérés, rend très difficile, voire impossible, de trouver une approximation de la solution dans l'ensemble du domaine étudié. Pour contourner cette difficulté, on subdivise le domaine en sous-domaines appelés éléments finis, sur lesquels on effectue localement une interpolation pour approcher la fonction inconnue. Le domaine considéré est limité par une frontière où la valeur du potentiel est supposée connue. Les éléments finis qui sont utilisés pour discréteriser le domaine sont généralement regroupés en familles topologiques : segments, triangles, quadrilatères, tétraèdres, parallélépipèdes, prismes (Figure II-1). Chaque élément est représenté par des points appelés nœuds géométriques. A chaque élément, on associe des nœuds d'interpolation où l'inconnue sera calculée. Ainsi, à chaque élément résultant de la subdivision, la fonction modélisant le phénomène est définie par une interpolation polynomiale[40].

$$\mathbf{V} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{V}_i \quad \text{II-1}$$

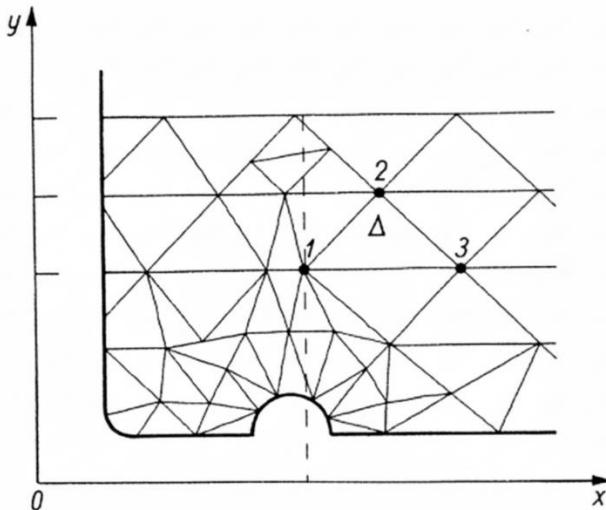


Figure II.1. Fragment du champ avec le maillage destiné aux calculs par la méthode des éléments finis

$N$  est le nombre de nœuds d'interpolations ;  $\lambda_i$  sont les fonctions d'interpolation et  $\mathbf{V}_i$  les valeurs nodales.

Le principe de base consiste à trouver la distribution des valeurs nodales ;  $\lambda_i$  qui vérifient les équations aux dérivées partielles et qui remplissent les conditions aux limites. Ceci peut être effectué soit par une méthode variationnelle qui minimise une fonction équivalente au problème différentiel posé, ou en utilisant une méthode de projection comme la projection de Galerkin qui traite directement l'équation aux dérivées partielles. L'ordre du polynôme dépend du type d'élément

; par exemple, pour un élément quadratique unidimensionnel décrit par l'abscisse curviligne  $\mu$  située dans l'intervalle  $[-1, 1]$ , les fonctions d'interpolation sont[39,40]:

$$\begin{aligned}\lambda_1(\mu) &= \frac{1}{2}\mu(\mu - 1) \\ \lambda_2(\mu) &= 1 - \mu^2 \\ \lambda_3(\mu) &= \frac{1}{2}\mu(\mu + 1)\end{aligned}\quad \text{II-2}$$

Considérons par exemple, l'équation de Poisson. Nous cherchons une approximation  $\mathbf{V}'$  de  $\mathbf{V}$  qui minimise la quantité R :

$$R = (\Delta V' + \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon}) \quad \text{II-3}$$

Où  $\rho$  est la densité volumique de charge.

Parmi les méthodes permettant d'annuler une quantité donnée dans un domaine  $\Omega$ , la méthode des résidus pondérés est souvent utilisée. On choisit un système de fonctions linéaires indépendantes  $W_n$ , appelées fonctions de projection, puis on annule toutes les intégrales (II-4) à chaque élément fini.

$$I_n = \int_{\Omega} W_n R d\Omega \quad \text{II-4}$$

On obtient ainsi une formulation intégrale de la méthode des éléments finis. Il existe également des sous-méthodes de la méthode des résidus pondérés (collocation point par point, collocation par sous-domaines, Galerkin, moindres carrés), selon le choix des fonctions pondérées.

La méthode de Galerkin est la plus utilisée. Elle consiste à prendre les mêmes expressions mathématiques des fonctions de projection et d'interpolation :

$$\lambda_i(\mu) = W(\mu) \quad \text{II-5}$$

Pour chaque élément, on annule les N intégrales (II-4) correspondant aux N fonctions de projection. Ce système d'équations peut s'écrire sous une forme matricielle :

$$\vec{A}_e \vec{V}_e = \vec{b}_e \quad \text{II-6}$$

Avec  $A_e$  étant la matrice associée à l'élément considéré, dont les coefficients dépendent des coordonnées des nœuds de l'élément. Les composantes de  $V_e$  sont les inconnues aux nœuds du même élément. Les vecteurs  $b_e$  prennent en compte les conditions aux limites éventuelles en certains nœuds de l'élément considéré. En écrivant l'équation (II-6) pour tous les éléments, on obtient une série d'équations algébriques parmi lesquelles la solution de potentiel dans le domaine étudié[38].

### II.2.1. Application aux matériaux composites

La méthode FE a été largement utilisée pour la modélisation des matériaux composites aléatoires ou périodiques, linéaires ou non linéaires, avec ou sans pertes que ce soit dans les cas 2D ou 3D. Cette méthode a été employée par divers auteurs pour le calcul de la permittivité effective complexe de matériaux composites à partir de la résolution de l'équation de Laplace et l'utilisation de conditions aux limites appropriées.

Considérons en premier lieu, le cas d'une structure périodique sans perte. Soit un composite diélectrique périodique à deux phases contenant une inclusion de forme arbitraire dans une matrice. En prenant en compte les propriétés de symétrie et de périodicité, la géométrie du matériau est réduite à une cellule élémentaire comme le montre la Figure II.2, qui est assimilé à un condensateur plan-plan.

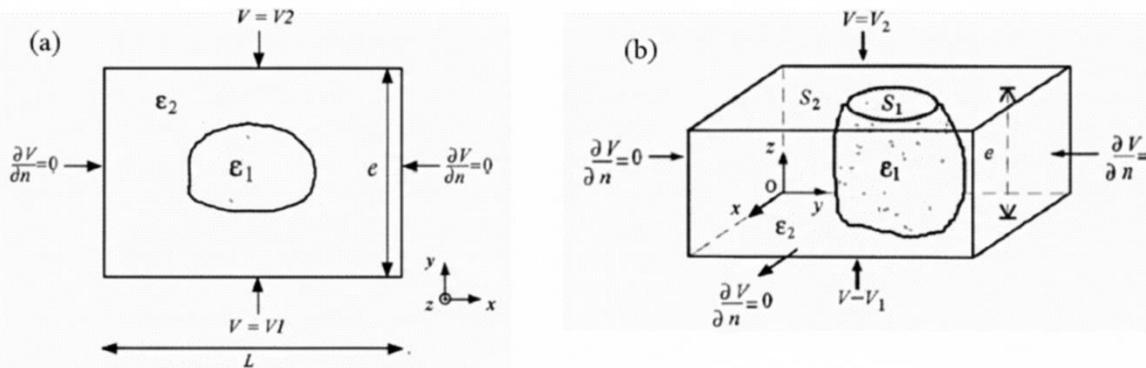


Figure II.2. Modélisation d'un composite périodique : (a) 2D, (b) 3D

Le calcul de la permittivité effective des structures composites 2D procède en trois étapes :

1-définition des cellules élémentaires contenant une grille de points permettant une bonne approximation du domaine spatial. L'espace est rempli de l'arrangement désiré, c'est à dire les permittivités effectives des cellules sont égales à  $\epsilon_1$  ou  $\epsilon_2$  selon que la cellule est remplie de la phase 1 ou de la phase 2.

2-calculation de la distribution du potentiel local à l'intérieur de  $\Omega$  où il n'y a ni charges libres, ni courants, obtenue par la résolution de l'équation (II-7).

$$\vec{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{r}) \vec{\nabla} V(\mathbf{r})) = 0 \quad \text{II-7}$$

où  $\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{r})$  et  $V(\mathbf{r})$  désignent la permittivité et le potentiel locaux.

L'énergie électrostatique peut être calculée à partir des valeurs des dérivées du potentiel  $V$  aux nœuds du maillage sur toute la surface  $S$  du composite à l'aide de l'équation :

$$E_e = \frac{1}{2} \iint_S \boldsymbol{\epsilon}(x, y) \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad \text{II-8}$$

La permittivité effective dans la direction du champ électrique appliqué, c'est à dire.  $\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}_y$ , est obtenue par la condition de continuité de la composante normale du vecteur déplacement électrique via :

$$\int_s \epsilon_1 \left( \frac{\partial V}{\partial n} \right) = \epsilon \frac{V_2 - V_1}{L} S \quad \text{II-9}$$

Où  $V_2 - V_1$  représente la différence de potentiel imposé dans la direction y, L est l'épaisseur du composite dans la même direction et S désigne la "surface" de la cellule unité qui est perpendiculaire au champ appliqué. Le potentiel sur le haut de la structure est fixé à  $V_2 = 1V$ , alors que sur l'autre face  $V_1$  est pris à 0V.

### 3-Génération automatique ou semi-automatique du maillage

L'interaction d'un champ électromagnétique avec un matériau diélectrique homogène et isotrope peut être caractérisé par une permittivité (relative) décrite par un nombre complexe :  $\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}' - j\boldsymbol{\epsilon}''$ . Le calcul de  $\boldsymbol{\epsilon}'$  et  $\boldsymbol{\epsilon}''$  se généralise aisément à partir de l'évaluation précédente de  $\boldsymbol{\epsilon}$  de la façon suivante :

Pour un milieu diélectrique, les solutions numériques du problème electrostatique sont basées dans le cas général sur la résolution de l'équation de Poisson

$$\vec{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\epsilon} \boldsymbol{\epsilon}_0 \vec{\nabla} V) = -\rho \quad \text{II-10}$$

Si le milieu est conducteur, sans charges libres, ni sources, la solution du problème est donnée par la résolution de

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = 0 \quad \text{II-11}$$

Avec  $\sigma$  définissant la conductivité du milieu. Lorsque le milieu considéré est intermédiaire entre les deux cas limites considérés précédemment (milieu avec pertes diélectriques), alors la solution du problème dépend du temps, et est donnée par un potentiel électrique complexe qui satisfait l'équation de continuité :

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) + \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial t} (\boldsymbol{\epsilon} \boldsymbol{\epsilon}_0 \vec{\nabla} V) \right) = 0 \quad \text{II-12}$$

Ou de façon équivalente dans l'espace de Fourier (en prenant un potentiel harmonique proportionnel à  $\exp(j\omega t)$ ), en considérant un milieu sans charges libres, par :

$$\vec{\nabla} \cdot (j\boldsymbol{\epsilon}_0 \boldsymbol{\epsilon}(\omega) \omega \vec{\nabla} V) = 0 \quad \text{II-13}$$

L'équation (II-13) est analogue à l'équation (II-7) en posant  $\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}' - j\boldsymbol{\epsilon}''$  avec  $\boldsymbol{\epsilon}'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$ . Myroshnychenko et Brosseau [20,21] ont développé une approche plus générale permettant l'évaluation de la permittivité effective complexe d'une structure hétérogène aléatoire en couplant une analyse FE de cette structure avec

un code de type Monte Carlo qui permet de générer différents types de désordre dans la structure (Fig.II-3).

### II.2.2. Maillage

La génération d'un maillage de haute qualité joue un rôle crucial dans l'analyse par éléments finis. Celle-ci est faite par l'utilisation du code de calcul. Le calcul du champ par un logiciel permet la génération contrôlée des mailles d'élément finis par l'utilisation des fichiers d'entrée contenant des instructions complètes avec des caractéristiques de maille de nœud-par-nœud et d'élément-par-élément. Il permet d'obtenir un maillage à la fois suffisamment fin pour garantir la qualité de la convergence et suffisamment réduit pour obtenir des résultats avec des ressources et un temps limité.

Le maillage des surfaces constitue une des étapes essentielles dans la modélisation des matériaux hétérogènes. Cette étape fait passer les surfaces de l'état de contour à l'état de surfaces élémentaires. Rappelons qu'il est possible d'utiliser un meilleur manuel, où les surfaces sont maillées soit au coup par coup, c'est à dire, surface après surface, soit toutes à la fois. Le maillage est ensuite affiné en propageant une ou plusieurs lignes de maillage et/ou en divisant les éléments du maillage. A titre d'exemple, la Fig. (2.4, resp. 2.5) représente le maillage avec des cellules unité en 2D avec une inclusion isolée de type fractal (triangle de Sierpinski)[38].

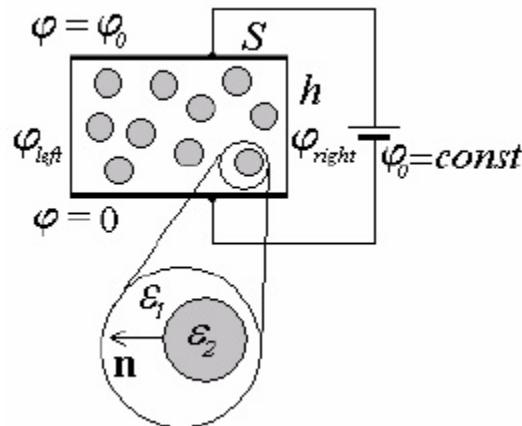


Figure II.3. Principe du calcul de la permittivité effective d'un composite aléatoire.

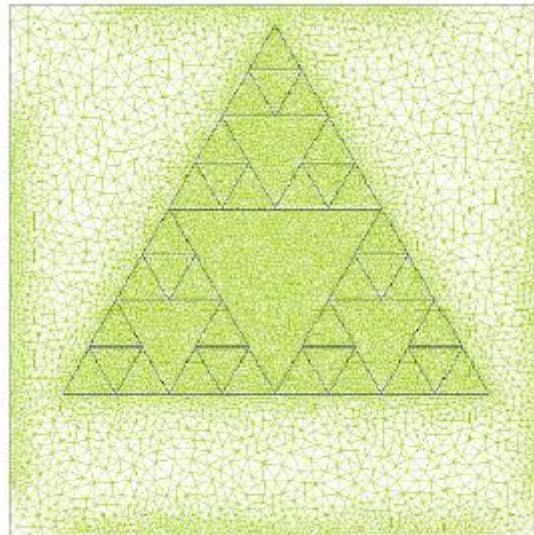


Figure II.4. Maillage des cellules unité en 2D avec une inclusion de type triangle de Sierpinski.

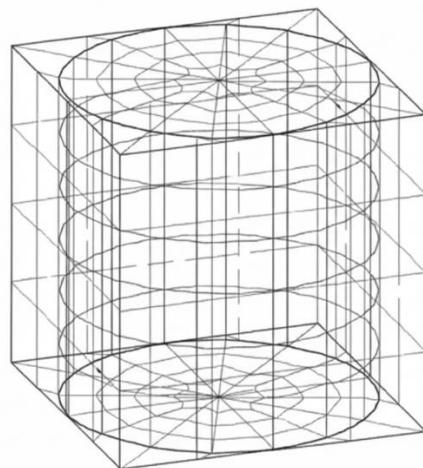


Figure II.5. Maillage des cellules unité en 3D avec une inclusion cylindrique de hauteur finie.

### II.3 Méthode des différences finies temporelles (FDTD)

La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) a été initialement proposée par Kane S. Yee en 1966[43] pour résoudre les problèmes impliquant[44] les équations de Maxwell dans les milieux isotropes avec les conditions aux limites. Il a développé les premiers algorithmes de calcul concernant l'approche temporelle. Elle a été ensuite appliquée aux cristaux photoniques. La méthode FDTD permet une résolution numérique des équations de Maxwell par une fine discrétisation spatio-temporelle. L'espace est divisé en cellules élémentaires (mailles élémentaires). Elle possède de nombreux avantages :

-Le calcul de toutes les composantes de champs à tous les instants et sur tout le domaine de calcul permet d'obtenir de nombreuses informations, grâce à

l'utilisation de la transformée de Fourier. Elle est particulièrement intéressante pour connaître la réponse spectrale d'un système.

-La possibilité de donner des résultats précis même sur les structures à fort contraste d'indice comme les cristaux photoniques.

-La résolution des équations dans le domaine temporel, permet d'appréhender visuellement la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau périodique. Cela a permis d'étudier l'évolution de la transmission et de la réflexion à l'intérieur du cristal photonique à étudier.

-L'étude de réseaux de taille finie grâce aux conditions aux limites absorbantes ou bien de réseau de taille infini en utilisant les conditions de mur magnétique ou de mur électrique.

-La possibilité d'intégrer dans l'algorithme de résolution de nombreuses sources (ondes planes, modes guidés, ...)[39,45–49].

### II.3.1. Principe de la méthode

La méthode FDTD se fonde sur la résolution directe des équations de Maxwell dans la structure étudiée. Nous considérons dans la suite, un milieu homogène, isotrope, non dispersif, sans source et transparent caractérisé par une permittivité (relative)  $\epsilon$  et une perméabilité magnétique (relative)  $\mu$  réelles. Les équations différentielles de Maxwell-Faraday et de Maxwell-Ampère sont définies dans le domaine temporel par :

$$\vec{\text{rot}} \vec{\text{H}} = \frac{\partial(\epsilon \vec{\text{E}})}{\partial t} \quad \text{II-14}$$

$$\vec{\text{rot}} \vec{\text{E}} = -\frac{\partial(\mu \vec{\text{H}})}{\partial t} \quad \text{II-15}$$

Où  $\vec{\text{E}}$  et  $\vec{\text{H}}$  désignent les champs électrique et magnétique, respectivement. En projetant les équations (II-14) et (II-15) dans un repère Cartésien ( $O, x, y, z$ ), on obtient :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad \text{II-16}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad \text{II-17}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad \text{II-18}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \quad \text{II-19}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad \text{II-20}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \quad \text{II-21}$$

Pour résoudre ce système d'équations, on applique la méthode des différences finies. La démarche consiste à évaluer chaque dérivée spatiale et temporelle des six composantes des champs. De plus, la réduction de ce système dans le plan ( $x, y$ ) permet de découpler ce système en deux sous-systèmes indépendants. L'un fait intervenir les composantes du champ magnétique du plan ( $H_x, H_y$ ) et la composante normale au plan ( $H_z$ ) ; l'autre fait intervenir les composantes du champ électrique du plan ( $E_x, E_y$ ) et la composante normale au plan ( $E_z$ ). Le premier cas se réfère au mode TM (transverse magnétique) et le second cas se réfère au mode TE (transverse électrique)[38].

La réduction de ce système dans un plan ( $x, y$ ) permet de le découpler en deux sous-systèmes indépendants :

1) En mode TM (transverse magnétique), le système fait intervenir les composantes ( $E_x, E_y, H_z$ ) :

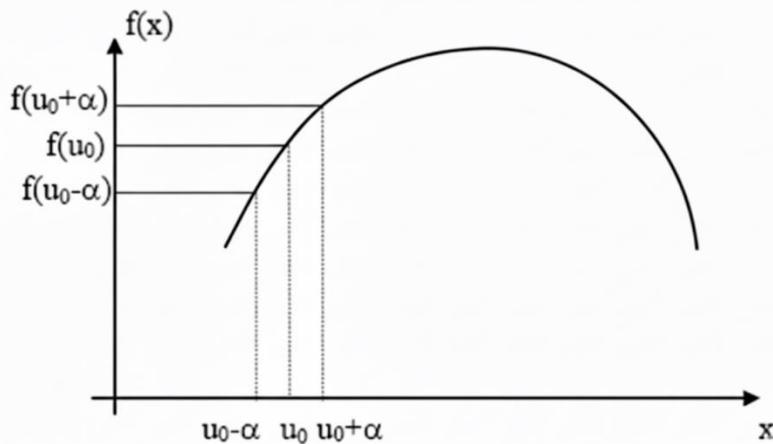
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \end{array} \right\} \quad \text{II-22}$$

1) En mode TE (transverse électrique), le système fait intervenir les composantes ( $H_x, H_y, H_z$ ) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \end{array} \right\} \quad \text{II-23}$$

Le développement limité de Taylor au deuxième ordre nous permet d'obtenir les dérivées temporelles et spatiales des fonctions ( $E_x, E_y, H_z$ ) et ( $H_x, H_y, H_z$ ). Rappelons brièvement cette discréétisation en utilisant une fonction  $f$  à une seule variable  $u$ .

Supposons que  $f$  est continue et connue aux points  $u_1 = u_0 - \alpha$  et  $u_2 = u_0 + \alpha$  (Figure II-6). Il est possible d'évaluer numériquement la dérivée de  $f$  en  $u_0$  en utilisant un développement limité de Taylor aux points  $u_1$  et  $u_2$ .

Figure II.6. Calcul de la dérivée de  $f(x)$  en  $u_0$ 

Ce qui donne :

$$f(\mathbf{u}_\alpha - \alpha) = f(\mathbf{u}_\alpha) - \alpha \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}}(\mathbf{u}_0) + \frac{\alpha^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial \mathbf{u}^2}(\mathbf{u}_0) - \dots + \frac{\alpha^i}{2!} \frac{\partial^i f}{\partial \mathbf{u}^i}(\mathbf{u}_0) \quad \text{II-24}$$

Et :

$$f(\mathbf{u}_\alpha + \alpha) = f(\mathbf{u}_\alpha) + \alpha \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}}(\mathbf{u}_0) - \frac{\alpha^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial \mathbf{u}^2}(\mathbf{u}_0) + \dots - \frac{\alpha^i}{2!} \frac{\partial^i f}{\partial \mathbf{u}^i}(\mathbf{u}_0) \quad \text{II-25}$$

La dérivée de  $f$  au point  $u_0$  est approchée de manière centrée en calculant la différence entre les équations (II-24) et (II-25) à l'ordre 2, comme suit :

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}}(\mathbf{u}_0) = \frac{f(\mathbf{u}_0 + \alpha) - f(\mathbf{u}_0 - \alpha)}{2\alpha} + \theta(\alpha^2) \quad \text{II-26}$$

Cette solution génère une erreur d'ordre 2( $\theta(\alpha^2)$ ). Beaucoup plus intéressante qu'une erreur d'ordre 1.

### II.3.2. Discréétisation des équations de Maxwell et algorithme de Yee

L'algorithme de Yee[43] utilise un maillage spatial où chaque composante du champ  $\vec{\mathbf{E}}$  est entourée par 4 composantes du champ  $\vec{\mathbf{H}}$ , et inversement. L'espace est divisé en cellules élémentaires parallélépipédiques, à l'intérieur desquelles sont calculées les 6 composantes orthogonales des champs électromagnétiques.

La forme des équations de Maxwell permet de calculer le champ électrique au milieu des arêtes des mailles. Les composantes du champ magnétique sont déterminées au centre des faces (Figure II.7).

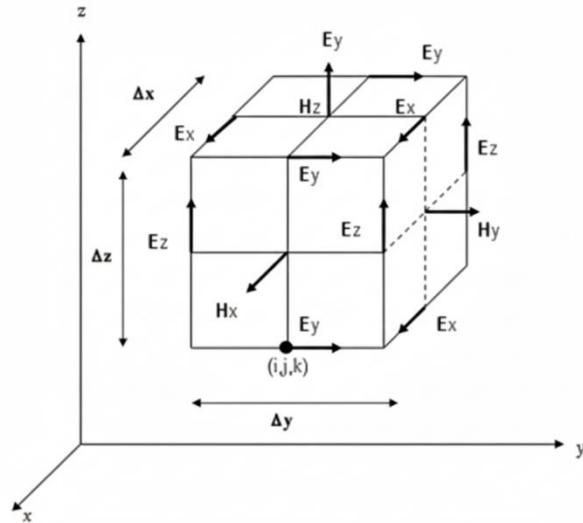


Figure II.7. Cellule cubique de yee

L'espace 3D est discrétement par un maillage de pas  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ , où  $\Delta$  représente le pas de discréttisation dans l'espace, et  $\Delta t$  celui du temps.

Les champs électriques et magnétiques seront évalués respectivement aux instants  $n\Delta t$  et  $(n + 1/2)\Delta t$ .  $\Delta t$  avec  $n$  un entier naturel. Les discréttisations spatiales des composantes du champ électrique et magnétique seront décalées de  $\Delta/2$  (figure II-8).

Les équations finales discréttisées sur cet espace et dans le temps permettent de calculer la valeur d'une composante de champs en un point de la grille à un instant  $t + \Delta t$  en fonction de :

- Cette même composante au temps précédent  $t$
- Des valeurs de champs voisines (4 composantes  $E$  si on calcule une composante  $H$  mais seulement 2 composantes  $H$  si on calcule une composante  $E$ ), calculées au temps  $t - \Delta t/2$  (Figure II-9).

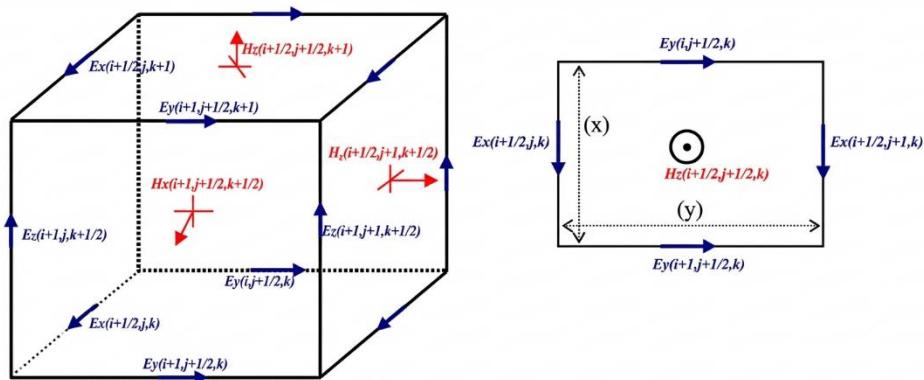


Figure II.8. Cellule de Yee (discréttisation spatiale) à trois (à gauche) et à deux (à droite) dimensions.

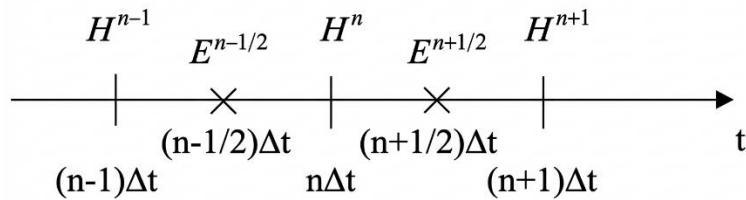


Figure II. 9. Décomposition numérique du calcul

Les différentes composantes des champs à l'instant  $t$  sont évaluées en fonction de ces mêmes composantes à l'instant  $t - \Delta t$  et des composantes de champ voisines ( $t - \Delta t/2$ ), (Figure II.9).

L'évolution du champ électromagnétique en fonction du temps est donc déterminée en chaque point du réseau par un processus itératif. En partant de :

$$\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} \right)$$

A l'aide des équations suivantes :

$$\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial t} = \frac{\mathbf{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - \mathbf{H}_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})}{\Delta t} \quad \text{II-27}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial y} = \frac{\mathbf{E}_x^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - \mathbf{E}_x^n(i+\frac{1}{2}, j)}{4y} \quad \text{II-28}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} = \frac{\mathbf{E}_y^n(i, j+\frac{1}{2}) - \mathbf{E}_x^n(i+1, j+\frac{1}{2})}{4y} \quad \text{II-29}$$

$$\mathbf{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) = \mathbf{H}_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})\Delta} [\mathbf{E}_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1) - \mathbf{E}_x^n(i+\frac{1}{2}, j) + \mathbf{E}_y^n(i, j+\frac{1}{2}) - \mathbf{E}_x^n(i+1, j+\frac{1}{2})] \quad \text{II-30}$$

Le calcul des deux composantes de  $\vec{\mathbf{E}}$  se fera de la manière que précédemment, ce qui nous donne :

$$\mathbf{E}_z^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j) = \mathbf{E}_z^n(i+\frac{1}{2}, j) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j)\Delta} \left[ \mathbf{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - \mathbf{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}) \right] \quad \text{II-31}$$

$$\mathbf{E}_y^{n+1}(i, j+\frac{1}{2}) = \mathbf{E}_y^n(i, j+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j+\frac{1}{2})\Delta} \left[ \mathbf{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j) - \mathbf{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) \right] \quad \text{II-32}$$

### II.3.3. Algorithme FDTD

L'algorithme du programme FDTD présenté ci-dessous figure II-10, permet de comprendre comment le décalage temporel entre le champ électrique et magnétique est pris en compte. Concrètement, l'évaluation du champ magnétique a lieu entre deux calculs du champ électrique. Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment.

Initialement toutes les composantes du champ électromagnétique sont nulles, sauf Hz au centre de la cellule qui modélise une source ponctuelle. Cette source entraîne une variation du champ électrique. Ainsi l'onde électromagnétique se propage de proche en proche dans tout le volume de calcul[39].

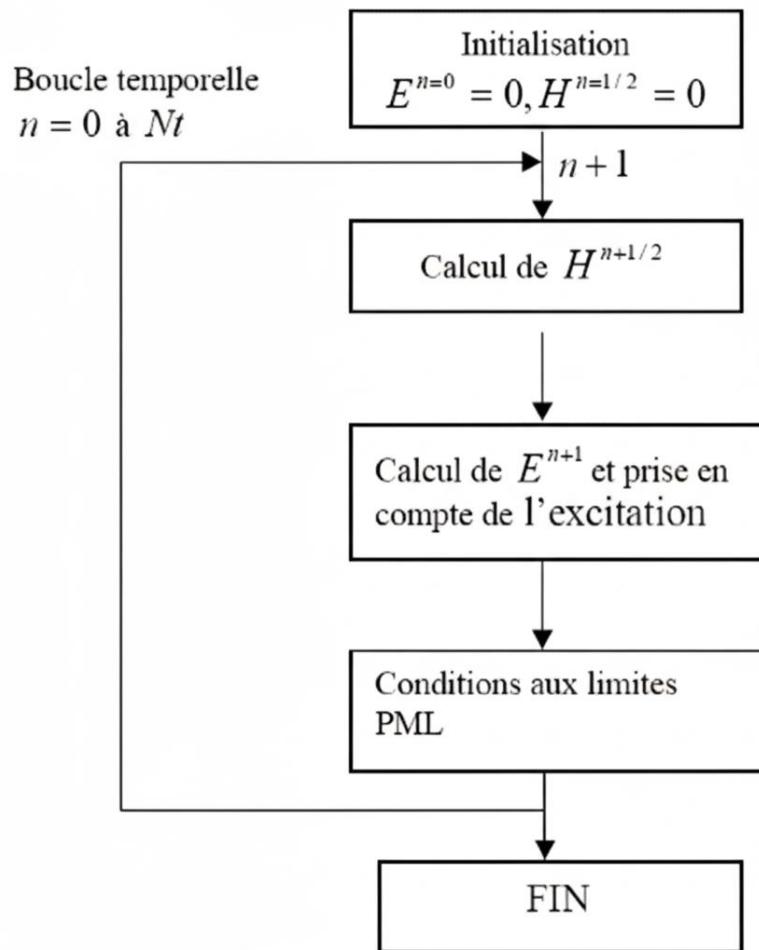


Figure II.10. Organigramme de l'algorithme de calcul des champs par FDTD

### II.3.4. Condition de stabilité

Comme tous les schémas explicites, le schéma de Yee[43] est soumis à une condition de stabilité[50] fixant le pas temporel à partir de la discrétisation initiale de l'espace de simulation. Les problèmes de stabilité des méthodes numériques explicites ont été analysés en détail par Courant, Friedrich et Lewy (CFL)[51], ainsi que par Von Neumann, à partir d'une approche mathématique rigoureuse. Taflove[47] a notamment appliqué l'approche de type CFL à la méthode FDTD.

Le critère CFL donné par l'inégalité (II-33), permet de palier à la divergence des calculs engendrée par l'approximation des dérivées.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2 + (1/\Delta z)^2}} \quad \text{II-33}$$

Avec  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  désignant la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le vide.

Dans le cas d'un maillage uniforme  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$  l'inégalité (II-33), se réduit à :

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{3}} \Delta \quad \text{à } 3D \quad \text{II-34}$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{2}} \Delta \quad \text{à } 2D \quad \text{II-35}$$

Ce critère de stabilité reste adéquat pour la plupart des milieux (diélectrique, magnétique, dispersif, avec ou sans pertes), car la vitesse de phase est inférieure à  $c$  dans ces milieux. Cette condition se comprend assez intuitivement : il faut que le pas temporel soit suffisant pour permettre de décrire la propagation de l'onde d'un nœud au nœud le plus proche distant de  $\Delta$ . Plus le maillage spatial sera fin et plus le nombre d'itérations pour décrire un temps  $T$  de propagation sera important.

### II.3.5. Dispersion numérique

La numérisation des équations de Maxwell introduit une dispersion appelée dispersion numérique. Cela s'exprime par le fait que les signaux numériques se propagent au cours du temps, dans le domaine de calcul, avec des vitesses de phase et de groupe différentes suivant leur fréquence mais aussi suivant leur direction de propagation par rapport aux axes du repère Cartésien. Les erreurs de dispersion numérique croissent lorsque la fréquence des signaux augmente et quand la taille du domaine de calcul augmente, ce qui rend les résultats de simulation de moins en moins fiables. Elles peuvent apparaître sous diverse formes : erreur de phase, déformation des signaux, perte en amplitude, élargissement des impulsions[38].

## II.4 Outils de simulation

### II.4.1. La structure périodique bidimensionnelle

Ces structures périodiques sont composées de cylindres diélectriques. Elles présentent une relative simplicité géométrique qui facilitent les études théoriques et expérimentales.

Les structures périodiques bidimensionnelles sont périodiques suivant deux directions de l'espace et infinies suivant la troisième.

Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

- Les structures dites « connectées » (Figure II.11) : les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  inférieur à l'indice  $n_2$  de la matrice diélectrique.

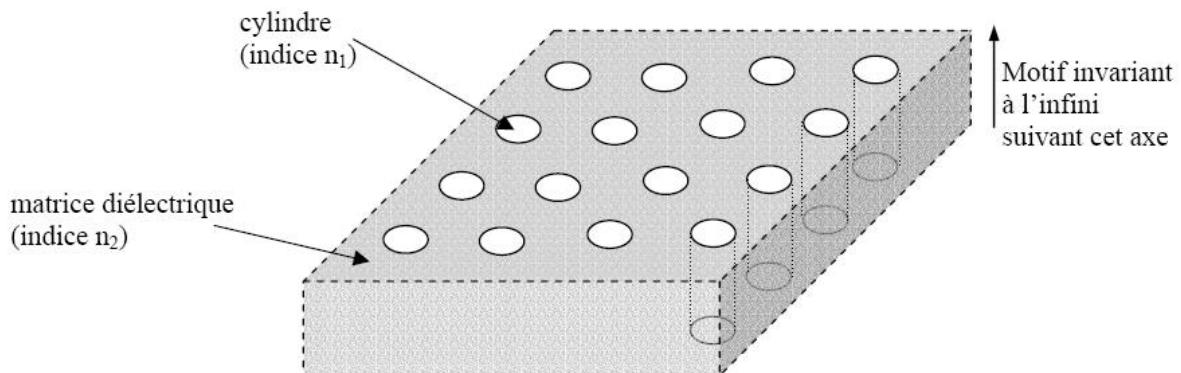


Figure II. 11 Structure périodique 2D connectée

- Les structures dites « déconnectées » (Figure II.12) : les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_2$  de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air ou de la mousse[52].

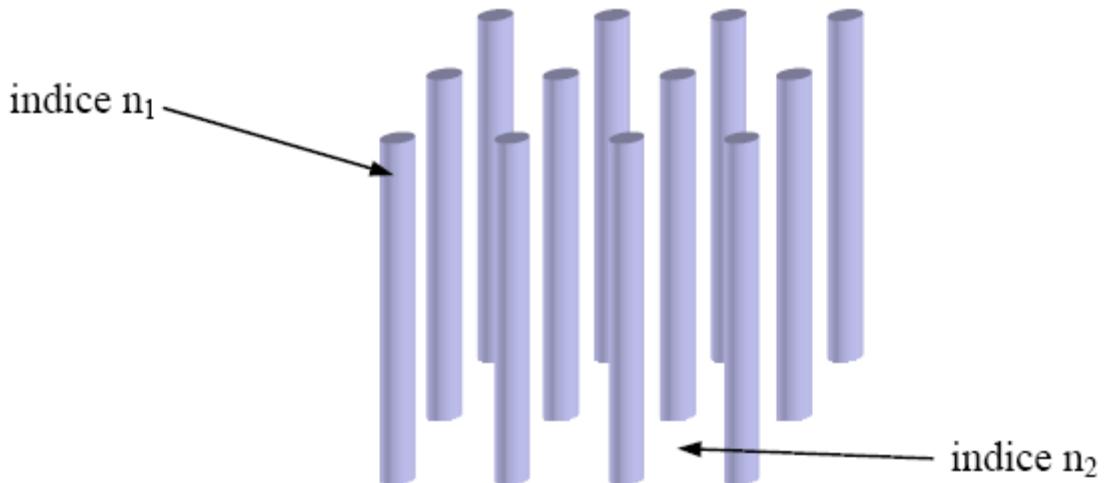


Figure II.12. Structure périodique 2D déconnectée

## II.5 Méthode de calcul

Pour calculer les structures de bandes de matériaux périodiques bidimensionnels, nous utilisons la méthode de décomposition en ondes planes. Indiquons que dans ce cadre, nous travaillons sur des cristaux photoniques constitués de matériaux sans pertes d'indice, de permittivité et de perméabilité réelles.

La méthode de la décomposition en ondes planes permet un calcul rapide des courbes de dispersion. Elle s'applique sur toutes les structures dont la constante diélectrique est périodique. Les équations de Maxwell sont représentées dans le domaine fréquentiel puis transformées en un problème aux valeurs propres. Les champs électrique E et magnétique H sont ainsi développés en une somme d'ondes planes.

L'équation résultante aux valeurs propres est alors résolue sur la maille élémentaire du cristal.

## II.6 Polarisation Transverse Electrique (TE) et Transverse Magnétique (TM)

Dans le cas de structures de périodicité 2D, on peut décomposer l'ensemble des modes de propagation suivant deux classes de polarisation découplées : TE et TM. Leurs principales caractéristiques sont détaillées dans la Figure II.13.

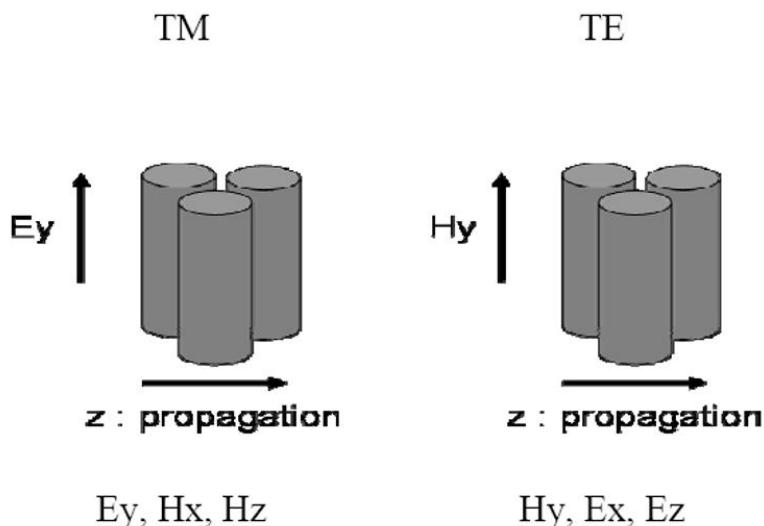


Figure II.13. Récapitulatif des propriétés des modes d'un CP 2D.

## II.7 Réseau réciproque et zone de Brillouin

Pour le calcul du diagramme de bande constitué de l'ensemble des courbes  $\omega(\mathbf{k})$  du cristal photonique, il est possible de considérer l'ensemble des vecteurs constituant la première zone de Brillouin réduite. La zone de Brillouin est un sous-espace de l'espace réciproque défini par la maille primitive, dite de Wigner-Seitz, dans l'espace des vecteurs d'onde  $\mathbf{k}$ .

Ainsi, le réseau de CP 2D à maille carrée est décrit dans l'espace réciproque par une zone de Brillouin carrée alors que le réseau triangulaire par une zone hexagonale. Par symétrie, on peut encore réduire dans l'espace réciproque, l'intervalle d'étude minimale pour restituer l'ensemble des propriétés du cristal à la « zone de Brillouin réduite ». Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau de la Figure II.14 pour les deux réseaux. La zone réduite est référencée par les points

de haute symétrie  $\Gamma$ , X et M pour la maille carrée et  $\Gamma$ ,K et M pour la maille triangulaire[24].

	<i>direct</i>	<i>réciproque</i>	<i>zone de Brillouin</i>
carrée	 $a_1 = a(0,1)$ $a_2 = a(1,0)$	 $b_1 = \frac{2\pi}{a}(0,1)$ $b_2 = \frac{2\pi}{a}(1,0)$	 $\Gamma = (0,0)$ $X = \left(\frac{\pi}{a}, 0\right)$ $M = \left(\frac{\pi}{a}, \frac{\pi}{a}\right)$
triangulaire	 $a_1 = a\left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ $a_2 = a\left(\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	 $b_1 = \frac{2\pi}{a}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)$ $b_2 = \frac{2\pi}{a}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2}\right)$	 $\Gamma = (0,0)$ $K = \left(\frac{2\pi}{3a}, \frac{2\pi}{\sqrt{3}a}\right)$ $M = \left(0, \frac{2\pi}{\sqrt{3}a}\right)$

Figure II.14. Représentation du réseau carré et triangulaire de période  $a$  dans l'espace direct et réciproque correspondant. La zone de Brillouin réduite est décrite par les points de haute symétrie.

## II.8 Diagramme de bande :

L'utilisation de la méthode des ondes plane qui est un outil numérique permettant de calculer les bandes de fréquences autorisées ou interdites des ondes électromagnétiques susceptible de se propager dans le matériau considéré comme milieu propageant et ceci pour n'importe quelle direction.

Cette méthode nous permet d'obtenir des diagrammes de dispersion que moyennant certaines symétries du cristal, l'étude peut se limiter aux vecteurs  $k$  situés à l'intérieur d'une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. La complexité du diagramme dépend de la dimension du cristal considéré (1D, 2D ou 3D). Le calcul d'un diagramme de bandes est le plus souvent réalisé à l'aide de la méthode générale des ondes planes qui reste la référence pour le calcul des bandes interdites dans les cristaux photoniques[53]. Elle s'appuie sur les équations de Maxwell et sur le théorème de Floquet-Bloch[54]. Présenté dans la Figure II.15.

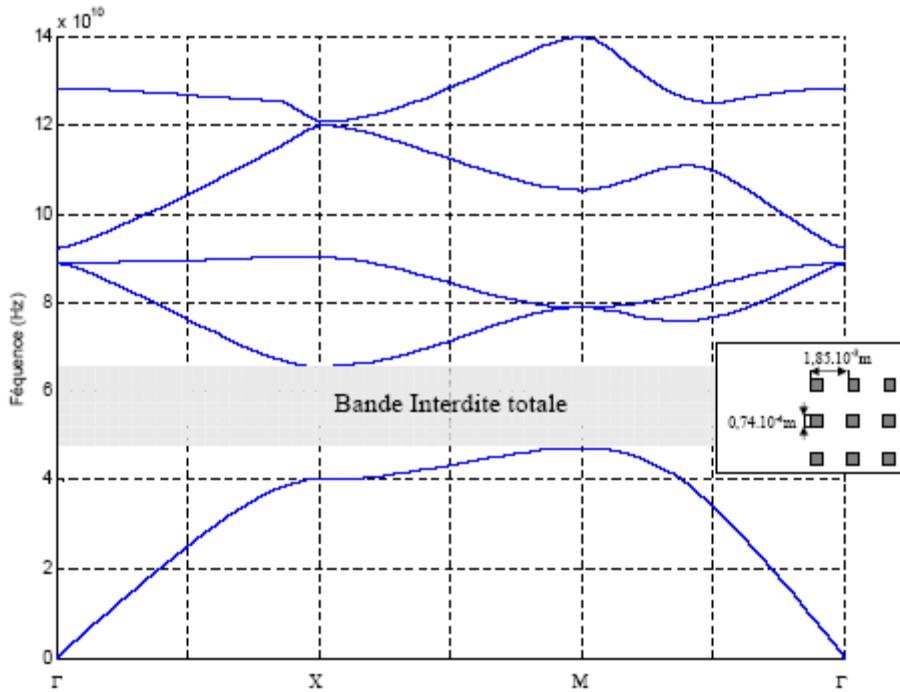


Figure II.15. Diagramme de bande d'un cristal PBG 2D

Ce diagramme représente :

- En abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie  $\Gamma, X, M$  de la première zone de Brillouin.
- En ordonnée, la fréquence des modes calculés.

Pour chaque vecteur d'onde du contour, il existe plusieurs fréquences correspondant aux différents modes de propagation susceptible de se propager dans le cristal photonique. En fonction de ce calcul, nous pouvons alors déterminer la ou les bandes interdites du matériau. En considérant toutes les directions possibles, nous pouvons alors avoir une bande interdite totale lorsque deux modes ne sont pas sécants. C'est cette bande de fréquence qui est caractéristique des matériaux à bande interdite photonique[52].

## II.9 Notion de bande interdite photonique

Une analogie entre le comportement des électrons dans un cristal semi-conducteur et le comportement des photons dans un CP peut être établie. Dans un semi-conducteur, la variation périodique du potentiel d'interaction entre électrons et atomes fait que les électrons n'ont accès qu'à certains niveaux d'énergie, des bandes d'énergie permises, séparées entre elles par des bandes d'énergies interdites. Ce concept de bandes permises et interdites peut être étendu au comportement des photons dans un CP. A cause de la variation périodique de l'indice de réfraction  $n$  dans un CP, l'énergie des photons est quantifiée en bandes permises et en bandes interdites, appelées aussi gaps.

Les bandes permises et interdites d'un CP se regroupent dans un diagramme de bandes photoniques, qui est une représentation des fréquences possibles pour l'onde électromagnétique au sein du CP en fonction de son vecteur d'onde (sa direction de propagation au sein du cristal). Afin d'expliquer le concept de diagramme de bandes photoniques, prenons le cas d'un CP 2D constitué par un réseau de cylindres dans une symétrie cubique (Figure II-16)[33].

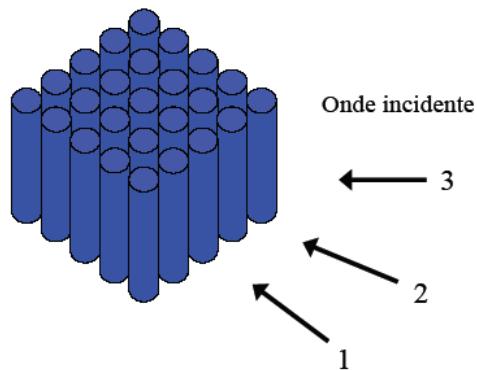


Figure II.16. Schéma d'un CP 2D constitué par un réseau de cylindres dans une symétrie cubique et des différentes directions de propagation de l'onde incidente.

A deux dimensions, les cristaux photoniques sont composés d'un réseau périodique de piliers de diélectrique dans l'air ou de trous d'air percés dans un diélectrique. Les deux réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont le réseau carre et le réseau triangulaire (ou hexagonal). La Figure II-17 présente ces deux réseaux avec leurs zones de Brillouin respectives. Pour un réseau carré de période  $a$ , la première zone de Brillouin est un carré de cote  $2\pi/a$ . Par des considérations de symétrie (le carré possédant 4 axes de symétrie principaux), on peut montrer que la zone de Brillouin irréductible est un triangle rectangle isocèle de sommets  $\Gamma$ , X, M. Pour le réseau triangulaire, le réseau réciproque est aussi un réseau triangulaire. Sa zone de Brillouin irréductible est un triangle rectangle de sommets  $\Gamma$ , K, M. Dans les deux cas, il suffit de suivre l'évolution du vecteur d'onde  $k$  sur les trois côtés du triangle pour atteindre les extrêmes de  $\omega(k)$ . On peut alors tracer le diagramme de bande  $\omega = f(k)$  qui représente les variations des fréquences permises dans le réseau en fonction de la projection du vecteur d'onde suivant les directions de haute symétrie de celui-ci[55].

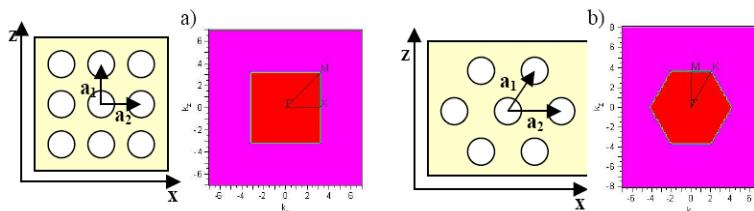


Figure II.17. a) Réseau carré et sa zone de Brillouin associée et b) Réseau triangulaire et sa zone de Brillouin associée

La partie gauche de la Figure II-18(a), montre le diagramme de bandes du CP pour une certaine direction de propagation de la lumière. Nous pouvons distinguer deux bandes permises (courbe noire et rouge). L'onde électromagnétique pourra se propager dans le CP comme dans un milieu diélectrique homogène, si son énergie est contenue dans ces bandes permises. Ces deux bandes permises sont séparées par une bande interdite (région grise) où aucune fréquence n'est autorisée. Si l'énergie de l'onde incidente est comprise dans cette bande interdite, alors l'onde est alors diffusée de manière cohérente aux interfaces entre les régions d'indices de réfraction différents du CP. On dit qu'elle est diffractée par le CP. Ce phénomène, qui satisfait la condition de diffraction de Bragg, est à l'origine des irisations des opales naturelles.

Expérimentalement, une bande interdite est mise en évidence en mesurant la réponse du matériau soumis à un faisceau lumineux, en transmission ou en réflexion. Cette dernière est caractérisée par l'apparition d'un minimum de la transmission, respectivement un maximum de la réflexion, comme le montre la partie droite de la Figure II-18(a).

Dans le cas d'un CP caractérisé par un contraste d'indice faible, la position spectrale d'une bande interdite dépend de la direction de propagation de l'onde incidente. Pour s'en convaincre, la Figure II-18(b) montre le diagramme de bande du même CP mais pour trois directions de propagation de l'onde incidente différentes (référencées par 1, 2, 3). La bande interdite précédemment observée pour la direction 1 se déplace vers des fréquences plus grandes dans le cas de la direction 2, alors qu'une seconde bande interdite apparaît pour une gamme de fréquences différentes dans le cas où l'onde incidente pénètre dans le CP dans la direction 3.

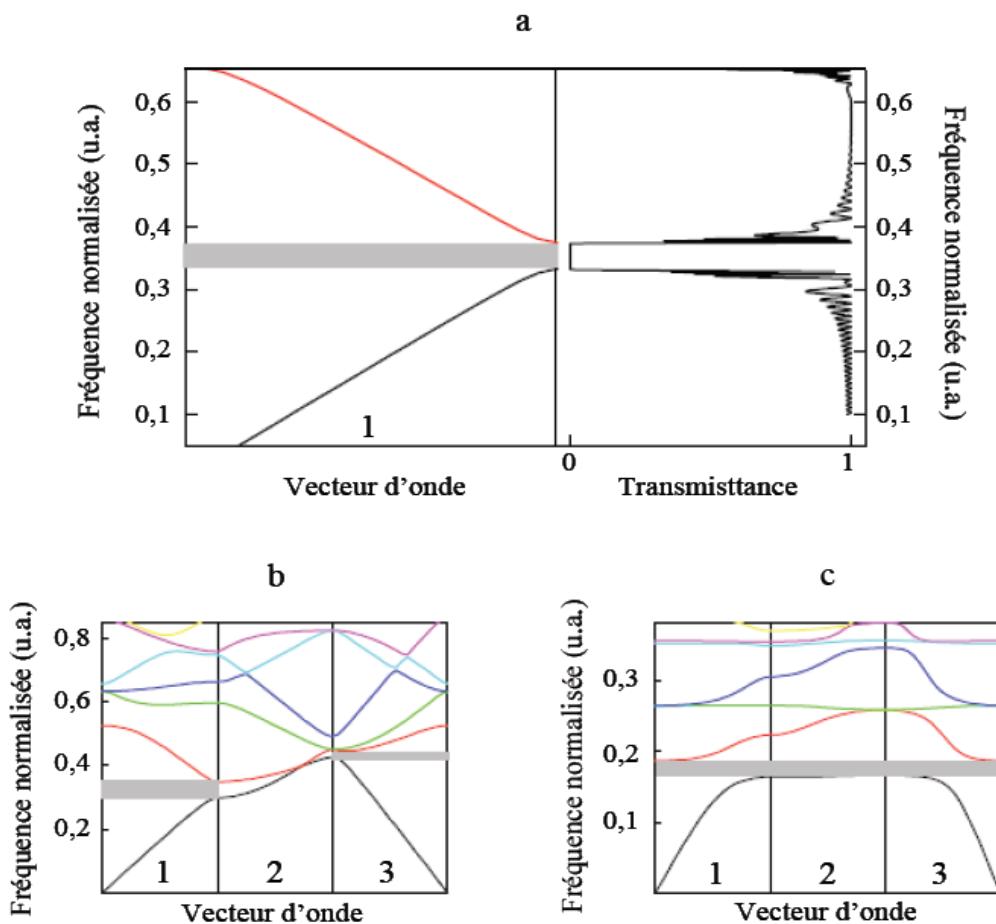


Figure II.18. a) Comparaison du diagramme de bandes du CP caractérisé par un contraste d'indice de réfraction égal à 1,5 (calculé par la méthode de l'approximation d'onde scalaire) avec sa réponse optique en transmission calculée par la méthode des matrices de transfert. Pour la direction de propagation 1. Diagrammes de bandes du même CP de contraste d'indice de réfraction égal à  $n=2$  (b) et  $n=6$  (c) pour trois directions de propagation de l'onde incidente différentes

En revanche, dans le cas d'un CP présentant une symétrie cristalline adaptée, un contraste d'indice de réfraction suffisamment élevé et constitué de briques élémentaires de forme appropriée, les bandes interdites peuvent devenir assez larges et se recouvrir pour une certaine gamme de fréquence (Figure II-18c). La propagation de la lumière est de la sorte interdite dans le matériau pour ces fréquences, selon toutes les directions de l'espace. On parle alors de bande interdite photonique complète. Pour cette gamme d'énergie, la densité d'état photonique est nulle dans le matériau. Il se comporte comme un miroir parfait.

Il existe de nombreux degrés de liberté lors de la conception d'un cristal photonique 2D. En particulier, il est possible pour un type de réseau choisi d'ajuster le paramètre de maille et le facteur de remplissage surfacique (rapport surface d'air/surface totale). Ces paramètres influencent directement les propriétés et l'allure du diagramme de bandes associé au cristal photonique réalisé, en particulier la largeur et la position de la bande interdite. La configuration la plus propice à l'obtention d'une bande interdite complète (c'est-à-dire en TE et en TM) est le réseau triangulaire de trous dans un diélectrique de haut indice de réfraction. En

effet, la bande interdite sera d'autant plus large que le contraste d'indice est grand. Quant au réseau triangulaire, sa première zone de Brillouin est celle qui a la forme circulaire possible, donc la plus favorable à l'ouverture d'une bande interdite. Un exemple de bande interdite complète est donné sur la Figure II-19 dans le cas d'un réseau hexagonal de trous d'air dans du silicium.

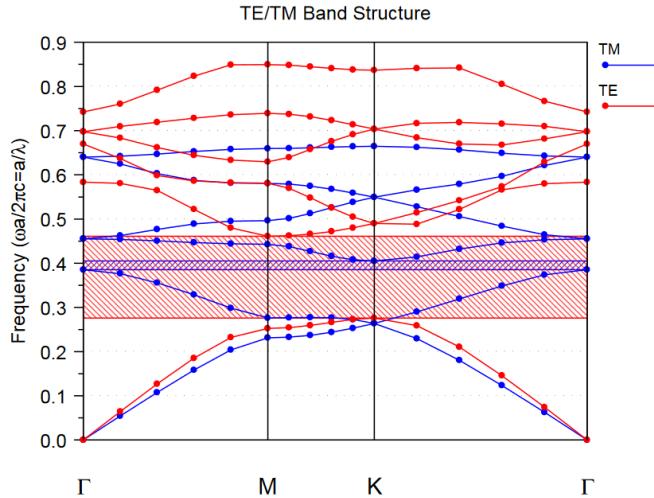


Figure II.19. Diagramme de dispersion d'un réseau hexagonal de trous d'air dans du silicium avec  $\epsilon = 11,6$  et  $r/a=0,43$  pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu). Les zones hachurées marquent les PBG de chacune des polarisations. Seules les fréquences comprises entre 0,385 et 0,406 permettent l'ouverture d'une bande interdite complète.

## II.10 La ligne de lumière

L'exemple de diagramme de bandes présenté sur la Figure II-19 est remplacé par celui de la figure II-20. On définit alors la notion de ligne de lumière qui marque la limite entre les longueurs d'onde qui seront réfléchies à l'interface couche guidante /couche de confinement (la lumière restera alors dans la couche de guidante) et celles qui seront réfractées (la lumière sortira du cristal). Les modes situés sous la ligne de lumière sont des modes parfaitement guidés qui restent confinés dans le plan, alors que les modes situés au-dessus de la ligne de lumière peuvent se coupler au continuum des modes rayonnés qui sont des modes totalement délocalisés. Les modes situés au-dessus de la ligne de lumière perdent de l'énergie dans la troisième direction au cours de leur propagation et sont donc des modes à pertes (ou quasi-guidés).

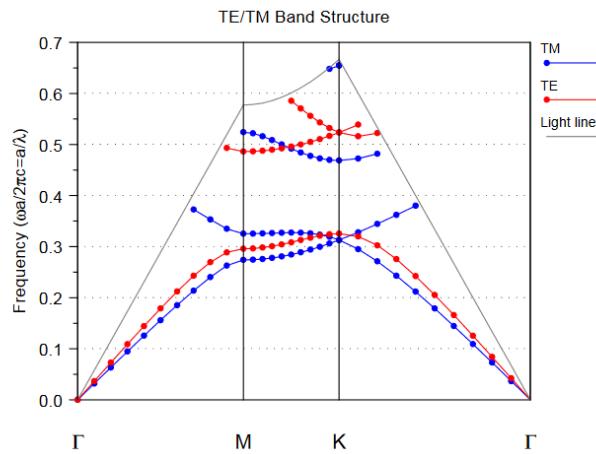


Figure II. 20 Diagramme de bandes d'un réseau hexagonal de trous en géométrie guide d'onde avec  $\epsilon = 11,6$  et  $r/a=0,43$ , pour une épaisseur de guide de 220 nm. La ligne de lumière est indiquée en traits noirs.

## II.11 Courbes iso-fréquences

La courbe iso-fréquence est tracée dans la première zone de Brillouin pour toutes les directions du plan  $[k_x, k_y]$ . Elle représente les modes de Bloch se propageant dans le cristal à une fréquence donnée. Chaque point représente une onde de Bloch. La vitesse de groupe de chaque onde est donnée par le gradient en ce point. Pour expliquer la construction d'une courbe iso-fréquence, il faut se rappeler les relations de continuité à l'interface entre deux milieux différents (Figure. II.21).

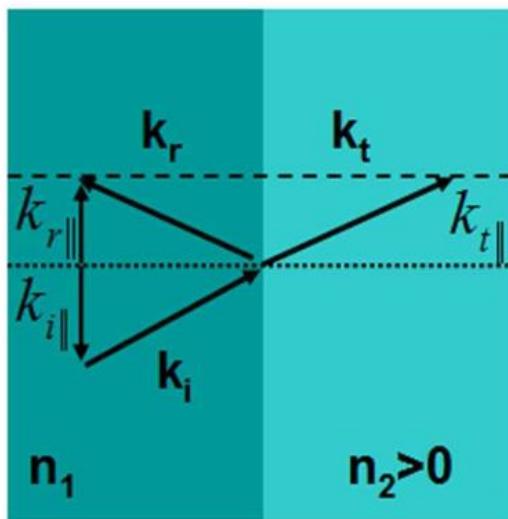


Figure II.21. Conservation des composantes parallèles du vecteur d'onde lors du passage du milieu 1 au milieu 2

On sait que les composantes tangentielles des champs E et H sont continuées à l'interface. On a donc une égalité entre les composantes parallèles des vecteurs d'ondes incidents, réfléchis et transmis :

$$\mathbf{k}_{\parallel,\text{incident}} = \mathbf{k}_{\parallel,\text{réfléchit}} = \mathbf{k}_{\parallel,\text{transmis}}$$

II-36

Avec :  $\mathbf{k}_{\parallel} = \mathbf{n}_i \sin(\theta_i)$ .

On sait que dans un milieu homogène :

$$\mathbf{k} = \frac{n\omega}{c} \quad \text{Avec } \mathbf{k}^2 = \mathbf{k}_{\perp}^2 + \mathbf{k}_{\parallel}^2$$

$$\text{On a alors : } \mathbf{k}_{\perp}^2 + \mathbf{k}_{\parallel}^2 = \left(\frac{n_i\omega}{c}\right)^2 \quad \text{avec } i = 1, 2 \quad \text{II-37}$$

Cette équation nous permet de voir que dans un milieu homogène d'indice  $n_i$  la courbe équifréquence est un cercle concentrique. Si maintenant on s'intéresse au comportement des vecteurs d'ondes à l'interface entre deux milieux homogènes d'indice  $n_1$  et  $n_2$ , alors il faut tracer un cercle pour chaque milieu dans la première zone de Brillouin. Ainsi pour chaque angle incident de composante  $k_i$ , on peut en déduire la composante réfléchie  $k_r$  du vecteur d'onde ainsi que l'angle de la composante transmise  $k_t$  (Figure II.22). Le tracé de ces cercles nous donne une information visuelle immédiate de la direction que prendra l'onde après le passage d'un milieu à un autre.

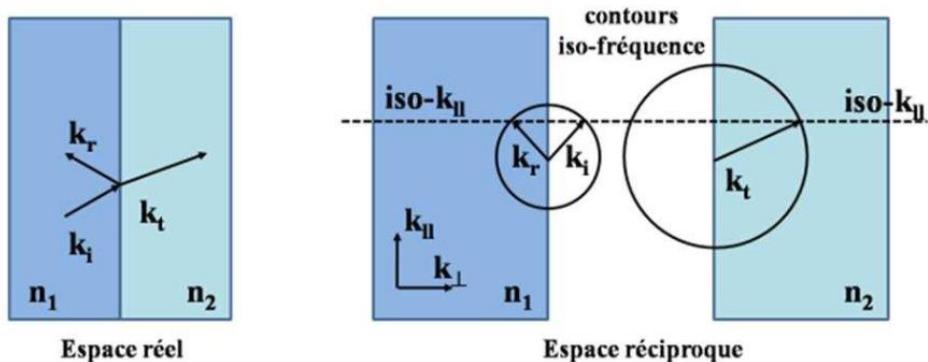


Figure II.22. Tracé des composantes des vecteurs d'ondes à partir des courbes iso-fréquences.

La simulation de ces courbes permet également d'accéder à l'information sur l'isotropie du milieu. Si la courbe iso-fréquence, représentant les rayons réfractés dans le deuxième milieu, est un cercle, et que pour chaque rayon incident il existe un rayon réfracté, alors le second milieu est isotrope. C'est une propriété qui sera utilisée pour l'étude de la lentille à indice de réfraction négatif car cette dernière nécessite dans le cas idéal un milieu isotrope.

Pour mieux comprendre ces notions, nous étudions les diagrammes de bandes et les courbes iso-fréquences d'un réseau carré de piliers d'indice 3.26 placés dans l'air ( $n=1$ ). La période est de 450nm pour un diamètre de pilier de 325nm et les polarisations TE et TM sont étudiées. La Figure II.23 représente pour chaque polarisation, le diagramme de bande pour les trois premières bandes d'énergie, ainsi que les courbes iso-fréquences pour les deux premières bandes d'énergie.

### Réseau carré

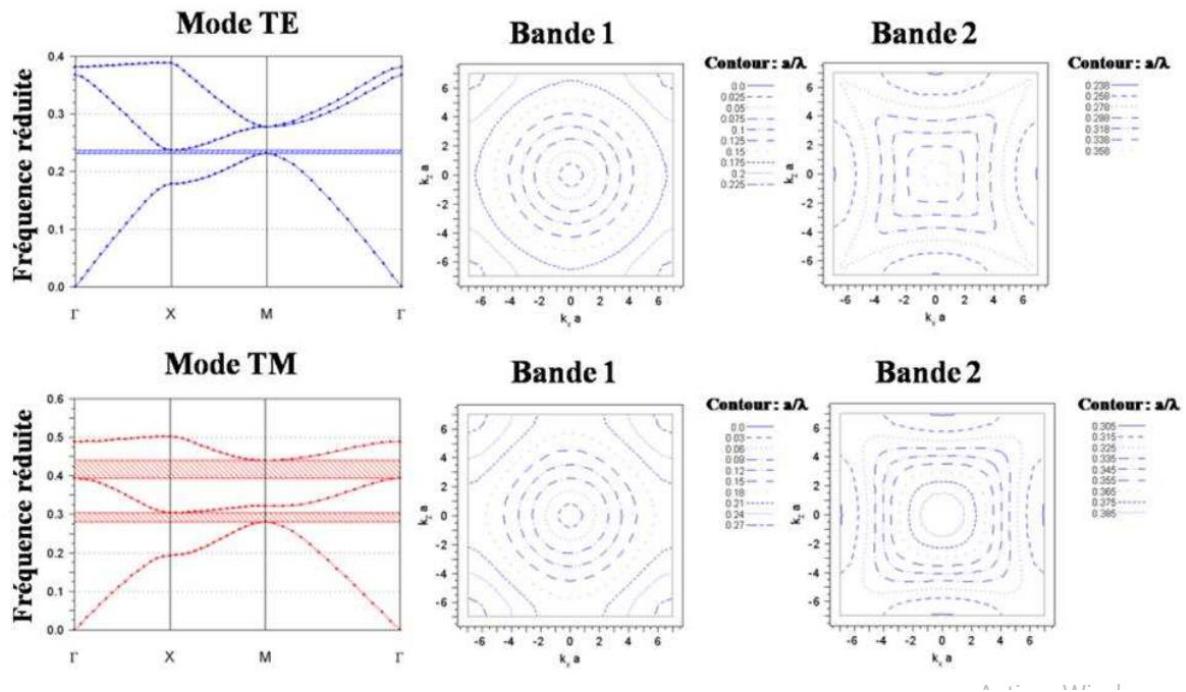


Figure II.23. Diagrammes de dispersion et courbes équi-fréquences associées pour les deux modes TE et TM du réseau carré.

Pour la première bande d'énergie, Quelles que soient la polarisation, les courbes iso-fréquences sont des cercles concentriques. Pour tout angle incident il existe un mode de Bloch réfracté dont le module du vecteur d'onde reste identique, on parle alors d'isotropie. Dans ce cas de figure on a une fréquence normalisée  $a/\lambda$  petite. L'onde traversant le milieu ne "perçoit" pas le réseau. La pente de la bande permet alors de définir un indice de réfraction effectif de type ( $k = \frac{\omega}{cn}$ ) avec  $n$  évidemment positif dans ce régime. Toujours sur la première bande et lorsque l'on s'approche du point de haute symétrie X, les courbes ne sont plus des cercles. La forme obtenue peut toutefois être exploitée pour créer des composants photoniques tels que le collimateur.

Pour la seconde bande,  $a/\lambda$  devient non négligeable et l'onde est perturbée par le réseau carré pour les deux polarisations. On voit que pour cette bande d'énergie, la forme prise par les courbes isofréquences sont proches de la forme du réseau. On pourra alors utiliser les informations fournies par ces courbes iso-fréquences associées au diagramme de bande pour diverses applications.

Entre ces bandes apparaissent des bandes interdites incomplètes soit en polarisation TE soit en polarisation TM, sans recouvrement pour les dimensions et facteurs de remplissage. Qui pourra être intéressant d'exploiter un mode particulier (TE ou TM) "propagatif" tandis que l'autre est en régime de bande interdite notamment pour les applications en réfraction négative[34].

## II.12 Cartes des bandes interdites

Les cartes de bandes interdites représentent les bords de bandes interdites pour un réseau donné en fonction du facteur de remplissage  $f$  (Figure II-24). Elles donnent un aperçu des possibilités de confinement de la lumière. Pour un réseau hexagonal de trous d'air dans du silicium, une bande interdite s'ouvre pour  $f = 0.10$  en polarisation TE et  $f = 0.61$  en polarisation TM. Pour le réseau carré, les bandes interdites s'ouvrent pour  $f = 0.32$  en polarisation TE et  $f = 0.48$  en polarisation TM. Les régions de bande interdite totale correspondent aux intersections des bandes interdites TE et TM. La plus large bande interdite pour les modes TE est obtenue par le réseau hexagonal. De plus, la PBG apparaît pour des facteurs de remplissages plus faibles que ceux du réseau carré. Le réseau hexagonal est par conséquent souvent préféré pour confiner la lumière. On peut remarquer que les bords de bandes interdites augmentent avec le facteur de remplissage de matériau de faible indice.

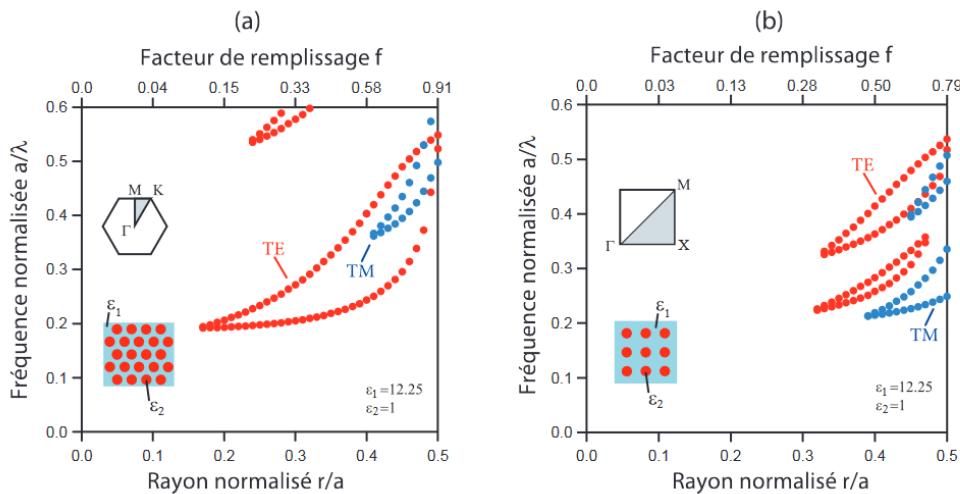


Figure II.24. Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ( $\epsilon=12.25$ ). (a) réseau hexagonal. (b) réseau carré.

Les cristaux photoniques bidimensionnels sont par définition infinis dans la troisième direction. En pratique, on peut atteindre une bonne approximation de ceux-ci en considérant une structure dont l'épaisseur est suffisamment grande par rapport à la longueur d'onde de la lumière. Ces structures sont le plus souvent fabriquées par gravure très sélective du motif 2D dans la profondeur d'un matériau. À l'instar des miroirs de Bragg qui perdent leur bande interdite en incidence oblique, les cristaux photoniques bidimensionnels ne permettent pas de confiner la lumière en incidence oblique par rapport à leur plan de périodicité[56].



## II.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principes de base des deux méthodes numériques (FDTD, FE) pour la modélisation des cristaux photoniques qui vont nous permettre d'évaluer l'influence de la géométrie, sur les propriétés de polarisation électrique de divers types de matériaux hétérogènes. Pour la FDTD La simplicité qui comporte le cœur de l'algorithme de résolution et les équations de base, la rende très accessible et compréhensible. Le calcul de toutes les composantes de champs à tous les instants et sur tout le domaine de calcul permet d'obtenir de nombreuses informations précises. On peut aussi obtenir des spectres en divers points de la structure ainsi que des cartes de champs à partir de la propagation d'un seul pulse temporel. Elle permet l'utilisation de sources des profils spatiaux (ondes planes, sources ponctuelles) et des profils temporels (harmoniques, impulsions).

Ensuite nous avons dressé un aperçu sur les différents outils pour la modélisation numérique, comme les diagrammes de bandes et la zone de Brillouin et ces points de haute symétrie. Ainsi que la bande interdite et les courbes iso-fréquences.

## **Deuxième partie : Résultats de simulation**

**Chapitre III :  
Simulation des structures  
à cristaux photoniques connectées.**

## Chapitre III Simulation des structures à cristaux photoniques connectées.

### III.1 Introduction

Effectivement, pour les matériaux diélectriques comme les cristaux photoniques, l'utilisation des diagrammes de bande est cruciale pour comprendre leurs propriétés optiques. Ces diagrammes représentent la relation entre la fréquence ou le vecteur d'onde de la lumière et les propriétés de dispersion du matériau.

Dans le cas des cristaux photoniques, les bandes interdites sont des régions de fréquence ou de vecteur d'onde pour lesquelles aucune propagation de lumière n'est autorisée dans certaines directions. Ces bandes interdites sont généralement étudiées pour les modes de polarisation transversale électrique (TE) et transversale magnétique (TM).

Pour déterminer les ensembles de points de fonctionnement possibles dans la zone de bande interdite, plusieurs approches sont utilisées :

- **Variation du rapport rayon/pas ou du facteur de remplissage** : En modifiant les paramètres géométriques des cristaux photoniques, comme le rapport entre le rayon des sphères constitutives et la distance entre elles (le pas), on peut observer comment ces variations influencent les bandes interdites. Par exemple, réduire le rapport rayon/pas peut élargir la bande interdite, limitant davantage les fréquences de lumière autorisées à se propager.
- **Variation de l'indice de réfraction** : En ajustant l'indice de réfraction des matériaux constitutifs du cristal photonique, on peut également influencer les propriétés de la bande interdite. Des changements dans l'indice de réfraction peuvent modifier la largeur et la position des bandes interdites dans le diagramme de bande.
- **Analyse des bandes interdites communes** : Il est intéressant d'identifier les zones de recouvrement des bandes interdites TE et TM, car ces zones communes pourraient être utilisées pour diverses applications où des propriétés symétriques pour les deux polarisations sont nécessaires.

En manipulant ces paramètres, on peut déterminer où se situent les bandes interdites les plus larges ou les plus élevées dans le diagramme de bande, ce qui peut être crucial pour la conception de dispositifs optiques spécifiques, tels que les cavité résonante, guides d'onde, superprisme, filtre add-drop.

Cette approche d'analyse des bandes interdites dans les cristaux photoniques est fondamentale pour la conception et l'optimisation des dispositifs optiques pour diverses applications allant des télécommunications à la photonique intégrée, en passant par les capteurs optiques avancés.

La fabrication de structures photoniques à l'échelle nanométrique reste un défi majeur en raison du choix critique des matériaux. Ces matériaux doivent être transparents dans le domaine spectral d'observation et avoir une constante diélectrique élevée pour un confinement optimal du champ. Les semi-conducteurs

sont privilégiés en raison de ces propriétés. Actuellement, la plupart des cristaux photoniques sont en 1D et 2D, composés de matériaux assurant un fort contraste d'indice, permettant ainsi la création de larges bandes interdites, essentielles pour de nombreux dispositifs.

Parmi les semi-conducteurs III-V couramment utilisés, l'indium phosphide (InP), l'arsénure de gallium (GaAs)[55,57–70] et le nitrate de gallium (GaN)[71–86] sont largement répandus en raison de leurs excellentes propriétés optiques résultant d'une bande interdite électronique directe. Cependant, leur inconvénient majeur réside dans leur coût élevé.

Les semi-conducteurs de type IV-IV, comme le silicium (Si), sont préférés pour la fabrication de cristaux photoniques en raison de leur coût plus bas et de la maîtrise technique acquise grâce aux progrès de la microélectronique. La technologie silicium est particulièrement bien maîtrisée et compatible avec les applications CMOS intégrées en électronique. Pour les cristaux photoniques nécessitant un contraste d'indice plus faible, on opte pour des matériaux diélectriques tels que Le nitrate de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )[87–96], le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) ou Le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ). Bien que ces matériaux aient une bande interdite plus étroite, ils sont utilisés dans diverses applications photoniques.

En parallèle, le Niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ )[77,78,97–101] est un matériau optique crucial en raison de ses propriétés exceptionnelles, trouvant des applications majeures en optique intégrée. Des microcavités photoniques à base de Niobate de lithium ont été développées, élargissant les possibilités d'intégration de ce matériau dans des dispositifs photoniques avancés.

## III.2 Simulations de la structure bidimensionnelle

### III.2.1. Méthode de calcul

Pour calculer les structures de bandes de matériaux périodiques bidimensionnels, nous utilisons la méthode de décomposition en ondes planes du logiciel Bandsolve de Rsoft ([www.rsoft.com](http://www.rsoft.com)).

La méthode de la décomposition en ondes planes permet un calcul rapide des courbes de dispersion. Elle s'applique sur toutes les structures dont la constante diélectrique est périodique. Les équations de Maxwell sont représentées dans le domaine fréquentiel puis transformées en un problème aux valeurs propres. Les champs électrique E et magnétique H sont ainsi développés en une somme d'ondes planes.

L'équation résultante aux valeurs propres est alors résolue sur la maille élémentaire du cristal qui par symétrie nous permet d'appréhender des structures périodiques planaires infinies. La cellule de base est choisie de telle sorte à pouvoir répéter le motif suivant les directions de l'espace dans lesquelles le cristal photonique s'organise.

Il existe deux approches pour étudier des structures telles que les cristaux photoniques : un calcul dans le domaine fréquentiel ou temporel. Pour le domaine

fréquentiel il effectue une simulation basée sur les équations de Maxwell (utilisant les ondes planes). Chaque champ calculé a une fréquence définie.

Au contraire, les méthodes temporelles qui itèrent les équations de Maxwell dans le temps, sont adaptées pour réaliser des simulations qui impliquent une évolution des champs, tels que des calculs de transmission et de temps de relaxation à la résonance.

Le principal avantage de cette méthode est que l'on peut obtenir toutes les fréquences instantanément par le calcul impliquant la propagation d'un seul mode. Cette technique présente cependant plusieurs inconvénients. Tout d'abord, les résultats ne sont pas fiables pour tous les modes : un état peut être faiblement couplé par accident ou deux états peuvent être confondus en fréquence et apparaître en un seul pic. Cet inconvénient est problématique dans le cas de calculs relatifs à des guides d'onde et des cavités résonantes d'ordre élevé[77].

Au contraire, les méthodes fréquentielles, sont plus appropriées pour calculer des structures de bande. Ce sont des résolutions itératives ; or l'erreur induite par le calcul pour une fréquence décroît exponentiellement donc le nombre d'itérations est logarithmique selon la précision demandée. De plus, grâce à cette méthode, l'obtention des fréquences et des états est simultanée : les modes peuvent donc être observés immédiatement.

Pour déterminer par le calcul une structure de bande, il faut tout d'abord spécifier les paramètres et la géométrie du réseau ainsi que la nature des données de sortie de la simulation. Ci-dessous sont exposés les principaux paramètres d'entrée (Figure III.1).

- Choix du nombre de dimensions pour la simulation.
- Définir les propriétés du réseau, y compris les vecteurs d'unités primitives, le centre du réseau et les dimensions d'une supercellule, si nécessaire
- Choix de la résolution numérique du réseau et d'autres paramètres numériques.
- Choix du nombre de bandes.
- Choisir le trajet  $\mathbf{k}$  du vecteur d'onde à travers la zone Brillouin en fonction des trajets automatiques.
- Choix de la polarisation du calcul.
- Démarrage du calcul.

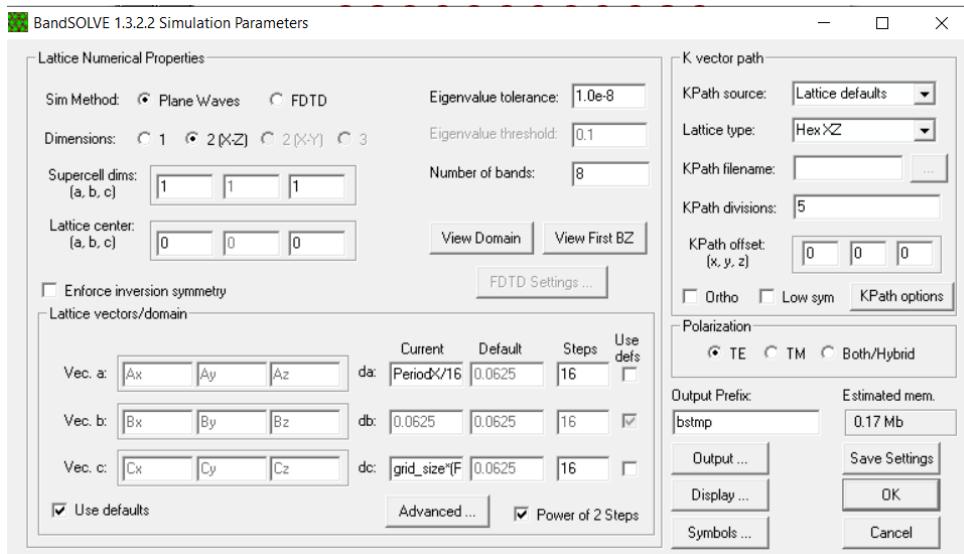


Figure III.1. Boîte de dialogue principale BandSOLVE

Une fois les principaux paramètres du réseau décrits, il reste à définir les paramètres de sortie en fonction des calculs que l'on veut réaliser. Voici une liste des différentes simulations proposées par le logiciel :

- Tracé de la structure de bande d'un réseau périodique.
- Extraction de toutes les fréquences autorisées pour les modes TE ou TM.
- Liste des différentes bandes interdites de la structure.

### III.3 Simulation des structures à cristaux photoniques connectées.

#### III.3.1. Structure triangulaire connectée pour le Silicium (Si) dans le domaine de télécommunication.

##### *III.3.1.1. Calcul du facteur de remplissage.*

La structure est composée de trous d'air  $n_1=1$  dans un milieu diélectrique d'indice  $n_2=3.47$ [34].

Pour obtenir la structure de bande photonique complète, il est nécessaire de balayer l'intervalle du facteur de remplissage de 20% à 90% dans le cas des polarisations TM et TE.

Pour chaque valeur du rayon, des barres verticales indiquent tous les écarts qui ont été trouvés. Ceci est utile d'un point de vue de conception car on peut trouver les écarts qui correspondent à diverses valeurs de conception physique.

Dans l'optimisation des conceptions de cristaux photoniques, il est souvent important de caractériser la structure de bande en fonction d'un ou plusieurs paramètres de conception. Si l'intérêt principal est d'optimiser les écarts, alors les diagrammes de bande contiennent plus d'informations que nécessaire, nous n'avons pas besoin de connaître les points de symétrie particuliers auxquels les bords de bande se produisent ; nous avons juste besoin de savoir si un écart existe ou non dans toute la 1BZ et sa largeur. En comprimant le tracé horizontalement en un seul

point, nous pouvons représenter la structure de bande comme une série de lignes verticales, une structure de bande réduite. Les espaces apparaissent comme les espaces entre les lignes. Nous pouvons ensuite faire varier un paramètre de conception et observer comment la distribution des écarts et des bandes change. La Figure III.2 devrait clarifier cette idée. La structure de bande réduite pour le réseau triangulaire 2D est représentée en fonction du rayon des tiges. La Figure III.2.b montre la carte des écarts pour le même problème qui est juste l'inverse de la structure de bande réduite. La carte des écarts indique que l'écart TM (rouge) existe sur une plage beaucoup plus large que l'écart TE. Il est également facile d'identifier le rayon optimal pour la bande interdite commune.

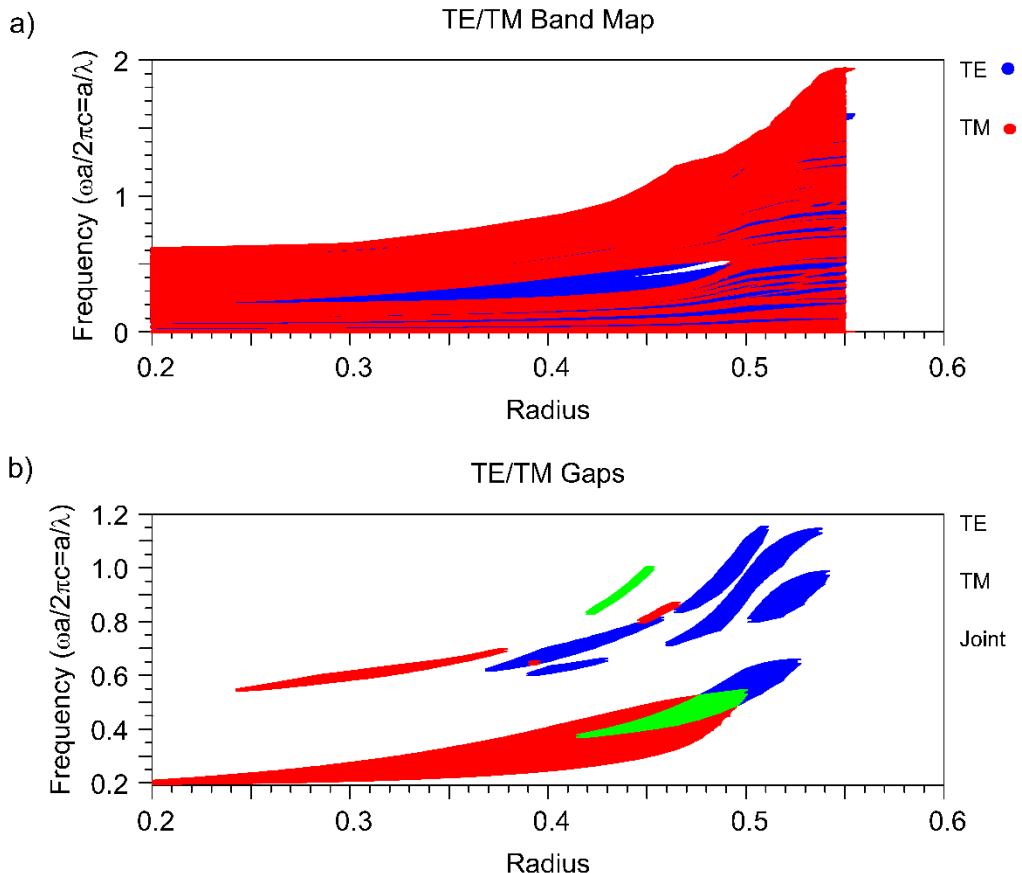


Figure III.2. a) Carte des bandes et b) Carte de Gap de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE

Dans la Figure III.2, l'évolution des bandes en fonction du rayon est illustrée. La plage de fréquences de chaque bande est également représentée par des barres verticales.

La Carte des bandes présentée dans la partie supérieure de la figure III.2 illustre un point correspondant à chaque mode calculé sur l'ensemble du balayage. Une fois que chaque structure de bande est entièrement calculée, toutes les valeurs propres de fréquence du chemin  $k$  sont collectées et représentées sur le graphique de bande le long d'une seule ligne verticale correspondant à la valeur actuelle de la variable balayée.

Il est envisagé que la carte de gaps inférieure soit plus aisée à interpréter. Pour chaque valeur du rayon, des barres verticales représentent tous les écarts identifiés. Cette approche est bénéfique en termes de conception car elle permet d'identifier les variations correspondant à différentes valeurs de conception physique. Dans cette situation, on observe une différence totale entre TE et TM lorsque le rayon se situe entre 0,425 et 0,475 μm. Une bande interdite commune est observée pour les fréquences centrales comprises entre 0,38388 et 0,47490 (Tableau III.3). Nous trouvons également qu'il existe une bande interdite assez large pour le cas TE de rayon allant de 0,375 à 0,525 (Tableau III.1).

### ***III.3.1.2. Calcul de la Bande interdite***

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TE sont obtenues pour un rayon de 0,500 soit un facteur de remplissage 90,69% de 0,10546. Pour un rayon de 0,475 la largeur de la bande interdite est de 0,07524. Pour un rayon de 0,400 une larguer de 0,04537. Ce qui implique qu'on n'a pas un grand choix en rayon.

Le Tableau III.1 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.1 Bande interdite TE de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en μm)
0,37500	51,01%	1	0,01262	0,62760	0,97278
0,40000	58,04%	1	0,01853	0,61792	0,95778
0,40000	58,04%	2	0,04537	0,67754	1,05018
0,42500	65,52%	1	0,01493	0,38388	0,59501
0,42500	65,52%	2	0,01108	0,65295	1,01207
0,42500	65,52%	3	0,03596	0,72972	1,13106
0,45000	73,46%	1	0,03908	0,41952	0,65026
0,45000	73,46%	2	0,01599	0,79312	1,22933
0,47500	81,85%	1	0,07524	0,47490	0,73610
0,47500	81,85%	2	0,03125	0,76047	1,17872
0,47500	81,85%	3	0,03393	0,87552	1,35706
0,50000	90,69%	1	0,10546	0,56486	0,87553
0,50000	90,69%	2	0,06629	0,93006	1,44160
0,50000	90,69%	3	0,06430	1,06329	1,64811
0,52500	99,99%	1	0,01963	0,64960	1,00689
0,52500	99,99%	2	0,10088	0,90598	1,40427
0,52500	99,99%	3	0,04861	1,10097	1,70651

Le Tableau III.2 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.2. Bande interdite TM de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,20000	14,51%	1	0,01278	0,20158	0,31245
0,22500	18,36%	1	0,02323	0,20862	0,32336
0,25000	22,67%	1	0,03597	0,21732	0,33684
0,25000	22,67%	2	0,00954	0,55018	0,85278
0,27500	27,43%	1	0,04955	0,22742	0,35249
0,27500	27,43%	2	0,02365	0,57416	0,88996
0,30000	32,65%	1	0,06682	0,24042	0,37266
0,30000	32,65%	2	0,02982	0,59869	0,92797
0,32500	38,32%	1	0,08533	0,25554	0,39608
0,32500	38,32%	2	0,02863	0,62308	0,96577
0,35000	44,44%	1	0,10766	0,27452	0,42550
0,35000	44,44%	2	0,01774	0,65196	1,01053
0,37500	51,01%	1	0,13147	0,29709	0,46049
0,37500	51,01%	2	0,00953	0,69057	1,07038
0,40000	58,04%	1	0,15680	0,32426	0,50260
0,42500	65,52%	1	0,17864	0,35693	0,55324
0,42500	65,52%	2	0,01123	0,84943	1,31662
0,45000	73,46%	1	0,18860	0,39404	0,61076
0,45000	73,46%	2	0,01246	0,81059	1,25642
0,45000	73,46%	3	0,01183	0,98890	1,53279
0,47500	81,85%	1	0,15684	0,44356	0,68752

### III.4 Structure de bande TE et TM

La Figure III.3 représente les Diagrammes de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f= 15\%$ , (b)  $f= 51\%$ , (c)  $f= 82\%$ . Nous pouvons évaluer à partir de ces résultats l'influence du facteur de remplissage sur l'ouverture de bandes interdites.

A très faible taux de remplissage nous observons l'existence d'une bande interdite TM de 0,01278 entre les fréquences 0,19518 et 0,20797 avec l'absence totale de la bande interdite TE (Figure III.3 (a)). Pour un facteur de remplissage moyen, on remarque une large première bande interdite TM de 0,13147 entre les fréquences 0,231354 et 0,36282 et la deuxième de largeur 0,009526 entre les fréquences 0,68580 et 0,69533 et aussi une bande interdite TE de largeur 0,01262 entre les fréquences 0,62129 et 0,62718 (Figure III.3 (b)). A taux de remplissage très élevé on remarque une large première bande interdite TM de 0,15683 entre les fréquences 0,36514 et 0,52198 et trois bandes interdites TE. La première de largeur 0,07524, située entre les fréquences 0,43728 et 0,51252 et la deuxième, de largeur 0,03125, située entre les fréquences 0,74484 et 0,77609 et la troisième de largeur 0,03393, située entre les fréquences 0,85855 et 0,89249. Une bande interdite commune apparaissent en se plaçant dans la zone de recouvrement entre la bande interdite TE et TM de largeur 0,07572 située entre les fréquences 0,43846 et 0,51418 (Figure III.3 (c)).

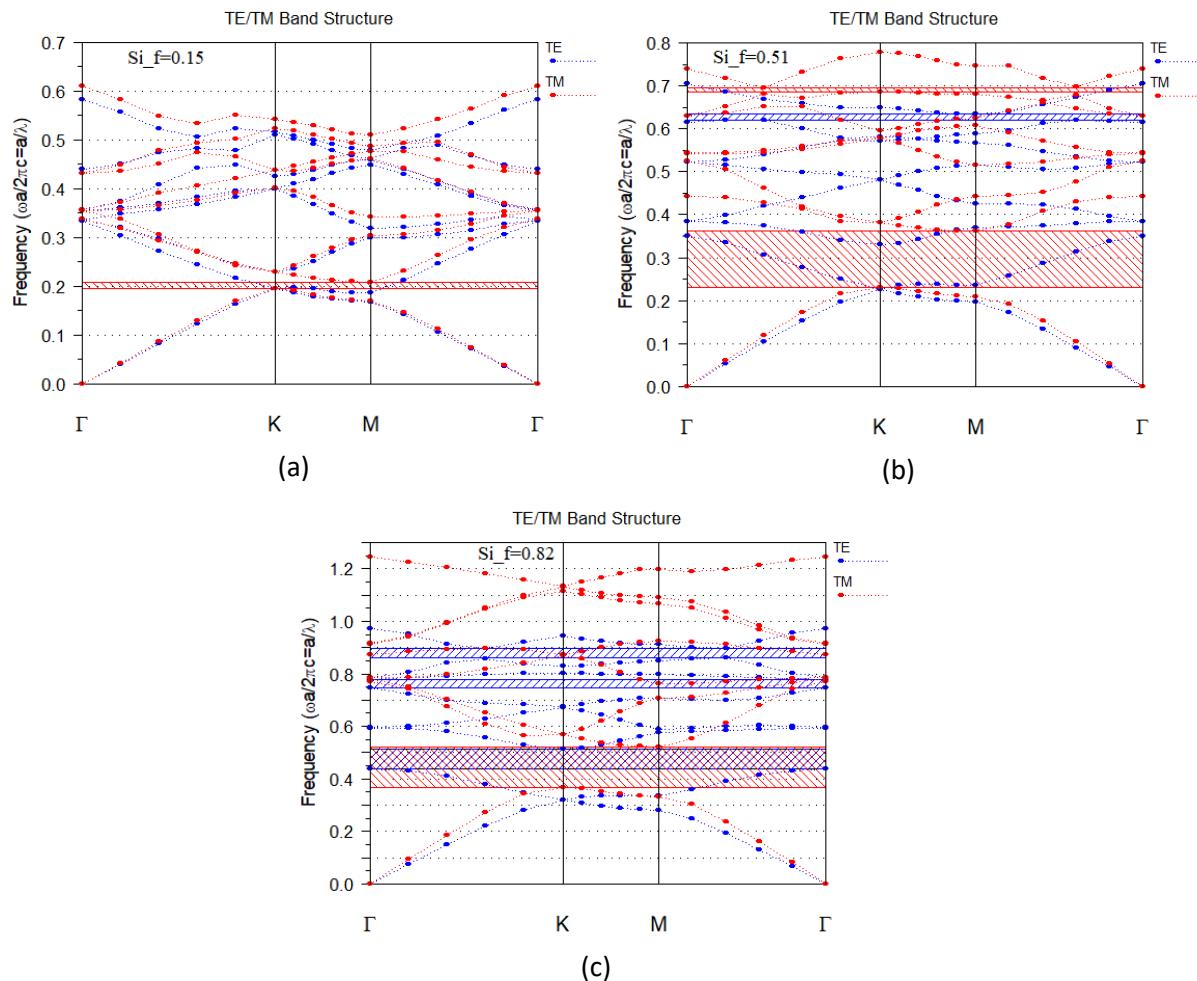


Figure III.3. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  
(a)  $f = 15\%$ , (b)  $f = 51\%$ , (c)  $f = 82\%$ .

Le Tableau III.3 expose les dimensions et les Bandes interdites communes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.3. Bande interdite commune de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la période (a)
0,42500	65,52%	1	0,01493	0,38388	0,59501
0,42500	65,52%	2	0,01123	0,84943	1,31662
0,45000	73,46%	1	0,03908	0,41952	0,65026
0,45000	73,46%	2	0,01183	0,98890	1,53279
0,47500	81,85%	1	0,07524	0,47490	0,73610

le tableaux III.3 expose les bandes interdites communes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium, qui nous donne pour les facteurs de

remplissages 65,52%, 73,46% et 81,85% de larges gaps avec une meilleure excursion fréquentielle.

### III.5 Structure de la Bande interdite commune

#### III.5.1. Diagramme de bandes pour f= 65,52%.

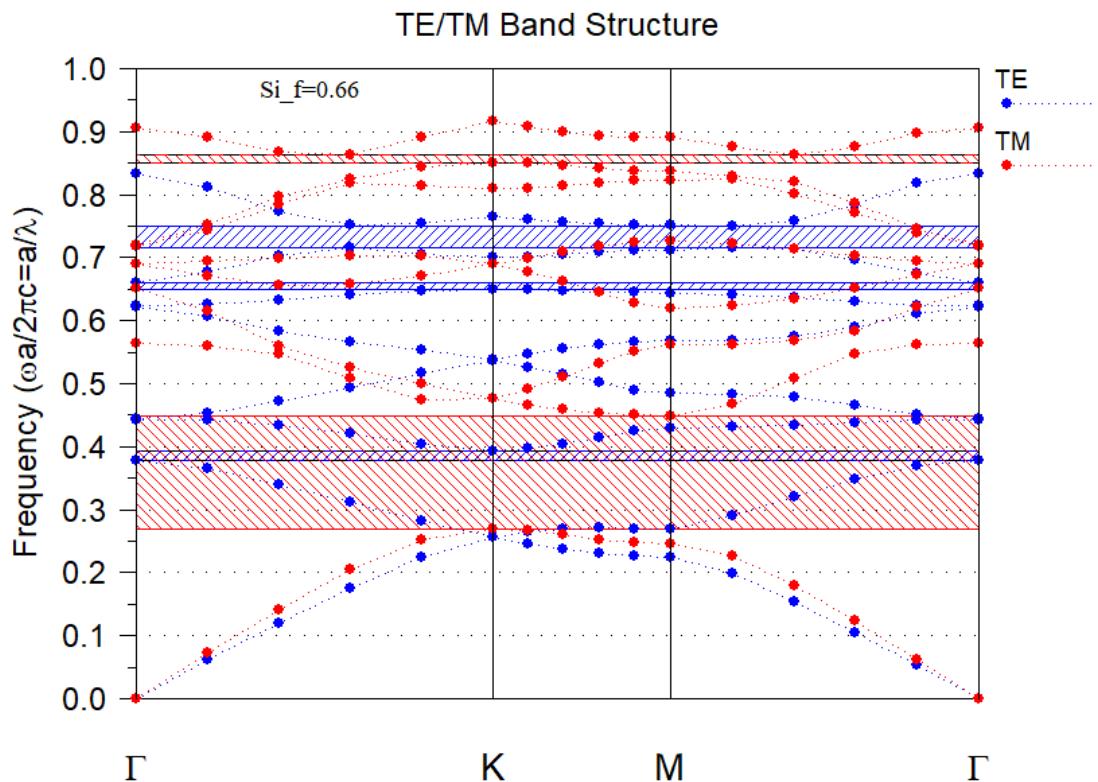


Figure III.4. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage f= 65,52%.

Le Tableau III.4 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 65,52% à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.4. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 65,52%.

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,01612	TE	0,38574	0,59790
2	0,00979	TE	0,65543	1,01591
3	0,03476	TE	0,73330	1,13661
1	0,17966	TM	0,35906	0,55655
2	0,01115	TM	0,85685	1,32812
1	0,01612	JOINT	0,38574	0,59790
2	0,01115	JOINT	0,85685	1,32812

La Figure III.4 représente le Diagramme de bande de la structure triangulaire connectée  $9 \times 9$  dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ . Nous observons l'existence de trois bandes interdites TE, la première bande de largeur 0,01612 entre les fréquences 0,37768 et 0,39380 et la deuxième de largeur 0,00979 entre les fréquences 0,65053 et 0,65053, la troisième bande TE de largeur 0,03476 entre les fréquences 0,71592 et 0,75068. Et aussi deux bandes interdites TM de largeur 0,17966 entre les fréquences 0,26923 et 0,44889, la deuxième de largeur 0,01115 entre les fréquences 0,85127 et 0,86243.

Le nouveau pour le facteur de remplissage  $f = 65,52\%$  l'apparition de deux bandes interdites communes c'est-à-dire un recouvrement de la bande interdite TE et TM ce qui impressionnant pour des diverses applications. La première bande de largeur 0,01612 entre les fréquences 0,37768 et 0,39380 et la deuxième de largeur 0,01115 entre les fréquences 0,85127 et 0,86243.

### *III.5.1.1. Contours équifréquences et surfaces des bandes pour $f = 65,52\%$ .*

Parfois, il est utile de connaître la structure complète des bandes dans toute la zone Brillouin, plutôt qu'à des points significatifs. Les applications pour lesquelles cela est généralement vrai sont celles dans lesquelles nous n'exploitons pas la suppression complète de la propagation de la lumière dans les bandes interdites, mais induisons plutôt des caractéristiques de propagation inhabituelles en utilisant la dispersion complexe de la vitesse du groupe *dans* les bandes.

Nous découvrons de nouvelles façons de visualiser et d'analyser les structures de bande. Essentiellement, nous déterminons la structure entière de la bande dans toute la première zone Brillouin, plutôt que la structure de la bande le long d'un chemin entre les points de symétrie. Le résultat est la création de surfaces de bande et de contours équifréquences et nous appelons ces tracés *une analyse de zone entière*

Ce type de tracés est particulièrement utile dans l'analyse des effets de diffraction de superprisme ou d'indice négatif.

Concernant la première bande d'énergie, indépendamment de la polarisation, les courbes iso-fréquences se présentent sous la forme de cercles concentriques. Pour chaque angle d'incidence, il y a un mode de Bloch réfracté dont l'amplitude du vecteur d'onde demeure constante, ce qui est caractérisé par l'isotropie. Toujours sur la première bande et en se rapprochant du point de haute symétrie K, les courbes ne prennent plus la forme de cercles. Il est néanmoins possible d'utiliser la forme obtenue pour la fabrication de composants photoniques.

Pour la seconde bande, on voit que pour cette bande d'énergie, la forme prise par les courbes isofréquences sont proches de la forme du réseau. On pourra alors utiliser les informations fournies par ces courbes iso-fréquences associées au diagramme de bande pour diverses applications. On remarque que les valeurs de fréquences associées aux courbes iso-fréquences croissent en se rapprochant du centre de la zone de Brillouin.

Bien que les tracés de surface des bandes aident à comprendre la nature des bandes, ils ne sont pas très utiles pour l'analyse quantitative. Nous pouvons enfin visualiser la bande interdite complète pour la première fois.

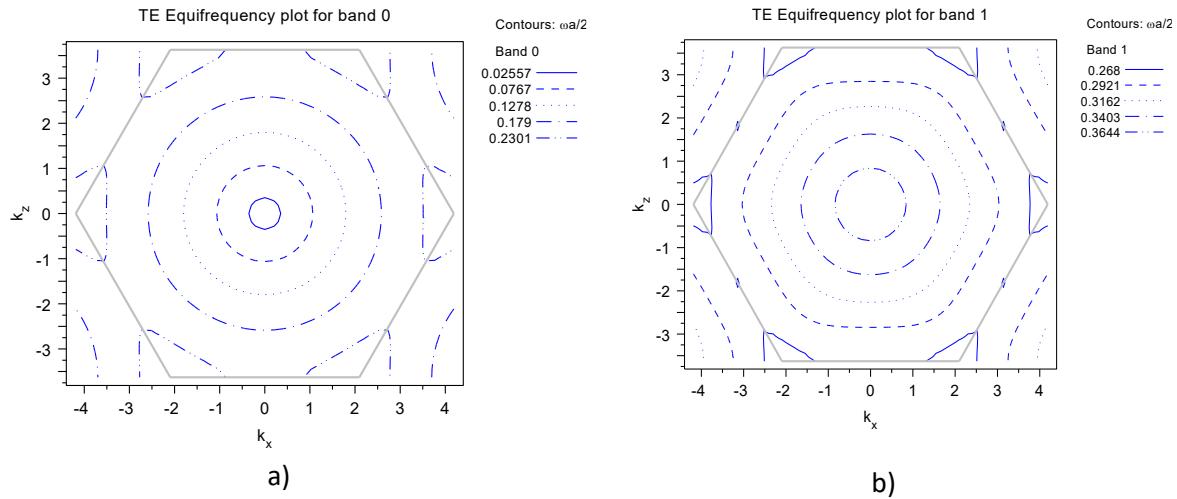


Figure III.5. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau triangulaire  
a) Première bande b) Deuxième bande  
dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans  
le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .

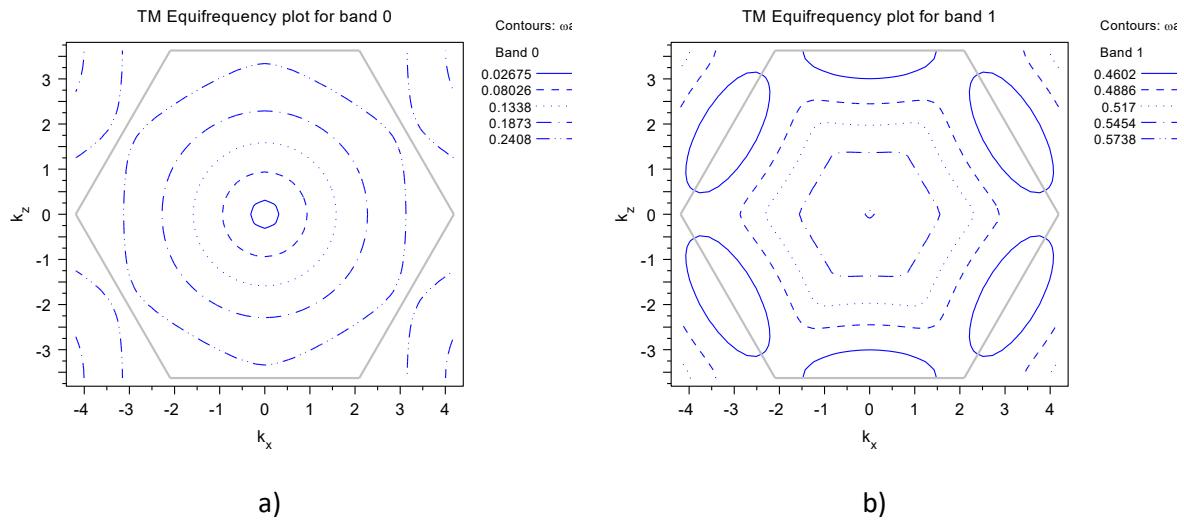


Figure III.6. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau triangulaire  
a) Première bande b) Deuxième bande  
dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans  
le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .

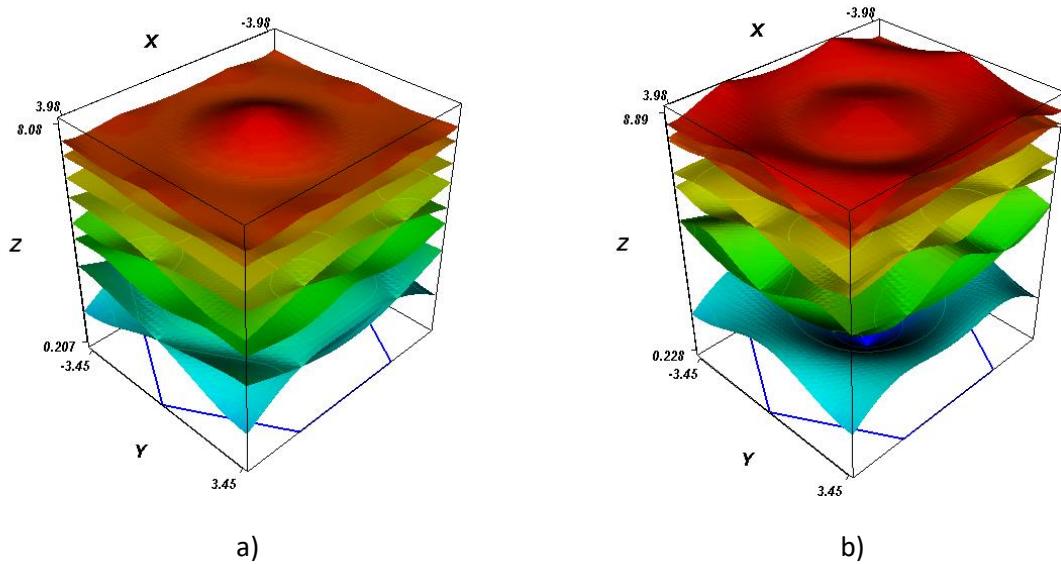


Figure III.7. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau triangulaire dans la 1<sup>ère</sup> zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .

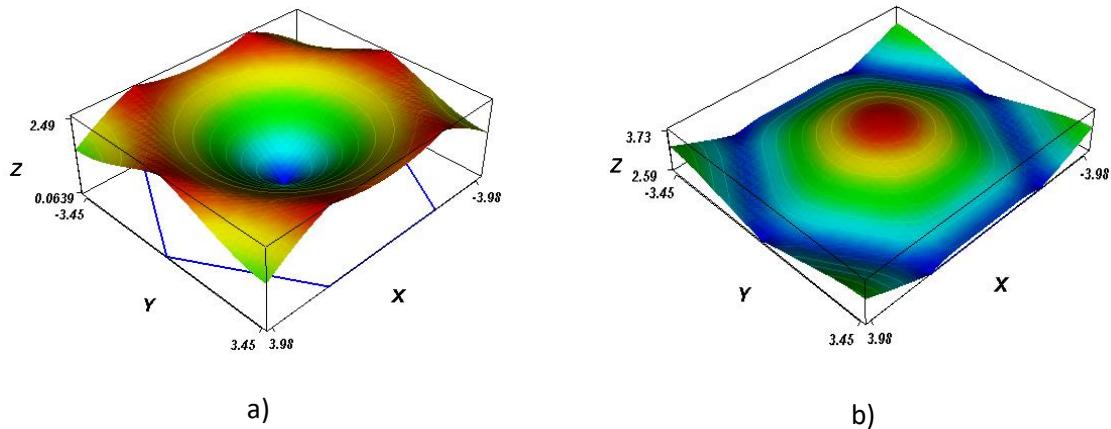


Figure III.8. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .

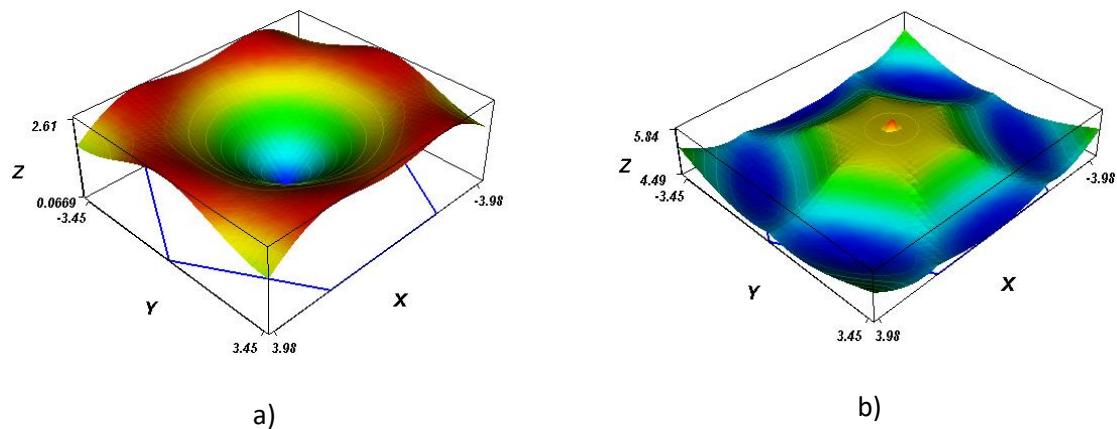


Figure III.9. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .  
 a) Première bande b) Deuxième bande

### **III.5.2. Diagramme de bandes pour f= 73,46%.**

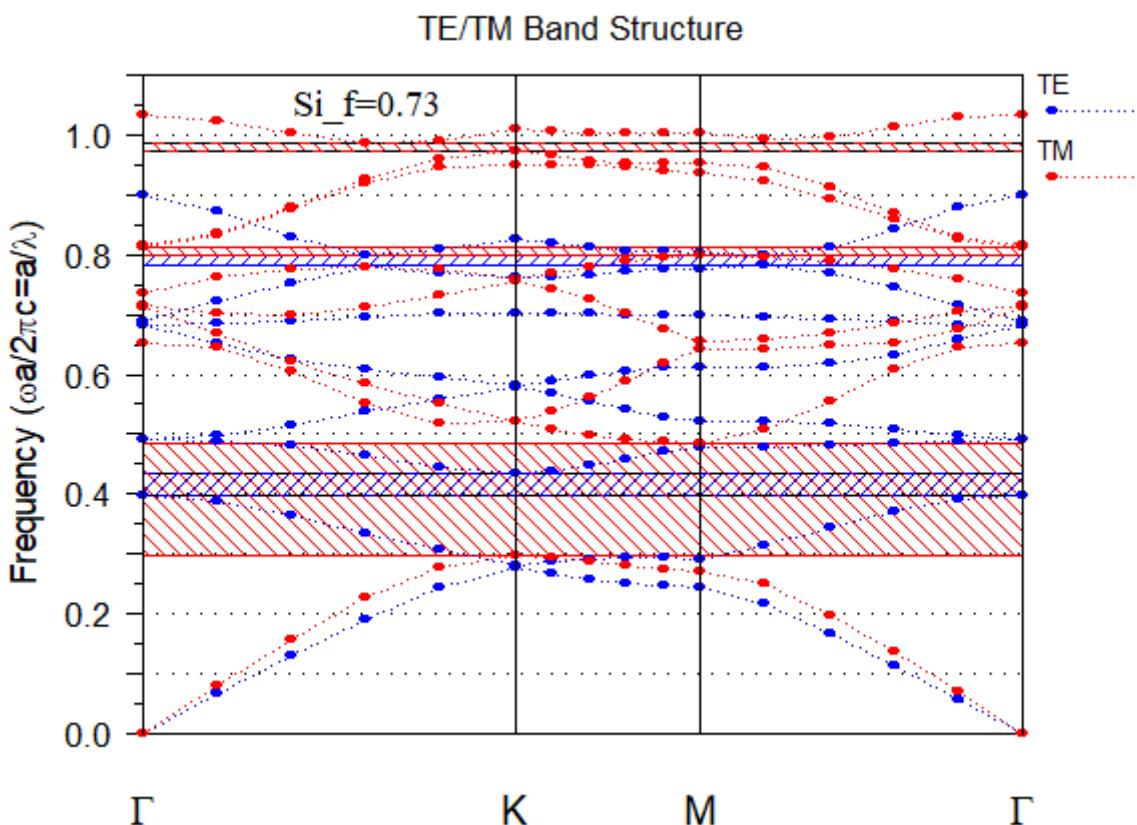


Figure III.10. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ .

Le Tableau III.5 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 73,46\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.5. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 73,46\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,03731	TE	0,41724	0,64672
2	0,01717	TE	0,78955	1,22380
1	0,18856	TM	0,39183	0,60734
2	0,01167	TM	0,80545	1,24845
3	0,01213	TM	0,97882	1,51717
1	0,03731	JOINT	0,41724	0,64672
2	0,01213	JOINT	0,97882	1,51717

La Figure III.10 représente le Diagramme de bande de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f= 73,46\%$ . Nous observons l'existence de trois bandes interdites TM, la première bande de largeur 0,18856 entre les fréquences 0,29755 et 0,48612 et la deuxième de largeur 0,01167 entre les fréquences 0,79962 et 0,81129, la troisième bande TM de largeur 0,01213 entre les fréquences 0,97276 et 0,98489. Et aussi deux bandes interdites TE de largeur 0,03731 entre les fréquences 0,39858 et 0,43590, la deuxième de largeur 0,01717 entre les fréquences 0,78096 et 0,79813.

Aussi pour le facteur de remplissage  $f= 73,46\%$  l'apparition de deux bandes interdites communes. La première bande de largeur 0,03731 entre les fréquences 0,39858 et 0,43590 et la deuxième de largeur 0,01213 entre les fréquences 0,97276 et 0,98489.

### *III.5.2.1. Contours équifréquences et surfaces des bandes $f= 73,46\%$ .*

Pour la seconde bande, on voit que pour cette bande d'énergie, la forme prise par les courbes isofréquences sont proches de la forme du réseau. On pourra alors utiliser les informations fournies par ces courbes iso-fréquences associées au diagramme de bande pour diverses applications. On remarque que les valeurs de fréquences associées aux courbes iso-fréquences croissent en se rapprochant du centre de la zone de Brillouin.

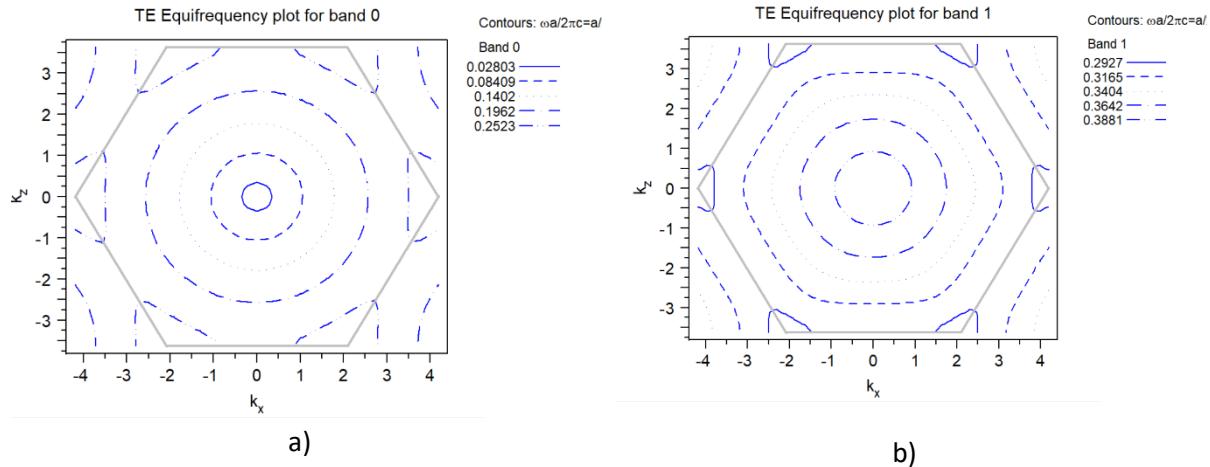


Figure III.11. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau triangulaire  
a) Première bande b) Deuxième bande  
dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans  
le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ .

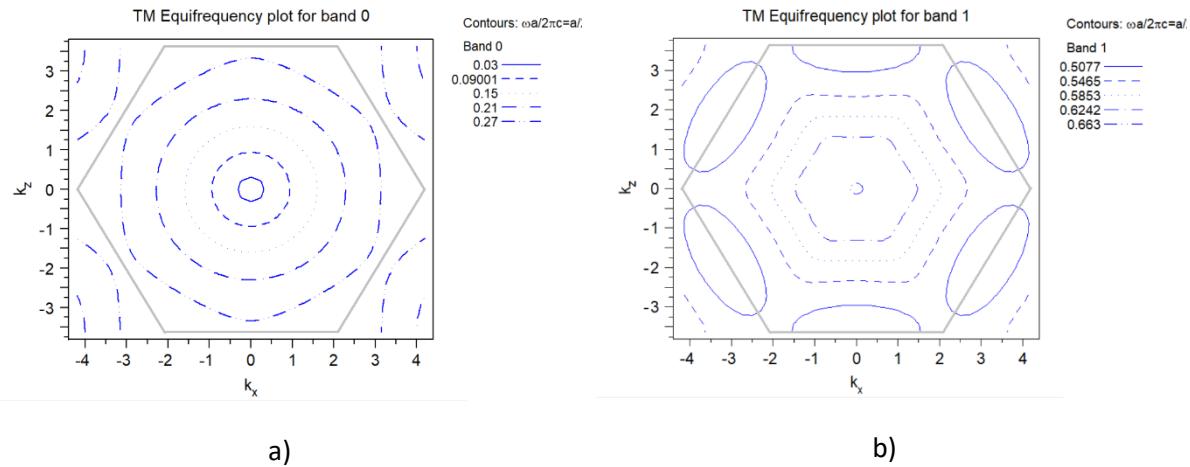


Figure III.12. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau triangulaire  
a) Première bande b) Deuxième bande  
dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans  
le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ .

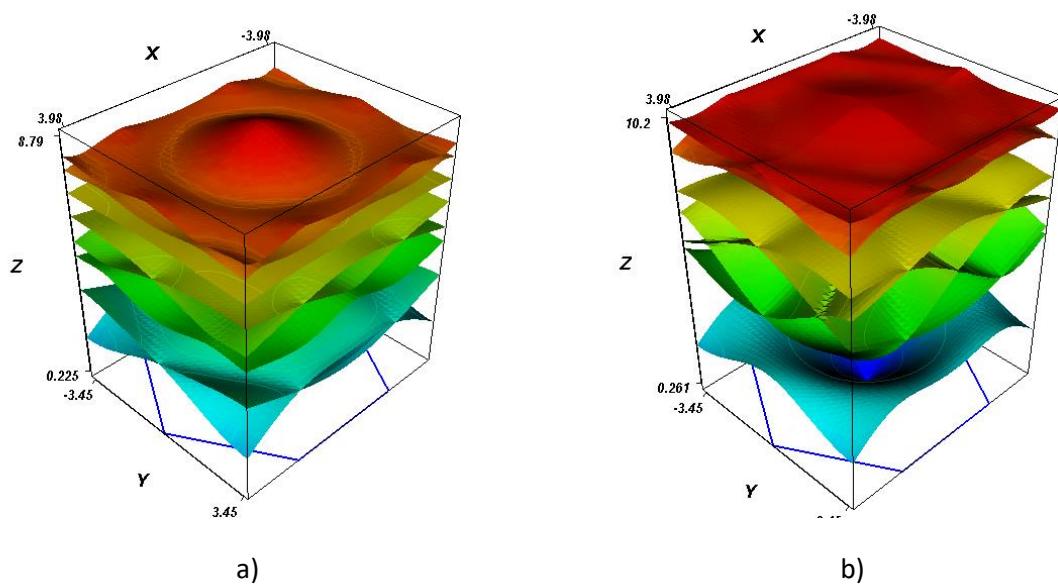


Figure III.13 Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ .

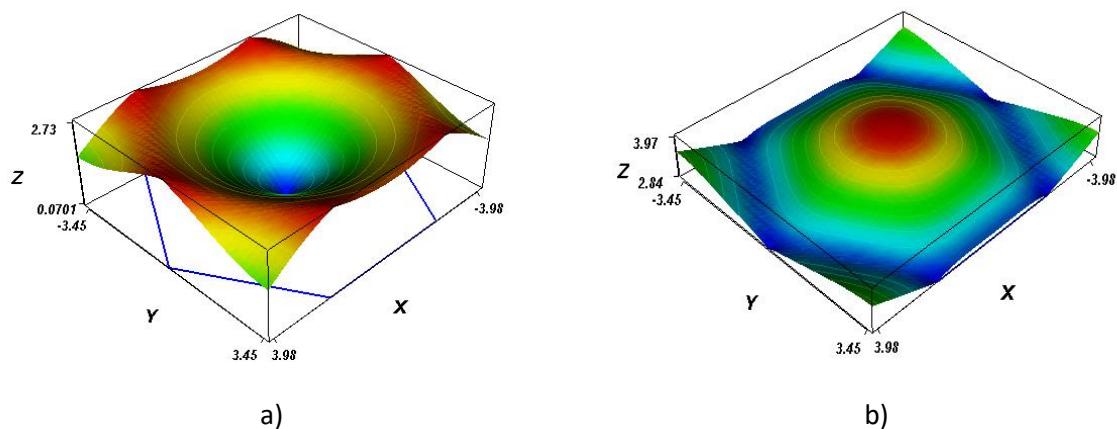


Figure III.14. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ .

a) Première bande b) Deuxième bande

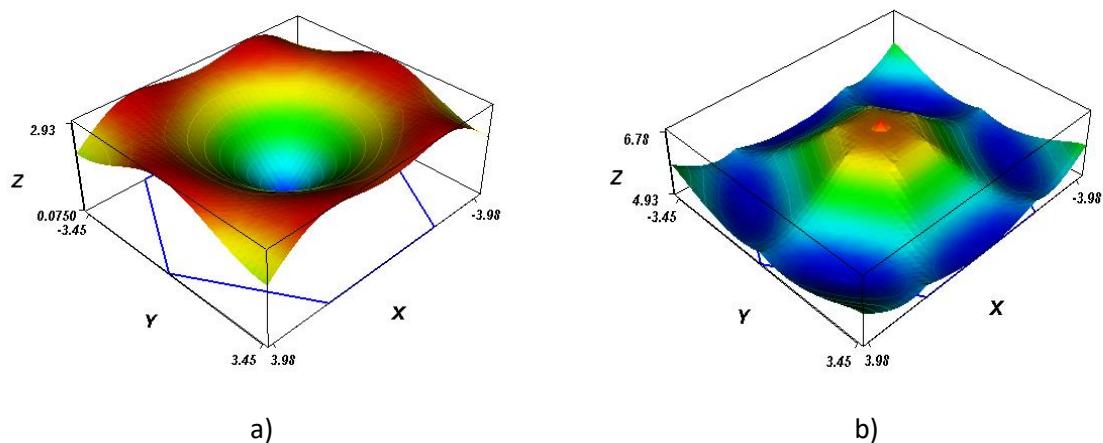


Figure III.15. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau triangulaire dans la 1<sup>ère</sup> zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ .

a) Première bande b) Deuxième bande

### **III.5.3. Diagramme de bandes pour f= 81,85%.**

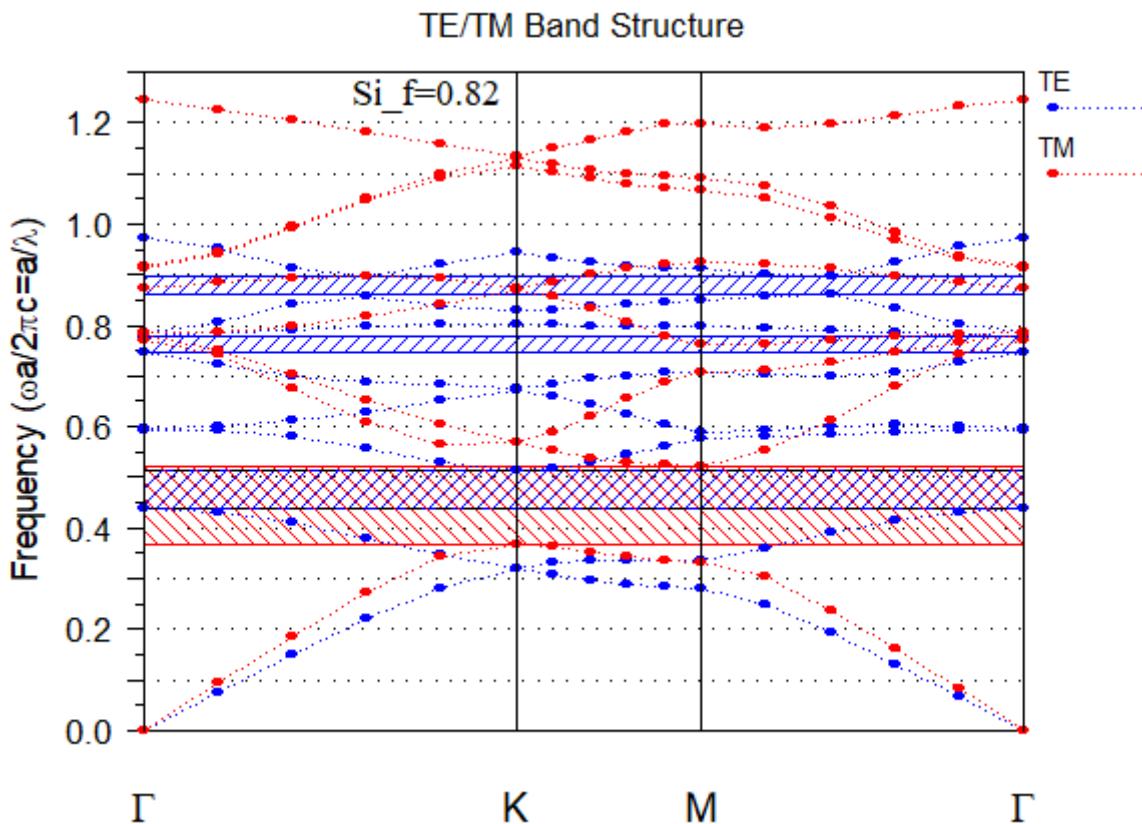


Figure III.16. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .

Tableau III.6 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 81,85\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.6. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 81,85\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,07572552	TE	0,476322659	0,738300122
2	0,03220424	TE	0,762172561	1,181367469
3	0,03482326	TE	0,878102167	1,361058358
1	0,1548367	TM	0,445048761	0,68982558
1	0,07572552	JOINT	0,476322659	0,738300122

La Figure 4.5 représente le Diagramme de bande de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f=81,85\%$ . Nous observons l'existence de trois bandes interdites TE, la première bande de largeur 0,07572 entre les fréquences 0,43845 et 0,51418 et la deuxième de largeur 0,03220 entre les fréquences 0,74607 et 0,77827, la troisième bande TE de largeur 0,03482 entre les fréquences 0,86069 et 0,89551. Et une bande interdite TM de largeur 0,15483 entre les fréquences 0,36763 et 0,52246.

Pour le facteur de remplissage  $f=81,85\%$  l'apparition d'une seule bande interdite commune. De largeur 0,07572 entre les fréquences 0,43845 et 0,51418.

### *III.5.3.1. Contours équifréquences et surfaces des bandes pour $f= 81,85\%$ .*

Pour la seconde bande, on voit que pour cette bande d'énergie, la forme prise par les courbes isofréquences sont proches de la forme du réseau. On pourra alors utiliser les informations fournies par ces courbes iso-fréquences associées au diagramme de bande pour diverses applications. On remarque que les valeurs de fréquences associées aux courbes iso-fréquences croissent en se rapprochant du centre de la zone de Brillouin.

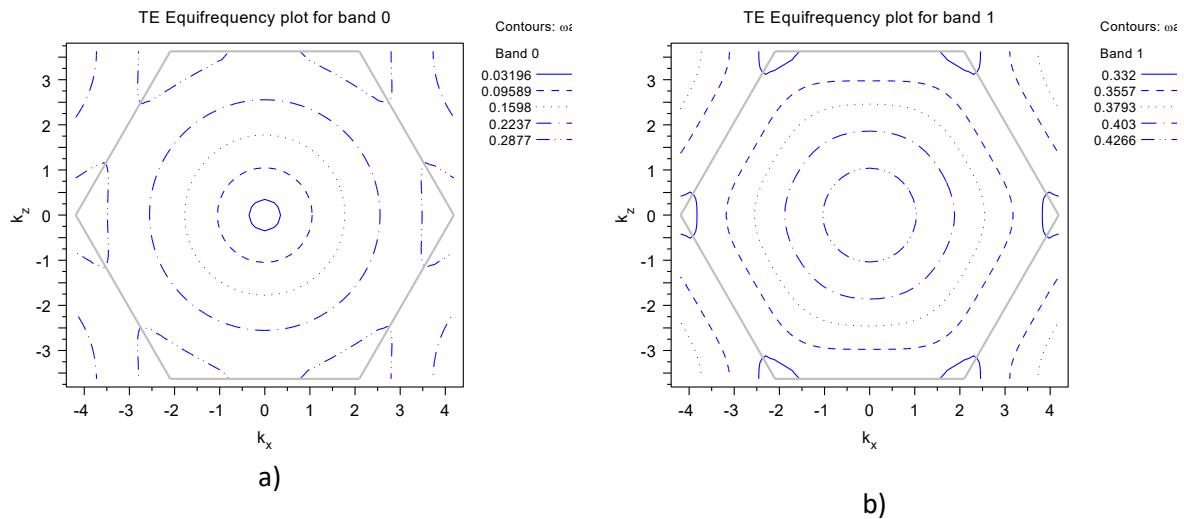


Figure III.17. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau triangulaire

a) Première bande b) Deuxième bande

dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .

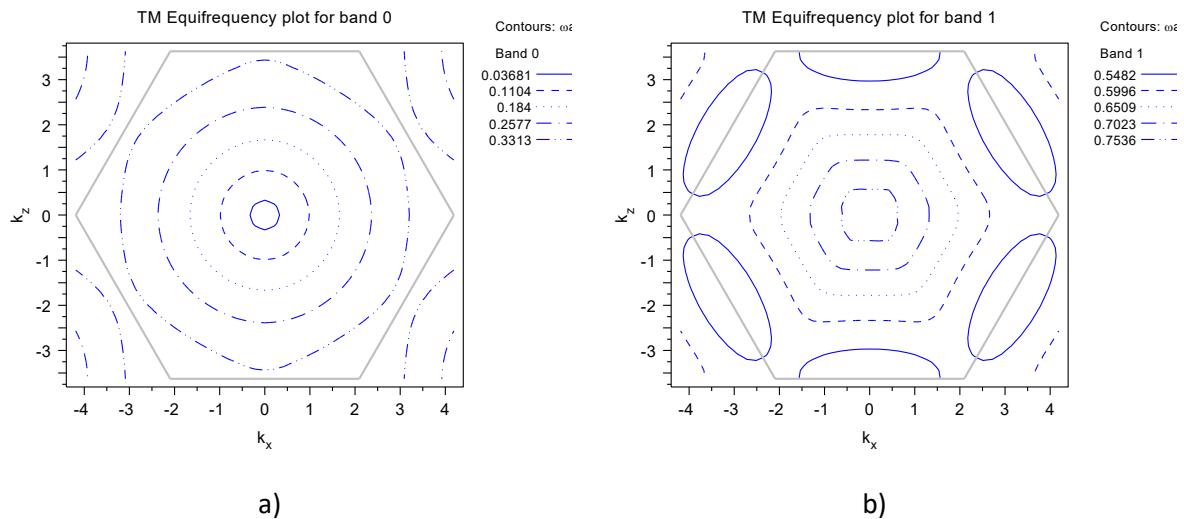


Figure III.18. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau triangulaire

a) Première bande b) Deuxième bande

dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .

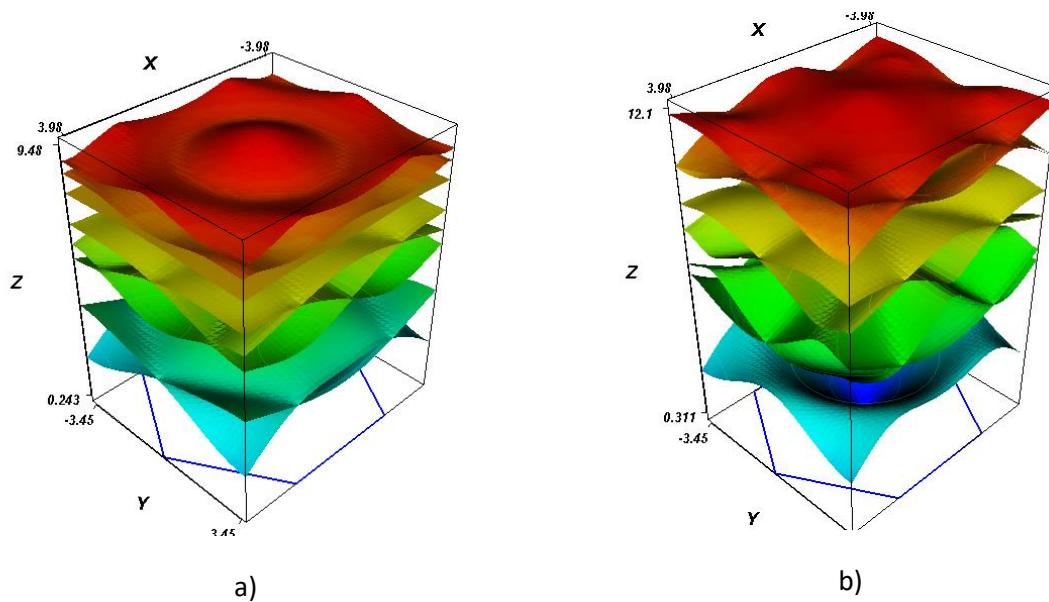


Figure III.19. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .

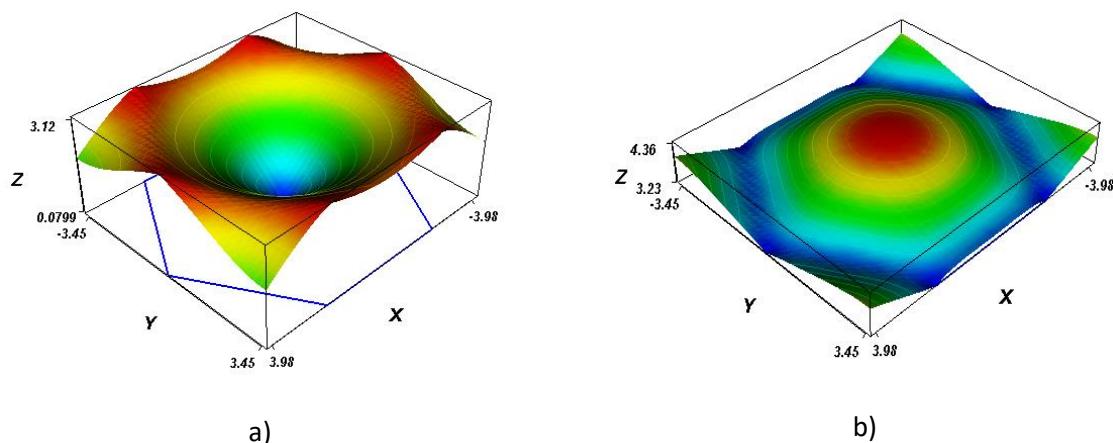


Figure III.20. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .  
a) Première bande b) Deuxième bande

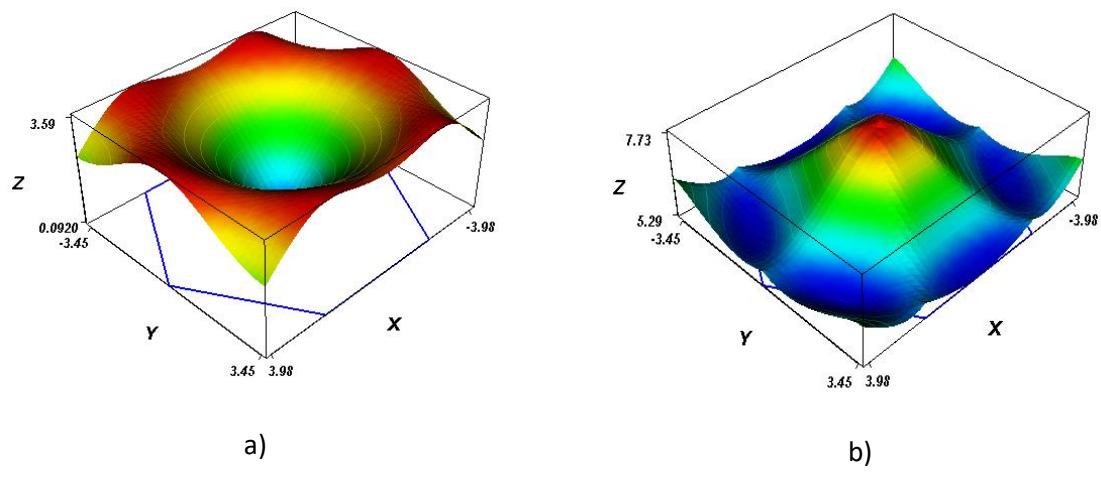


Figure III.21. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .

a) Première bande b) Deuxième bande

### III.6 Structure carrée connectée pour le Silicium (Si) dans le domaine de télécommunication.

#### III.6.1.Calcul du facteur de remplissage.

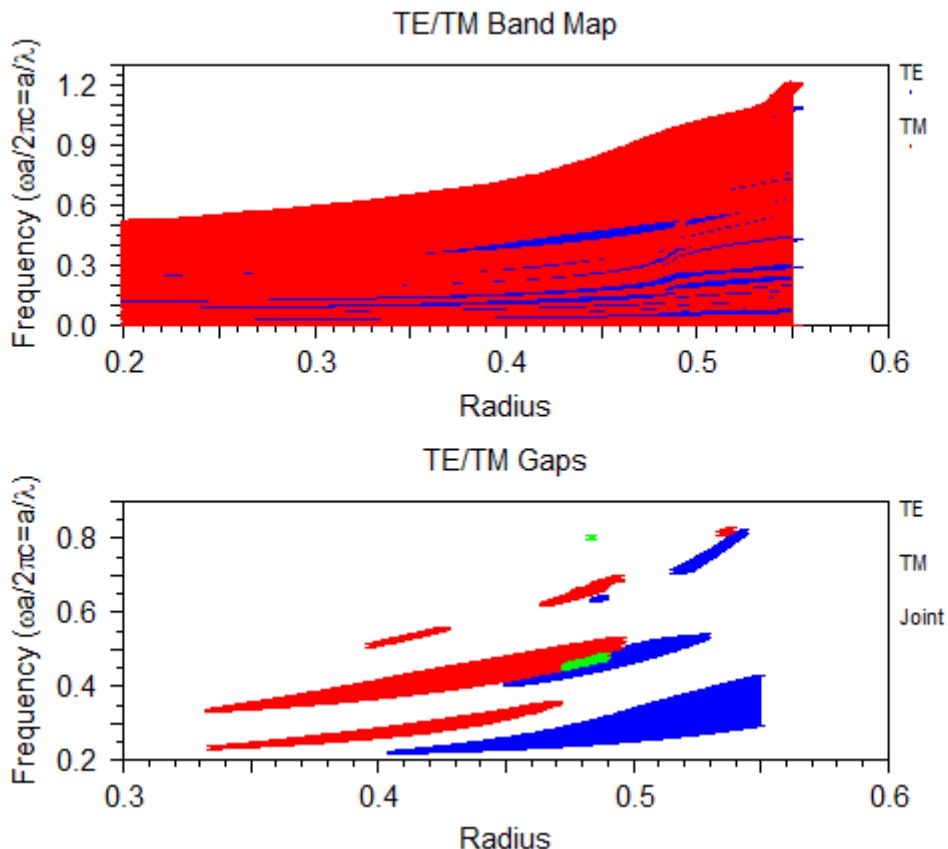


Figure III.22. a) Carte des bandes et b) Carte de Gap de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE

Le Tableau III.7 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.7. Bande interdite TE de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium

Radius( $r/a$ )	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période $a$ (en $\mu\text{m}$ )
0,40750	60,24%	1	0,00706	0,22793	0,35329
0,41250	61,73%	1	0,00944	0,23012	0,35669
0,41750	63,23%	1	0,01183	0,23243	0,36026
0,42500	65,52%	1	0,01620	0,22990	0,35634
0,45000	73,46%	1	0,03145	0,24457	0,37908
0,47500	81,85%	1	0,05324	0,26508	0,41087
0,47500	81,85%	2	0,03647	0,44446	0,68891
0,50000	90,69%	1	0,08627	0,29487	0,45706
0,50000	90,69%	2	0,04511	0,48801	0,75641

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TE sont obtenues pour un rayon de 0.5 soit un facteur de remplissage 90,69% de 0,08627. Pour un rayon de 0,47500 la

largeur de la bande interdite est de 0,05324. Pour un rayon de 0,45000 une larguer de 0,03145. Ce qui implique qu'on n'a pas un grand choix en rayon.

Le Tableau III.8 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.8. Bande interdite TM de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,33750	41,32%	1	0,00668	0,24121	0,37388
0,34000	41,94%	2	0,00914	0,34767	0,53889
0,34250	42,55%	2	0,01111	0,34973	0,54208
0,35000	44,44%	1	0,01141	0,24120	0,37386
0,35000	44,44%	2	0,01774	0,34666	0,53732
0,37500	51,01%	1	0,01930	0,25611	0,39697
0,37500	51,01%	2	0,03246	0,36756	0,56972
0,40000	58,04%	1	0,02524	0,27292	0,42302
0,40000	58,04%	2	0,04795	0,39126	0,60645
0,40000	58,04%	3	0,00807	0,51450	0,79747
0,42500	65,52%	1	0,02825	0,29517	0,45752
0,42500	65,52%	2	0,06103	0,41881	0,64916
0,42500	65,52%	3	0,00820	0,55408	0,85882
0,45000	73,46%	1	0,02471	0,32379	0,50188
0,45000	73,46%	2	0,06452	0,44729	0,69330
0,47500	81,85%	1	0,06117	0,47994	0,74391
0,47500	81,85%	2	0,01464	0,64115	0,99379

La Figure III.23 représente les Diagrammes de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) f= 15%, (b) f= 51%, (c) f= 82%.

A très faible taux de remplissage nous observons l'absence totale de la bande interdite TE et TM. (Figure III.23 (a)). Pour un facteur de remplissage moyen, on remarque une large première bande interdite TM de 0,05035 entre les fréquences 0,36958 et 0,41993 et la deuxième de largeur 0,02569 entre les fréquences 0,26268 et 0,28837 et aussi une petite bande interdite TM de largeur 0,00843 entre les fréquences 0,51497 et 0,52340, avec l'absence des bandes TE (Figure III.23 (b)). A taux de remplissage très élevé on remarque une large première bande interdite TE de 0,10006 entre les fréquences 0,25903 et 0,35909 et une deuxième bande interdite TE de largeur 0,03921, située entre les fréquences 0,48712 et 0,52633. la structure carrée ne présente aucune bande interdite commune (Figure III.23 (c)).

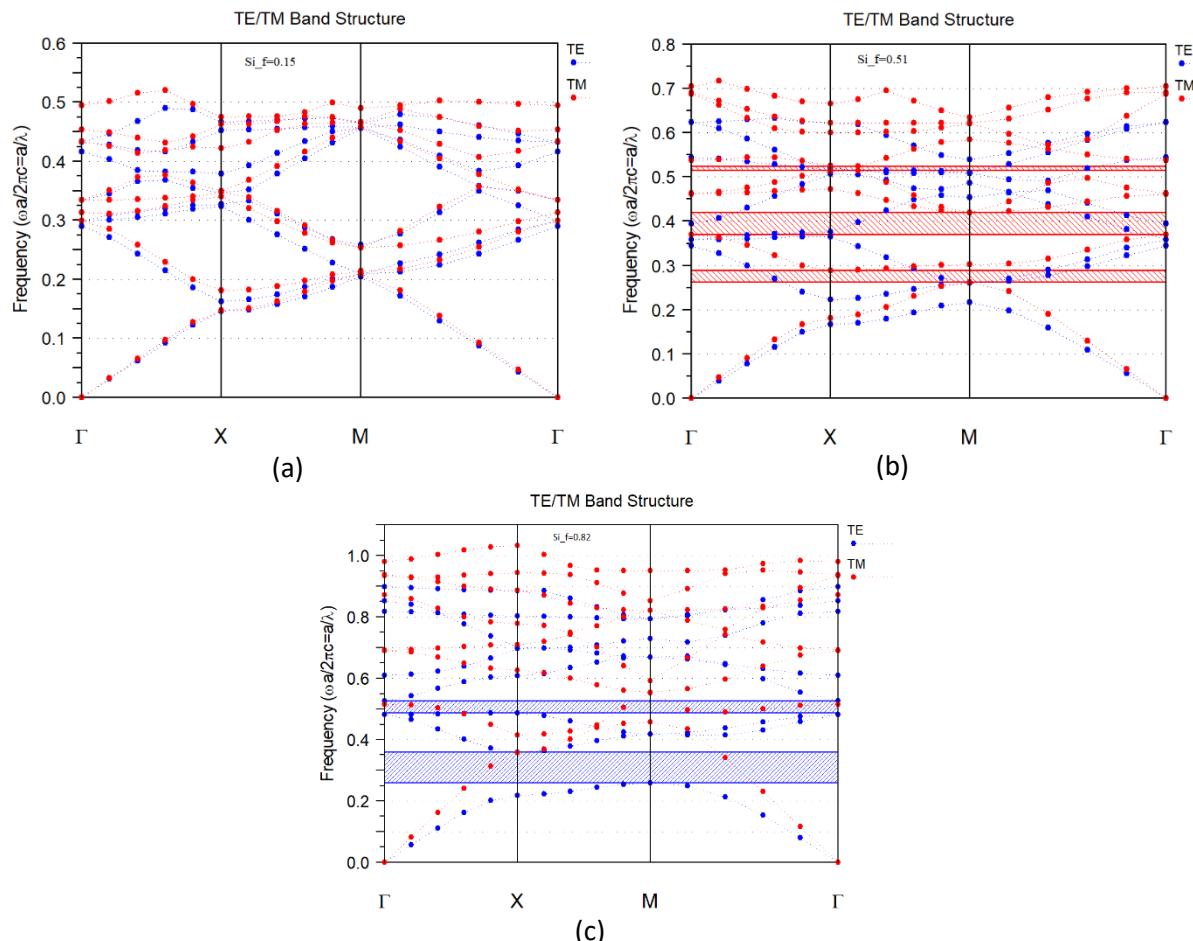


Figure III.23. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  
(a)  $f = 15\%$ , (b)  $f = 51\%$ , (c)  $f = 82\%$ .

Le Tableau III.9 expose les dimensions et les Bandes interdites communes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium à la longueur d'onde 1550 nm. Qui nous donne pour les facteurs de remplissages 81,85%, 86,21% de larges gaps avec une meilleure excursion fréquentielle.

Tableau III.9. Bande interdite commune de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium

Radius( $r/a$ )	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La période( $a$ )
0,47500	81,85%	1	0,01334	0,45602	0,70684
0,48750	86,21%	1	0,01412	0,48852	0,75720

### III.7 Structure de la Bande interdite commune

#### III.7.1. Diagramme de bandes pour $f= 81,85\%$ .

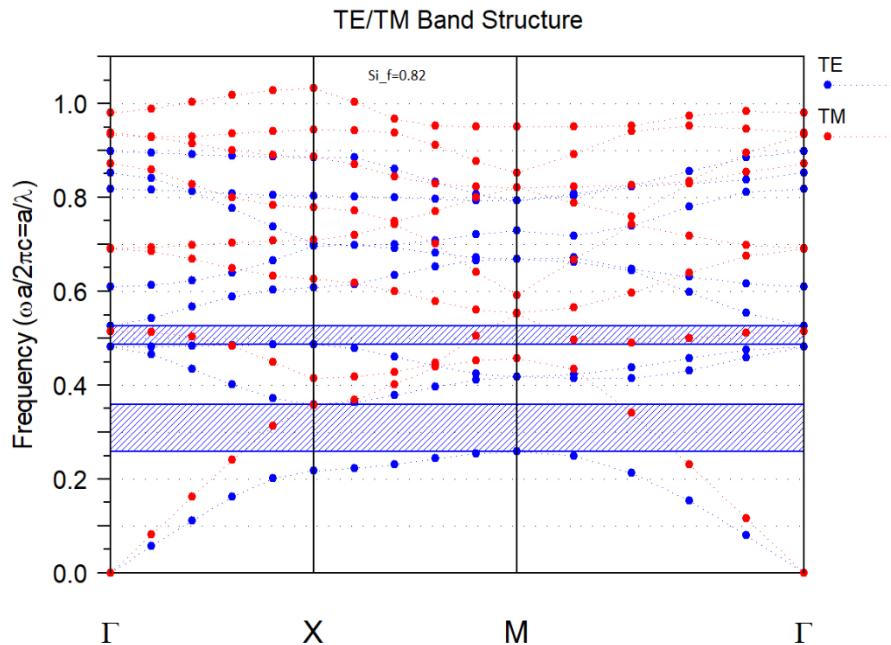


Figure III.24. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f= 81,85\%$ .

Le Tableau III.10 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 81,85\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.10. Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 81,85\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,10006	TE	0,30907	0,47906
2	0,03921	TE	0,50672	0,78542

La Figure III.24 représente le Diagramme de bande de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f= 81,85\%$ . Nous observons l'existence de deux bandes interdites TE, la première bande de largeur 0,10006 entre les fréquences 0,25903 et 0,35909 et la deuxième de largeur 0,03921 entre les fréquences 0,48712 et 0,52633.

### III.7.1.1. Contours équifréquences et surfaces des bandes pour $f=81,85\%$ .

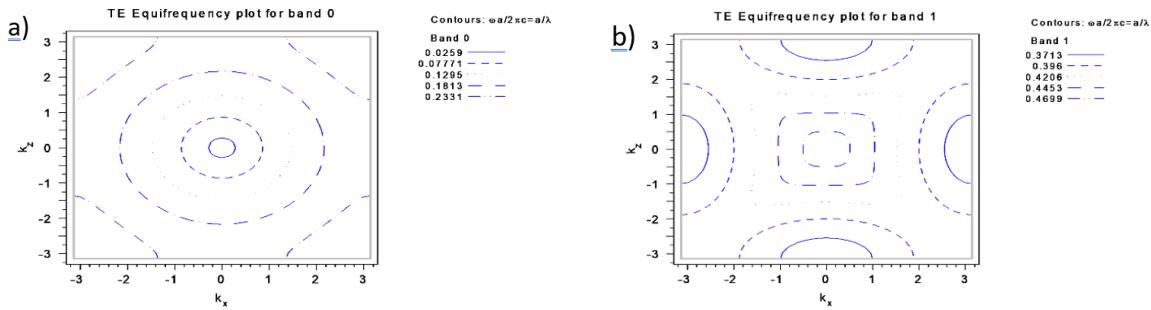


Figure III.25. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f=81,85\%$ , a) Première bande b) Deuxième bande.

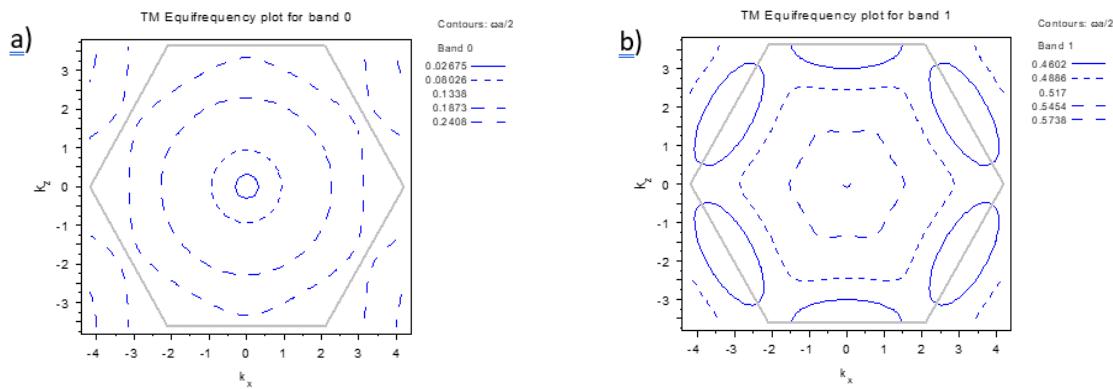


Figure III.26. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f=81,85\%$ , a) Première bande b) Deuxième bande

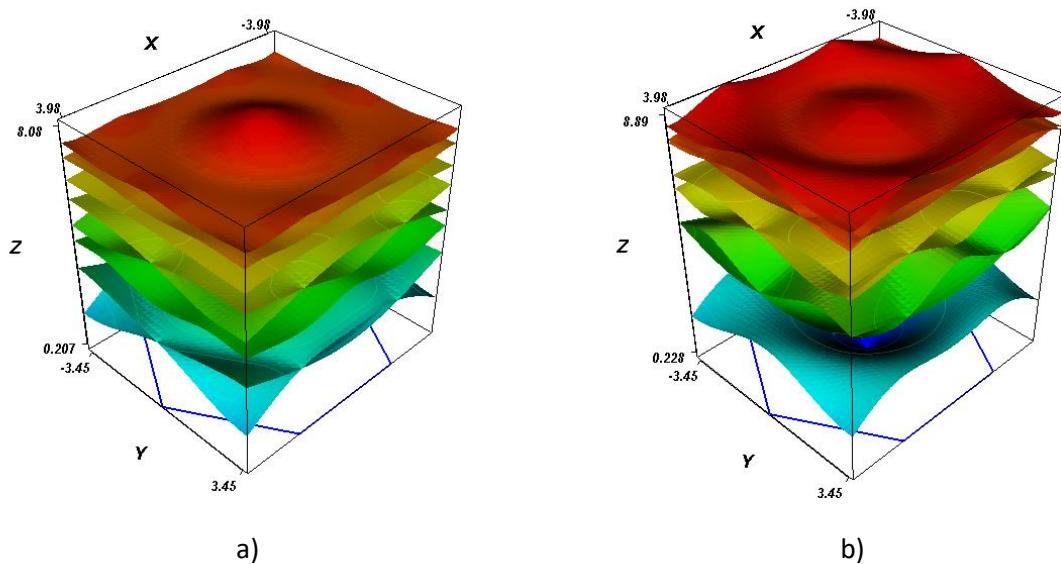


Figure III.27. Surfaces des bandes pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ , a) en polarisation TE b) en polarisation TM

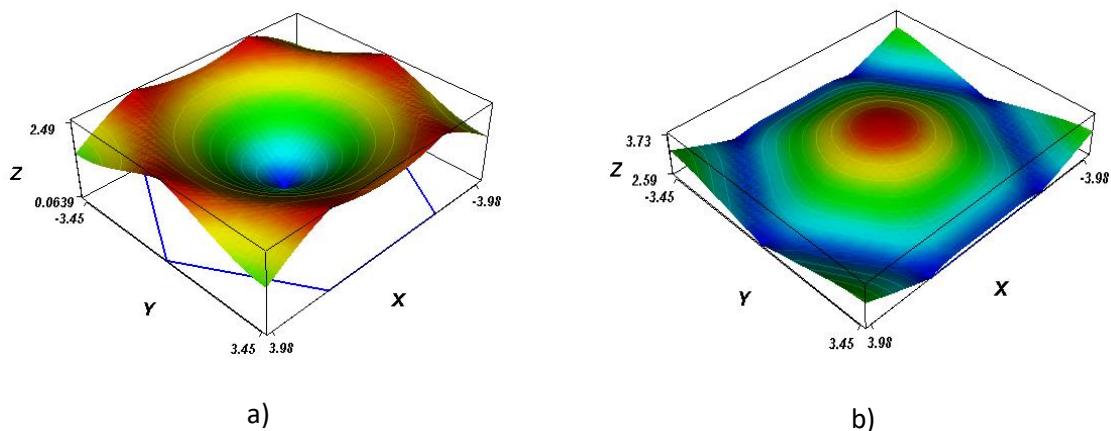


Figure III.28. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ , a) Première bande b) Deuxième bande

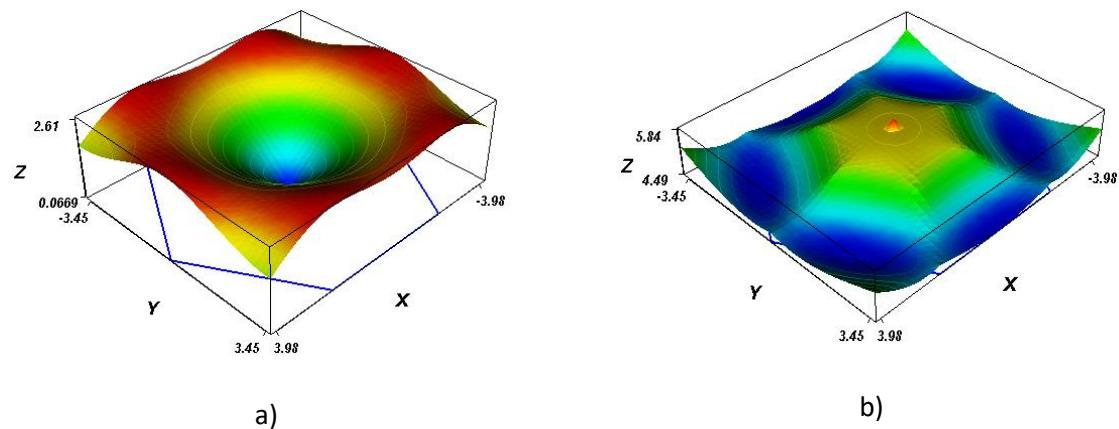


Figure III.29. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ , a) Première bande b) Deuxième bande

### III.8 Structure triangulaire connectée pour l'arsénure de gallium (GaAs) dans le domaine de télécommunication.

#### III.8.1.Calcul du facteur de remplissage.

La structure est composée de trous d'air  $n_1=1$  dans un milieu diélectrique d'indice  $n_2=3.37$  [70]

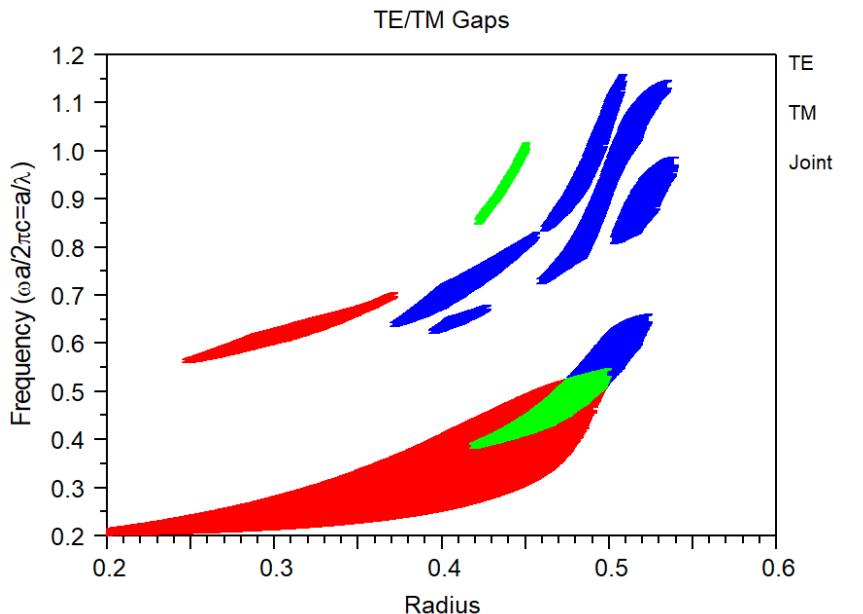


Figure III.30. Carte de Gap de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE

Dans cette situation, dans la figure III.30 on observe une différence totale entre TE et TM lorsque le rayon se situe entre 0,425 et 0,475  $\mu\text{m}$ . Une bande interdite commune est observée pour les fréquences normalisées comprises entre 0,4250 et 0,47490 (Tableau III.13). Nous trouvons également qu'il existe une bande interdite assez large pour le cas T allant de 0,375 à 0,525 (Tableau III.11), une large bande interdite TM allant de 0,2000 à 0,4750 (Tableau III.12).

##### III.8.1.1. Calcul de la Bande interdite

Les résultats montrent que la plus grande bande interdite d'une structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TE sont obtenues pour un rayon de 0,5 soit un facteur de remplissage 90,69% de 0,09557. Pour un rayon de 0,47500 la largeur de la bande interdite est de 0,07212. Pour un rayon de 0,40000 une largeur de 0,04697.

Le Tableau III.11 expose les dimensions et les bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.11. Bande interdite TE de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,3750	51,01%	1	0,01231	0,64527	1,00017
0,4000	58,04%	1	0,01498	0,63383	0,98243
0,4000	58,04%	2	0,04697	0,69642	1,07945
0,4250	65,52%	1	0,01372	0,39420	0,61102
0,4250	65,52%	2	0,01004	0,67108	1,04018
0,4250	65,52%	3	0,03586	0,74771	1,15894
0,4500	73,46%	1	0,03760	0,43025	0,66689
0,4500	73,46%	2	0,01606	0,80797	1,25235
0,4750	81,85%	1	0,07212	0,48560	0,75269
0,4750	81,85%	2	0,03797	0,77716	1,20460
0,4750	81,85%	3	0,03677	0,89386	1,38548
0,5000	90,69%	1	0,09557	0,57355	0,88900
0,5000	90,69%	2	0,06749	0,94804	1,46947
0,5000	90,69%	3	0,05769	1,08214	1,67732

Le Tableau III.12 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.12.Bande interdite TM de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,2000	14,51%	1	0,01268	0,20730	0,32132
0,2250	18,36%	1	0,02328	0,21446	0,33241
0,2500	22,67%	1	0,03617	0,22329	0,34610
0,2500	22,67%	2	0,00836	0,56548	0,87649
0,2750	27,43%	1	0,04989	0,23353	0,36197
0,2750	27,43%	2	0,02222	0,58970	0,91403
0,3000	32,65%	1	0,06727	0,24669	0,38237
0,3000	32,65%	2	0,02875	0,61489	0,95308
0,3250	38,32%	1	0,08581	0,26195	0,40602
0,3250	38,32%	2	0,02740	0,63973	0,99159
0,3500	44,44%	1	0,10803	0,28105	0,43562
0,3500	44,44%	2	0,01535	0,66877	1,03659
0,3750	51,01%	1	0,13148	0,30366	0,47067
0,4000	58,04%	1	0,15600	0,33070	0,51258
0,4250	65,52%	1	0,17633	0,36298	0,56261
0,4250	65,52%	2	0,01137	0,87026	1,34890
0,4500	73,46%	1	0,18411	0,39945	0,61914
0,4500	73,46%	2	0,01102	1,00929	1,56440
0,4750	81,85%	1	0,15080	0,44818	0,69467

### III.9 Structure de bande pour l'arséniure de gallium (GaAs)

#### III.9.1. Structure de bande TE et TM

La Figure III.31 représente les Diagrammes de bandes de la structure triangulaire connectée  $9 \times 9$  dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f = 15\%$ , (b)  $f = 51\%$ , (c)  $f = 82\%$ . Nous pouvons évaluer à partir de ces résultats l'influence du facteur de remplissage sur l'ouverture de bandes interdites.

A très faible taux de remplissage nous observons l'existence d'une bande interdite TM de 0,01278 entre les fréquences 0,19518 et 0,20797 avec l'absence totale de la bande interdite TE (Figure III.31 (a)). Pour un facteur de remplissage moyen, on remarque une large première bande interdite TM de 0,13147 entre les fréquences 0,231354 et 0,36282 et la deuxième de largeur 0,009526 entre les fréquences 0,68580 et 0,69533 et aussi une bande interdite TE de largeur 0,01262 entre les fréquences 0,62129 et 0,62718 (Figure III.31 (b)). A taux de remplissage très élevé on remarque une large première bande interdite TM de 0,15683 entre les fréquences 0,36514 et 0,52198 et trois bandes interdites TE. La première de largeur 0,07524, située entre les fréquences 0,43728 et 0,51252 et la deuxième, de largeur 0,03125, située entre les fréquences 0,74484 et 0,77609 et la troisième de largeur 0,03393, située entre les fréquences 0,85855 et 0,89249. Une bande interdite commune apparaissent en se plaçant dans la zone de recouvrement entre la bande interdite TE et TM de largeur 0,07572 située entre les fréquences 0,43846 et 0,51418 (Figure III.31 (c)).

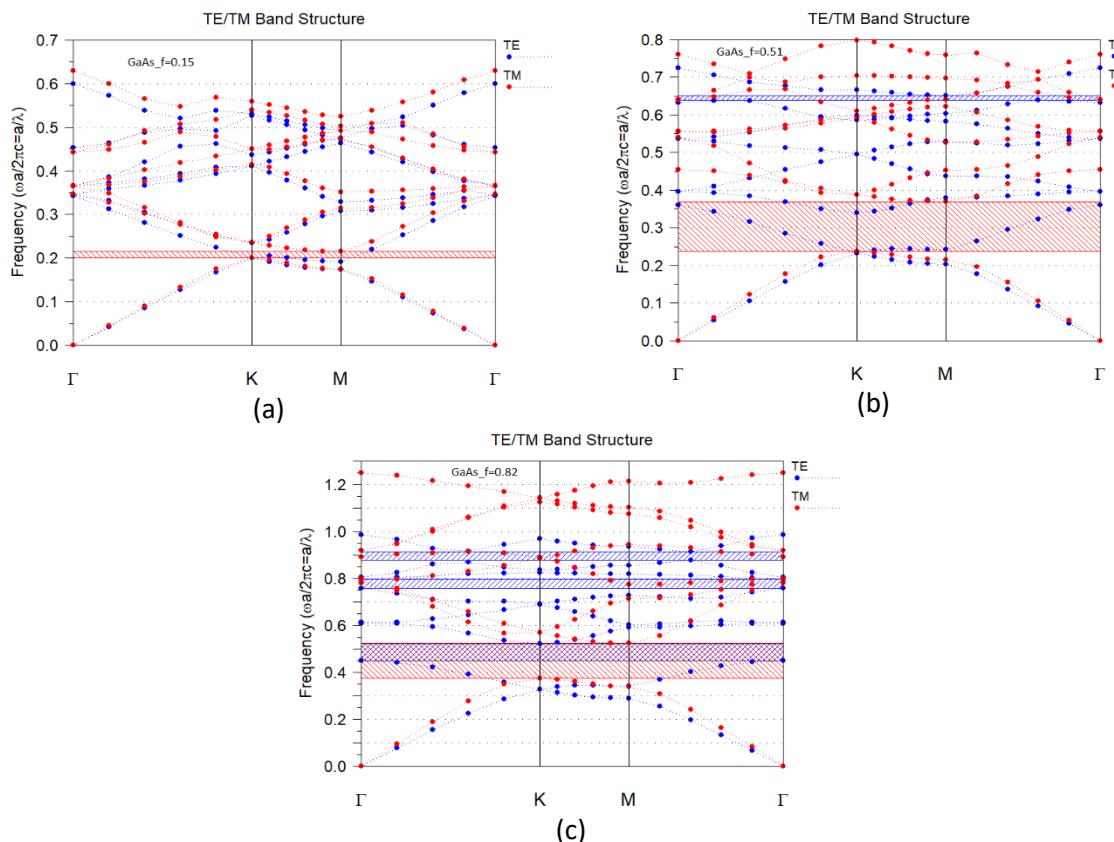


Figure III.31. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f=15\%$ , (b)  $f=51\%$ , (c)  $f=82\%$ .

Le Tableau III.13 expose les dimensions et les Bandes interdites communes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium à la longueur d'onde 1550 nm, qui nous donne pour les facteurs de remplissages 65,52%, 73,46% et 81,85% de larges gaps avec une meilleure excursion fréquentielle.

Tableau III.13. Bande interdite commune de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium

Radius(r/a)	F	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La période(a)
0,4250	65,52%	1	0,01372	0,39420	0,61102
0,4250	65,52%	2	0,01137	0,87026	1,34890
0,4500	73,46%	1	0,03760	0,43025	0,66689
0,4500	73,46%	2	0,01102	1,00929	1,56440
0,4750	81,85%	1	0,07212	0,48560	0,75269

### III.9.2. Diagramme de bandes pour $f=65,52\%$ .

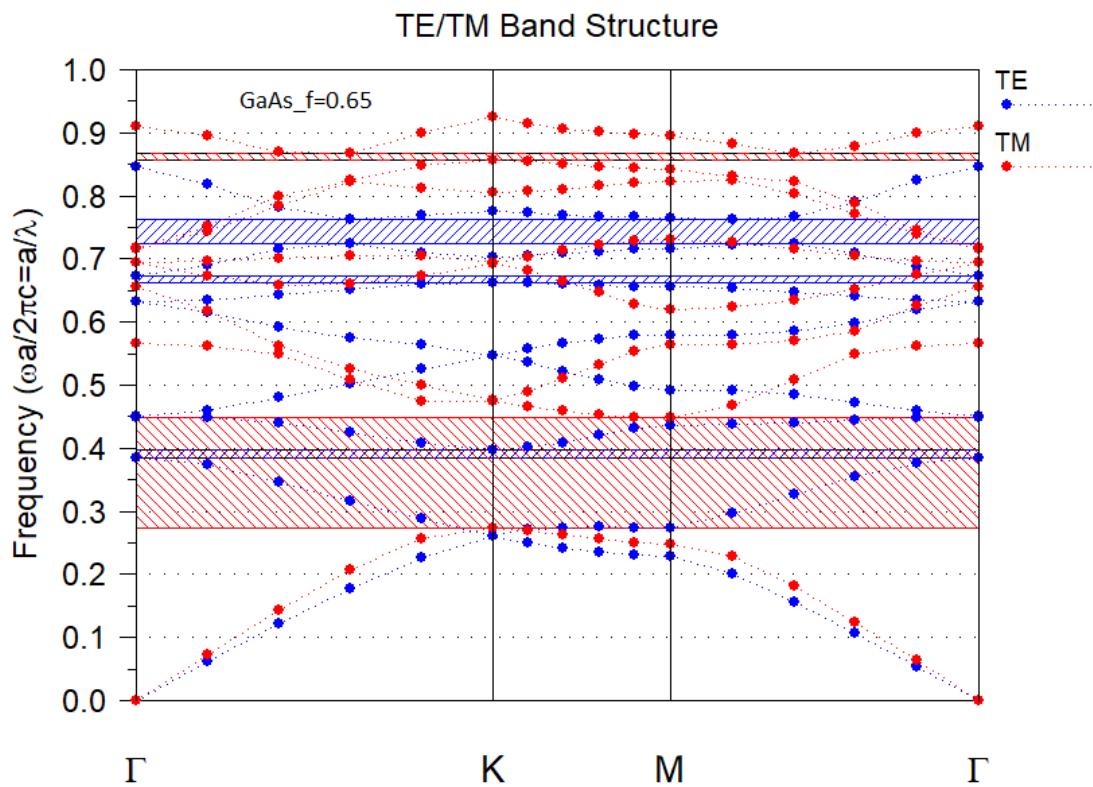


Figure III.32. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f=65,52\%$ .

Le Tableau III.14 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour  $f=65,52\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.14. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium pour  $f= 65,52\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,01259	TE	0,39189	0,60743
2	0,01189	TE	0,66800	1,03539
3	0,03725	TE	0,74336	1,15220
1	0,17520	TM	0,36048	0,55875
2	0,01043	TM	0,86131	1,33504
1	0,01259	JOINT	0,39189	0,60743
2	0,01043	JOINT	0,86131	1,33504

La Figure III.32 représente le Diagramme de bande de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f= 65,52\%$ . Nous observons l'existence de trois bandes interdites TE, la première bande de largeur 0,03725 entre les fréquences 0,72473 et 0,76198 et la deuxième de largeur 0,01259 entre les fréquences 0,38560 et 0,39819, la troisième bande TE de largeur 0,01189 entre les fréquences 0,66205 et 0,67394. Et aussi deux bandes interdites TM de largeur 0,17520 entre les fréquences 0,27288 et 0,44808, la deuxième de largeur 0,01043 entre les fréquences 0,85610 et 0,86653.

Le nouveau pour le facteur de remplissage  $f= 65,52\%$  l'apparition de deux bandes interdites communes c'est-à-dire un recouvrement de la bande interdite TE et TM ce qui impressionnant pour des diverses applications. La première bande de largeur 0,01259 entre les fréquences 0,38560 et 0,39819 et la deuxième de largeur 0,01043 entre les fréquences 0,85610 et 0,86653 (Tableau III.14).

### III.9.2.1. Contours équifréquences et surfaces des bandes pour $f= 65,52\%$ .

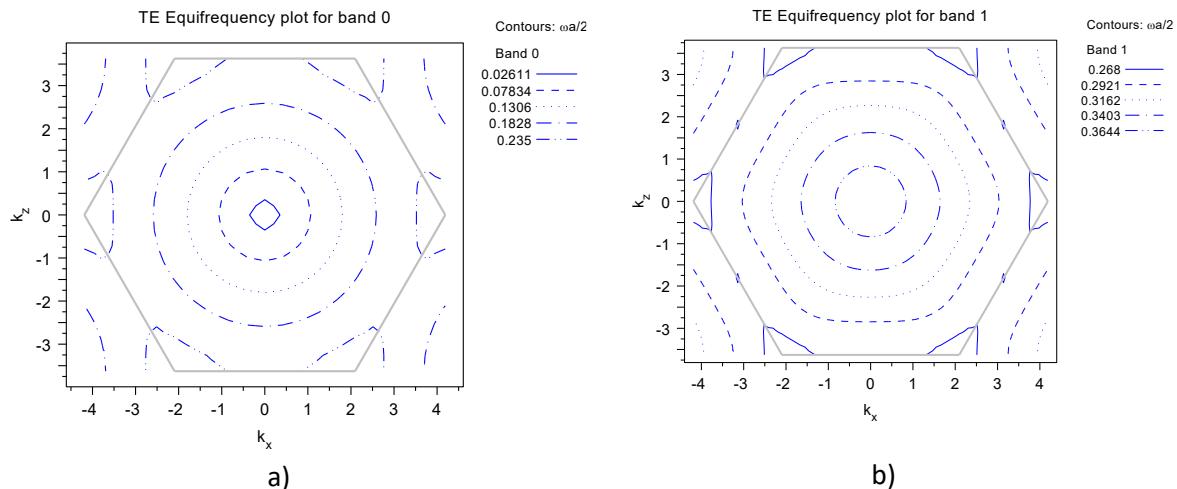


Figure III.33. Contours équifréquences en polarisation TE a) Première bande b) Deuxième bande d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium pour un facteur de remplissage  $f= 65,52\%$ .

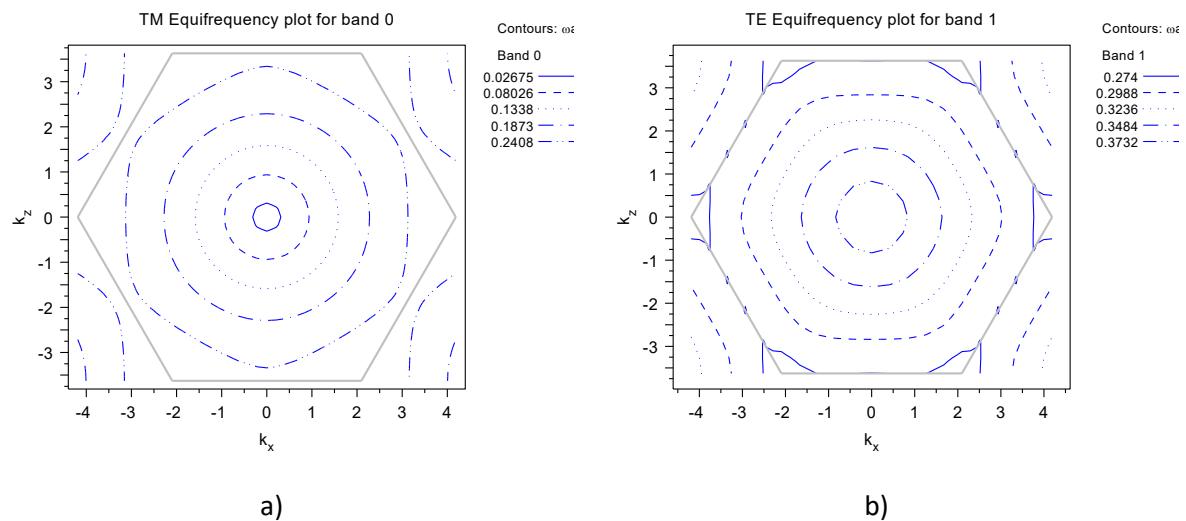


Figure III.34. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau triangulaire  
 a) Première bande b) Deuxième bande  
 dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans  
 l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .

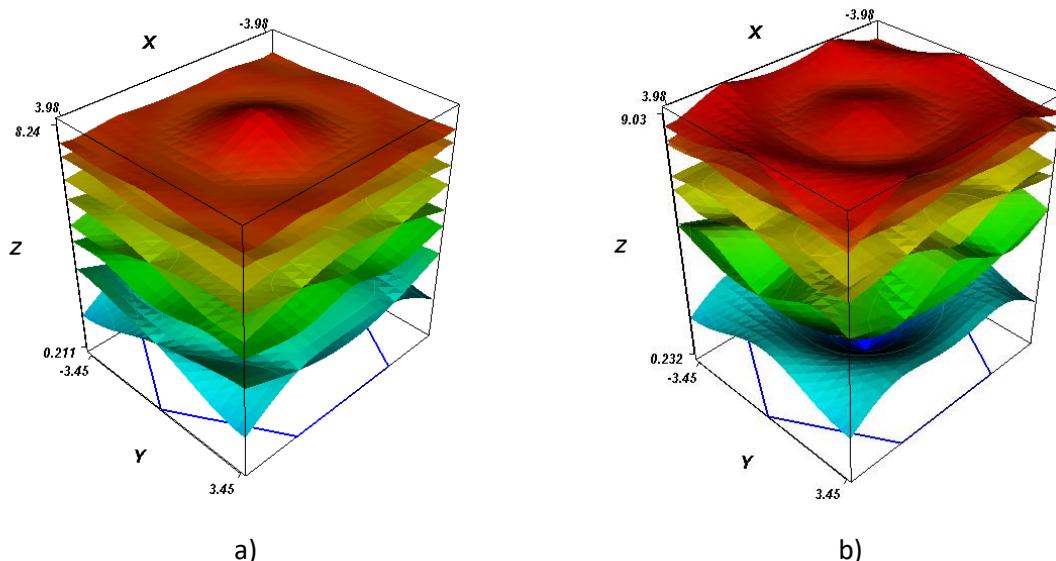


Figure III.35. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les  
 08 Premières bandes d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de  
 la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un  
 facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .

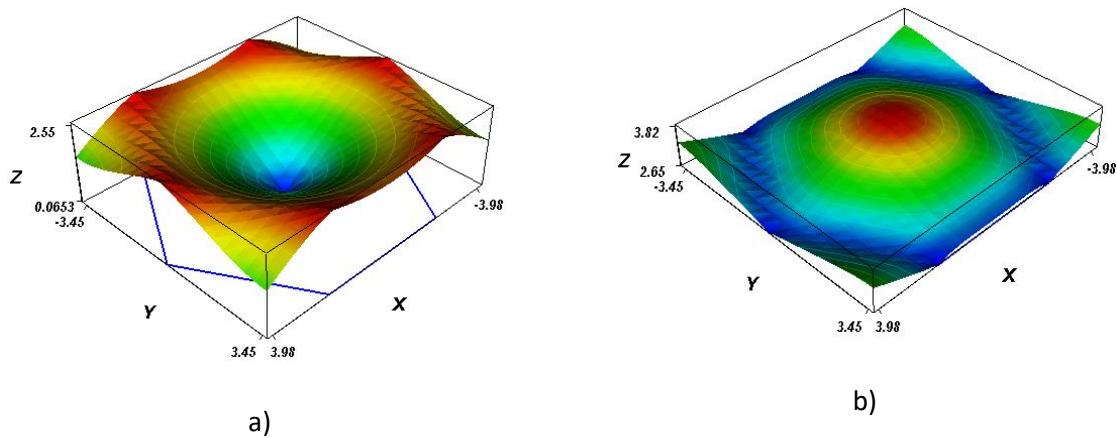


Figure III.36. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée  $9 \times 9$  dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .  
 a) Première bande b) Deuxième bande

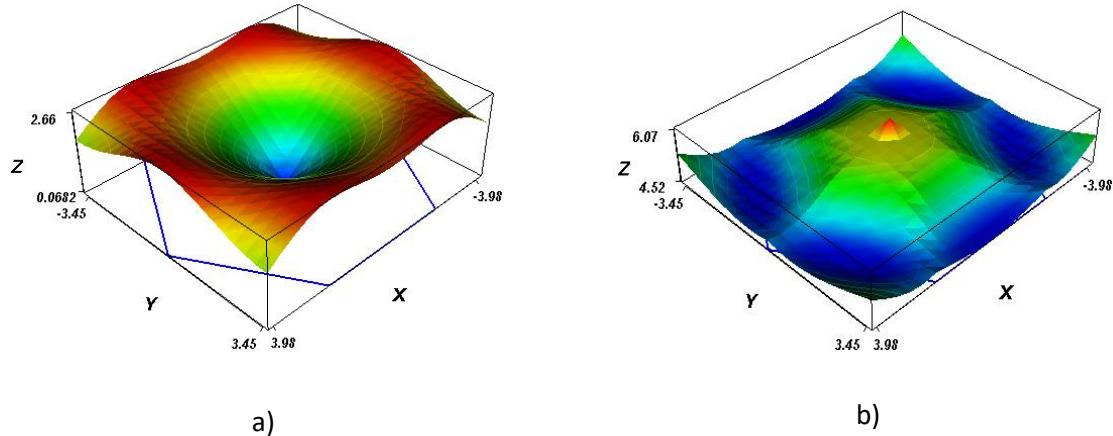


Figure III.37. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau triangulaire dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée  $9 \times 9$  dans l'arsénium de gallium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .  
 a) Première bande b) Deuxième bande

### III.9.3. Diagramme de bandes pour $f= 73,46\%$ .

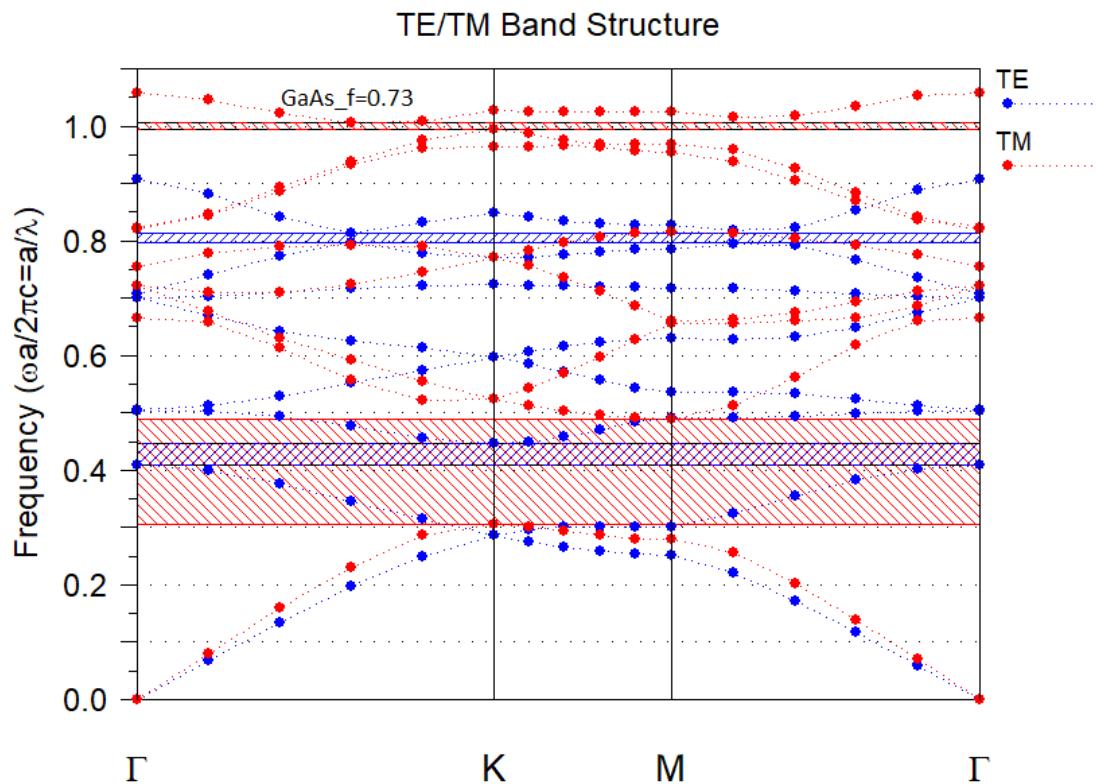


Figure III.38. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f= 73,46\%$ .

Le Tableau III.15 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium pour  $f= 73,46\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.15. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium pour  $f= 73,46\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,03731	TE	0,41724	0,64672
2	0,01717	TE	0,78955	1,22380
1	0,18856	TM	0,39183	0,60734
2	0,01167	TM	0,80545	1,24845
3	0,01213	TM	0,97882	1,51717
1	0,03731	JOINT	0,41724	0,64672
2	0,01213	JOINT	0,97882	1,51717

La Figure III.38 représente le Diagramme de bande de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f= 73,46\%$ . Nous observons l'existence de trois bandes interdites TM, la première bande de largeur 0,18856 entre les fréquences 0,29755 et 0,48612 et la deuxième de largeur 0,01167 entre les fréquences 0,79962 et

0,81129, la troisième bande TM de largeur 0,01213 entre les fréquences 0,97276 et 0,98489. Et aussi deux bandes interdites TE de largeur 0,03731 entre les fréquences 0,39858 et 0,43590, la deuxième de largeur 0,01717 entre les fréquences 0,78096 et 0,79813.

Aussi pour le facteur de remplissage  $f = 73,46\%$  l'apparition de deux bandes interdites communes. La première bande de largeur 0,03731 entre les fréquences 0,39858 et 0,43590 et la deuxième de largeur 0,01213 entre les fréquences 0,97276 et 0,98489.

### III.9.4. Diagramme de bandes pour $f = 81,85\%$ .

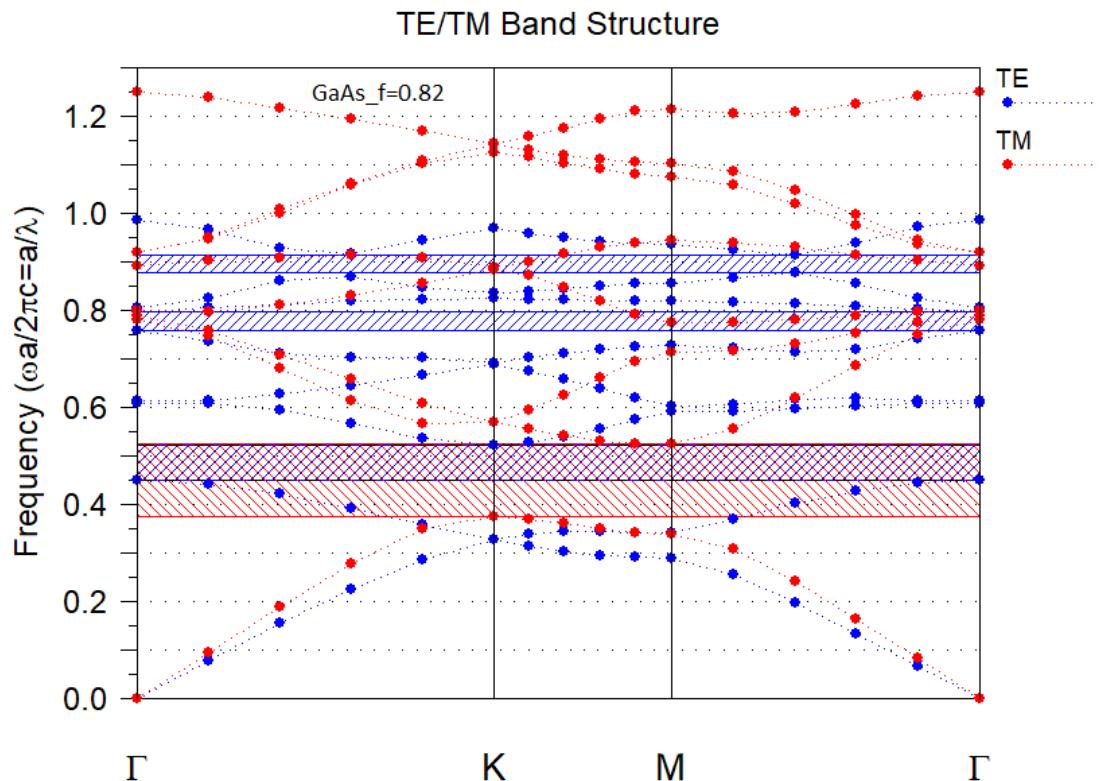


Figure III.39. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .

Le Tableau III.16 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium pour  $f = 81,85\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.16. Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium pour  $f = 81,85\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,07254	TE	0,48702	0,75487
2	0,03903	TE	0,77884	1,20720
3	0,03761	TE	0,89627	1,38921
1	0,14882	TM	0,44963	0,69693

1	0,07254	JOINT	0,48702	0,75487
---	---------	-------	---------	---------

La Figure III.39 représente le Diagramme de bande de la structure triangulaire connectée  $9 \times 9$  dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ . Nous observons l'existence de trois bandes interdites TE, la première bande de largeur 0,07572 entre les fréquences 0,43845 et 0,51418 et la deuxième de largeur 0,03220 entre les fréquences 0,74607 et 0,77827, la troisième bande TE de largeur 0,03482 entre les fréquences 0,86069 et 0,89551. Et une bandes interdite TM de largeur 0,15483 entre les fréquences 0,36763 et 0,52246.

Pour le facteur de remplissage  $f = 81,85\%$  l'apparition d'une seule bande interdite commune. De largeur 0,07572 entre les fréquences 0,43845 et 0,51418.

### III.10 Structure carrée connectée pour l'arséniure de gallium (GaAs) dans le domaine de télécommunication.

#### III.10.1. Calcul du facteur de remplissage.

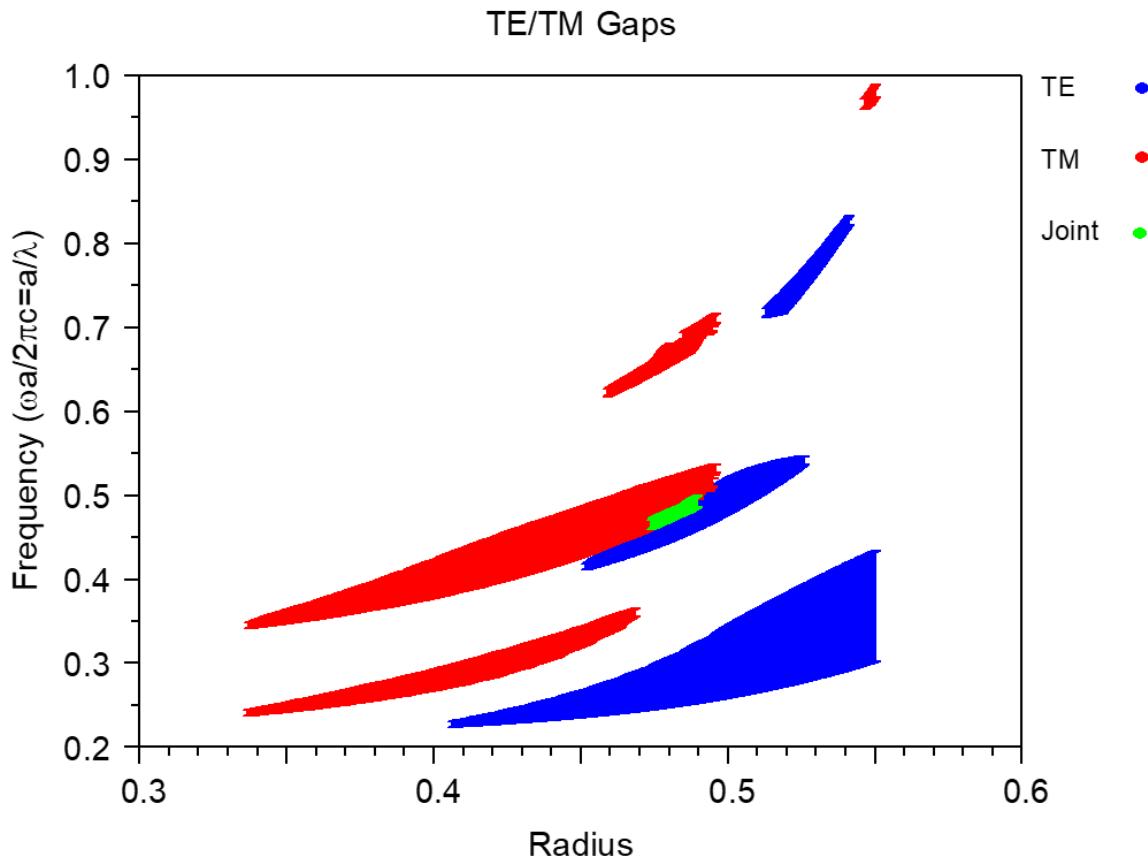


Figure III.40. Carte de Gap de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE

#### III.10.1.1. Calcul de la Bande interdite

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TE sont obtenues pour un rayon de 0.5 soit un facteur de remplissage 90,69% de 0,08627. Pour un rayon de 0,47500 la largeur de la bande interdite est de 0,05324. Pour un rayon de 0,45000 une larguer de 0,03145.

Le Tableau III.17 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.17. Bande interdite TE de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en μm)
0,40750	60,24%	1	0,00706	0,22793	0,35329
0,41000	60,98%	1	0,00790	0,22884	0,35470
0,41250	61,73%	1	0,00944	0,23012	0,35669

0,42500	65,52%	1	0,01591	0,23623	0,36616
0,45000	73,46%	1	0,03127	0,25113	0,38925
0,47500	81,85%	1	0,05310	0,27188	0,42141
0,47500	81,85%	2	0,03555	0,45606	0,70689
0,50000	90,69%	1	0,08591	0,30186	0,46788
0,50000	90,69%	2	0,04191	0,49934	0,77397
0,52500	99,99%	1	0,11392	0,33448	0,51844
0,52500	99,99%	2	0,01232	0,53993	0,83689
0,52500	99,99%	3	0,02054	0,75464	1,16969
0,55000	109,73%	1	0,13156	0,36788	0,57021

Le Tableau III.18 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.18. Bande interdite TM de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,33750	41,32%	1	0,00668	0,24121	0,37388
0,33750	41,32%	2	0,00667	0,34540	0,53538
0,34250	42,55%	1	0,00817	0,24377	0,37785
0,34250	42,55%	2	0,01111	0,34973	0,54208
0,34750	43,81%	1	0,00975	0,24610	0,38145
0,34750	43,81%	2	0,01420	0,35342	0,54780
0,35000	44,44%	1	0,01061	0,24758	0,38375
0,35000	44,44%	2	0,01579	0,35545	0,55095
0,37500	51,01%	1	0,01848	0,26272	0,40722
0,37500	51,01%	2	0,03016	0,37648	0,58354
0,40000	58,04%	1	0,02436	0,27979	0,43368
0,40000	58,04%	2	0,04507	0,40026	0,62040
0,42500	65,52%	1	0,02719	0,30232	0,46860
0,42500	65,52%	2	0,05713	0,42775	0,66302
0,45000	73,46%	1	0,02328	0,33121	0,51338
0,45000	73,46%	2	0,05913	0,45605	0,70688
0,47500	81,85%	1	0,05376	0,48838	0,75699
0,47500	81,85%	2	0,01541	0,65387	1,01350

La Figure III.41 représente les Diagrammes de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) f= 15%, (b) f= 51%, (c) f= 82%.

A très faible taux de remplissage nous observons l'absence totale de la bande interdite TE et TM. (Figure III.41 (a)). Pour un facteur de remplissage moyen, on remarque une large première bande interdite TM de 0,05035 entre les fréquences 0,36958 et 0,41993 et la deuxième de largeur 0,02569 entre les fréquences 0,26268 et 0,28837 et aussi une petite bande interdite TM de largeur 0,00843 entre les fréquences 0,51497 et 0,52340, avec l'absence des bandes TE (Figure III.41 (b)). A taux de remplissage très élevé on remarque une large première bande interdite TE de 0,10006 entre les fréquences 0,25903 et 0,35909 et une deuxième bande

interdite TE de largeur 0,03921, située entre les fréquences 0,48712 et 0,52633. La structure carrée ne présente aucune bande interdite commune (Figure III.41 (c)).

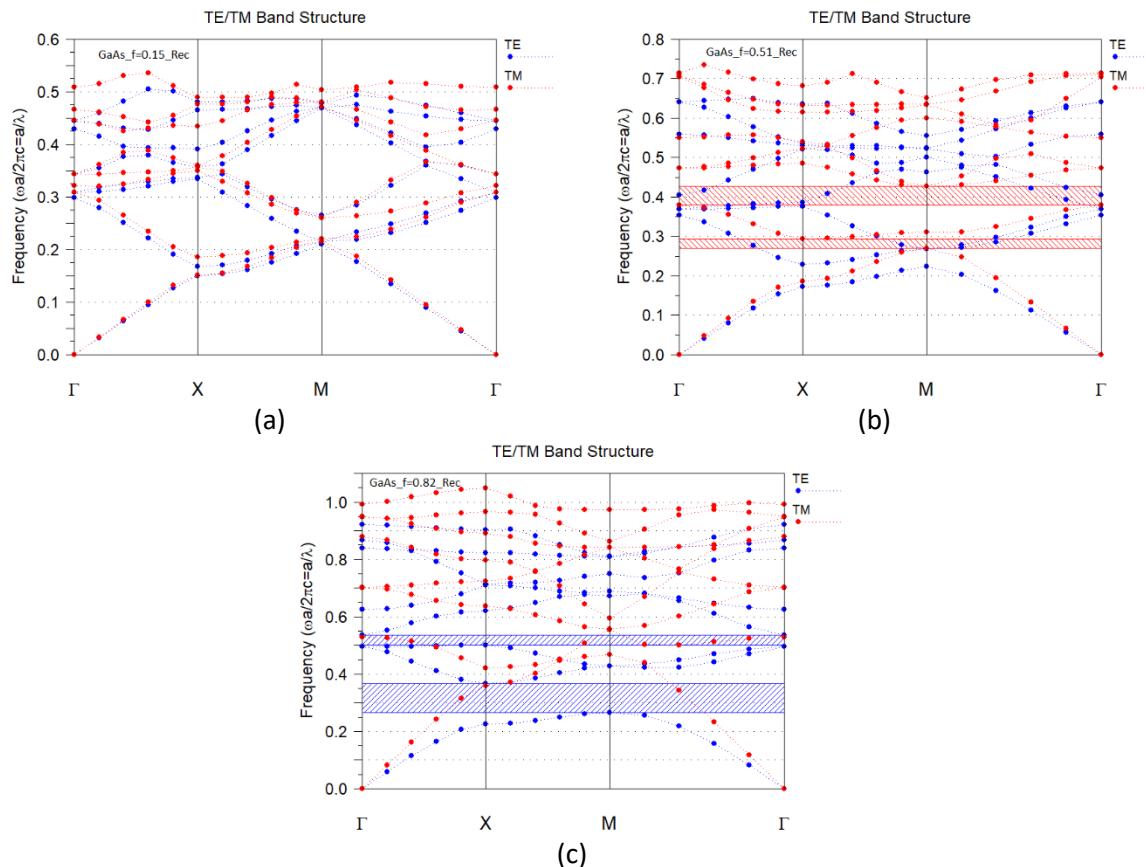


Figure III.41. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arsénium de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f=15\%$ , (b)  $f=51\%$ , (c)  $f=82\%$ .

Le Tableau III.19 expose les dimensions et les Bandes interdites communes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arsénium de gallium à la longueur d'onde 1550 nm, pour les facteurs de remplissages 81,85%, 86,21%.

Tableau III.19. Bande interdite commune de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arsénium de gallium

Radius( $r/a$ )	F	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La période( $a$ )
0,4750	81,85%	1	0,01233	0,46767	0,72489
0,4875	86,21%	1	0,01412	0,48852	0,75720

### III.10.2. Diagramme de bandes pour $f=81,85\%$ .

TE/TM Band Structure

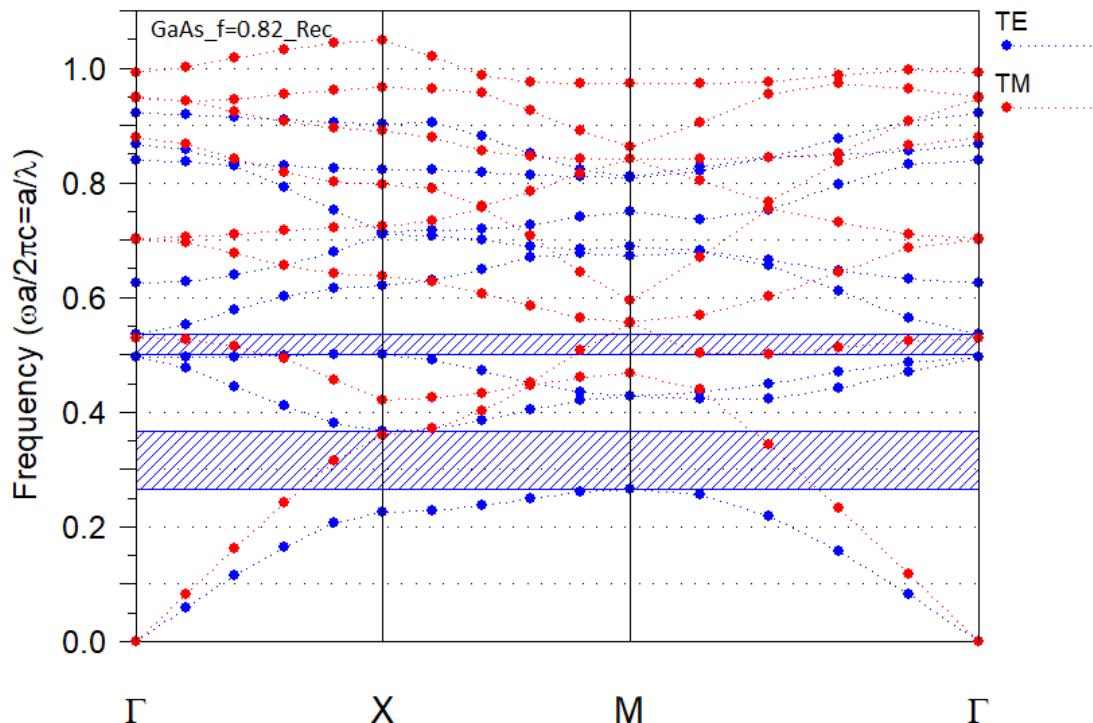


Figure III.42. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans l'arsénium de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f=81,85\%$ .

Le Tableau III.20 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans l'arsénium de gallium pour  $f=81,85\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.20. Bandes interdites de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans l'arsénium de gallium pour  $f=81,85\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,09888	TE	0,31546	0,48897
2	0,03521	TE	0,51710	0,80151

La Figure III.42 représente le Diagramme de bande de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans le l'arsénium de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  $f=81,85\%$ . Nous observons l'existence de deux bandes interdites TE, la première bande de largeur 0,09888 entre les fréquences 0,26602 et 0,36490 et la deuxième de largeur 0,03521 entre les fréquences 0,49950 et 0,53471.

### III.10.2.1. Contours équifréquences et surfaces des bandes $f=81,85\%$ .

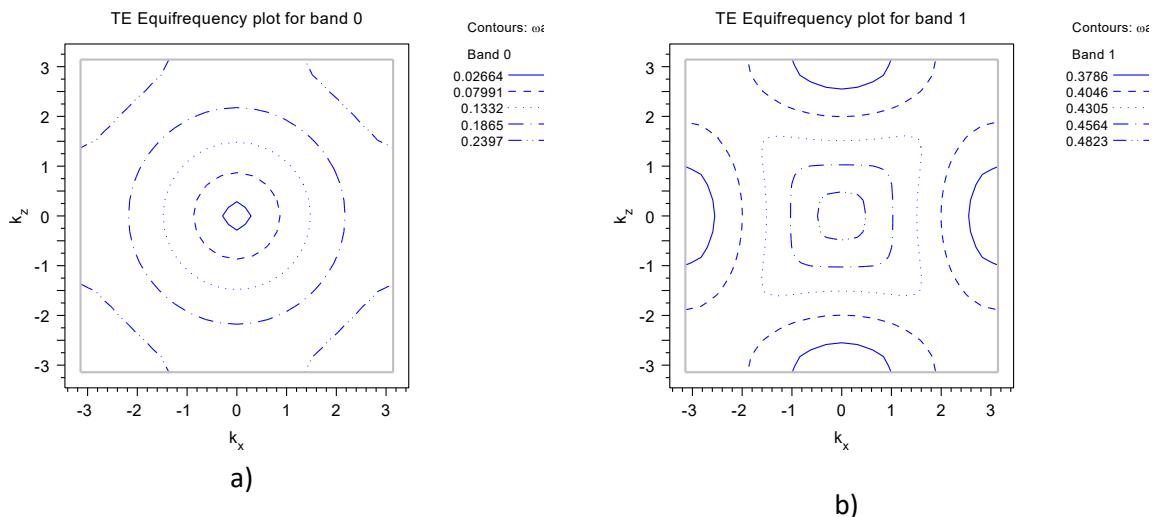


Figure III.43. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau carré

a) Première bande b) Deuxième bande

dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage  $f=81,85\%$ .

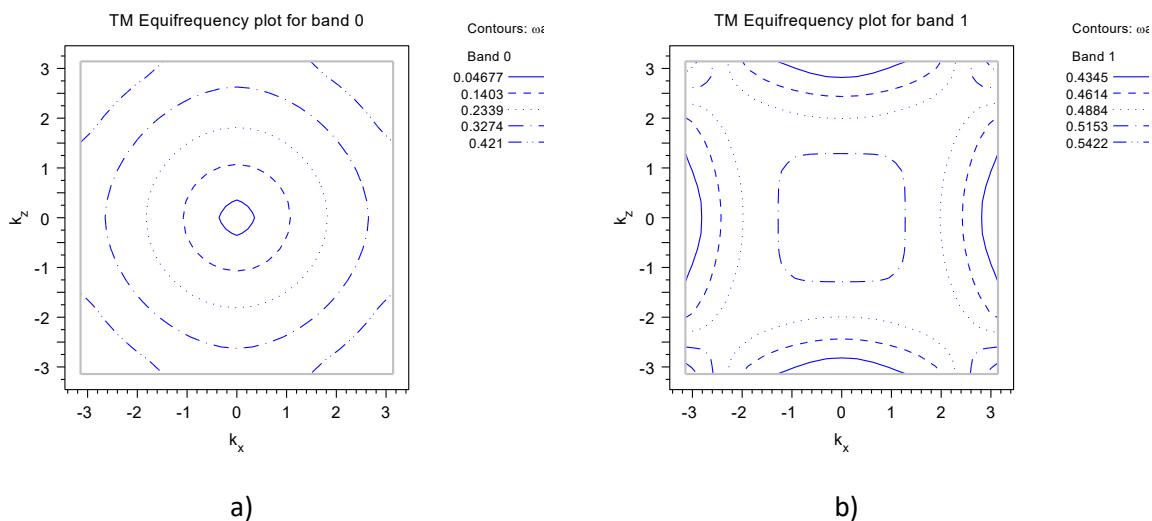


Figure III.44. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau carré

a) Première bande b) Deuxième bande

dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage  $f=81,85\%$ .

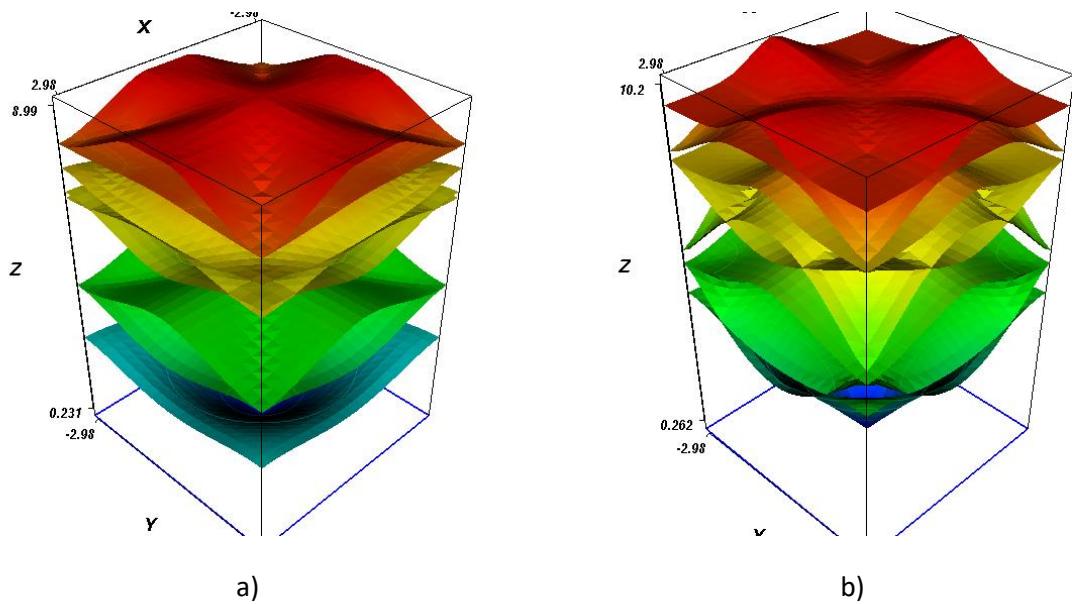


Figure III.45. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes d'un réseau carré dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .

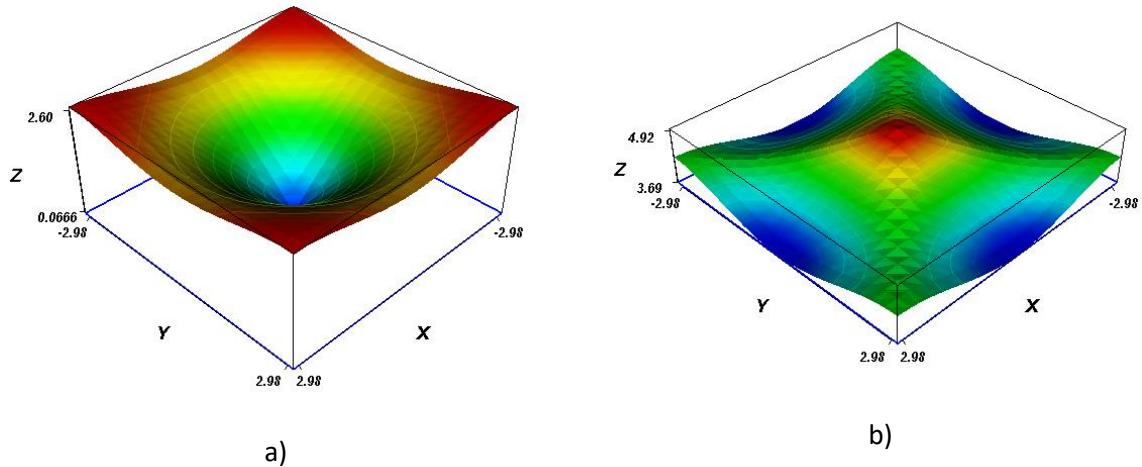


Figure III.46. Surfaces des bandes en polarisation TE d'un réseau carré dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .  
 a) Première bande b) Deuxième bande

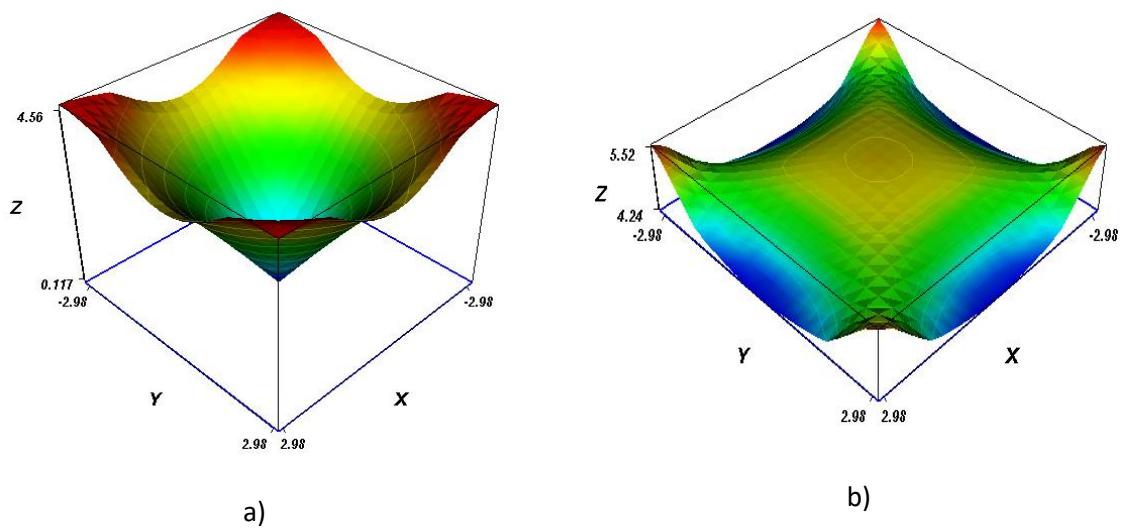


Figure III.47. Surfaces des bandes en polarisation TM d'un réseau carré dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour un facteur de remplissage  $f = 81,85\%$ .  
a) Première bande b) Deuxième bande

### III.11 Structure triangulaire connectée pour le Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) dans le domaine de télécommunication.

#### III.11.1. Calcul du facteur de remplissage.

La structure est composée de trous d'air  $n_1=1$  dans un milieu diélectrique d'indice  $n_2=2.21$ .

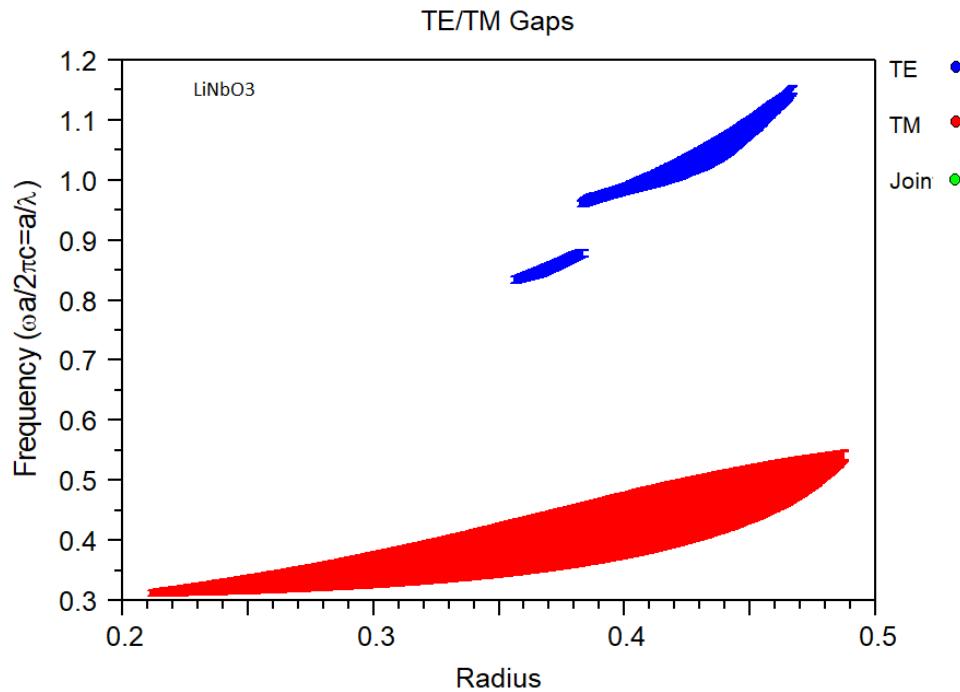


Figure III.48. Carte de Gap de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE

#### III.11.1.1. Calcul de la Bande interdite

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TE sont obtenues pour un rayon de 0,425 soit un facteur de remplissage 65,52% de 0,03538. Pour un rayon de 0,35750 une bande interdite minimale de 0,01115 (Tableau III.21).

Pour le mode TM la plus large bande interdite est 0,10788 pour un rayon 0,4000, une bande interdite minimale de 0,01599 pour un rayon de 0,2250 (Tableau III.22).

Le Tableau III.21 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.21. Bande interdite TE de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en μm)
0,35750	46,36%	1	0,01115	0,83528	1,29468
0,37500	51,01%	1	0,01512	0,86346	1,33836

0,40000	58,04%	1	0,01658	0,98495	1,52667
0,42500	65,52%	1	0,03538	1,02519	1,58905
0,45000	73,46%	1	0,03146	1,08946	1,68867
0,46500	78,44%	1	0,01607	1,14186	1,76989

Le Tableau III.22 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.22. Bande interdite TM de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,2250	18,36%	1	0,01599	0,31627	0,49021
0,2500	22,67%	1	0,02910	0,32598	0,50527
0,2750	27,43%	1	0,04234	0,33700	0,52236
0,3000	32,65%	1	0,05773	0,35049	0,54326
0,3250	38,32%	1	0,07249	0,36555	0,56660
0,3500	44,44%	1	0,08758	0,38315	0,59388
0,3750	51,01%	1	0,09983	0,40276	0,62428
0,4000	58,04%	1	0,10788	0,42448	0,65795
0,4250	65,52%	1	0,10696	0,44926	0,69635
0,4500	73,46%	1	0,09329	0,47731	0,73983
0,4650	78,44%	1	0,07526	0,49740	0,77098
0,4750	81,85%	1	0,05456	0,51421	0,79702

La Figure III.49 représente les Diagrammes de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage a) f= 18.36%, (b) f= 51,01%, (c) f= 78.44%.

A très faible taux de remplissage nous observons l'existence d'une bande interdite TM de 0,01597 entre les fréquences 0,30827 et 0,32424 avec l'absence totale de la bande interdite TE (Figure III.49(a)). Pour un facteur de remplissage moyen, on remarque une large première bande interdite TM de 0,09983 entre les fréquences 0,35284 et 0,45266 et aussi une bande interdite TE de largeur 0,01512 entre les fréquences 0,85588 et 0,87100 (Figure III.49(b)). A taux de remplissage très élevé on remarque une première bande interdite TM de 0,07524 entre les fréquences 0,45980 et 0,53504 et une bande interdite TE de largeur 0,01604, située entre les fréquences 1,13393 et 1,14997 (Figure III.49 (c)).

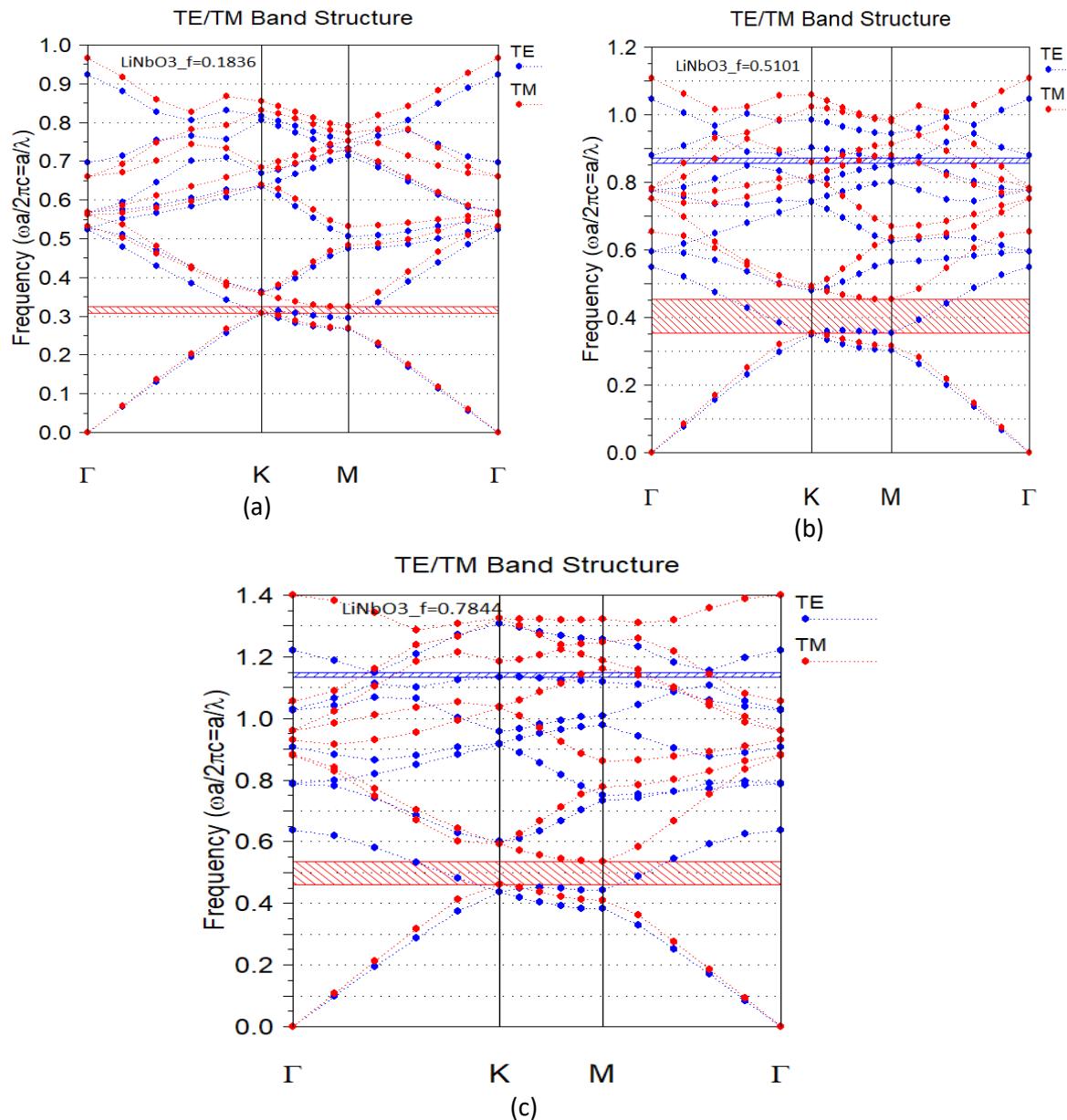


Figure III.49. Diagramme de bandes de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f=18.36\%$ , (b)  $f=51.01\%$ , (c)  $f=78.44\%$ .

**III.11.1.2. Contours équifréquences et surfaces des bandes pour  $f=65,52\%$ .**

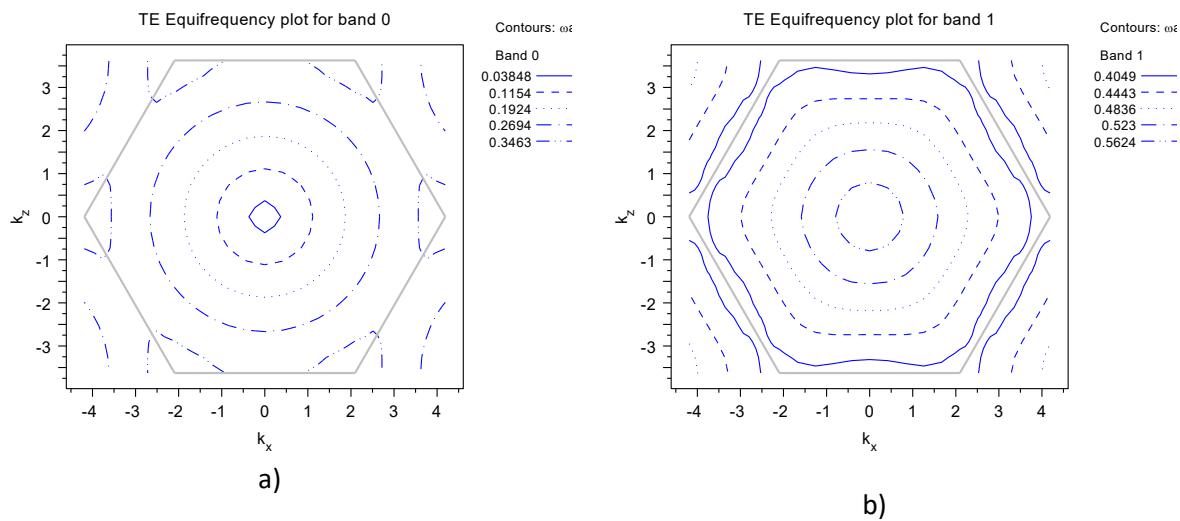


Figure III.50. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau carré  
a) Première bande b) Deuxième bande  
dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans  
le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f=65,52\%$ .

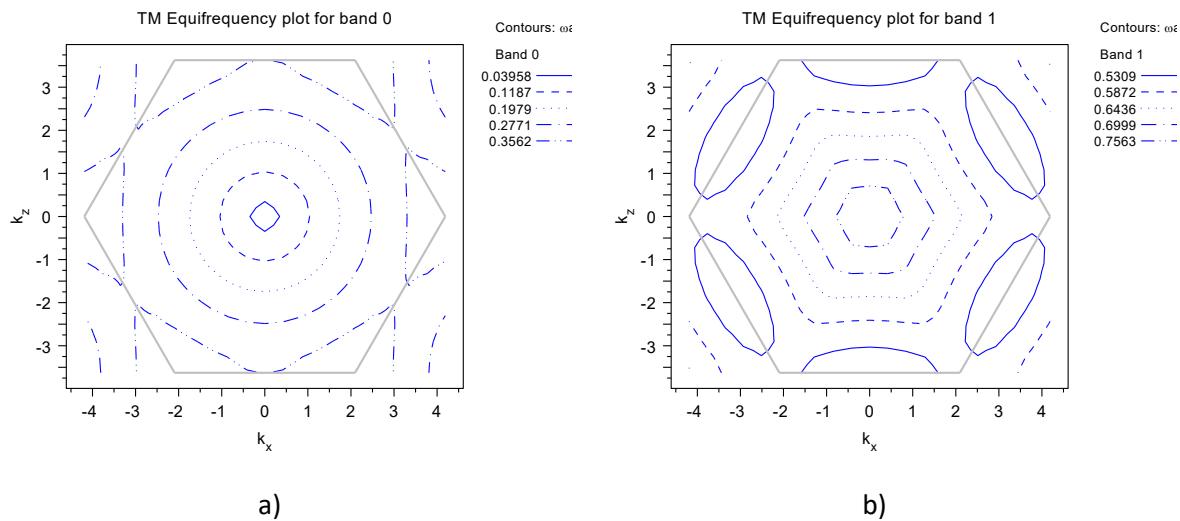


Figure III.51. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau carré  
a) Première bande b) Deuxième bande  
dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans  
le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f=65,52\%$ .

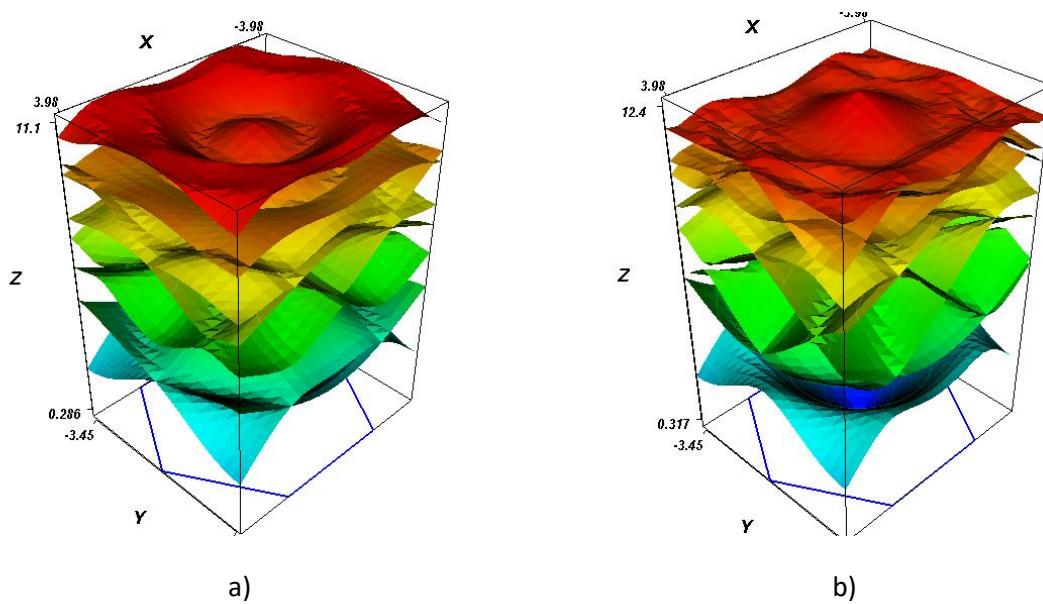


Figure III.52. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée  $9 \times 9$  le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ .

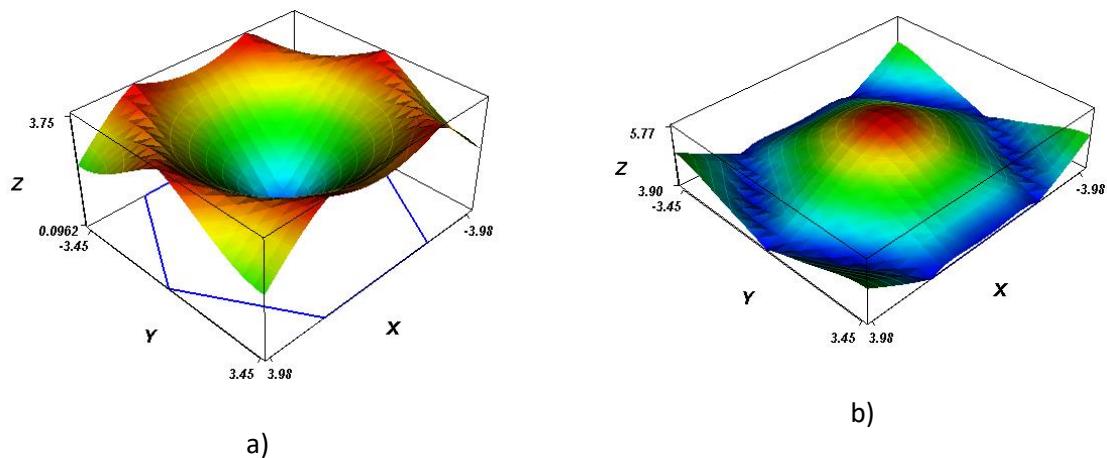


Figure III.53. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée  $9 \times 9$  dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

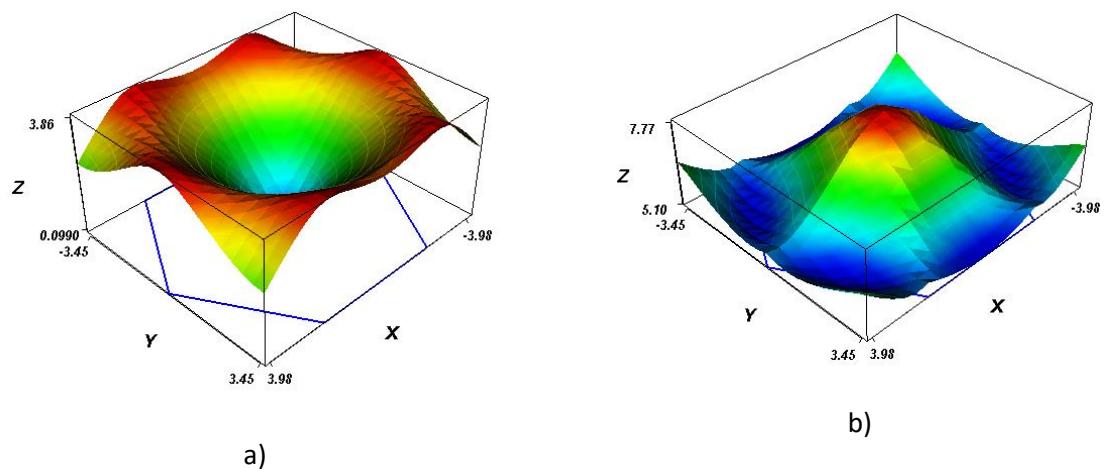


Figure III.54. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire connectée  $9 \times 9$  dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f = 65,52\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

### III.12 Structure carrée connectée pour le Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) dans le domaine de télécommunication.

#### III.12.1. Calcul du facteur de remplissage.

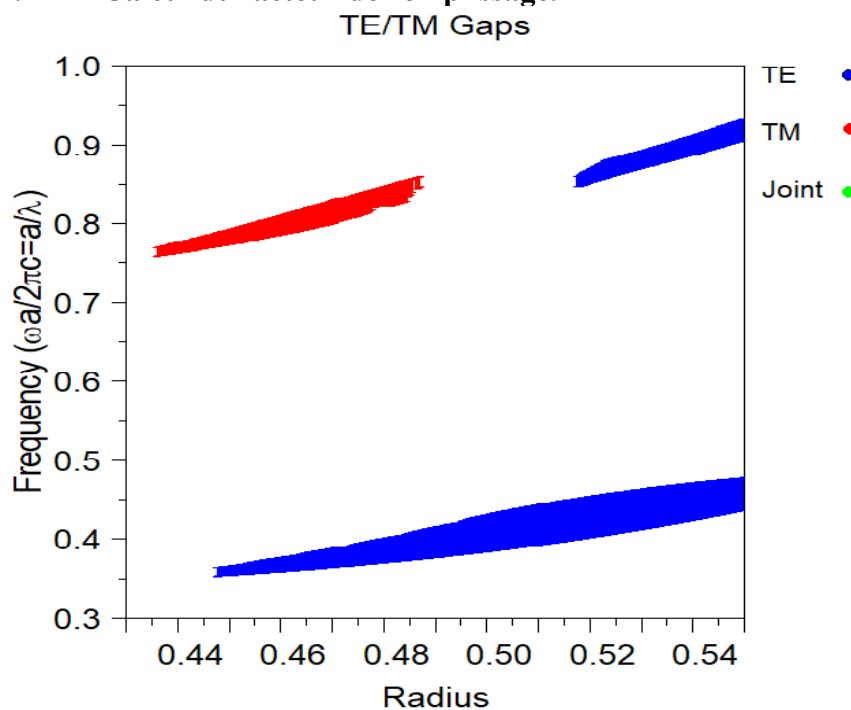


Figure III.55. Carte de Gap de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE

##### III.12.1.1. Calcul de la Bande interdite

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure carrée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TE sont obtenues pour un rayon de 0,50750 soit un facteur de remplissage 93,43% de 0,05009. Pour un rayon de 0,44775 la largeur de la bande interdite est de 0,01062 est minimale.

Le Tableau III.23 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.23. Bande interdite TE de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium

Radius(r/a)	F	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en μm)
0,44775	72,73%	1	0,01062	0,35837	0,55547
0,45250	74,28%	1	0,01257	0,36142	0,56020
0,45500	75,10%	1	0,01493	0,36375	0,56381
0,46000	76,76%	1	0,01770	0,36753	0,56967
0,46250	77,60%	1	0,01874	0,36929	0,57240
0,46500	78,44%	1	0,02110	0,37176	0,57623
0,46750	79,28%	1	0,02281	0,37396	0,57963
0,47000	80,13%	1	0,02415	0,37600	0,58279

0,47500	81,85%	1	0,02768	0,38060	0,58993
0,47750	82,71%	1	0,02965	0,38312	0,59384
0,48000	83,58%	1	0,03118	0,38542	0,59740
0,48250	84,45%	1	0,03244	0,38763	0,60083
0,48500	85,33%	1	0,03465	0,39039	0,60510
0,48750	86,21%	1	0,03699	0,39327	0,60957
0,49250	87,99%	1	0,04004	0,39833	0,61740
0,49500	88,89%	1	0,04189	0,40111	0,62171
0,49750	89,79%	1	0,04476	0,40446	0,62691
0,50000	90,69%	1	0,04654	0,40735	0,63139
0,50750	93,43%	1	0,05009	0,41543	0,64392

Le Tableau III.24 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau III.24. Bande interdite TM de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium

Rayon	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en μm)
0,4375	69,43%	1	0,01170	0,76578	1,18696
0,4400	70,23%	1	0,01340	0,76906	1,19204
0,4425	71,03%	1	0,01492	0,77207	1,19671
0,4450	71,84%	1	0,01579	0,77580	1,20248
0,4475	72,64%	1	0,01735	0,77932	1,20794
0,4500	73,46%	1	0,01901	0,78272	1,21321
0,4525	74,28%	1	0,02053	0,78611	1,21847
0,4550	75,10%	1	0,02148	0,79034	1,22502
0,4575	75,93%	1	0,02270	0,79416	1,23095
0,4600	76,76%	1	0,02432	0,79801	1,23691
0,4700	80,13%	1	0,02792	0,81433	1,26222
0,4825	84,45%	1	0,02742	0,83753	1,29817

La Figure III.56 représente les Diagrammes de bandes de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) f= 15%, (b) f= 51%, (c) f= 82%.

A très faible et moyen taux de remplissage nous observons l'absence totale de la bande interdite TE et TM. (Figure III.56 (a), (b)). A taux de remplissage très élevé on remarque une large première bande interdite TE de 0,10006 entre les fréquences 0,25903 et 0,35909 et une deuxième bande interdite TE de largeur 0,03921, située entre les fréquences 0,48712 et 0,52633. la structure carrée ne présente aucune bande interdite commune (Figure III.56 (c)).

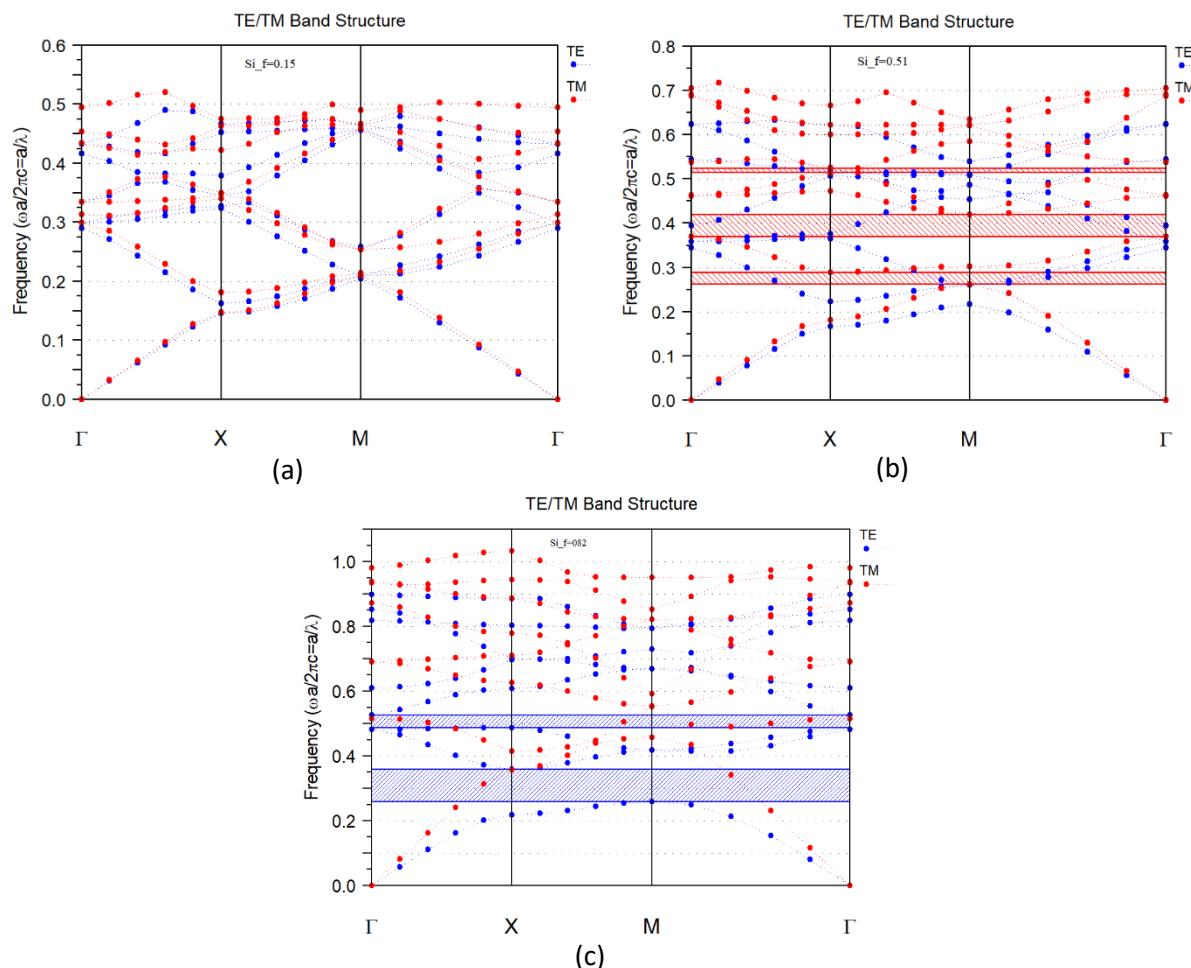


Figure III.56. Diagramme de bandes de la structure carrée connectée  $9 \times 9$  dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f= 15\%$ , (b)  $f= 51\%$ , (c)  $f= 82\%$ .

### III.12.1.2. Contours équifréquences et surfaces des bandes pour $f=72,73\%$ .

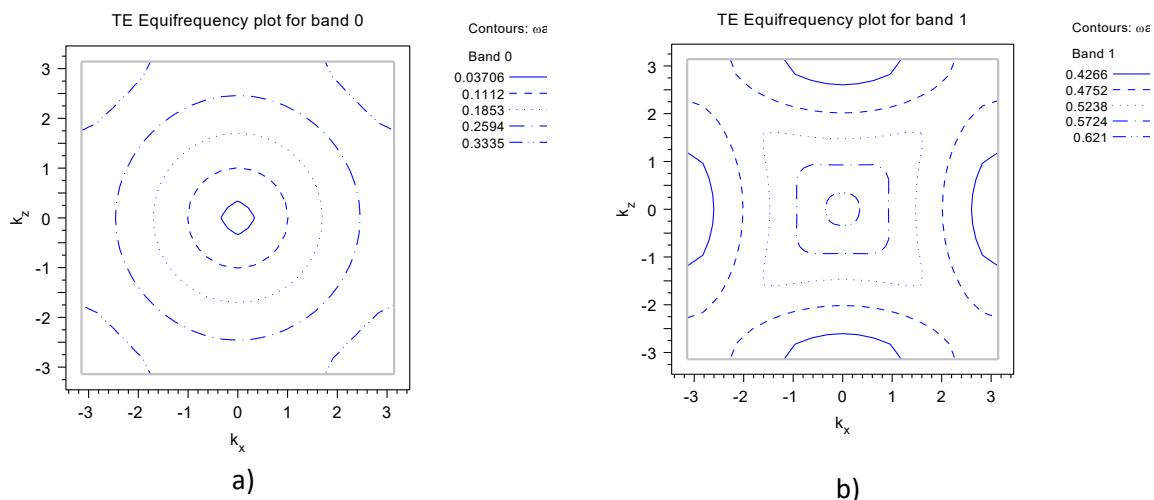


Figure III.57. Contours équifréquences en polarisation TE d'un réseau carré  
a) Première bande b) Deuxième bande

dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f = 72.73\%$ .

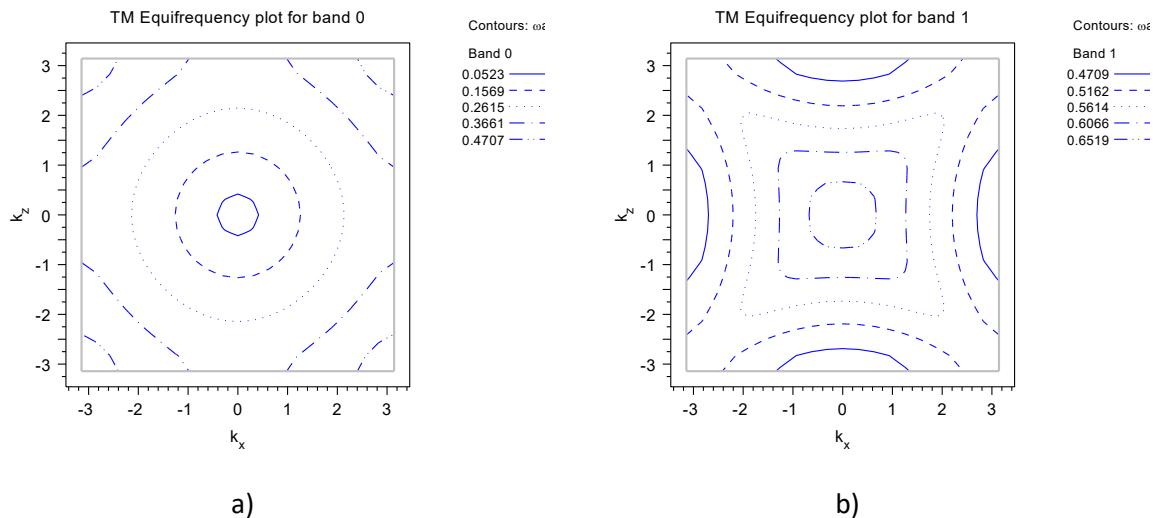


Figure III.58. Contours équifréquences en polarisation TM d'un réseau carré  
a) Première bande b) Deuxième bande  
dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le  
Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f = 72.73\%$ .

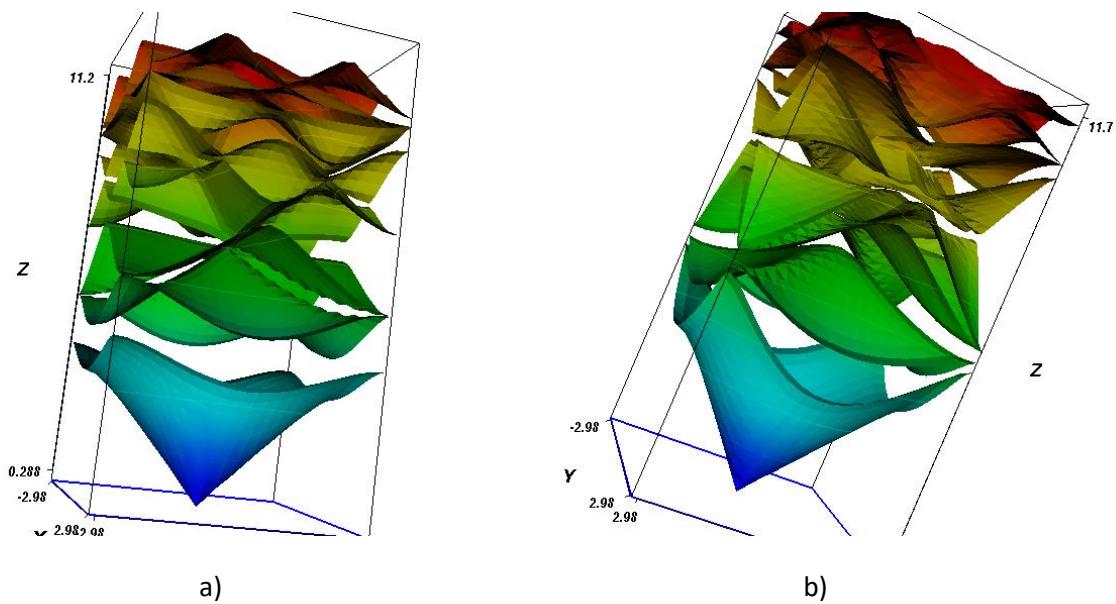


Figure III.59. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les  
08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée  
connectée 9 x 9 le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f =$   
 $72.73\%$ .

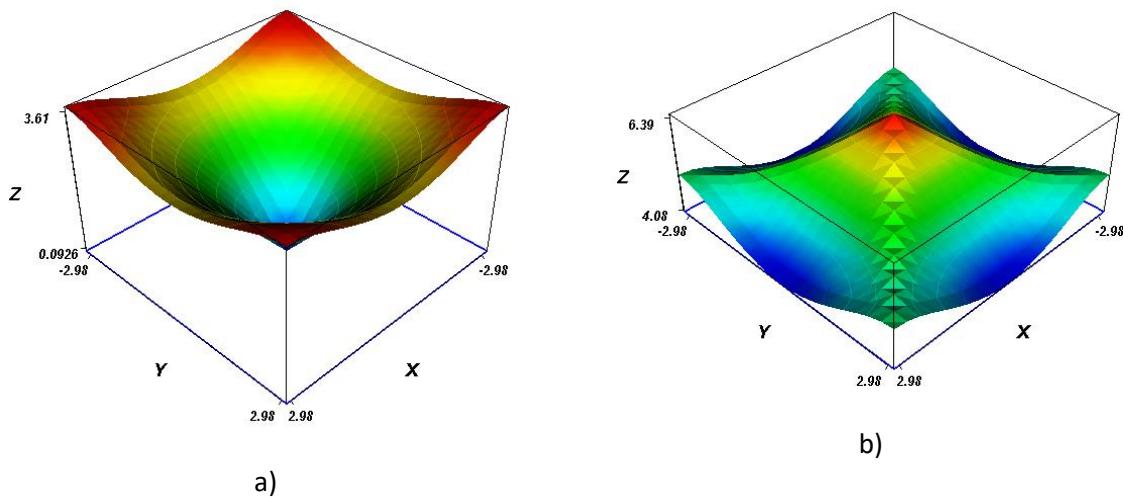


Figure III.60. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f = 72.73\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

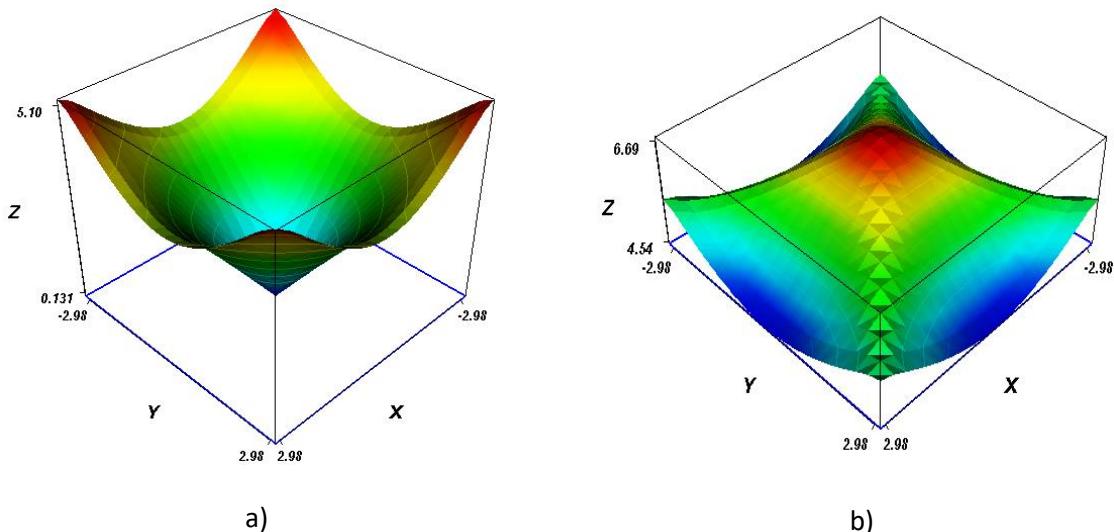


Figure III.61. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée connectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour un facteur de remplissage  $f = 72.73\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

### III.13 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la simulation des structures à cristaux photoniques connectées, pour trois matériaux (Si, GaAs, LiNbO<sub>3</sub>) et deux géométries (triangulaire et carrée).

Les résultats montrent que la plus large bande interdite pour le mode TE est obtenue pour la Structure carrée pour un rayon  $r = 308,130$  nm pour le Silicium et  $r = 313,613$  nm pour l'arsénure de gallium de largeur respectivement 0,134762 et

0,131561 centrée autour d'une fréquence normalisée 0,36144 soit une période de 560,237 nm pour le Silicium et 0,36787 et une période de 570,207 nm pour l'arséniure de gallium. De même on constate pour la Structure triangulaire connectée une assez large bande interdite pour le silicium de 0,10546 pour  $r = 437,765$  centrée autour d'une fréquence normalisée 0,56486 soit une période de 875,529 nm. Et de 0,09557 pour  $r = 444,498$  centrée autour d'une fréquence normalisée 0,57354 soit une période de 888,995 nm Pour l'arséniure de gallium.

Pour le Niobate de lithium la Structure carrée à la plus large bande de 0,04654 pour  $r = 315,693$  nm centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,407346 soit une période de 407,346 nm.

Pour le mode TM plus larges que le mode TE la Structure triangulaire du silicium et l'arséniure de gallium qui ont les plus larges bandes interdites respectivement de 0,188599 pour  $r = 274,844$  nm centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,39404 soit une période de 610,765 nm pour le silicium. Pour l'arséniure de gallium de 0,184106 pour  $r = 278,614$  nm centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,39945 soit une période de 619,142 nm.

Pour la bande interdite commune la plus large est obtenue pour la Structure triangulaire du silicium et l'arséniure de gallium qui ont les plus larges bandes interdites respectivement de 0,07524 pour  $r = 349,647$  nm centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,47490 soit une période de 736,098 nm pour le silicium. Pour l'arséniure de gallium de 0,072120 pour  $r = 357,526$  nm centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,485604 soit une période de 752,687 nm. On remarque l'apparition d'une petite bande pour la structure carrée du Silicium (Si), l'arséniure de gallium (GaAs), le Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) pour un  $r = 369,134$  nm de 0,014116 centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,488515 soit une période de 757,199 nm pour les trois matériaux.

Ces optimisations ouvrent des perspectives pour des applications en filtrage optique dans le domaine des télécommunications.

**Chapitre IV :**  
**Simulation des structures à cristaux**  
**photoniques déconnectées.**

## Chapitre IV Simulation des structures à cristaux photoniques déconnectées.

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre Nous avons tout d'abord simulé des réseaux bidimensionnels triangulaires et carrées déconnectées dans le Silicium (Si), l'arséniure de gallium (GaAs), le Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>). Des calculs permettant de déterminer les dimensions exactes de la structure et la forme du réseau.

Dans un premier temps, les simulations seront effectuées pour les modes TE et TM pour connaître le comportement des structures à PBG pour les structures triangulaire puis pour structures carrées.

### IV.2 Méthode de calcul

De la même manière que le chapitre III, Simulation des structures à cristaux photoniques connectées. Pour le calcul des structures de bandes de matériaux périodiques bidimensionnels, nous utilisons la méthode de décomposition en ondes planes du logiciel Bandsolve de Rsoft ([www.rsoft.com](http://www.rsoft.com)).

Les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_2$  de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques alignées périodiquement dans l'air ou de la mousse.

### IV.3 Structure triangulaire déconnectée pour le Silicium (Si) dans le domaine de télécommunication.

#### IV.3.1. Calcul du facteur de remplissage.

La structure est composée de tiges diélectriques d'indice  $n_1=3.47$  [34] dans l'air  $n_2=1$ .

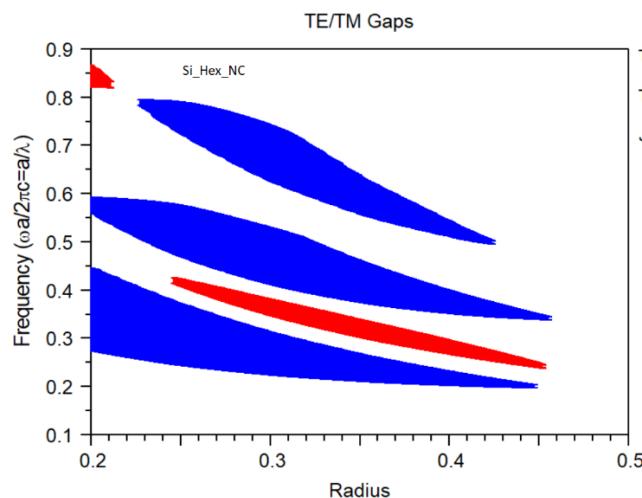


Figure IV.1. Carte de Gap de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE

Dans la figure IV.1, on observe une différence totale entre TE et TM lorsque le rayon se situe entre 0,200 et 0,450  $\mu\text{m}$ . Une absence totale de la bande interdite commune.

### IV.3.2. Calcul de la Bande interdite

Le Tableau IV.1 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.1. Bande interdite TE de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,200	14,51%	1	0,17055	0,36019	0,55829
0,200	14,51%	2	0,03001	0,57722	0,89469
0,225	18,36%	1	0,14770	0,33194	0,51451
0,225	18,36%	2	0,07426	0,54926	0,85135
0,250	22,67%	1	0,12618	0,30712	0,47603
0,250	22,67%	2	0,10432	0,52272	0,81022
0,250	22,67%	3	0,06349	0,75767	1,17439
0,275	27,43%	1	0,10687	0,28682	0,44458
0,275	27,43%	2	0,11382	0,49642	0,76945
0,275	27,43%	3	0,09470	0,72280	1,12034
0,300	32,65%	1	0,08766	0,26781	0,41511
0,300	32,65%	2	0,11589	0,47029	0,72896
0,300	32,65%	3	0,11327	0,68372	1,05976
0,325	38,32%	1	0,07140	0,25258	0,39150
0,325	38,32%	2	0,10477	0,44415	0,68843
0,325	38,32%	3	0,10044	0,64183	0,99484
0,350	44,44%	1	0,05574	0,23866	0,36992
0,350	44,44%	2	0,08446	0,41707	0,64647
0,350	44,44%	3	0,07515	0,59622	0,92414
0,375	51,01%	1	0,04160	0,22682	0,35158
0,375	51,01%	2	0,06514	0,39428	0,61113
0,375	51,01%	3	0,05301	0,55959	0,86737
0,400	58,04%	1	0,02877	0,21662	0,33576
0,400	58,04%	2	0,04650	0,37501	0,58127
0,400	58,04%	3	0,02916	0,52693	0,81675
0,425	65,52%	1	0,01614	0,20716	0,32110
0,425	65,52%	2	0,02769	0,35799	0,55488
0,450	73,46%	1	0,00949	0,34389	0,53302

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TE est obtenue pour un rayon normalisé  $r/a = 0,200$  soit un facteur de remplissage 14,51% de 0,17055. Pour un rayon normalisé  $r/a = 0,450$  une largeur minimale de 0,00949 soit un facteur de remplissage 73,46% (Tableau IV.1).

Le Tableau IV.2 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Pour le mode TM une large bande interdite de 0,04423 pour un rayon normalisé  $r/a = 0.2$  soit un facteur de remplissage 14,51%. Une bande interdite minimale de 0,00789 de rayon 0.45 soit un facteur de remplissage 73,46% (Tableau IV.2).

Tableau IV.2. Bande interdite TM de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,200	14,51%	1	0,04423	0,84373	1,30779
0,250	22,67%	1	0,01337	0,41537	0,64383
0,275	27,43%	1	0,02459	0,38881	0,60266
0,300	32,65%	1	0,03229	0,36388	0,56401
0,325	38,32%	1	0,03519	0,34158	0,52945
0,350	44,44%	1	0,03507	0,32003	0,49604
0,375	51,01%	1	0,03292	0,30046	0,46571
0,400	58,04%	1	0,02691	0,28110	0,43570
0,425	65,52%	1	0,01934	0,26221	0,40642
0,450	73,46%	1	0,00789	0,24309	0,37678

#### IV.4 Structure de bande TE et TM.

La Figure IV.2 représente les Diagrammes de bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f = 14,51\%$ , (b)  $f = 51,01\%$ , (c)  $f = 73,46\%$ . Nous pouvons évaluer à partir de ces résultats l'influence du facteur de remplissage sur l'ouverture de la bandes interdites.

A très faible taux de remplissage nous observons l'existence d'une large bande interdite TE de 0,17055 entre les fréquences 0,27492 et 0,44547 et une deuxième de largeur 0,03000 entre les fréquences 0,56222 et 0,59223. Et aussi une bande interdite TM de largeur 0,04423 entre les fréquences 0,82162 et 0,86586 (Figure IV.2 (a)).

Pour un facteur de remplissage moyen, on remarque une assez large première bande interdite TE de 0,06515 entre les fréquences 0,36171 et 0,42686 et la deuxième de largeur 0,05302 entre les fréquences 0,53310 et 0,58612 et une troisième de largeur 0,04161 entre les fréquences 0,20603 et 0,24763 et aussi une bande interdite TM de largeur 0,03292 entre les fréquences 0,28401 et 0,31692 (Figure IV.2 (b)).

A taux de remplissage très élevé on remarque une petite bande interdite TM de 0,00788 entre les fréquences 0,23914 et 0,24702 et une bande interdite TE de largeur 0,00949 située entre les fréquences 0,33914 et 0,34863. Avec l'absence totale de la bande interdite commune (Figure IV.2(c)).

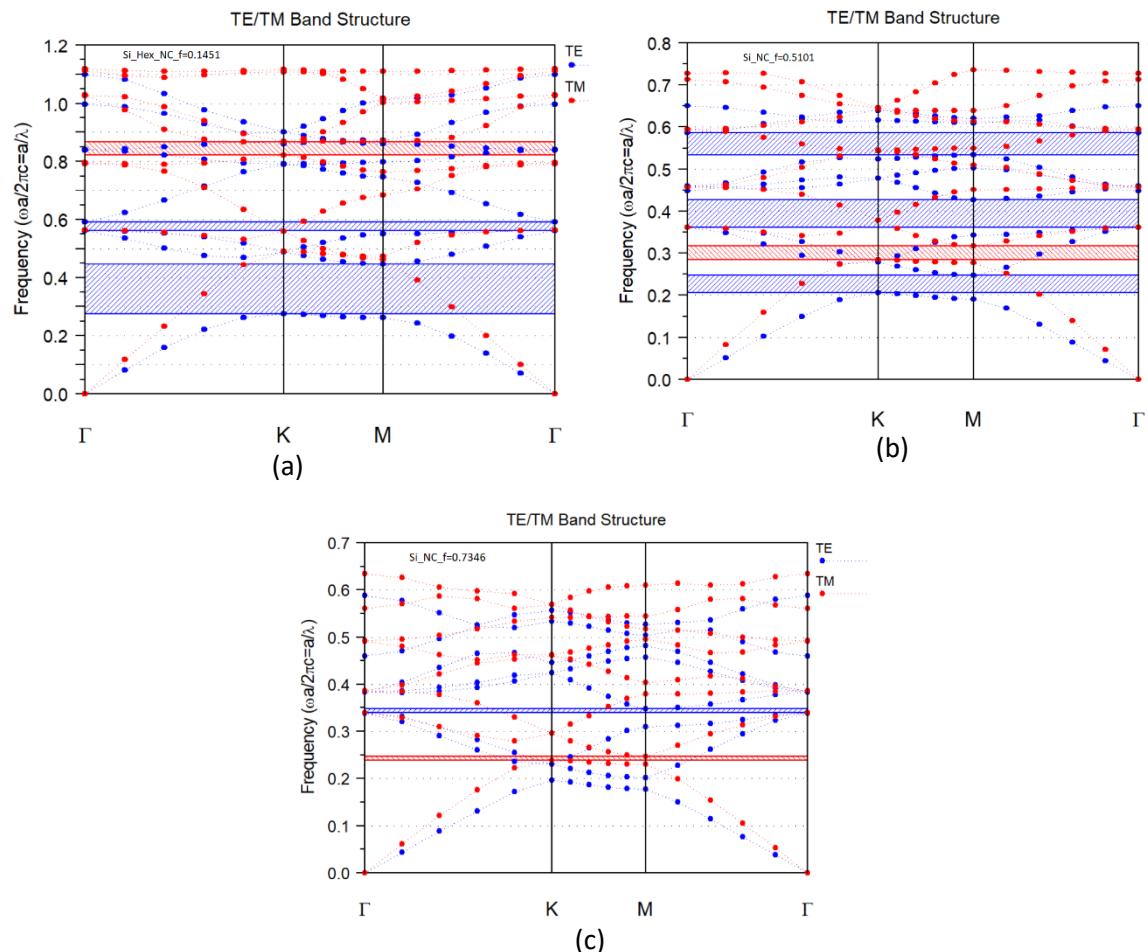


Figure IV.2. Diagramme de bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  
(a)  $f= 14,51\%$ , (b)  $f= 51,01\%$ , (c)  $f= 73.14\%$ .

Le Tableau IV.3 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f=14,51\%$ , à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.3. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 14,51\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,17055	TE	0,36019	0,55830
2	0,03000	TE	0,57722	0,89470
1	0,04423	TM	0,84374	1,30779

Le Tableau IV.4 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f=51,01\%$ , à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.4. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 51,01\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,04161	TE	0,22683	0,35158
2	0,06515	TE	0,39429	0,61114
3	0,05302	TE	0,55961	0,86739
1	0,03292	TM	0,30047	0,46572

Le Tableau IV.5 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f=73,46\%$ , à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.5. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 73,46\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,00949	TE	0,34388	0,53302
1	0,00788	TM	0,24308	0,37678

#### IV.4.1. Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour $f= 14,51\%$ .

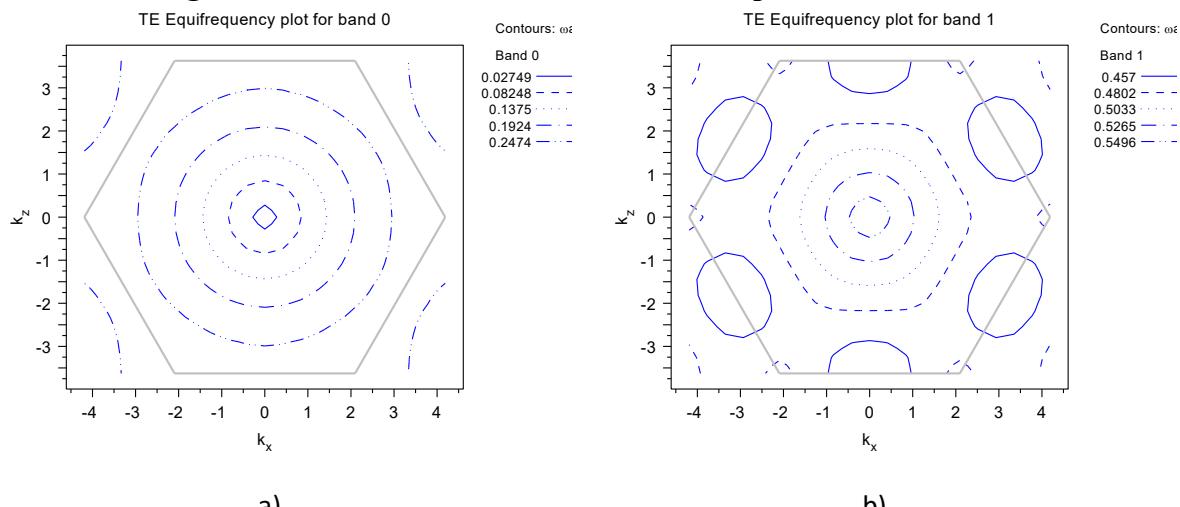


Figure IV.3. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f= 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

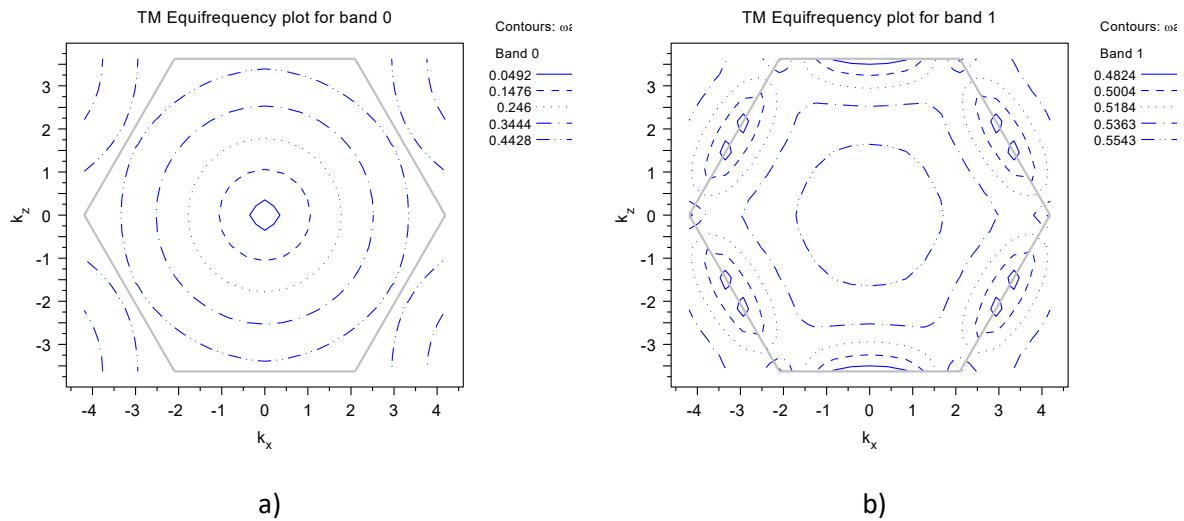


Figure IV.4. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

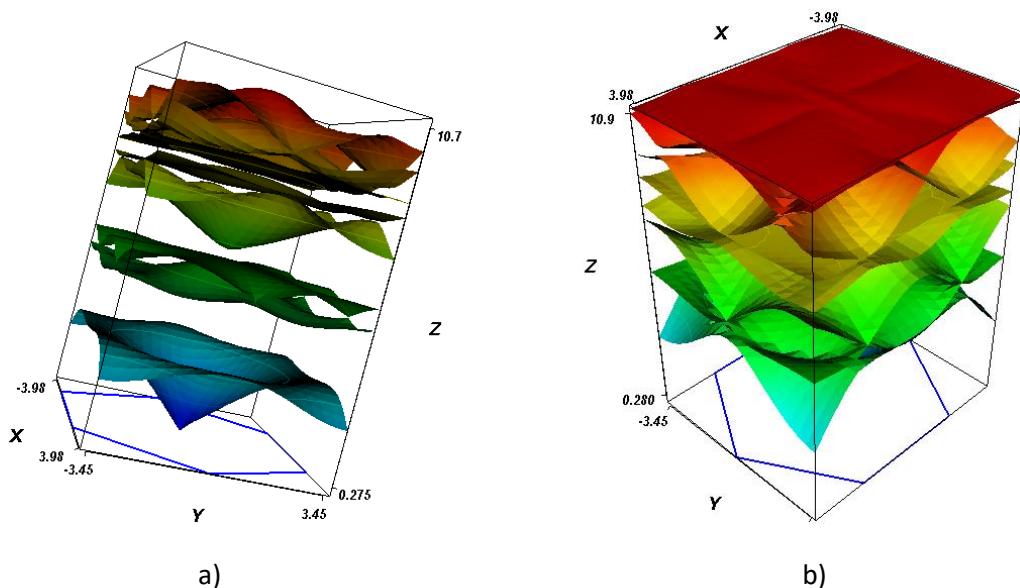


Figure IV.5. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 14,51\%$ .

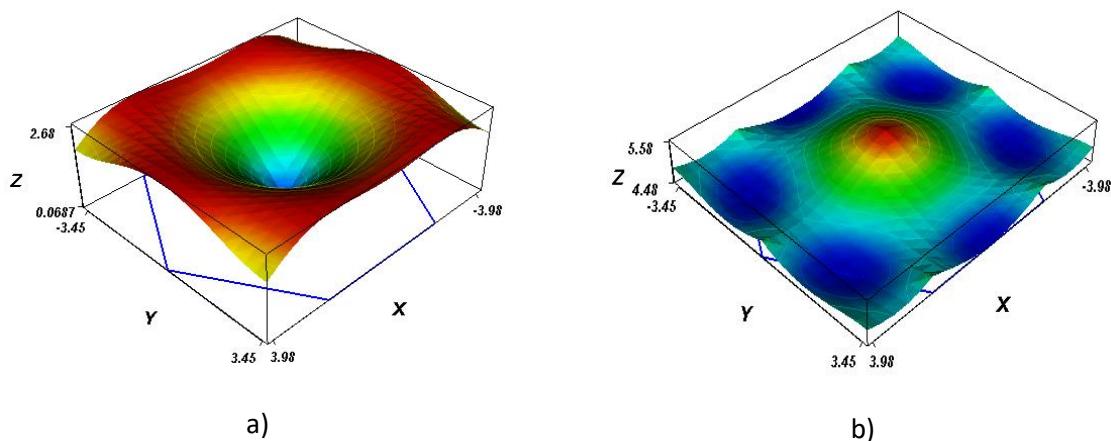


Figure IV.6. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

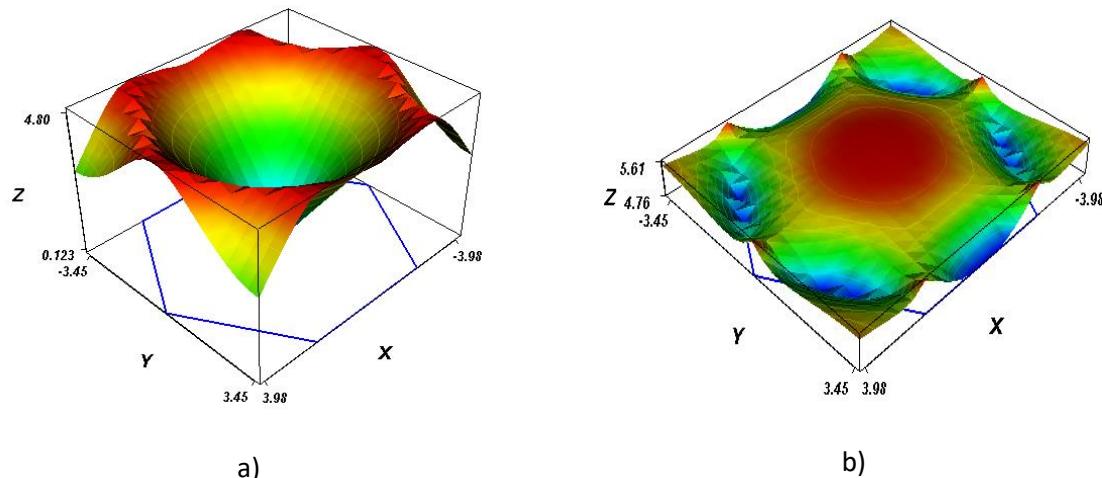


Figure IV.7. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

#### IV.4.2. Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 51,01%.

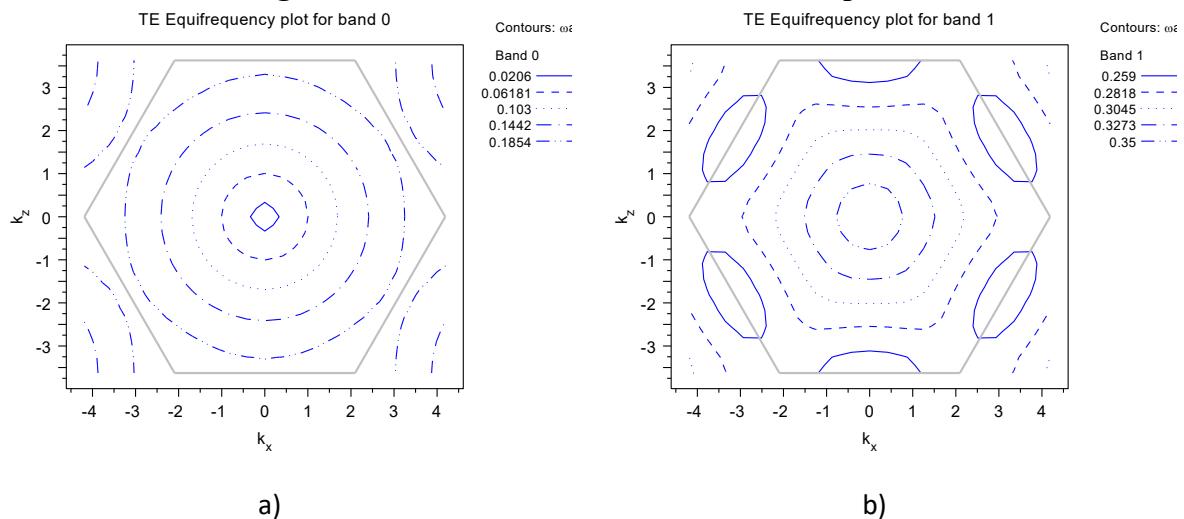


Figure IV.8. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

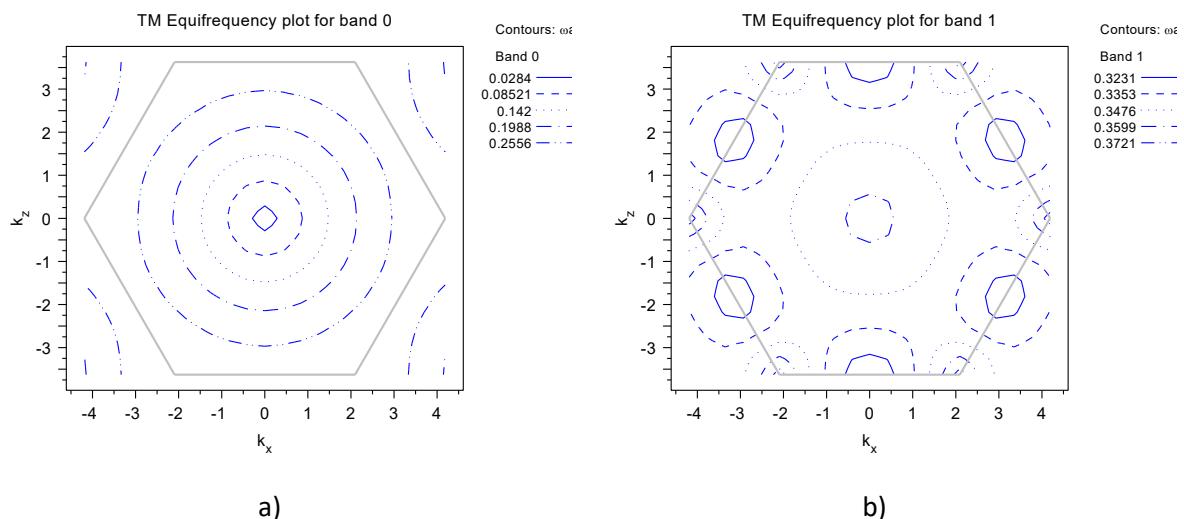


Figure IV.9. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

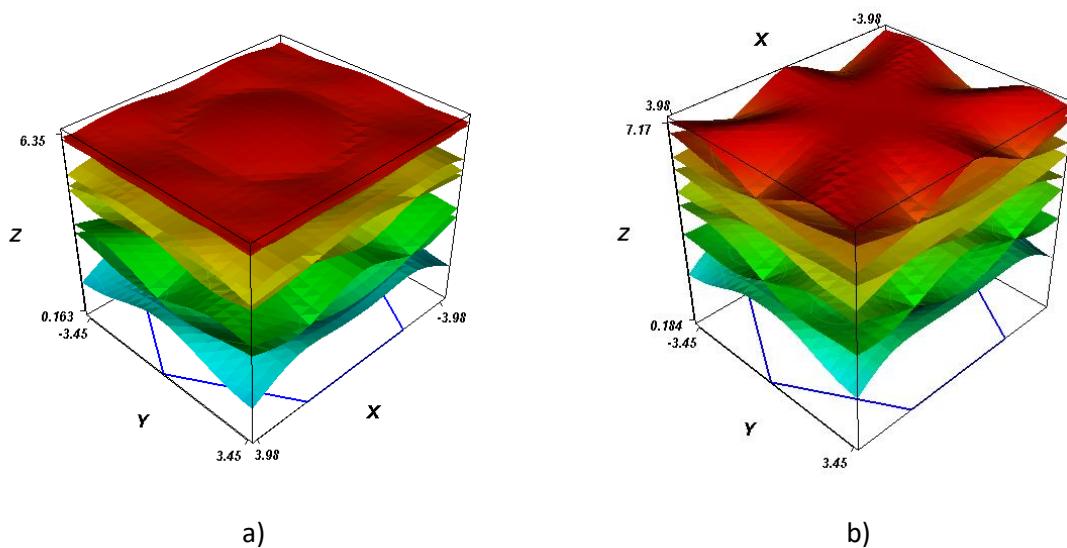


Figure IV.10. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ .

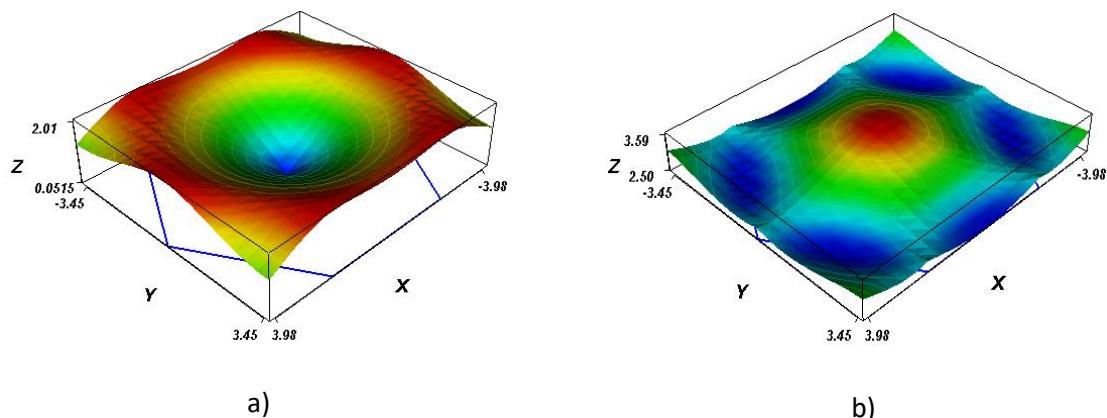


Figure IV.11. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

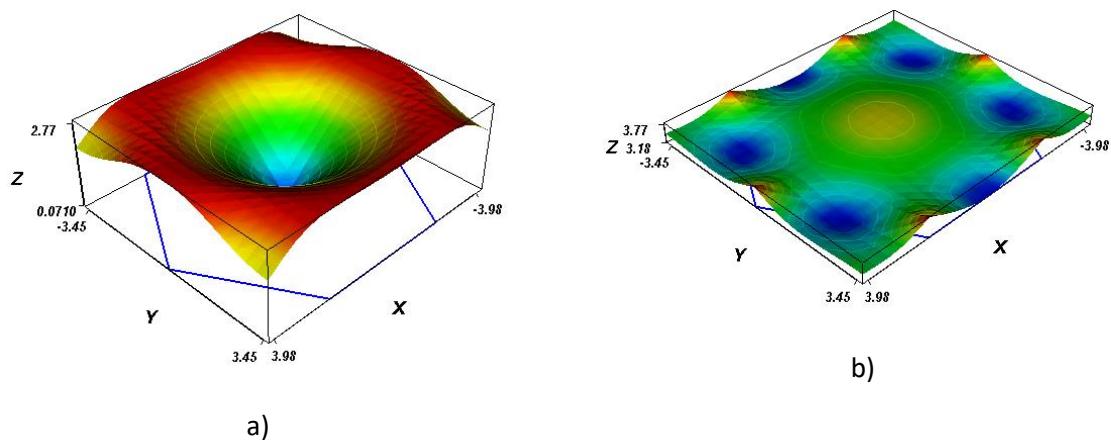


Figure IV.12. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

#### IV.4.3. Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure triangulaire déconnectée $9 \times 9$ dans le silicium pour $f = 73,46\%$ .

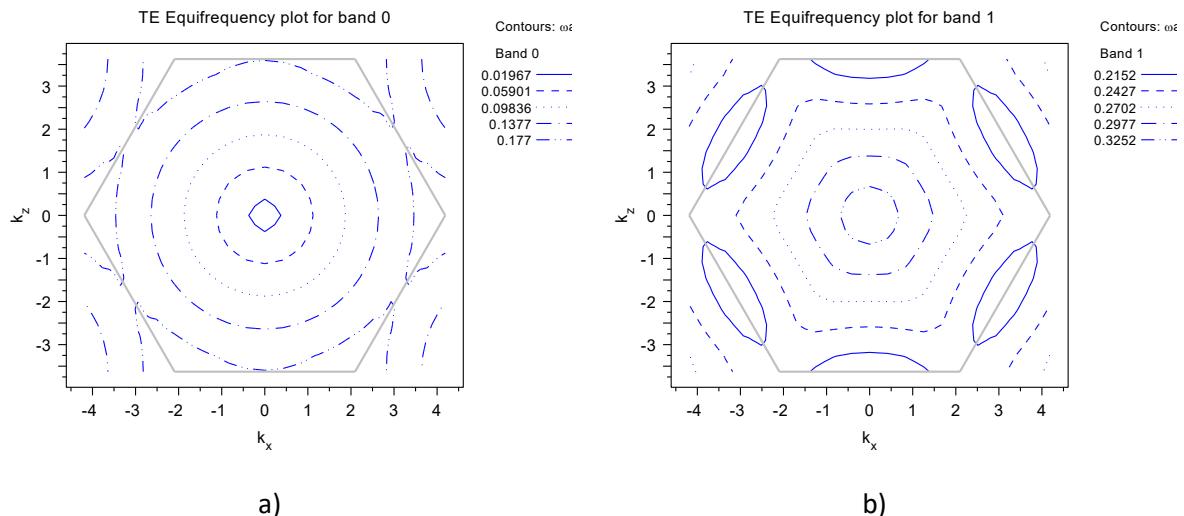


Figure IV.13. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

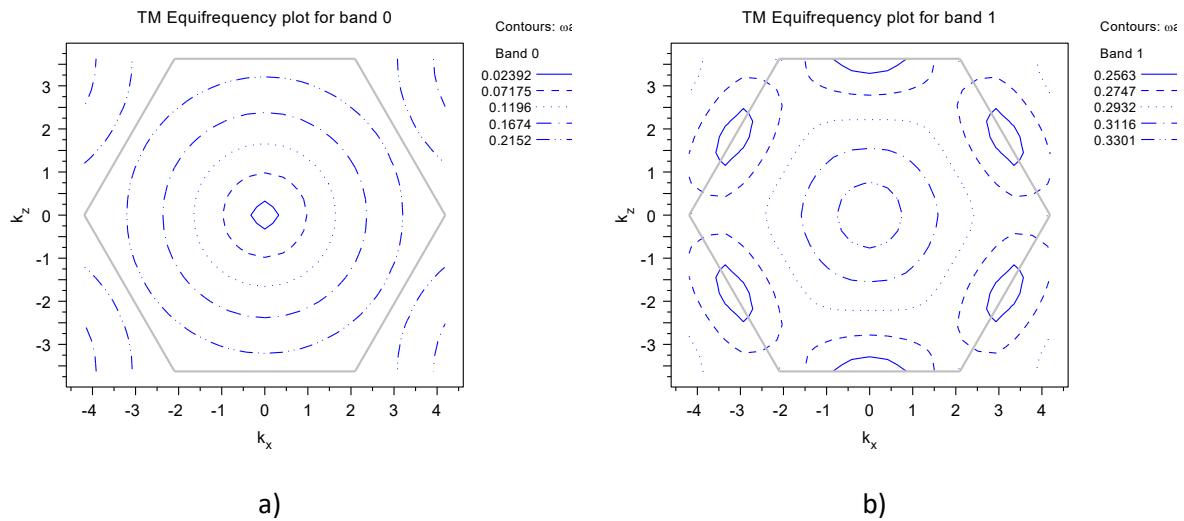


Figure IV.14. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

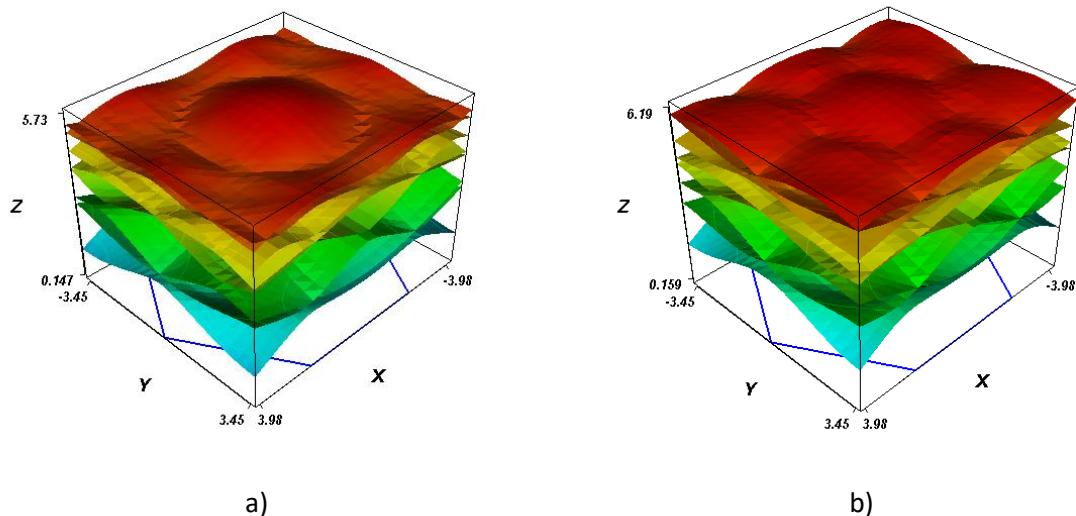


Figure IV.15. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ .

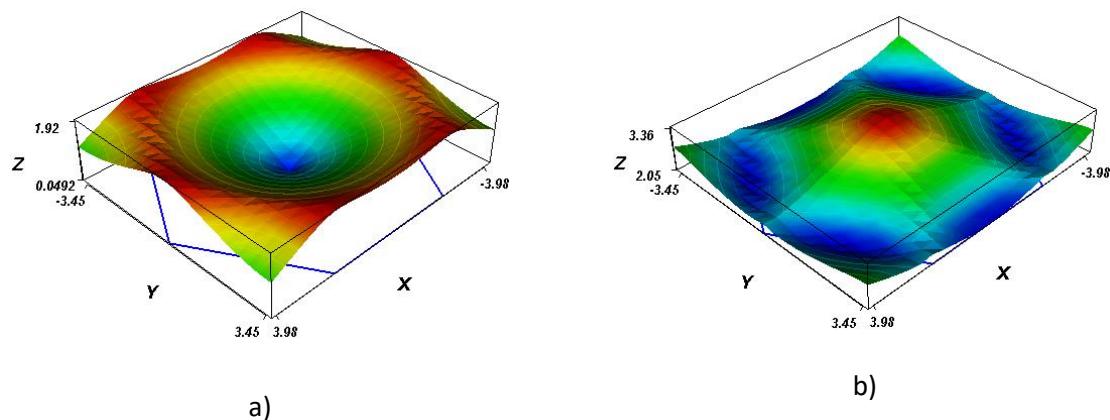


Figure IV.16. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

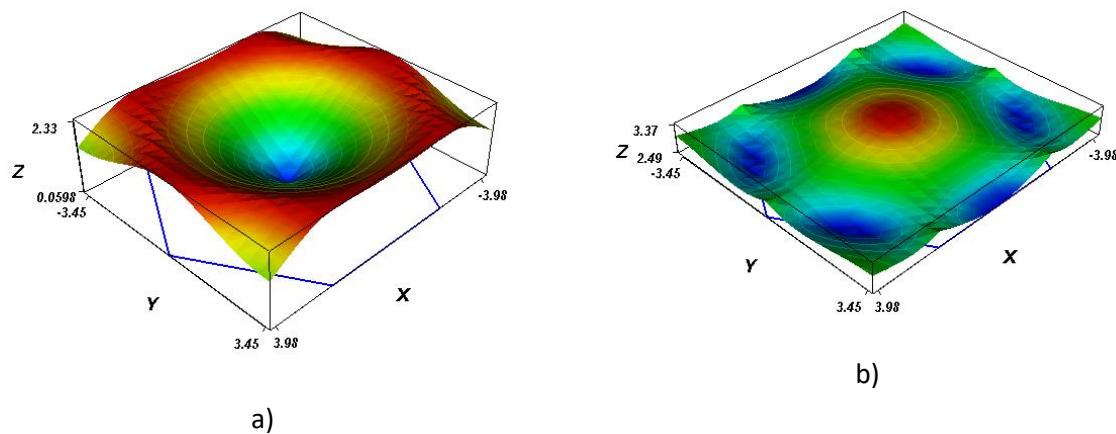


Figure IV.17. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 73,46\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

## IV.5 Structure carrée déconnectée pour le Silicium (Si) dans le domaine de télécommunication.

### IV.5.1. Calcul du facteur de remplissage.

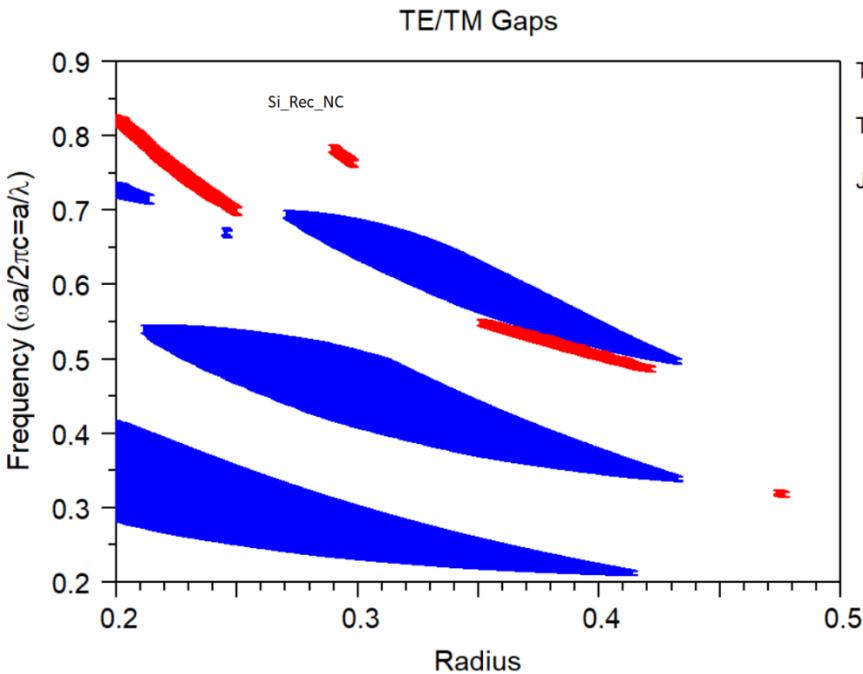


Figure IV.18. Carte de Gap de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE

### IV.5.2. Calcul de la Bande interdite

Le Tableau IV.6 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.6. Bande interdite TE de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,200	14,51%	1	0,13457	0,34909	0,54109
0,200	14,51%	2	0,01988	0,72723	1,12720
0,225	18,36%	1	0,12111	0,32422	0,50254
0,225	18,36%	2	0,03816	0,52546	0,81446
0,250	22,67%	1	0,10352	0,30234	0,46863
0,250	22,67%	2	0,07046	0,50291	0,77951
0,275	27,43%	1	0,08620	0,28276	0,43827
0,275	27,43%	2	0,09144	0,48142	0,74619
0,275	27,43%	3	0,01678	0,68935	1,06849
0,300	32,65%	1	0,06999	0,26555	0,41160
0,300	32,65%	2	0,10129	0,45879	0,71112

0,300	32,65%	3	0,05143	0,66070	1,02409
0,325	38,32%	1	0,05406	0,25080	0,38874
0,325	38,32%	2	0,08981	0,43279	0,67083
0,325	38,32%	3	0,06685	0,63064	0,97749
0,350	44,44%	1	0,03967	0,23764	0,36834
0,350	44,44%	2	0,07125	0,40521	0,62808
0,350	44,44%	3	0,06574	0,59643	0,92447
0,375	51,01%	1	0,02568	0,22647	0,35102
0,375	51,01%	2	0,05085	0,38196	0,59204
0,375	51,01%	3	0,05112	0,56337	0,87322
0,400	58,04%	1	0,01263	0,21659	0,33572
0,400	58,04%	2	0,03133	0,36155	0,56040
0,400	58,04%	3	0,03247	0,53186	0,82439
0,425	65,52%	1	0,01191	0,34327	0,53207
0,425	65,52%	2	0,01182	0,50332	0,78014

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TE sont obtenues pour un rayon normalisé  $r/a = 0,200$  soit un facteur de remplissage 14,51% de 0,13457. Pour le mode TM un rayon normalisé  $r/a = 0,225$  soit un facteur de remplissage 18,36% de 0,01592.

Le Tableau IV.7 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.7. Bande interdite TM de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium

Radius( $r/a$ )	F	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,200	14,51%	1	0,01342	0,82057	1,27188
0,225	18,36%	1	0,01592	0,75345	1,16785
0,250	22,67%	1	0,01017	0,69827	1,08231
0,375	51,01%	1	0,01116	0,52672	0,81642
0,400	58,04%	1	0,01081	0,50428	0,78163
0,475	81,85%	1	0,00763	0,31861	0,49385

La Figure IV.19 représente les Diagrammes de bandes de la structure carrée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f= 15\%$ , (b)  $f= 51\%$ , (c)  $f= 82\%$ .

A très faible taux de remplissage nous observons une large première bande interdite TE de 0,12719 entre les fréquences 0,27037 et 0,39755 et la deuxième de largeur 0,01931 entre les fréquences 0,52599 et 0,54530 (Figure IV.19 (a)).

Pour un facteur de remplissage moyen, on remarque trois bandes interdites TE et une bande interdite TM. La première bande interdite TE de larguer 0,03040 entre les fréquences 0,51284 et 0,54324, la deuxième de largeur 0,02945 entre les fréquences 0,34438 et 0,37382 et la troisième de larguer 0,01122 entre les

fréquences 0,20986 et 0,22108 et aussi une petite bande interdite TM de largeur 0,01069 entre les fréquences 0,49616 et 0,50685 (Figure IV.19 (b)).

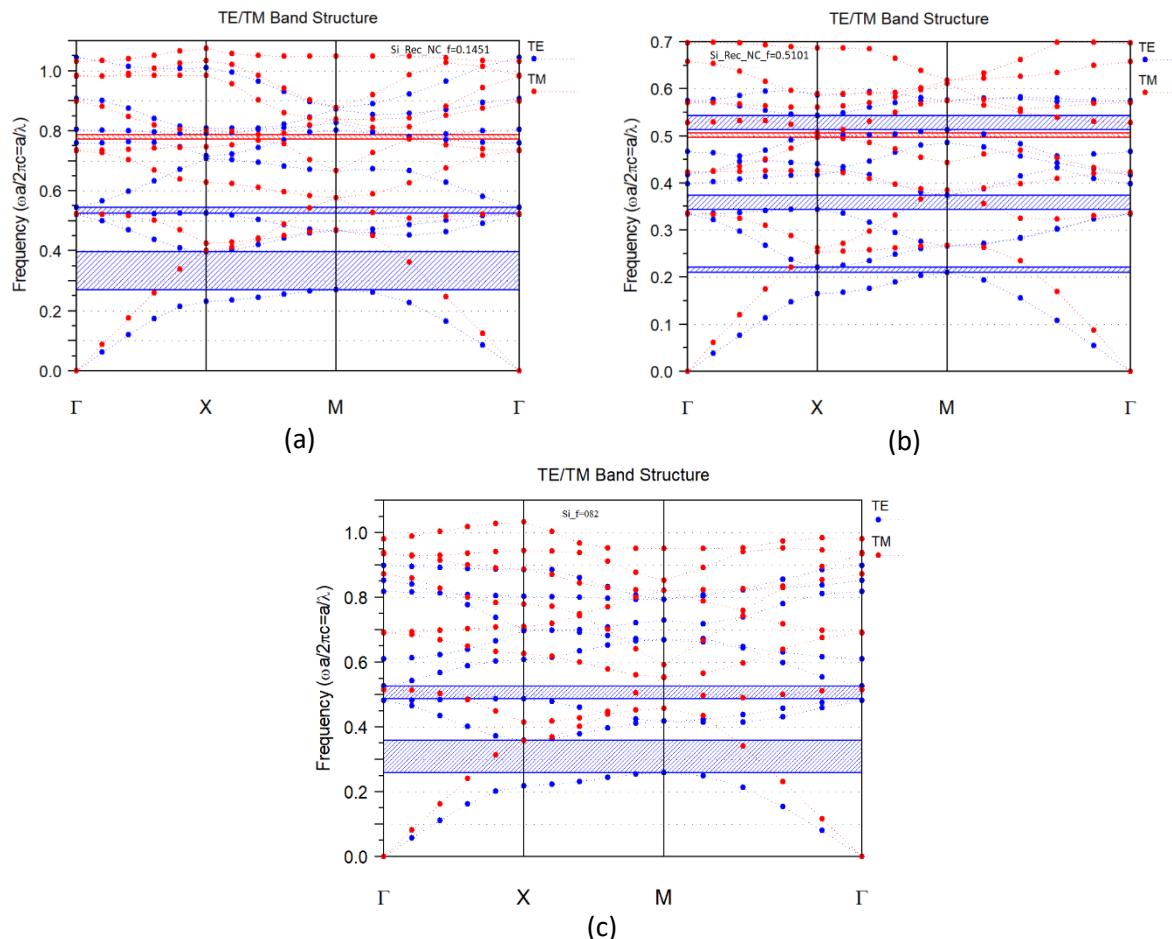


Figure IV.19. Diagramme de bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage  
(a)  $f = 14,51\%$ , (b)  $f = 51,01\%$ , (c)  $f = \%$ .

Le Tableau IV.8 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f = 14,51\%$ . à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.8. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f = 14,51\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,12719	TE	0,33396	0,51764
2	0,01931	TE	0,53565	0,83025
1	0,01487	TM	0,77948	1,20819

Le Tableau IV.9 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f = 51,01\%$ . à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.9. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour  $f= 51,01\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,01122	TE	0,21547	0,33398
2	0,02945	TE	0,35910	0,55661
3	0,03040	TE	0,52804	0,81846
1	0,01069	TM	0,50150	0,77733

#### IV.5.3. Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour $f= 14,51\%$ .

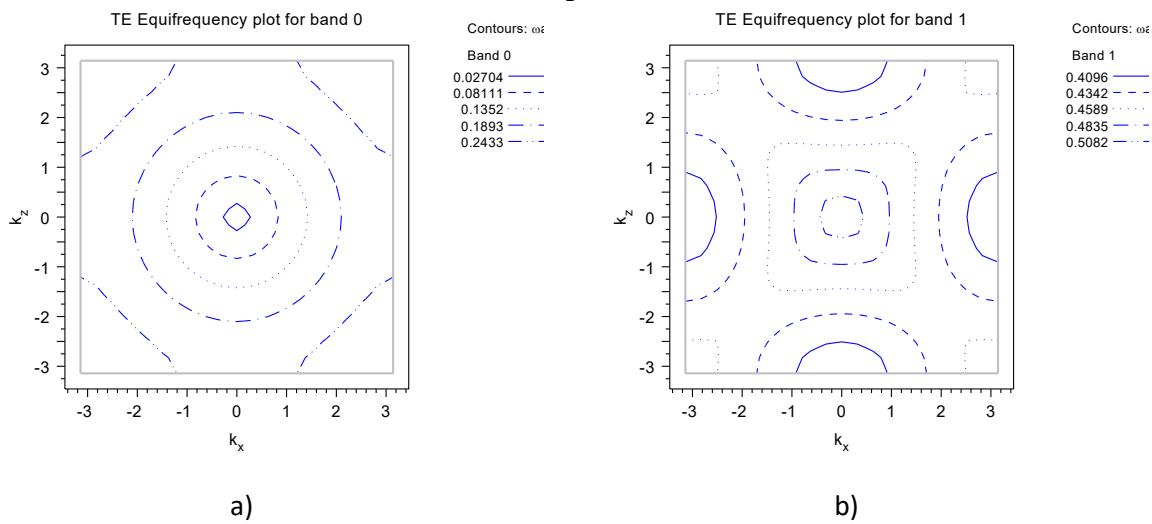


Figure IV.20. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f= 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

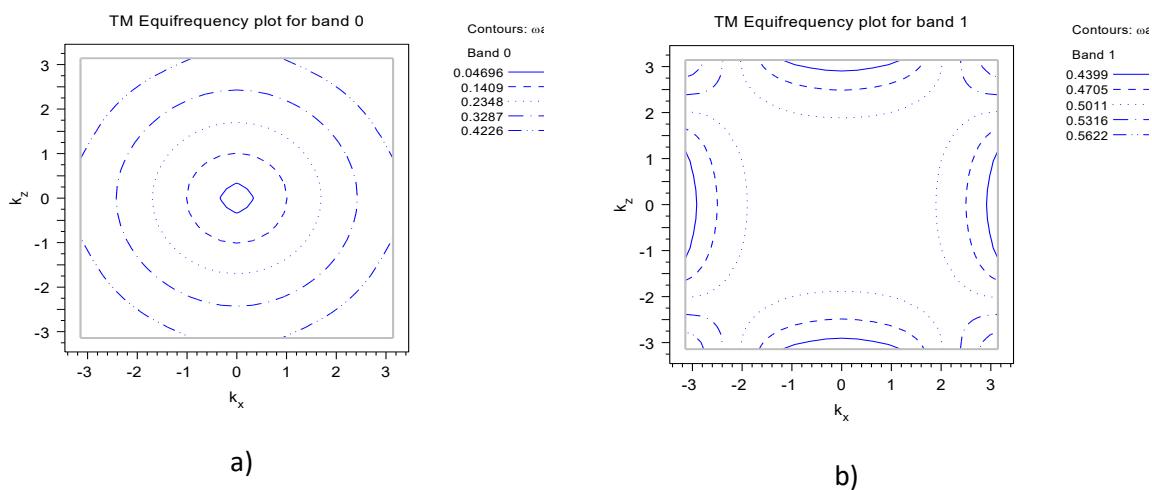


Figure IV.21. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f= 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

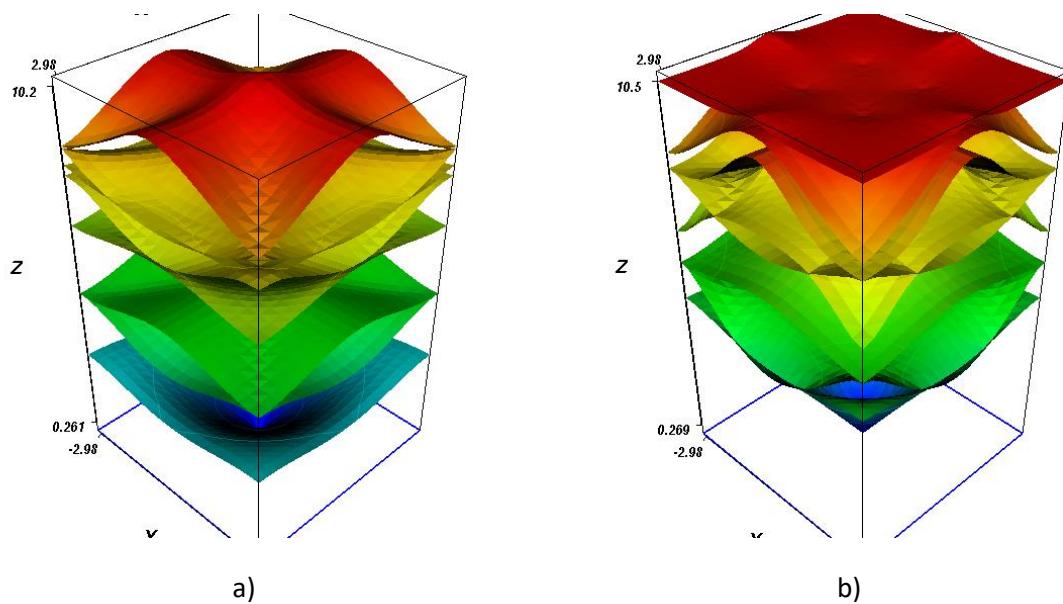


Figure IV.22. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 14,51\%$ .

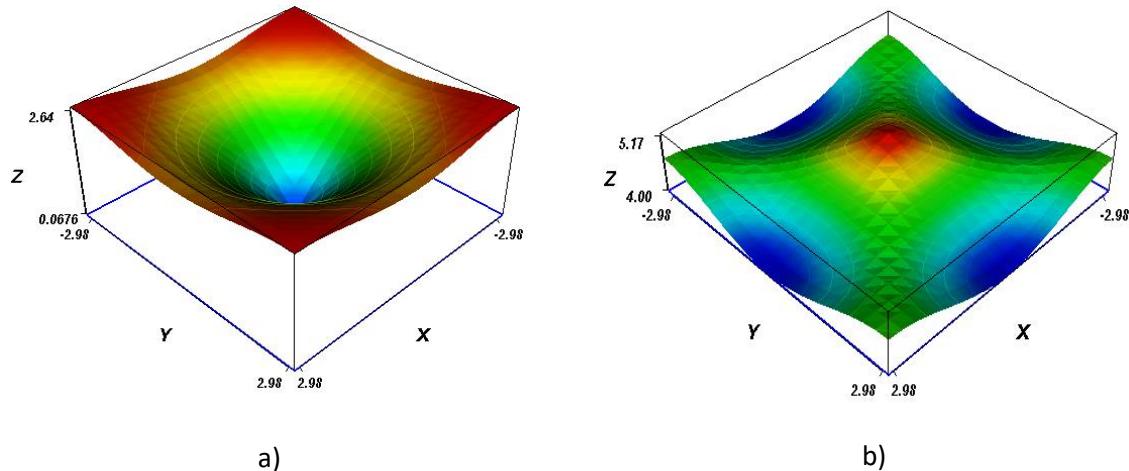


Figure IV.23. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

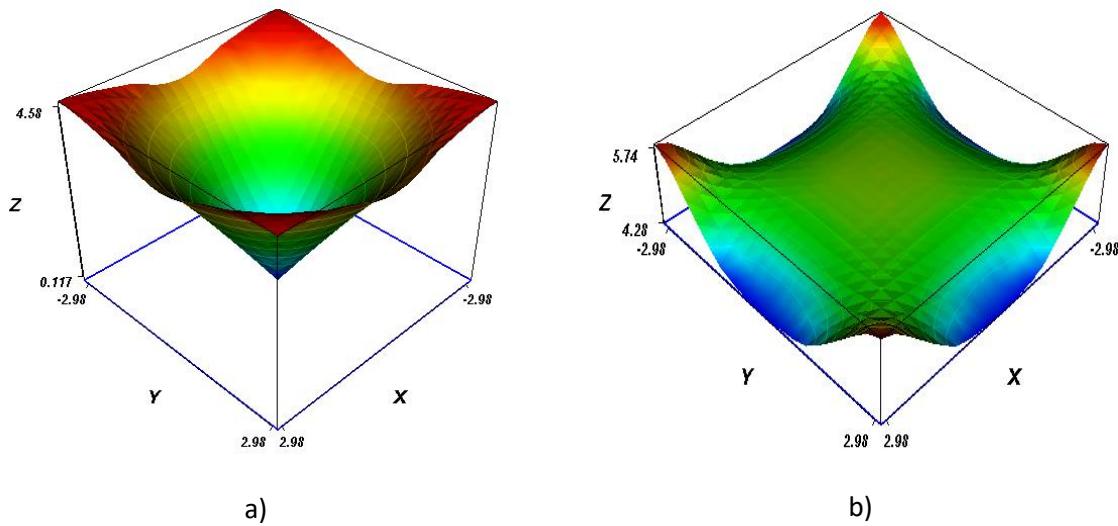


Figure IV.24. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 14,51\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

#### **IV.5.4. Contours équifréquences et surfaces des bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour f= 51,01%.**

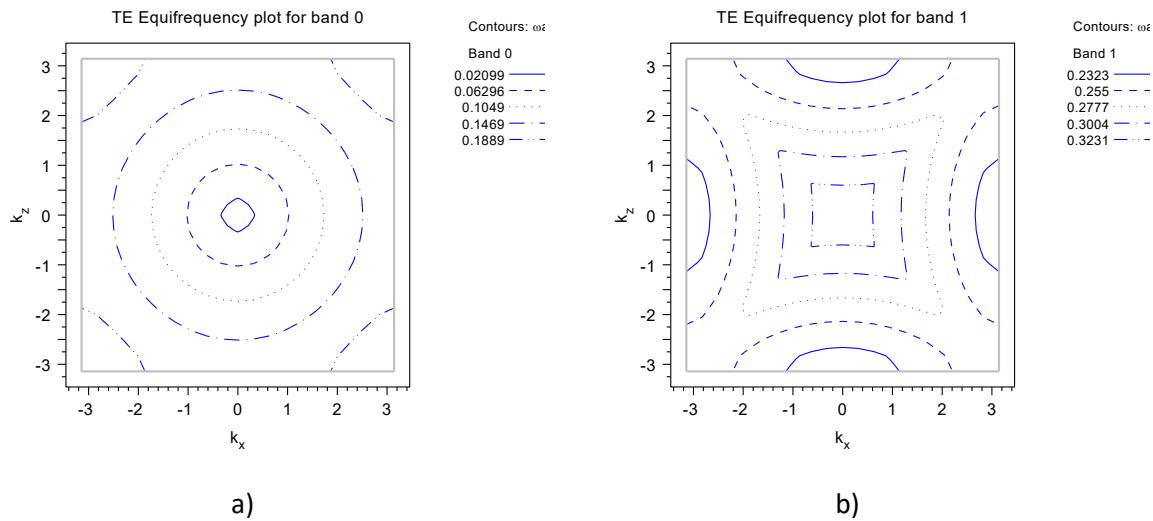


Figure IV.25. Contours équifréquences en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

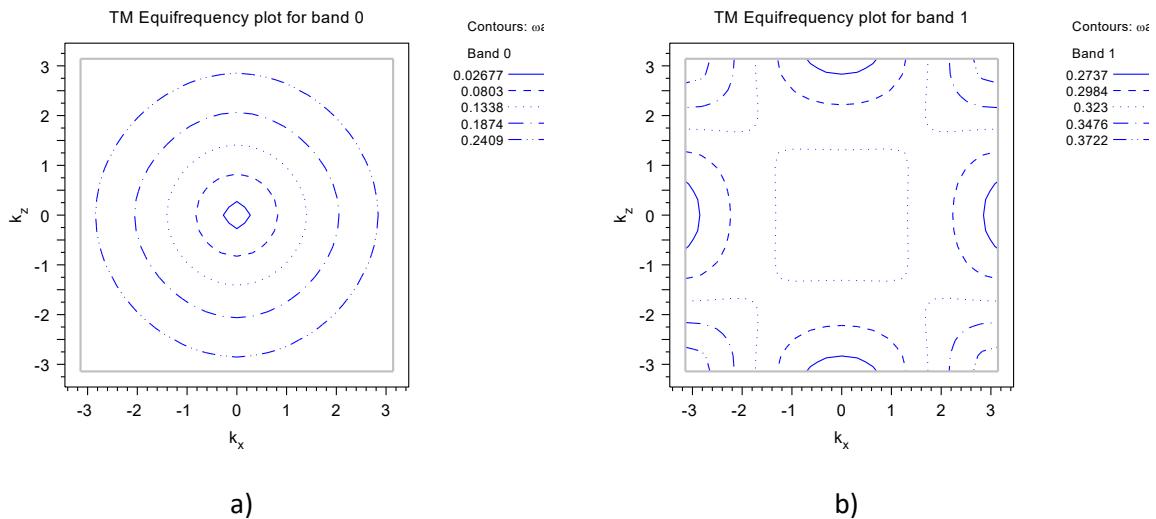


Figure IV.26. Contours équifréquences en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

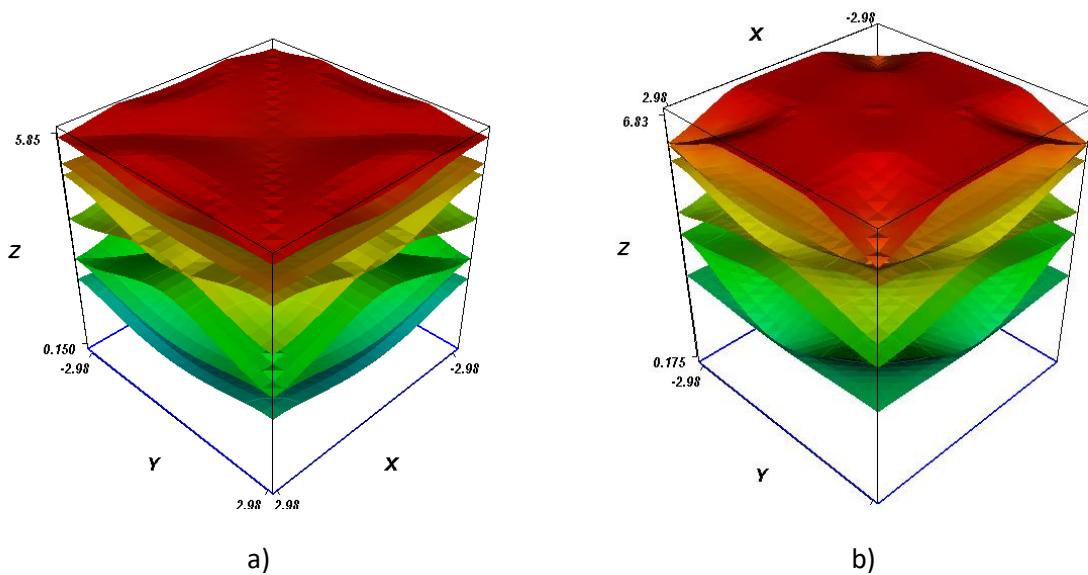


Figure IV.27. Surfaces des bandes a) en polarisation TE b) en polarisation TM pour les 08 Premières bandes dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ .

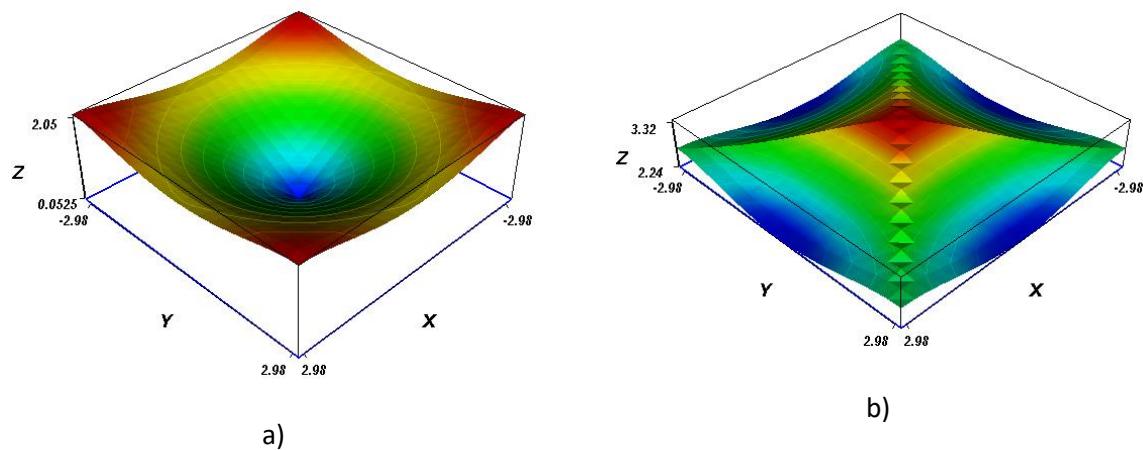


Figure IV.28. Surfaces des bandes en polarisation TE dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

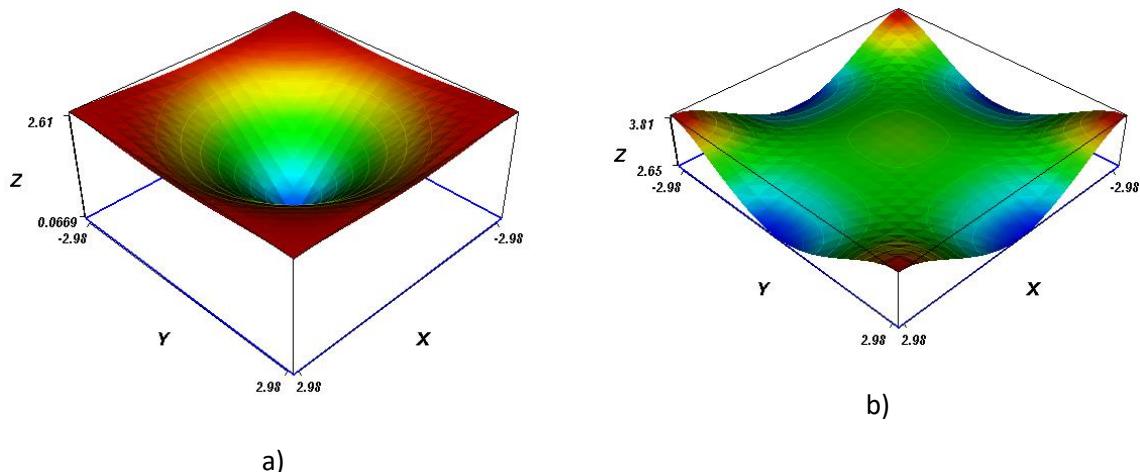


Figure IV.29. Surfaces des bandes en polarisation TM dans la 1ère zone de Brillouin de la structure carrée déconnectée  $9 \times 9$  dans le silicium pour un facteur de remplissage  $f = 51,01\%$ . a) Première bande b) Deuxième bande

## IV.6 Structure triangulaire déconnectée pour l'arsénure de gallium (GaAs) dans le domaine de télécommunication.

### IV.6.1. Calcul du facteur de remplissage.

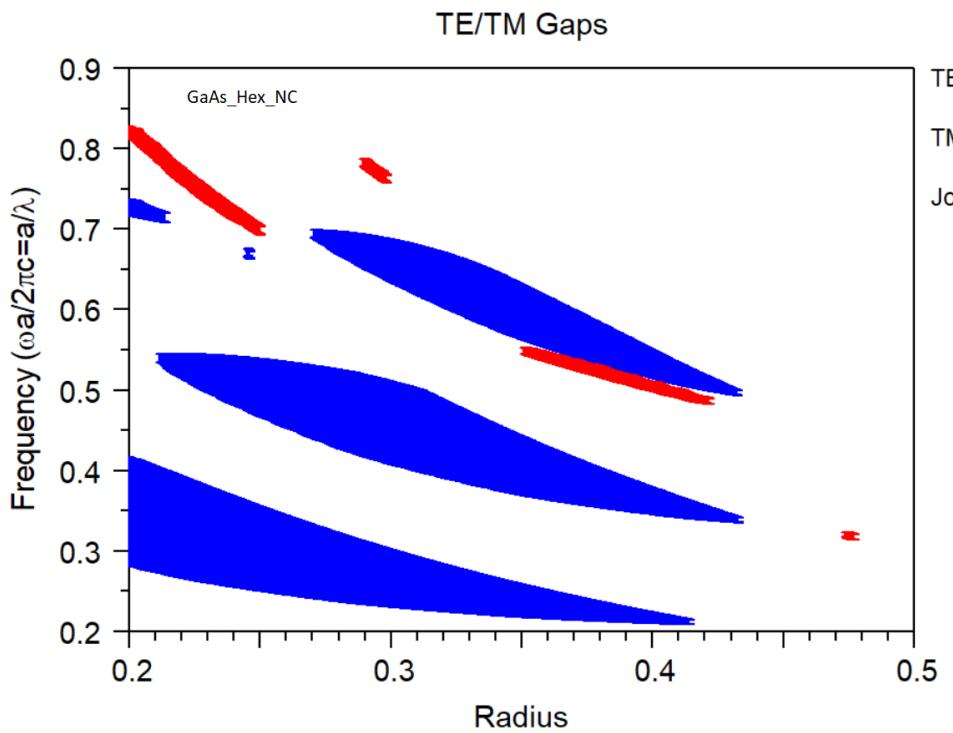


Figure IV.30. Carte de Gap de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE

Dans cette situation, dans la figure IV.30 on observe une dominance totale de TE et une légère bande TM lorsque le rayon se situe entre 0,200 et 0,450 μm. L'absence totale de la bande interdite commune.

Le Tableau IV.10 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arsénure de gallium en mode TE à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.10. Bande interdite TE de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arsénure de gallium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en μm)
0,20000	14,51%	1	0,17054	0,36774	0,56999
0,20000	14,51%	2	0,02270	0,58867	0,91243
0,22500	18,36%	1	0,14852	0,33956	0,52632
0,22500	18,36%	2	0,06892	0,56066	0,86902
0,25000	22,67%	1	0,12738	0,31463	0,48768
0,25000	22,67%	2	0,10120	0,53433	0,82821
0,25000	22,67%	3	0,05496	0,77257	1,19749
0,27500	27,43%	1	0,10812	0,29413	0,45590

0,27500	27,43%	2	0,11270	0,50832	0,78790
0,27500	27,43%	3	0,08930	0,73873	1,14504
0,30000	32,65%	1	0,08884	0,27487	0,42605
0,30000	32,65%	2	0,11624	0,48229	0,74755
0,30000	32,65%	3	0,11142	0,70041	1,08563
0,32500	38,32%	1	0,07243	0,25940	0,40207
0,32500	38,32%	2	0,10623	0,45621	0,70712
0,32500	38,32%	3	0,10184	0,65937	1,02202
0,35000	44,44%	1	0,05658	0,24524	0,38011
0,35000	44,44%	2	0,08572	0,42861	0,66435
0,35000	44,44%	3	0,07603	0,61273	0,94973
0,37500	51,01%	1	0,04222	0,23318	0,36142
0,37500	51,01%	2	0,06610	0,40535	0,62828
0,37500	51,01%	3	0,05333	0,57522	0,89159
0,40000	58,04%	1	0,02917	0,22276	0,34529
0,40000	58,04%	2	0,04714	0,38568	0,59780
0,40000	58,04%	3	0,02894	0,54178	0,83976
0,42500	65,52%	1	0,01630	0,21311	0,33032
0,42500	65,52%	2	0,02797	0,36828	0,57084
0,45000	73,46%	1	0,00939	0,35387	0,54850

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TE sont obtenues pour un rayon de 0,200 soit un facteur de remplissage 14,51% de 0,17054. Pour le mode TM pour un rayon de 0,200 soit un facteur de remplissage 14,51% de 0,05716.

Le Tableau IV.11 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arsénure de gallium en mode TM à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.11. Bande interdite TM de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arsénure de gallium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en μm)
0,20000	14,51%	1	0,05716	0,85774	1,32949
0,27500	27,43%	1	0,01744	0,39458	0,61159
0,30000	32,65%	1	0,02591	0,36960	0,57288
0,32500	38,32%	1	0,02953	0,34726	0,53825
0,35000	44,44%	1	0,03010	0,32564	0,50475
0,37500	51,01%	1	0,02853	0,30598	0,47428
0,40000	58,04%	1	0,02306	0,28654	0,44414
0,42500	65,52%	1	0,01596	0,26754	0,41469

La Figure IV.31 représente les Diagrammes de bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) f=14,51%, (b) f=51,01%, (c) f=73,46%.

A très faible taux de remplissage nous observons l'existence d'une large bande interdite TE de 0,17054 entre les fréquences 0,28247 et 0,45301 et une deuxième

de larguer 0,02269 entre les fréquences 0,57732 et 0,60002 et aussi une bande interdite TM de larguer 0,05716 entre les fréquences 0,82916 et 0,88632 (Figure IV.31 (a)).

Pour un facteur de remplissage moyen, on observe l'apparition de trois bandes interdites TE et une TM. Une large première bande interdite TE de 0,06610 entre les fréquences 0,37230 et 0,43841 et la deuxième de largeur 0,05335 entre les fréquences 0,54856 et 0,60191 et la troisième de largeur 0,04223 entre les fréquences 0,21207 et 0,25430 et aussi une bande interdite TM de largeur 0,02853 entre les fréquences 0,29173 et 0,32025 (Figure IV.31 (b)).

A taux de remplissage très élevé on remarque l'apparition d'une petite bande interdite commune et une petite bande interdite TM de 0,01156 entre les fréquences 0,80978 et 0,82134 et une bande interdite TE de largeur 0,00939, située entre les fréquences 0,34917 et 0,35857.

La bande interdite commune apparaissent en se plaçant dans la zone de recouvrement entre la bande interdite TE et TM de largeur 0,01156 située entre les fréquences 0,80978 et 0,82134 (Figure IV.31 (c)).

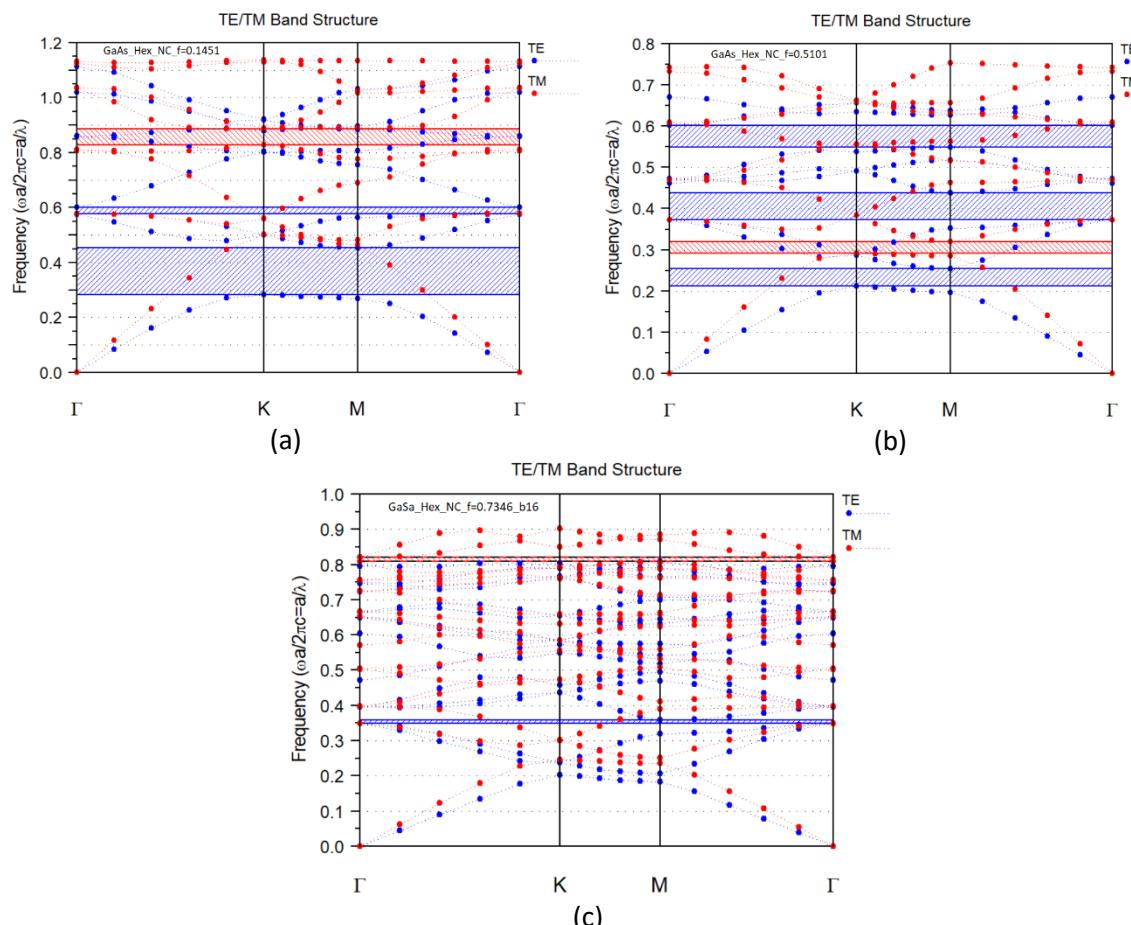


Figure IV.31. Diagramme de bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f=14,51\%$ , (b)  $f= 51,01\%$ , (c)  $f=73,46\%$ .

Le Tableau IV.12 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium pour f=14,51% à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.12. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f=14,51%.

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,17054	TE	0,36774	0,56999
2	0,02269	TE	0,58867	0,91244
1	0,05716	TM	0,85774	1,32950

Le Tableau IV.13 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium pour f=51,01% à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.13. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 51,01%.

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,04223	TE	0,23318	0,36143
2	0,06610	TE	0,40535	0,62830
3	0,05335	TE	0,57523	0,89161
1	0,02853	TM	0,30599	0,47429

Le Tableau IV.14 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le l'arséniure de gallium pour f=73,46% à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.14. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour f= 73,46%.

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,00939	TE	0,35387	0,54850
1	0,01156	TM	0,81556	1,26412
1	0,01156	Joint	0,81556	1,26412

#### IV.7 Structure carrée déconnectée pour l'arséniure de gallium (GaAs) dans le domaine de télécommunication.

##### IV.7.1. Calcul du facteur de remplissage.

###### TE/TM Gaps

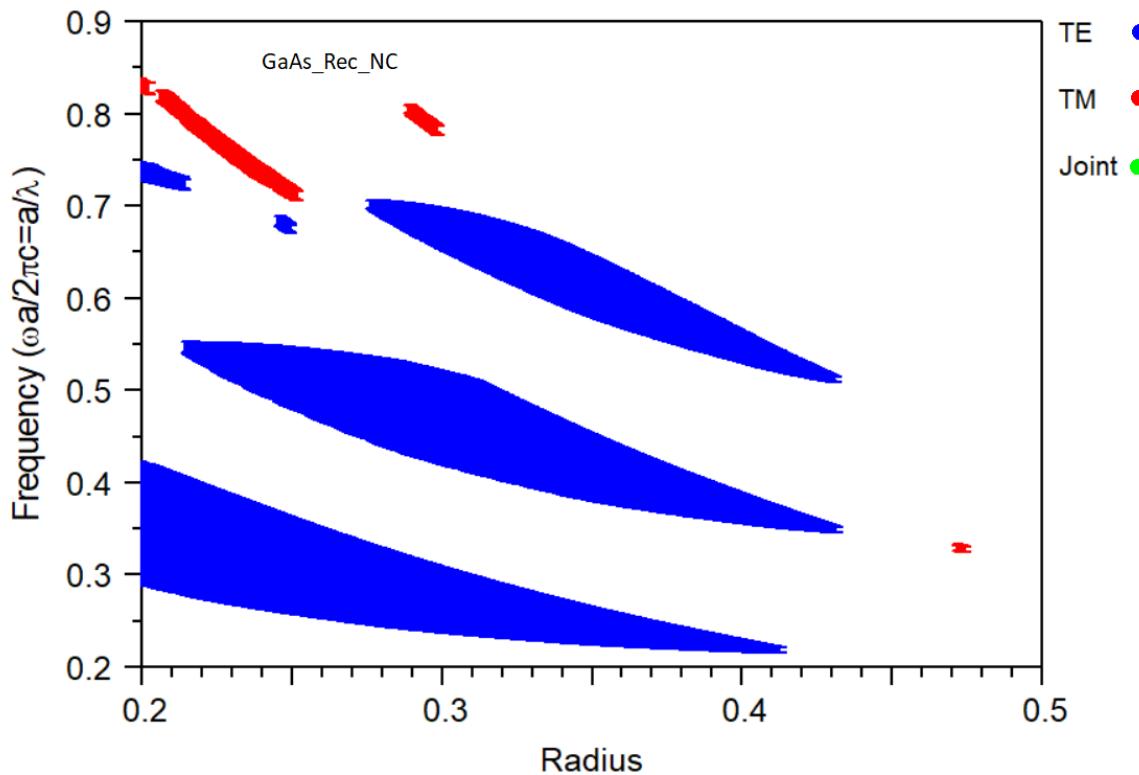


Figure IV.32. Carte de Gap de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE

Le Tableau IV.15 expose les dimensions et les Bandes interdites TE de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.15. Bande interdite TE de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en μm)
0,20000	14,51%	1	0,13223	0,35572	0,55137
0,20000	14,51%	2	0,01838	0,73722	1,14270
0,22500	18,36%	1	0,12013	0,33116	0,51330
0,22500	18,36%	2	0,03132	0,53592	0,83068
0,25000	22,67%	1	0,10323	0,30935	0,47948
0,25000	22,67%	2	0,06546	0,51343	0,79582
0,27500	27,43%	1	0,08626	0,28969	0,44902
0,27500	27,43%	2	0,08839	0,49219	0,76290
0,30000	32,65%	1	0,07018	0,27233	0,42211
0,30000	32,65%	2	0,10001	0,46981	0,72820
0,30000	32,65%	3	0,04402	0,67489	1,04608
0,32500	38,32%	1	0,05422	0,25741	0,39899

0,32500	38,32%	2	0,08955	0,44384	0,68795
0,32500	38,32%	3	0,06258	0,64552	1,00055
0,35000	44,44%	1	0,03974	0,24406	0,37829
0,35000	44,44%	2	0,07106	0,41586	0,64458
0,35000	44,44%	3	0,06417	0,61188	0,94841
0,37500	51,01%	1	0,02559	0,23270	0,36069
0,37500	51,01%	2	0,05053	0,39221	0,60793
0,37500	51,01%	3	0,05056	0,57868	0,89696

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TE sont obtenues pour un rayon normalisé  $r/a = 0,200$  soit un facteur de remplissage 14,51% de 0,13223. Pour un rayon normalisé  $r/a = 0,47500$  la largeur de la bande interdite est de 0,05324. Pour le mode TM un rayon normalisé  $r/a = 0,225$  soit un facteur de remplissage 18,36% de 0,01490.

Le Tableau IV.16 expose les dimensions et les Bandes interdites TM de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV 16. Bande interdite TM de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium

Radius( $r/a$ )	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,2000	14,51%	1	0,01354	0,83036	0,2000
0,2250	18,36%	1	0,01490	0,76978	0,2250
0,2500	22,67%	1	0,01161	0,71382	0,2500

La Figure IV.33 Représente les Diagrammes de bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f= 14,51\%$ , (b)  $f= 51,01\%$ .

A très faible taux de remplissage nous observons une large première bande interdite TE de 0,12574 entre les fréquences 0,27794 et 0,40368 et une deuxième de largeur 0,01195 entre les fréquences 0,54027 et 0,55222 et aussi une petite bande interdite TM de largeur 0,01311 entre les fréquences 0,78864 et 0,80175 (Figure 4.7 (a)).

Pour un facteur de remplissage moyen, l'apparition de trois bandes interdites TE avec l'absence totale de la bande interdite TM. La première bande interdite TE de larguer 0,02990 entre les fréquences 0,52782 et 0,55771 et une deuxième de largeur 0,02888 entre les fréquences 0,35449 et 0,38337 et une troisième de largeur 0,01092 entre les fréquences 0,21606 et 0,22697(Figure 4.2 (c)).

La structure carrée ne présente aucune bande interdite commune.

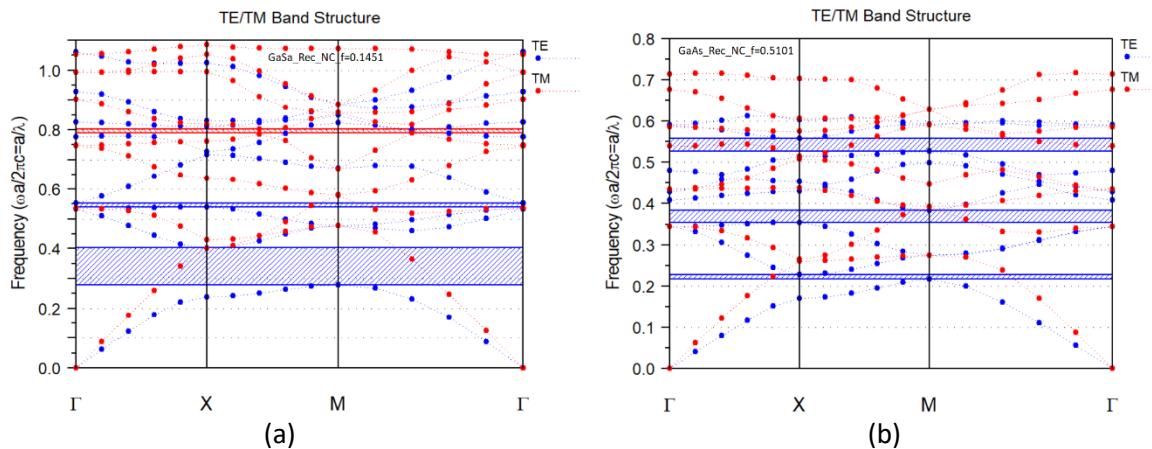


Figure IV.33. Diagramme de bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f = 14,51\%$ , (b)  $f = 51,01\%$ .

Le Tableau IV.17 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour  $f=14,51\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.17. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour  $f=14,51\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,12574	TE	0,34081	0,52826
2	0,01195	TE	0,54625	0,84668
1	0,01311	TM	0,79519	1,23255

Le Tableau IV.18 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour  $f=51,01\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.18. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans l'arséniure de gallium pour  $f= 51,01\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,01092	TE	0,22151	0,34335
2	0,02888	TE	0,36893	0,57184
3	0,02990	TE	0,54276	0,84128

## IV.8 Structure triangulaire déconnectée pour le Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) dans le domaine de télécommunication.

### IV.8.1. Calcul du facteur de remplissage.

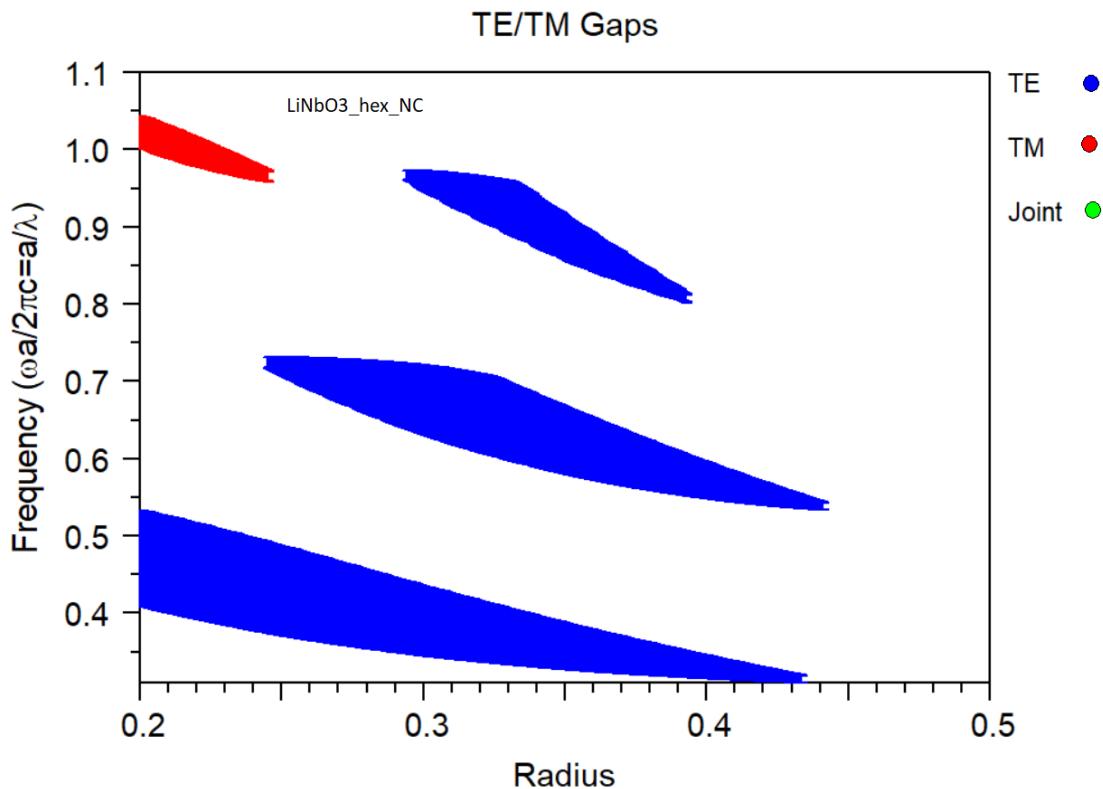


Figure IV.34. Carte de Gap de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE

Dans la figure IV.34 On observe une différence totale entre TE et TM. Une bande interdite TE est observée pour le rayon se situe entre 0,200 et 0,440 μm. Nous trouvons également qu'il existe une bande interdite TM allant de 0,200 à 0,245.

Le Tableau IV.19 expose les dimensions et les Bandes interdites TE de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.19. Bande interdite TE de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en μm)
0,20000	14,51%	1	0,12304	0,47105	0,73013
0,22500	18,36%	1	0,12133	0,44954	0,69678
0,25000	22,67%	1	0,11454	0,42841	0,66403
0,25000	22,67%	2	0,02322	0,71980	1,11569

0,27500	27,43%	1	0,10331	0,40900	0,63395
0,27500	27,43%	2	0,06008	0,69778	1,08156
0,30000	32,65%	1	0,08912	0,38952	0,60376
0,30000	32,65%	2	0,08889	0,67599	1,04778
0,30000	32,65%	3	0,02492	0,95977	1,48764
0,32500	38,32%	1	0,07455	0,37274	0,57775
0,32500	38,32%	2	0,10096	0,65421	1,01402
0,32500	38,32%	3	0,06047	0,93184	1,44435
0,35000	44,44%	1	0,05904	0,35677	0,55299
0,35000	44,44%	2	0,08505	0,62309	0,96580
0,35000	44,44%	3	0,05410	0,88500	1,37176
0,37500	51,01%	1	0,04374	0,34263	0,53108
0,37500	51,01%	2	0,06600	0,59550	0,92303
0,37500	51,01%	3	0,02974	0,83824	1,29928
0,40000	58,04%	1	0,02904	0,33009	0,51165
0,42750	66,30%	2	0,02140	0,54812	0,84959
0,43750	69,43%	1	0,01232	0,54061	0,83794
0,44000	70,23%	1	0,01023	0,53889	0,83528

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TE sont obtenues pour un rayon normalisé  $r/a = 0,200$  soit un facteur de remplissage 14,51% de 0,12304. Pour le mode TM un rayon normalisé  $r/a = 0,225$  soit un facteur de remplissage 18,36% de 0,01592.

Le Tableau IV.20 expose les dimensions et les Bandes interdites TM de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.20. Bande interdite TM de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium

Radius(r/a)	F	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,2000	14,51%	1	0,03996	1,02317	1,58591
0,2250	18,36%	1	0,03186	0,98970	1,53404
0,2275	18,78%	1	0,03008	0,98647	1,52903
0,2300	19,19%	1	0,02812	0,98352	1,52445
0,2325	19,61%	1	0,02613	0,98076	1,52018
0,2350	20,03%	1	0,02369	0,97735	1,51490
0,2375	20,46%	1	0,02151	0,97413	1,50990
0,2400	20,89%	1	0,01917	0,97122	1,50539
0,2425	21,33%	1	0,01642	0,96828	1,50084
0,2450	21,77%	1	0,01357	0,96531	1,49623

La Figure IV.35 Représente les Diagrammes de bandes de la structure triangulaire 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage a)  $f= 14,51\%$ , (b)  $f= 51,01\%$ , (c)  $f= 70,23\%$ .

A très faible taux de remplissage nous observons l'existence d'une large bande interdite TE de 0,12304 entre les fréquences 0,40954 et 0,53257 et une bande

interdite TM de largeur 0,03996 entre les fréquences 1,00319 et 1,04315 (Figure 4. (a)). Pour un facteur de remplissage moyen, on observe trois bandes interdites TE. La première de largueur 0,06600 entre les fréquences 0,56251 et 0,62852 et la deuxième de largeur 0,04375 entre les fréquences 0,32076 et 0,36451, la troisième de largeur 0,02975 entre les fréquences 0,82339 et 0,85314 (Figure 4. (b)). A taux de remplissage très élevé on remarque une seule bande interdite TE de 0,01023 entre les fréquences 0,53378 et 0,54401 (Figure 4. (c)).

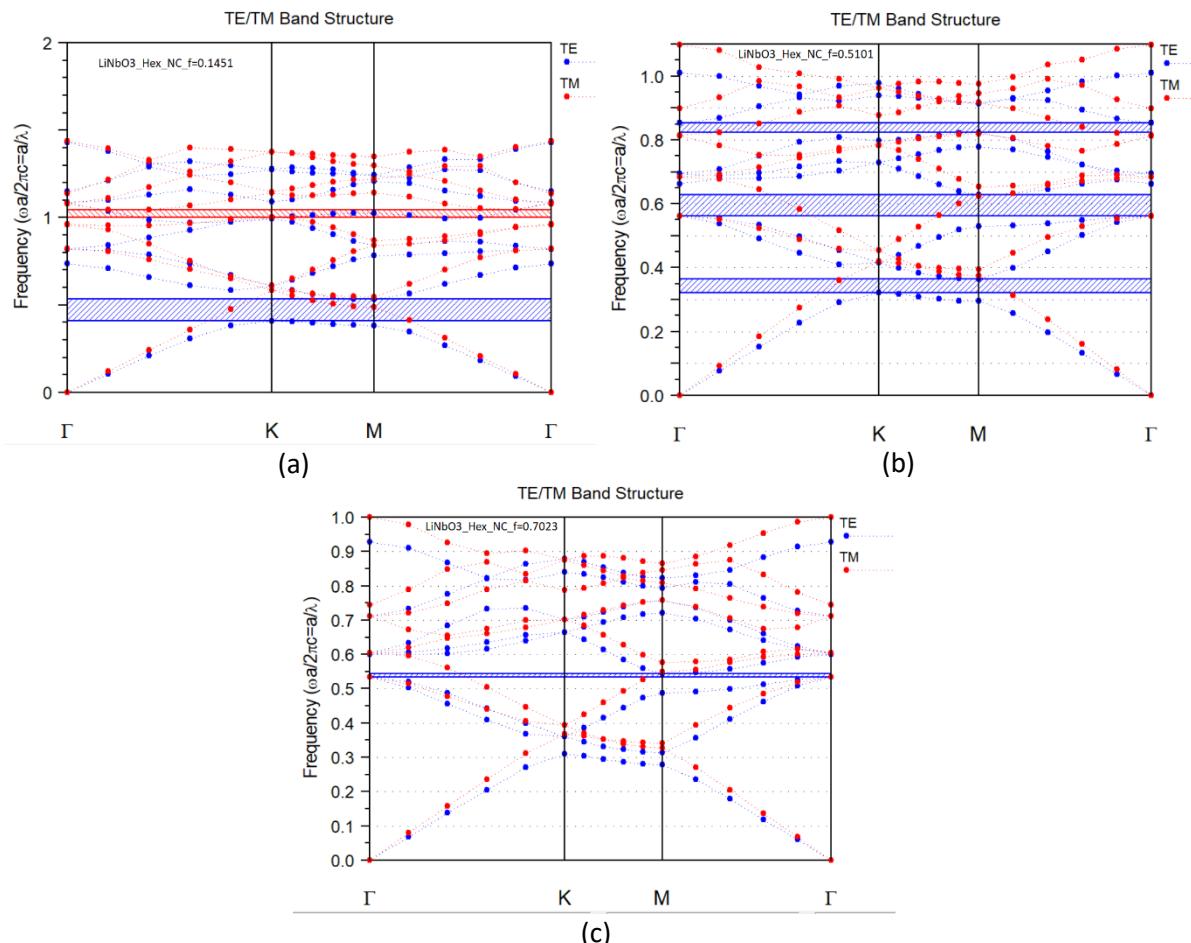


Figure IV.35. Diagramme de bandes de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f= 14,51\%$ , (b)  $f= 51,01\%$ , (c)  $f= 70,23\%$ .

Le Tableau IV.21 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour  $f=14,51\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.21. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour  $f=14,51\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,12304	TE	0,47106	0,73014
1	0,03996	TM	1,02317	1,58591

Le Tableau IV.22 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f=51,01% à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.22.Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f= 51,01%.

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,04375	TE	0,34264	0,53109
2	0,06600	TE	0,59552	0,92305
3	0,02975	TE	0,83826	1,29931

Le Tableau IV.23 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f=70,23% à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.23. Bandes interdites de la structure triangulaire déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour f= 70,23%.

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,01023	TE	0,53889	0,83529

## IV.9 Structure carrée déconnectée pour le Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) dans le domaine de télécommunication.

### IV.9.1. Calcul du facteur de remplissage.

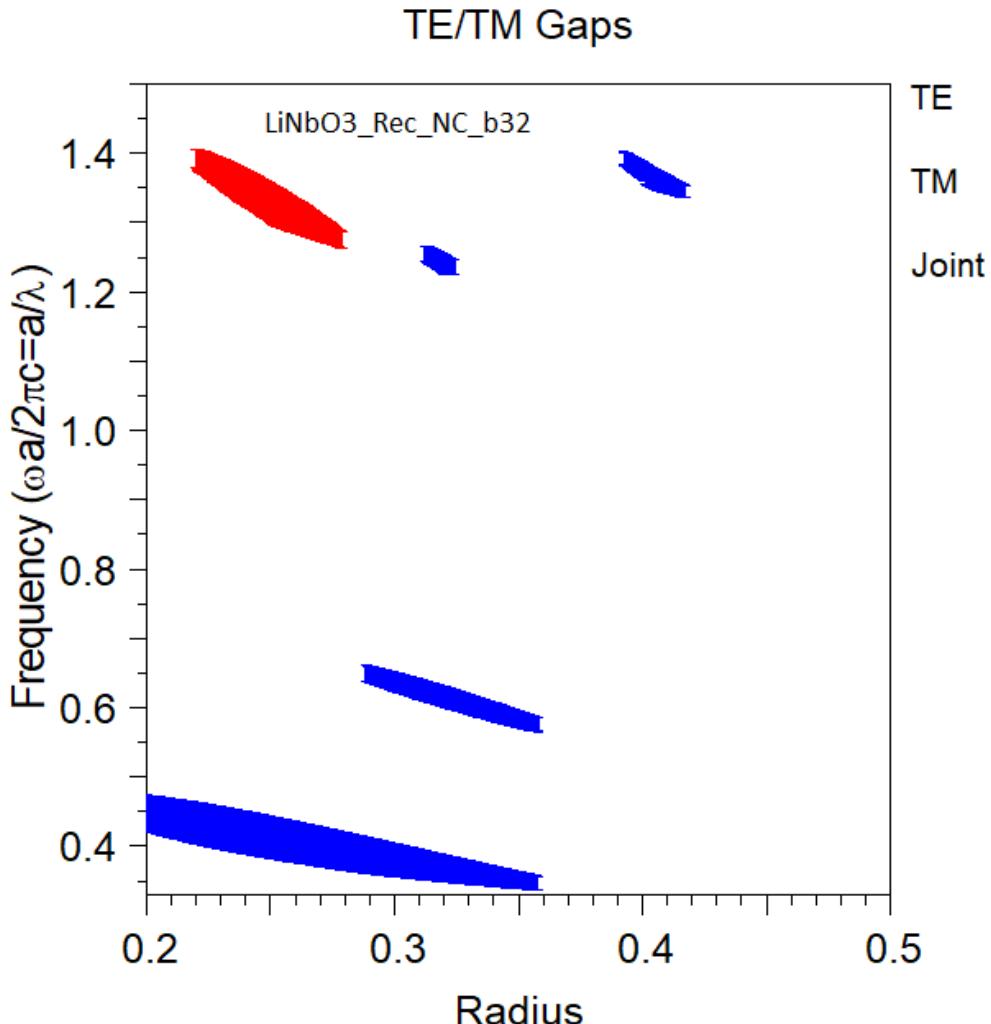


Figure IV.36. Carte de Gap de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE

Les résultats montrent que la plus large bande interdite d'une structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TE sont obtenues pour un rayon normalisé  $r/a = 0,225$  soit un facteur de remplissage 18,36% de 0,06041. Pour le mode TM un rayon normalisé  $r/a = 0,250$  soit un facteur de remplissage 22,67% de 0,05615.

Le Tableau IV.24 expose les dimensions et les Bandes interdites TE de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.24. Bande interdite TE de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	la Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,20000	14,51%	1	0,05148	0,44787	0,69419
0,22500	18,36%	1	0,06041	0,42982	0,66623
0,25000	22,67%	1	0,05997	0,41277	0,63979
0,27500	27,43%	1	0,05519	0,39608	0,61392
0,30000	32,65%	1	0,04716	0,37996	0,58894
0,30000	32,65%	2	0,02689	0,63713	0,98756
0,32500	38,32%	1	0,03579	0,36515	0,56598
0,32500	38,32%	2	0,02829	0,61042	0,94615
0,35000	44,44%	1	0,02395	0,35114	0,54426
0,35000	44,44%	2	0,02370	0,58330	0,90412
0,40000	58,04%	1	0,02618	1,37499	2,13123

Le Tableau IV.25 expose les dimensions et les Bandes interdites TM de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.25. Bande interdite TM de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium

Radius(r/a)	f	Nombre de Gap	Largeur du Gap	Fréquence centrale	La Période a (en $\mu\text{m}$ )
0,22500	18,36%	1	0,03734	1,38206	2,14219
0,25000	22,67%	1	0,05615	1,32825	2,05879
0,27500	27,43%	1	0,03034	1,28332	1,98914

La Figure IV.37 Représente les Diagrammes de bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a) f= 14,51%, (b) f= 51,01%.

A très faible taux de remplissage on remarque une large bande interdite TE de 0,06064 entre les fréquences 0,38809 et 0,44873 et aussi une assez large bande interdite TM de largeur 0,05267 entre les fréquences 1,32014 et 1,37281 (Figure IV.37 (a)). Pour un facteur de remplissage moyen, on remarque une large bande interdite TE de 0,02881 entre les fréquences 1,35237 et 1,38117, avec l'absence des bandes TM (Figure IV.37 (b)).

Dans les deux cas, l'absence totale des bandes interdites communes.

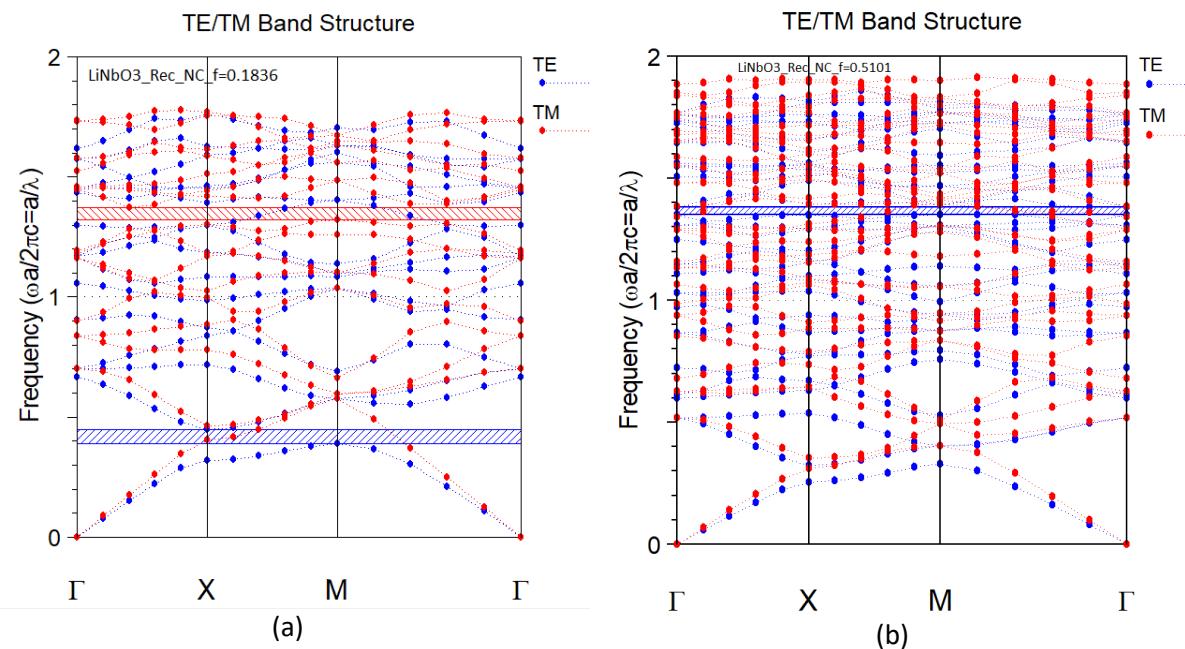


Figure IV.37. Diagramme de bandes de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium en mode TM et en mode TE pour un facteur de remplissage (a)  $f= 14,51\%$ , (b)  $f= 51,01\%$ .

Le Tableau IV.26 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour  $f=14,51\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.26. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour  $f=14,51\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,06064	TE	0,41841	0,64854
1	0,05267	TM	1,34647	2,08703

Le Tableau IV.27 expose les dimensions et les Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour  $f=51,01\%$  à la longueur d'onde 1550 nm.

Tableau IV.27. Bandes interdites de la structure carrée déconnectée 9 x 9 dans le Niobate de lithium pour  $f= 51,01\%$ .

Nombre de Gap	Largeur du Gap	Polarisation	Fréquence centrale	La période(a)
1	0,02881	TE	1,36677	2,11849

#### IV.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la simulation de structures déconnectées en cristaux photoniques, de géométrie triangulaire et carrée, pour trois matériaux diélectriques : le silicium (Si), l'arsénure de gallium (GaAs) et le Niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ).

Les résultats révèlent que, pour le mode TE, la bande interdite la plus large est obtenue avec la configuration triangulaire, pour un rayon normalisé  $r/a = 0,20$  (facteur de remplissage  $f = 14,51\%$ ). Dans le cas du silicium et l'arsénure de gallium, cette bande présente une largeur respective de 0,170548 et 0,170536 (en unités normalisées), centrée autour d'une fréquence normalisée de 0,360190 (période  $a \approx 558,294 \text{ nm}$  pour Si) et 0,3677735 (période  $a \approx 569,989 \text{ nm}$  pour GaAs). La configuration carrée déconnectée offre également des gaps notables, avec des largeurs de 0,134568 (centrée à 0,349090, période  $\approx 541,089 \text{ nm}$ ) pour le Si et 0,132226 (centrée à 0,355723, période  $\approx 551,371 \text{ nm}$ ) pour le GaAs.

Pour le même rayon normalisé  $r/a$  de 0,200, la Structure triangulaire de Niobate de lithium à une largeur qui se rapproche du silicium et l'arsénure de gallium de 0,123038 centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,471054 soit une période de 730,134 nm.

En mode TM, les bandes interdites sont systématiquement moins larges que pour le mode TE. La configuration triangulaire en GaAs offre le gap le plus important (largeur 0,057156), centré à une fréquence normalisée élevée (0,8577738, période  $\approx 1329,494 \text{ nm}$ ).

Enfin, aucune bande interdite commune (TE et TM superposée) n'a été observée pour les trois matériaux étudiés dans ces configurations déconnectées.

Cette analyse met en évidence la supériorité du mode TE et des géométries à faible facteur de remplissage pour maximiser les gaps, bien que les structures déconnectées présentent généralement des bandes moins larges que leurs équivalents connectés (étudiés au chapitre précédent). Ces résultats ouvrent des perspectives pour des applications nécessitant une dispersion contrôlée, telles que la réfraction négative ou les guides d'ondes sélectifs en fréquence.

**Chapitre V :**  
**Évaluation et Optimisation des**  
**Structures de Cristaux Photoniques 2D**

## Chapitre V Évaluation et Optimisation des Structures de Cristaux Photoniques 2D

### V.1 Comparaison des Structures triangulaires et carrées connectées et déconnectées pour le silicium

#### V.1.1. Structure triangulaire et carrée connectée et déconnectée pour le Silicium (Si)

D'après les simulations du chapitre IV sur la plus large bande interdite en fonction du rapport  $r/a$ . La largeur et la fréquence centrale de la plus large bande interdite TM et TE de la Structure triangulaire et carrée connectée et déconnectée pour le Silicium, en fonction du rapport  $r/a$ , sont présentées sur le graphique de la Figure V.1.

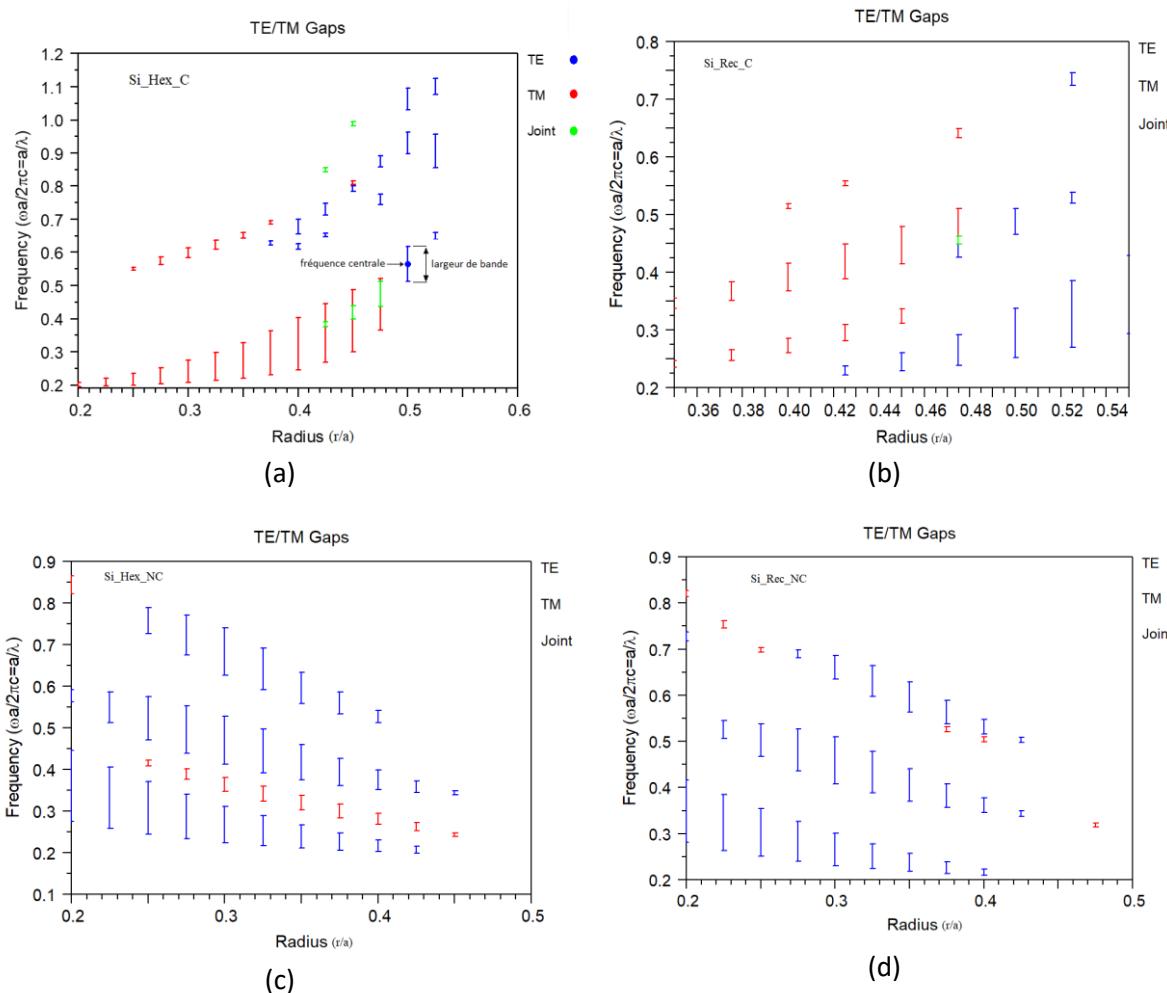


Figure V.1. Influence du rapport  $r/a$  sur la fréquence centrale et la largeur de la plus large des bandes interdites TE et TM de la Structure (a) triangulaire connectée (b) carrée connectée (c) triangulaire déconnectée (d) carrée déconnectée pour le Silicium.

En ce qui concerne le mode TE de la Structure triangulaire et carrée connectée pour le Silicium. Plus le rapport r/a augmente, plus la fréquence normalisée est élevée et plus la bande interdite est large. La plus grande bande interdite TE pour la Structure triangulaire et carrée connectée pour le Silicium est obtenue pour la valeur r/a = 0,500 de 0,10546 centrée autour d'une fréquence normalisée 0,564858 soit une période de 875,53 nm. Pour un rapport r/a inférieur à 0,375 une absence totale de la bande interdite TE. Pour la structure déconnectée Plus le rapport r/a augmente, plus la fréquence normalisée est faible et plus la bande interdite est étroite. La plus grande bande interdite TE pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée pour le Silicium est obtenue pour la valeur r/a = 0,200 de 0,17055 centrée autour d'une fréquence normalisée 0,36019 soit une période de 558,29 nm.

On remarque une ressemblance dans l'évolution de la bande interdite TE quand le rapport r/a augmente pour la structure déconnectée carrée et triangulaire dans le silicium.

Pour le mode TM plus le rapport r/a augmente, plus la fréquence normalisée est élevée et plus la bande interdite est large. La plus grande bande interdite TM pour la Structure triangulaire et carrée connectée pour le Silicium est obtenue pour la valeur r/a = 0,450 de 0,18860 pour la Structure triangulaire centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,394042 soit une période de 610,765 nm et 0,064520 pour la Structure carrée centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,447289 soit une période de 693,297. La plus grande bande interdite TM pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée pour le Silicium est obtenue pour la valeur r/a = 0,200 de 0,044227 centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,843733 soit une période de 1307,78 nm pour la structure triangulaire. Pour la structure carrée La plus grande bande interdite TM est obtenue pour la valeur r/a = 0,200 de 0,013420 centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,820566 soit une période de 1271,87 nm.

L'évolution de la fréquence normalisée et de la largeur de bande en fonction du rapport r/a est différente suivant la nature de la structure connectée au déconnectée.

Un réseau dont la plus grande bande interdite centrée autour d'une fréquence normalisée faible présentera, lors de sa réalisation, des problèmes technologiques quelle que soit la technologie utilisée.

Pour le mode joint c'est-à-dire la bande interdite commune. La plus grande bande interdite commune pour la Structure triangulaire et carrée connectée pour le Silicium est obtenue pour la valeur r/a = 0,475 de 0,075238 pour la Structure triangulaire centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,474902 soit une période de 736,098 nm et pour la Structure carrée pour r/a = 0,488 de 0,014116 centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,488515 soit une période de 757,199 nm. On remarque l'absence totale de la bande interdite commune pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée.

### V.1.2. Structure triangulaire et carrée connectée et déconnectée pour l'arséniure de gallium (GaAs)

La largeur et la fréquence centrale de la plus grande bande interdite TM et TE de la Structure triangulaire et carrée connectée et déconnectée pour l'arséniure de gallium, en fonction du rapport r/a, sont présentées sur le graphique de la Figure V.2.

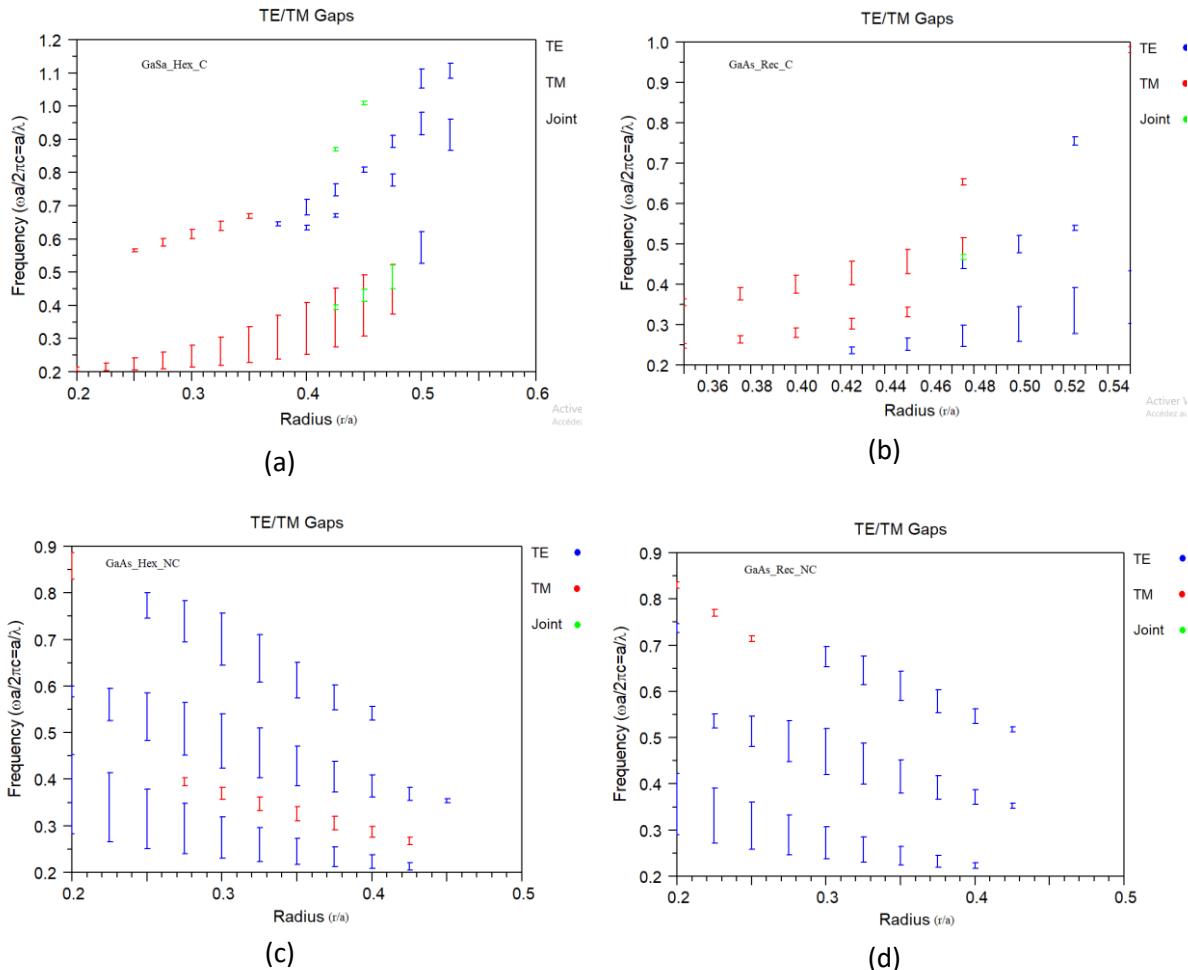


Figure V.2. Influence du rapport  $r/a$  sur la fréquence centrale et la largeur de la plus grande des bandes interdites TE et TM de la Structure (a) triangulaire connectée (b) carrée connectée (c) triangulaire déconnectée (d) carrée déconnectée pour l'arséniure de gallium.

Pour le mode TE de la Structure triangulaire et carrée connectée pour l'arséniure de gallium. Même tendance que le silicium plus le rapport  $r/a$  augmente, plus la fréquence normalisée est élevée et plus la bande interdite est large. La plus grande bande interdite TE pour la Structure triangulaire et carrée connectée pour l'arséniure de gallium est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,500$  de 0,095570 centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,573545 soit une période de 888,995 nm pour la structure triangulaire. Pour la structure carrée une largeur de 0,085907 centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevée de 0,301859 soit une période de 467,881 nm.

Pour un rapport r/a inférieur à 0,375 une absence totale de la bande interdite TE. Pour la structure déconnectée Plus le rapport r/a augmente, plus la fréquence normalisée est faible et plus la bande interdite est étroite. La plus large bande interdite TE pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée pour l'arsénure de gallium est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,200$  de 0,170536 centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevée 0,367735 soit une période de 569,989 nm pour la structure triangulaire. Pour la structure carrée une largeur de 0,132226 centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevée 0,355723 soit une période de 551,371 nm.

On remarque une ressemblance dans l'évolution de la bande interdite TE quand le rapport r/a augmente pour la structure déconnectée carrée et triangulaire dans l'arsénure de gallium.

Pour le mode TM plus le rapport r/a augmente, plus la fréquence normalisée est élevée et plus la bande interdite est large. La plus large bande interdite TM pour la Structure triangulaire et carrée connectée pour l'arsénure de gallium est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,450$  de 0,184106 pour la Structure triangulaire centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevée de 0,399447 soit une période de 619,143 nm et 0,059126 pour la Structure carrée centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,456050 soit une période de 706,877. La plus large bande interdite TM pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée pour l'arsénure de gallium est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,200$  de 0,057156 centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,857738 soit une période de 1329,494 nm pour la structure triangulaire. Pour la structure carrée La plus large bande interdite TM est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,225$  de 0,014896 centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 0,769785 soit une période de 1193,166 nm.

Pour le mode joint. On remarque l'absence totale de la bande interdite commune pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée pour l'arsénure de gallium.

### V.1.3. Structure triangulaire et carrée connectée et déconnectée pour le Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>)

La plus large bande interdite en fonction du rapport r/a. La largeur et la fréquence centrale de la plus large bande interdite TM et TE de la Structure triangulaire connectée pour le Niobate de lithium, en fonction du rapport r/a, sont présentées sur le graphique de la Figure V.3.

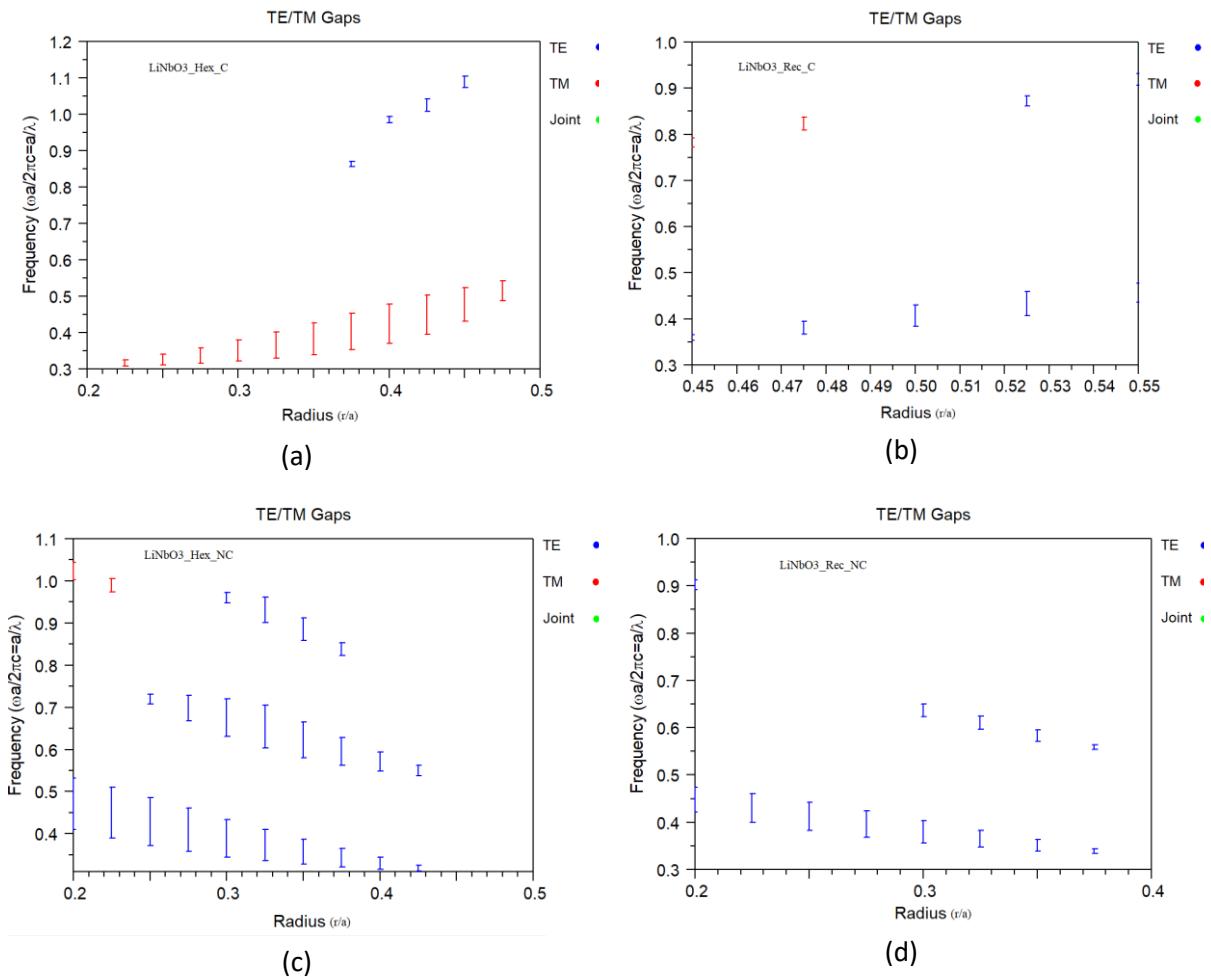


Figure V.3. Influence du rapport  $r/a$  sur la fréquence centrale et la largeur de la plus large des bandes interdites TE et TM de la Structure (a) triangulaire connectée (b) carrée connectée (c) triangulaire déconnectée (d) carrée déconnectée pour le Niobate de lithium.

Pour le mode TE de la Structure triangulaire et carrée connectée pour le Niobate de lithium. La plus large bande interdite TE pour la Structure triangulaire et carrée connectée pour le Niobate de lithium est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,500$  de 0,046544 centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevée de 0,407346 soit une période de 631,386 nm pour la structure triangulaire. Pour la structure carrée une largeur de 0,035377 centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de 1,025191 soit une période de 1589,047 nm.

Pour un rapport  $r/a$  inférieur à 0,358 une absence totale de la bande interdite TE. Pour la structure déconnectée Plus le rapport  $r/a$  augmente, plus la fréquence normalisée est faible et plus la bande interdite est étroite. La plus large bande interdite TE pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée pour le Niobate de lithium est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,200$  de 0,123038 centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevée 0,471054 soit une période de 730,134 nm pour la structure triangulaire. Pour la structure carrée une largeur de 0,060409 pour un  $r/a=0,225$  centrée autour d'une fréquence normalisée élevée 0,429824 soit une période de 666,227 nm.

On remarque pour la Structure triangulaire et carrée connectée pour le Niobate de lithium la plus large bande interdite pour le mode TE est centrée autour d'une fréquence normalisée élevée et un rayon normalisé faible.

Pour le mode TM plus le rapport  $r/a$  augmente, plus la fréquence normalisée est élevée et plus la bande interdite est large pour la Structure triangulaire connectée. La plus large bande interdite TM pour la Structure triangulaire et carrée connectée pour le Niobate de lithium est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,400$  de  $0,107881$  pour la Structure triangulaire centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de  $0,424483$  soit une période de  $657,948$  nm et  $0,027918$  pour la Structure carrée centrée autour d'une fréquence normalisée très élevée de  $0,814333$  soit une période de  $1262,216$  nm. La plus large bande interdite TM pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée pour le Niobate de lithium est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,250$  de  $0,056146$  centrée autour d'une fréquence normalisée très élevée de  $1,328251$  soit une période de  $2058,790$  nm pour la structure carrée. Pour la structure triangulaire La plus large bande interdite TM est obtenue pour la valeur  $r/a = 0,225$  de  $0,031856$  centrée autour d'une fréquence normalisée élevée de  $0,989705$  soit une période de  $1534,043$  nm.

Pour le mode joint. On remarque l'absence totale de la bande interdite commune pour la Structure triangulaire et carrée déconnectée le Niobate de lithium.

## V.2 Conclusion

La plus large bande interdite TE est obtenue pour la Structure triangulaire déconnectée pour le Silicium et l'arséniure de gallium, pour un rayon  $r = 111,659$  nm centrée sur une fréquence normalisée de  $0,360189$  de  **$0,170548$**  pour le Silicium. Pour l'arséniure de gallium pour un rayon  $r = 113,998$  nm centrée sur une fréquence normalisée de  $0,367735$  de  **$0,170536$** . On remarque aussi l'apparition des bandes interdites assez larges pour les structures carrées connectées et déconnectées pour le silicium et l'arséniure de gallium, tous presque égaux.

Pour la structure carrée connectée dans le silicium une bande de largeur  **$0,134762$**  pour un  $r = 308,130$  nm centrée sur une fréquence normalisée de  $0,361443$  soit une période de  $560,237$  nm. Pour la structure carrée déconnectée dans le silicium une bande de largeur  **$0,134567$**  pour un  $r = 108,218$  nm centrée sur une fréquence normalisée de  $0,349089$  soit une période de  $541,089$  nm.

Pour la structure carrée déconnectée dans l'arséniure de gallium une bande de largeur  **$0,132226$**  pour un  $r = 0,110274$  nm centrée sur une fréquence normalisée de  $0,355723$  soit une période de  $551,370$  nm. Pour la structure carrée connectée dans l'arséniure de gallium une bande de largeur  **$0,131561$**  pour un  $r = 313,614$  nm centrée sur une fréquence normalisée de  $0,367875$  soit une période de  $570,207$  nm.

Pour le mode TM La plus large bande interdite est obtenue pour la Structure triangulaire connectée pour le Silicium et l'arséniure de gallium, pour un rayon  $r = 274,844$  nm centrée sur une fréquence normalisée de  $0,394041$  de  **$0,188599$**  pour le Silicium. Pour l'arséniure de gallium pour un rayon  $r = 278,614$  nm centrée sur une fréquence normalisée de  $0,399447$  de  **$0,184106$** . On remarque l'apparition des bandes interdites assez faible pour les structures carrées connectées pour le silicium

et l'arséniure de gallium. Pour la structure carrée connectée dans le silicium une bande de largeur **0,064520** pour un  $r = 311,984$  nm centrée sur une fréquence normalisée de 0,447289 soit une période de 693,297 nm. Pour la structure carrée connectée dans l'arséniure de gallium une bande de largeur **0,059126** pour un  $r = 318,095$  nm centrée sur une fréquence normalisée de 0,456049 soit une période de 706,877 nm.

Pour la structure triangulaire connectée dans le Niobate de lithium une bande de largeur **0,057733** pour un  $r = 162,979$  nm centrée sur une fréquence normalisée de 0,350493 soit une période de 543,264 nm.

Pour la bande interdite commune la plus large est obtenue pour la Structure triangulaire connectée du silicium et l'arséniure de gallium qui ont les plus larges bandes interdites respectivement de **0,075238** pour  $r = 349,647$  nm centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,474902 soit une période de 736,098 nm pour le silicium. Pour l'arséniure de gallium de **0,072120** pour  $r = 357,527$  nm centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,485605 soit une période de 752,687 nm. On remarque l'apparition d'une petite bande pour la structure carrée du Silicium (Si), l'arséniure de gallium (GaAs), le Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) pour un  $r = 369,134$  nm de **0,014116** centrée autour d'une fréquence normalisée peu élevé de 0,488515 soit une période de 757,199 nm pour les trois matériaux.

## Conclusion Générale et Perspectives

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit marque l'aboutissement de nos travaux de recherche consacrés à l'étude de la bande interdite photonique (PBG) dans les cristaux photoniques bidimensionnels et les métamatériaux. La méthodologie adoptée, alliant analyse théorique rigoureuse et simulations numériques avancées, a permis d'explorer de nouvelles voies pour optimiser le contrôle de la propagation de la lumière à l'échelle mésoscopique.

L'objectif principal de ce travail était d'examiner le potentiel des structures périodiques pour la manipulation des ondes électromagnétiques. La problématique centrale s'est articulée autour de l'identification des paramètres structurels déterminants, notamment la géométrie du réseau, les dimensions des motifs et la connectivité, permettant d'obtenir les bandes interdites photoniques les plus larges. Cette recherche s'inscrit dans un contexte marqué par la demande croissante en dispositifs photoniques et optoélectroniques performants destinés aux télécommunications et aux applications micro-ondes.

La méthodologie suivie s'est structurée en deux axes majeurs. Le premier a consisté en une étude bibliographique approfondie visant à établir les fondements théoriques et numériques nécessaires à la compréhension des phénomènes étudiés. Le second a porté sur une phase intensive de modélisation et de simulation à l'aide du logiciel Rsoft, reposant sur la méthode des ondes planes (PWE), appliquée à trois matériaux d'intérêt stratégique : le silicium (Si), l'arséniure de gallium (GaAs) et le niobate de lithium.

Les chapitres initiaux ont permis de poser le cadre de l'électromagnétisme classique à travers les équations de Maxwell, indispensables à la description de la propagation des ondes dans des milieux hétérogènes. L'étude a également mis en évidence le rôle fondamental des métamatériaux, capables d'exhiber des paramètres effectifs non conventionnels, tels que des permittivités et perméabilités négatives, ouvrant ainsi la voie à des phénomènes avancés comme la réfraction négative et la focalisation au-delà de la limite de diffraction.

Sur le plan numérique et méthodologique, les résultats ont confirmé l'efficacité la méthode des ondes planes pour la résolution des équations de Maxwell dans des structures présentant un fort contraste d'indice. L'analyse des zones de Brillouin et des diagrammes de bandes s'est révélée essentielle pour l'identification précise des modes de polarisation transverse électrique (TE) et transverse magnétique (TM).

Les simulations réalisées ont démontré que la connectivité des structures joue un rôle déterminant dans l'ouverture des bandes interdites photoniques. Pour les réseaux triangulaires et carrés connectés, il a été observé que la largeur de la bande interdite et la fréquence centrale augmentent de manière significative avec l'accroissement du facteur de remplissage, et ce pour l'ensemble des matériaux étudiés. Les structures triangulaires connectées se distinguent par l'obtention des bandes interdites les plus larges en polarisation TM, notamment dans le cas du silicium et de l'arséniure de gallium. Un résultat majeur réside dans le fait que seules les structures connectées permettent l'apparition d'une bande interdite

commune bloquant simultanément les modes TE et TM, la configuration triangulaire connectée en silicium présentant la zone de recouvrement la plus étendue.

On notera la présence des bandes interdites communes que pour les structures triangulaires et rectangulaires connectée pour tous les matériaux en études, la bande interdite la plus large est obtenue pour la structure triangulaire connectée dans le silicium de 0,07524 pour une fréquence centrale 0,47490 et la structure triangulaire connectée 9 x 9 dans l'arsénure de gallium de 0,07212 pour une fréquence centrale de 0,48560.

Pour la polarisation **TM**, la structure **triangulaire connectée** s'impose comme la configuration la plus performante. Elle permet d'atteindre une largeur de bande de **0,18860** pour le Silicium et **0,184106** pour l'Arsénure de Gallium. Ces maxima sont obtenus pour un même rayon de  $r = 274,844\text{nm}$ , avec des fréquences centrales respectives de 0,394042 (Si) et 0,399447 (GaAs). Ces valeurs très proches confirment la convergence des résultats entre ces deux semi-conducteurs. En comparaison, le Niobate de Lithium présente une bande interdite plus étroite, atteignant un maximum de **0,107881** pour un rayon de 263,179 nm.

À l'inverse, l'étude des structures déconnectées, constituées de tiges diélectriques dans l'air, a révélé un comportement complémentaire. Ces structures se montrent particulièrement adaptées à l'obtention de larges bandes interdites photoniques en polarisation TE, notamment pour de faibles facteurs de remplissage. Toutefois, l'absence de bande interdite commune dans ces configurations limite leur utilisation pour des dispositifs nécessitant une isolation simultanée des deux polarisations.

En ce qui concerne le mode **TE**, les structures **déconnectées** offrent les bandes interdites les plus larges. La configuration triangulaire déconnectée (9x9) se distingue particulièrement avec des valeurs quasi-identiques pour le Silicium (0,170548) et l'Arsénure de Gallium (0,170536). Les structures carrées, qu'elles soient connectées ou déconnectées, affichent des performances en retrait mais très homogènes pour ces deux matériaux, avec des largeurs de gap comprises entre 0,131 et 0,135. Enfin, le Niobate de Lithium présente des performances plus modestes, avec une largeur de bande maximale atteignant 0,123038.

L'interprétation globale des résultats met en évidence une convergence remarquable des performances photoniques du silicium et de l'arsénure de gallium, attribuable à leurs indices de réfraction élevés assurant un contraste optimal avec l'air. Le Niobate de lithium, bien que présentant des bandes interdites plus étroites en raison d'un contraste d'indice plus faible, demeure un matériau de premier plan pour la photonique intégrée grâce à ses propriétés non linéaires, particulièrement adaptées aux fonctions de modulation et de commutation.

En synthèse, l'optimisation des cristaux photoniques bidimensionnels repose sur plusieurs critères essentiels : l'adoption d'une structure triangulaire connectée pour l'obtention de bandes interdites de type TM ou communes, le recours à des structures triangulaires déconnectées pour maximiser les bandes interdites en polarisation TE, et le choix du silicium ou de l'arsénure de gallium pour les applications nécessitant de larges bandes.

Enfin, cette thèse ouvre plusieurs perspectives de recherche, notamment l'exploration de nouveaux matériaux à indice élevé ou à propriétés accordables, ainsi que l'extension des approches numériques vers des méthodes tridimensionnelles ou hybrides intégrant des défauts ponctuels et linéaires. Ces axes permettront un contrôle encore plus fin du confinement et de la propagation de la lumière.

En conclusion, ce travail démontre que l'ingénierie précise de la géométrie et de la connectivité des cristaux photoniques constitue un levier fondamental pour la maîtrise de la lumière et représente une étape clé vers la conception de la prochaine génération de circuits photoniques intégrés.

La maîtrise de ces structures et de leurs propriétés optiques ouvre la voie à la réalisation de fonctions essentielles telles que la modulation, la commutation et la conversion de fréquences. Ces résultats sont fondamentaux pour la conception de dispositifs optoélectroniques avancés, incluant les cavités résonantes, les guides d'ondes et les filtres "add-drop".

Les perspectives ouvertes par ce travail sont multiples. Une première orientation consiste à franchir le pas **de la simulation à la réalisation expérimentale**, à travers la fabrication et la caractérisation des structures les plus prometteuses afin de valider les prédictions numériques. Une seconde perspective concerne **l'ingénierie de défauts contrôlés**, qu'ils soient linéaires ou ponctuels, permettant la conception de guides d'ondes et de micro-cavités à haute performance, essentiels pour l'optique intégrée. Par ailleurs, l'extension de l'étude aux **cristaux photoniques tridimensionnels** représente une étape clé vers un confinement total de la lumière dans toutes les directions. Enfin, **l'intégration de matériaux actifs ou non linéaires** offrirait la possibilité de développer de nouvelles fonctionnalités photoniques, telles que la commutation, la modulation ou la conversion de fréquence, renforçant ainsi le potentiel applicatif des cristaux photoniques dans les systèmes optoélectroniques de prochaine génération.

## Bibliographies

1. Yablonovitch, E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Phys. Rev. Lett.* **1987**, *58*, 2059.
2. Yablonovitch, E.; Gmitter, T.J.; Leung, K.M. Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case Employing Nonspherical Atoms. *Phys. Rev. Lett.* **1991**, *67*, 2295–2298, doi:10.1103/PhysRevLett.67.2295.
3. Ho, K.M.; Chan, C.T.; Soukoulis, C.M. Existence of a Photonic Gap in Periodic Dielectric Structures. *Phys. Rev. Lett.* **1990**, *65*, 3152–3155, doi:10.1103/PhysRevLett.65.3152.
4. Zhang, Z.; Satpathy, S. Electromagnetic Wave Propagation in Periodic Structures: Bloch Wave Solution of Maxwell's Equations. *Phys. Rev. Lett.* **1990**, *65*, 2650–2653, doi:10.1103/PhysRevLett.65.2650.
5. Leung, K.M.; LIN, Y. Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case Employing Nonspherical Atoms. *Phys. Rev. Lett.* **1990**, *65*, 2.
6. Satpathy, S.; Zhang, Z.; Salehpour, M.R. Theory of Photon Bands in Three-Dimensional Periodic Dielectric Structures. *Phys. Rev. Lett.* **1990**, *64*, 1239–1242, doi:10.1103/PhysRevLett.64.1239.
7. Yablonovitch, E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Phys. Rev. Lett.* **1987**, *58*, 2059–2062, doi:10.1103/PhysRevLett.58.2059.
8. Yablonovitch, E.; Gmitter, T.J. Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case. *Phys. Rev. Lett.* **1989**, *63*, 1950–1953, doi:10.1103/PhysRevLett.63.1950.
9. John, S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Phys. Rev. Lett.* **1987**, *58*, 2486–2489, doi:10.1103/PhysRevLett.58.2486.
10. Monat, C.; Seassal, C.; Letartre, X.; Viktorovitch, P.; Regreny, P.; Gendry, M.; Rojo-Romeo, P.; Hollinger, G.; Jalaguier, E.; Pocas, S.; et al. InP 2D Photonic Crystal Microlasers on Siliconwafer: Room Temperature Operation at 1.55 Mm. *Electron. Lett.* **2001**, *37*, 764–766, doi:10.1049/el:20010543.
11. Russell, P. Photonic Crystal Fibers. *Science* **2003**, *299*, 358–362, doi:10.1126/science.1079280.
12. Fan, S.; Villeneuve, P.R.; Meade, R.D.; Joannopoulos, J.D. Design of Three-Dimensional Photonic Crystals at Submicron Lengthscales. *Appl. Phys. Lett.* **1994**, *65*, 1466–1468.
13. Özbay, E.; Michel, E.; Tuttle, G.; Biswas, R.; Sigalas, M.; Ho, K.-M. Micromachined Millimeter-Wave Photonic Band-Gap Crystals. *Appl. Phys. Lett.* **1994**, *64*, 2059–2061.
14. Lin, S.-Y.; Hietala, V.M.; Wang, L.; Jones, E.D. Highly Dispersive Photonic Band-Gap Prism. *Opt. Lett.* **1996**, *21*, 1771–1773.
15. Zhou, R.; Yan, Q.; Lu, C.; Hu, X. Band Structures of Lossy Photonic Time Crystals. In Proceedings of the Fifth Optics Frontier Conference (OFS 2025); SPIE, 2025; Vol. 13648, pp. 57–62.
16. Asgari, M.M.; Garg, P.; Wang, X.; Mirmoosa, M.S.; Rockstuhl, C.; Asadchy, V. Theory and Applications of Photonic Time Crystals: A Tutorial. *Adv. Opt. Photonics* **2024**, *16*, 958–1063.
17. Yuan, J.; Shu, J.; Jiang, L. Multifunctional Beam Steering via Switchable Negative Refraction, Self-Collimation, and Zero Refraction Effects in Conventional and Annular Photonic Crystals. *Opt. Express* **2020**, *28*, 5367–5377.
18. Gnawali, R.; Volk, A.; Agha, I.; Payne, T.E.; Rai, A.; Touma, J. Bio-Inspired Spatially Variant Photonic Crystals for Self-Collimation and Beam-Steering Applications in the near-Infrared Spectrum. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 18767.
19. Lheurette, E. Métamatériaux à Indice Négatif de Réfraction: Des Microondes Aux Fréquences Térahertz. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2009.
20. Foulon, M.-F. Metamateriaux Térahertz En Régime Linéaire et Non Linéaire. Thèse de doctorat, Lille 1, 2008.
21. Houzet, G. Déphasage Composite Accordable et Routage Spatial Par La Technologie Des Métamatériaux. Thèse de doctorat, Lille 1, 2009.
22. Pendry, J.B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Phys. Rev. Lett.* **2000**, *85*, 3966.

23. Shelby, R.A.; Smith, D.R.; Schultz, S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *science* **2001**, *292*, 77–79.
24. Fabre, N. Matériaux Main Gauche et Cristaux Photoniques Pour l'optique: Approche Diélectrique. Thèse de doctorat, Université Lille I—Sciences et Technologies, 2008.
25. Veselago, V.G. Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative And. *Usp Fiz Nauk* **1967**, *92*, 517.
26. Lončar, M.; Yoshie, T.; Scherer, A.; Gogna, P.; Qiu, Y. Low-Threshold Photonic Crystal Laser. *Appl. Phys. Lett.* **2002**, *81*, 2680–2682.
27. Nozaki, K.; Kita, S.; Baba, T. Room Temperature Continuous Wave Operation and Controlled Spontaneous Emission in Ultrasmall Photonic Crystal Nanolaser. *Opt. Express* **2007**, *15*, 7506–7514.
28. Painter, O.; Lee, R.K.; Scherer, A.; Yariv, A.; O'Brien, J.D.; Dapkus, P.D.; Kim, I. Two-Dimensional Photonic Band-Gap Defect Mode Laser. *Science* **1999**, *284*, 1819–1821, doi:10.1126/science.284.5421.1819.
29. Fabre, N.; Lalouat, L.; Cluzel, B.; Mélique, X.; Lippens, D.; de Fornel, F.; Vanbésien, O. Optical Near-Field Microscopy of Light Focusing through a Photonic Crystal Flat Lens. *Phys. Rev. Lett.* **2008**, *101*, 073901.
30. Aydin, K.; Bulu, I.; Ozbay, E. Subwavelength Resolution with a Negative-Index Metamaterial Superlens. *Appl. Phys. Lett.* **2007**, *90*, 254102.
31. Grbic, A.; Eleftheriades, G.V. Overcoming the Diffraction Limit with a Planar Left-Handed Transmission-Line Lens. *Phys. Rev. Lett.* **2004**, *92*, 117403.
32. John, S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Phys. Rev. Lett.* **1987**, *58*, 2486.
33. Massé, P. Cristaux Photoniques Colloïdaux d'architecture Contrôlée. Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2007.
34. Hofman, M. Composants Optiques à Base de Cristaux Photoniques Pour Applications à l'imagerie Infrarouge. PhD Thèse de doctorat, Lille 1, 2011.
35. Kosaka, H.; Kawashima, T.; Tomita, A.; Notomi, M.; Tamamura, T.; Sato, T.; Kawakami, S. Superprism Phenomena in Photonic Crystals. *Phys. Rev. B* **1998**, *58*, R10096.
36. Hu, X.; Chan, C.T. Photonic Crystals with Silver Nanowires as a Near-Infrared Superlens. *Appl. Phys. Lett.* **2004**, *85*, 1520–1522.
37. Luo, C.; Johnson, S.G.; Joannopoulos, J.D.; Pendry, J.B. Negative Refraction without Negative Index in Metallic Photonic Crystals. *Opt. Express* **2003**, *11*, 746–754.
38. Mejdoubi, A. Étude Par Simulation Numérique Des Propriétés Diélectriques d'hétérostructures Multiphasiques Contenant Des Inclusions de Forme Arbitraire. Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest, 2007.
39. Labbani, A. Matériaux BIP à Base de Nanoparticules Métalliques et Semiconductrices: Étude Des Propriétés Optiques Par FDTD. Thèse de doctorat, Mentouri Constantine, 2009.
40. Mejdoubi, A.; Brosseau, C. Finite-Element Simulation of the Depolarization Factor of Arbitrarily Shaped Inclusions. *IEEE Trans. Magn.* **2008**, *44*, 1142–1145.
41. Hunter, P.; Pullan, A. Fem/Bem Notes. *Dep. Eng. Sci. Univ. Auckl. New Zeland* **2001**.
42. Silvester, P.P.; Ferrari, R.L. *Finite Elements for Electrical Engineers*; Cambridge university press, 1996;
43. Kane Yee Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Équations in Isotropic Media. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **1966**, *14*, 302–307, doi:10.1109/TAP.1966.1138693.
44. Nakamura, S. Background Story of the Invention of Efficient Blue InGaN Light Emitting Diodes. *Int. J. Mod. Phys. B* **2015**, *29*, 1530016.
45. Qiu, M.; He, S. A Nonorthogonal Finite-Difference Time-Domain Method for Computing the Band Structure of a Two-Dimensional Photonic Crystal with Dielectric and Metallic Inclusions. *J. Appl. Phys.* **2000**, *87*, 8268–8275.

46. Lavrinenko, A.; Borel, P.I.; Frandsen, L.H.; Thorhauge, M.; Harpøth, A.; Kristensen, M.; Niemi, T.; Chong, H.M.H. Comprehensive FDTD Modelling of Photonic Crystal Waveguide Components. *Opt. Express* **2004**, *12*, 234–248.
47. Hagness, S.C.; Taflove, A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. *Norwood MA Artech House* **2000**.
48. Chan, C.T.; Yu, Q.L.; Ho, K.M. Order-N Spectral Method for Electromagnetic Waves. *Phys. Rev. B* **1995**, *51*, 16635.
49. Brillat, T. Définition, Réalisation et Caractérisation de Matériaux à Bandes Photoniques Interdites Reconfigurables En Micro-Ondes. Thèse de doctorat, Paris 10, 2000.
50. Taflove, A.; Hagness, S.C.; Piket-May, M. Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method. In *The Electrical Engineering Handbook*; Elsevier, 2005; pp. 629–670 ISBN 978-0-12-170960-0.
51. Lewy, H.; Friedrichs, K.; Courant, R. Mathematische Annalen. *Math. Ann.* **1928**, *100*, 1,32.
52. Merle, Y. Etude de La Dispersion Électromagnétique Dans Les Matériaux Diélectriques Bidimensionnels. Thèse de doctorat, Limoges, 2003.
53. Joannopoulos, J.D.; Meade, R.; Winn, J. Photonic Crystals Princeton University Press. *Princet. N. J.* **1995**.
54. Lourtioz, J.-M.; Benisty, H.; Berger, V. *Les Cristaux Photoniques Ou La Lumière En Cage*; 2003;
55. Delphine, N. Etude En Champ Proche Optique de Guides à Cristaux Photoniques Sur SOI. PhD, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006.
56. Bernier, D. Propriétés de Superprisme Des Cristaux Photoniques Sur Substrats SOI Pour Le Démultiplexage En Longueur d'onde. PhD Thèse de doctorat, Paris 11, 2008.
57. Kim, Y.K.; Elarde, V.C.; Long, C.M.; Coleman, J.J.; Choquette, K.D. Electrically Injected InGaAs/GaAs Photonic Crystal Membrane Light Emitting Microcavity with Spatially Localized Gain. *J. Appl. Phys.* **2008**, *104*.
58. Frédéric, S.; Dalacu, D.; Lapointe, J.; Poole, P.J.; Aers, G.C.; Williams, R.L. Experimental Demonstration of High Quality Factor, x-Dipole Modes in InAs/InP Quantum Dot Photonic Crystal Microcavity Membranes. *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *89*, 091115, doi:10.1063/1.2338662.
59. Weidner, E.; Combrie, S.; de Rossi, A.; Tran, N.-V.-Q.; Cassette, S. Nonlinear and Bistable Behavior of an Ultrahigh-Q GaAs Photonic Crystal Nanocavity. *Appl. Phys. Lett.* **2007**, *90*.
60. Diziain, S.; Geiss, R.; Zilk, M.; Schremppel, F.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T. Mode Analysis of Photonic Crystal L3 Cavities in Self-Suspended Lithium Niobate Membranes. *Appl. Phys. Lett.* **2013**, *103*.
61. Yu, P.; Bhattacharya, P.; Cheng, J.-C. Enhanced Spontaneous Emission from InAs/GaAs Self-Organized Quantum Dots in a GaAs Photonic-Crystal-Based Microcavity. *J. Appl. Phys.* **2003**, *93*, 6173–6176.
62. Stomeo, T.; Grande, M.; Rainò, G.; Passaseo, A.; D’Orazio, A.; Cingolani, R.; Locatelli, A.; Modotto, D.; De Angelis, C.; De Vittorio, M. Optical Filter Based on Two Coupled PhC GaAs-Membranes. *Opt. Lett.* **2010**, *35*, 411–413.
63. Skauli, T.; Kuo, P.S.; Vodopyanov, K.L.; Pinguet, T.J.; Levi, O.; Eyres, L.A.; Harris, J.S.; Fejer, M.M.; Gerard, B.; Becouarn, L. Improved Dispersion Relations for GaAs and Applications to Nonlinear Optics. *J. Appl. Phys.* **2003**, *94*, 6447–6455.
64. Mokhtari, L.; Badaoui, H.A.; Abri, M.; Abdelbasset, M.; Lallam, F.; Rahmi, B. Proposal of a New Efficient OR/XOR Logic Gates and All-Optical Nonlinear Switch in 2D Photonic Crystal Lattices. *Prog. Electromagn. Res. C* **2020**, *106*, 187–197.
65. Cassagne, D.; Jouanin, C.; Bertho, D. Photonic Band Gaps in a Two-Dimensional Graphite Structure. *Phys. Rev. B* **1995**, *52*, R2217.
66. Padjen, R.; Gerard, J.M.; Marzin, J.Y. Analysis of the Filling Pattern Dependence of the Photonic Bandgap for Two-Dimensional Systems. *J. Mod. Opt.* **1994**, *41*, 295–310, doi:10.1080/09500349414550341.

67. Sugimoto, Y.; Tanaka, Y.; Ikeda, N.; Nakamura, Y.; Asakawa, K.; Inoue, K. Low Propagation Loss of 0.76 dB/Mm in GaAs-Based Single-Line-Defect Two-Dimensional Photonic Crystal Slab Waveguides up to 1 Cm in Length. *Opt. Express* **2004**, *12*, 1090–1096.
68. Combrié, S.; Weidner, E.; DeRossi, A.; Bansropun, S.; Cassette, S.; Talneau, A.; Benisty, H. Detailed Analysis by Fabry-Perot Method of Slab Photonic Crystal Line-Defect Waveguides and Cavities in Aluminium-Free Material System. *Opt. Express* **2006**, *14*, 7353–7361.
69. Combrié, S.; Bansropun, S.; Lecomte, M.; Parillaud, O.; Cassette, S.; Benisty, H.; Nagle, J. Optimization of an Inductively Coupled Plasma Etching Process of GaInP/GaAs Based Material for Photonic Band Gap Applications. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom.* **2005**, *23*, 1521–1526.
70. Joannapoulos, J.D.; Meade, R.D.; Winn, J.N. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light 1995.
71. Choi, Y.-S.; Hennessy, K.; Sharma, R.; Haberer, E.; Gao, Y.; DenBaars, S.P.; Nakamura, S.; Hu, E.L.; Meier, C. GaN Blue Photonic Crystal Membrane Nanocavities. *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *87*, 243101, doi:10.1063/1.2147713.
72. Barker, A.S.; Illegems, M. Infrared Lattice Vibrations and Free-Electron Dispersion in GaN. *Phys. Rev. B* **1973**, *7*, 743–750, doi:10.1103/PhysRevB.7.743.
73. Kawashima, T.; Yoshikawa, H.; Adachi, S.; Fuke, S.; Ohtsuka, K. Optical Properties of Hexagonal GaN. *J. Appl. Phys.* **1997**, *82*, 3528–3535.
74. Lin, M.E.; Sverdlov, B.N.; Strite, S.; Morkoç, H.; Drakin, A.E. Refractive Indices of Wurtzite and Zincblende GaN. *Electron. Lett.* **1993**, *29*, 1759–1760, doi:10.1049/el:19931172.
75. Logothetidis, S.; Petalas, J.; Cardona, M.; Moustakas, T.D. Optical Properties and Temperature Dependence of the Interband Transitions of Cubic and Hexagonal GaN. *Phys. Rev. B* **1994**, *50*, 18017–18029, doi:10.1103/PhysRevB.50.18017.
76. Hahn, D.N.; Kiehne, G.T.; Ketterson, J.B.; Wong, G.K.L.; Kung, P.; Saxler, A.; Razeghi, M. Phase-Matched Optical Second-Harmonic Generation in GaN and AlN Slab Waveguides. *J. Appl. Phys.* **1999**, *85*, 2497–2501.
77. Massy, S. Contribution à La Réalisation de Fonctions Optiques à Base de Cristaux Photoniques Sur LiNbO<sub>3</sub>. PhD, Thèse de doctorat, 2004.
78. Torres, J. Exaltation de La Génération de Second Harmonique Dans Les Cristaux Photoniques Planaires à Bases de Nitrures. Thèse de doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2004.
79. Coquillat, D.; Ribayrol, A.; De La Rue, R.M.; Le Vassor d'Yerville, M.; Cassagne, D.; Albert, J.P. Observations of Band Structure and Reduced Group Velocity in Epitaxial GaN–Sapphire 2D Photonic Crystals. *Appl. Phys. B* **2001**, *73*, 591–593, doi:10.1007/s003400100660.
80. Julier, M. Etudes Optiques de GaN et d'InGaN. PhD Thèse de doctorat, Montpellier 2, 1999.
81. Tiginyanu, I.M.; Kravetsky, I.V.; Pavlidis, D.; Eisenbach, A.; Hildebrandt, R.; Marowsky, G.; Hartnagel, H.L. Nonlinear Optical Characterization of GaN Layers Grown by MOCVD on Sapphire. *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* **2000**, *5*, 768–774, doi:10.1557/S1092578300005056.
82. Miragliotta, J.; Wickenden, D.K.; Kistenmacher, T.J.; Bryden, W.A. Linear-and Nonlinear-Optical Properties of GaN Thin Films. *J. Opt. Soc. Am. B* **1993**, *10*, 1447–1456.
83. Eliseev, P.G.; Sun, H.-B.; Juodkazis, S.; Sugahara, T.; Sakai, S.; Misawa, H. Laser-Induced Damage Threshold and Surface Processing of GaN at 400 nm Wavelength. *Jpn. J. Appl. Phys.* **1999**, *38*, L839.
84. Kravetsky, I.V.; Tiginyanu, I.M.; Hildebrandt, R.; Marowsky, G.; Pavlidis, D.; Eisenbach, A.; Hartnagel, H.L. Nonlinear Optical Response of GaN Layers on Sapphire: The Impact of Fundamental Beam Interference. *Appl. Phys. Lett.* **2000**, *76*, 810–812.
85. Kasic, A.; Schubert, M.; Einfeldt, S.; Hommel, D.; Tiwald, T.E. Free-Carrier and Phonon Properties of *n*- and *p*-Type Hexagonal GaN Films Measured by Infrared Ellipsometry. *Phys. Rev. B* **2000**, *62*, 7365–7377, doi:10.1103/PhysRevB.62.7365.
86. Chowdhury, A.; Ng, H.M.; Bhardwaj, M.; Weimann, N.G. Second-Harmonic Generation in Periodically Poled GaN. *Appl. Phys. Lett.* **2003**, *83*, 1077–1079.

87. Gerace, D.; Galli, M.; Bajoni, D.; Guizzetti, G.; Andreani, L.C.; Riboli, F.; Melchiorri, M.; Daldosso, N.; Pavesi, L.; Pucker, G.; et al. Wide-Band Transmittance of One-Dimensional Photonic Crystals Carved in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> Channel Waveguides. *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *87*, 211116, doi:10.1063/1.2135408.
88. Krückel, C.J.; Fülöp, A.; Ye, Z.; Andrekson, P.A.; Torres-Company, V. Optical Bandgap Engineering in Nonlinear Silicon Nitride Waveguides. *Opt. Express* **2017**, *25*, 15370–15380.
89. Decoopman, T.; Crepin, T.; Perrin, M.; Fasquel, S.; Marteau, A.; Mélique, X.; Lheurette, E.; Vanbésien, O.; Lippens, D. Left-Handed Propagation Media via Photonic Crystal and Metamaterials. *Comptes Rendus Phys.* **2005**, *6*, 683–692.
90. Le Roy, M.; Lheurette, E.; Vanbésien, O.; Lippens, D. Wave-Mechanical Calculations of Leakage Current through Stacked Dielectrics for Nanotransistor Metal-Oxide-Semiconductor Design. *J. Appl. Phys.* **2003**, *93*, 2966–2971.
91. Lin, S.; Fleming, J.G.; Hetherington, D.L.; Smith, B.K.; Biswas, R.; Ho, K.M.; Sigalas, M.M.; Zubrzycki, W.; Kurtz, S.R.; Bur, J. A Three-Dimensional Photonic Crystal Operating at Infrared Wavelengths. *Nature* **1998**, *394*, 251–253.
92. Netti, M.C.; Harris, A.; Baumberg, J.J.; Whittaker, D.M.; Charlton, M.B.D.; Zoorob, M.E.; Parker, G.J. Optical Trifringence in Photonic Crystal Waveguides. *Phys. Rev. Lett.* **2001**, *86*, 1526.
93. Romero-García, S.; Merget, F.; Zhong, F.; Finkelstein, H.; Witzens, J. Silicon Nitride CMOS-Compatible Platform for Integrated Photonics Applications at Visible Wavelengths. *Opt. Express* **2013**, *21*, 14036–14046.
94. Arbabi, A.; Goddard, L.L. Measurements of the Refractive Indices and Thermo-Optic Coefficients of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiO<sub>x</sub> Using Microring Resonances. *Opt. Lett.* **2013**, *38*, 3878–3881.
95. Pruiti, N.G.; Klitis, C.; Gough, C.; May, S.; Sorel, M. Thermo-Optic Coefficient of PECVD Silicon-Rich Silicon Nitride. *Opt. Lett.* **2020**, *45*, 6242–6245.
96. Gerace, D.; Galli, M.; Bajoni, D.; Guizzetti, G.; Andreani, L.C.; Riboli, F.; Melchiorri, M.; Daldosso, N.; Pavesi, L.; Pucker, G. Wide-Band Transmittance of One-Dimensional Photonic Crystals Carved in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> Channel Waveguides. *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *87*.
97. Chen, F. Photonic Guiding Structures in Lithium Niobate Crystals Produced by Energetic Ion Beams. *J. Appl. Phys.* **2009**, *106*.
98. Si, G.; Teo, E.J.; Bettoli, A.A.; Teng, J.; Danner, A.J. Suspended Slab and Photonic Crystal Waveguides in Lithium Niobate. *J. Vac. Sci. Technol. B* **2010**, *28*, 316–320.
99. Farha, R. Etude d'une Structure à Cristal Photonique "LOM" Gravée Dans Un Guide Ti:LiNbO<sub>3</sub> Dopé Erbium Pour l'émission de La Lumière à 1.55 Mm. PhD Thèse de doctorat, Institut National des Télécommunications, 2010.
100. Farha, R.; Zou, Q.; Benkelfat, B.-E. Novel Photonic Crystal Designs in Er:Ti:LiNbO<sub>3</sub> Waveguides. In Proceedings of the 2008 IEEE Lebanon Communications Workshop; IEEE, 2008; pp. 35–39.
101. Sakoda, K. *Optical Properties of Photonic Crystals*; Springer Series in Optical Sciences; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2005; Vol. 80; ISBN 978-3-540-20682-8.

## Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le domaine des matériaux artificiels périodiques et porte sur l'étude et la simulation de la bande interdite photonique dans les métamatériaux et les cristaux photoniques bidimensionnels (2D) à réseaux carrés et triangulaires, en configurations connectées et déconnectées. Trois matériaux diélectriques d'intérêt majeur pour les applications optiques et télécommunications ont été sélectionnés : le silicium (Si), l'arsénure de gallium (GaAs) et le niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>). Considérés comme des matériaux artificiels à structure périodique de l'indice de réfraction, ils permettent de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. La propriété fondamentale de ces matériaux réside dans l'apparition d'une bande interdite photonique (Photonic Band Gap – PBG), qui empêche la propagation de la lumière dans certaines plages fréquentielles, indépendamment de l'angle d'incidence ou de l'état de polarisation, ce qui en fait des éléments efficaces pour le contrôle photonique.

L'étude se concentre sur la modélisation et l'analyse de cristaux photoniques bidimensionnels (2D) à réseaux géométriques carrés et triangulaires, dans les configurations connectées et déconnectées. Ces matériaux d'intérêt scientifique et technologique ont été sélectionnés en raison de leurs propriétés photoniques et optiques remarquables. Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel Rsoft, en s'appuyant sur la méthode des ondes planes (Plane Wave Expansion Method), afin de déterminer les paramètres géométriques optimaux des réseaux permettant de maximiser la largeur de la bande interdite photonique.

Les résultats montrent que la structure triangulaire connectée, pour le silicium et l'arsénure de gallium, présente la plus large bande interdite photonique pour les deux polarisations transversales électrique (TE) et transversale magnétique (TM). Il a également été observé que l'apparition d'une bande interdite photonique commune, bloquant simultanément les deux polarisations, est limitée aux structures connectées. En revanche, les structures déconnectées se révèlent plus performantes pour l'obtention de larges bandes interdites photoniques spécifiques au mode TE. Par ailleurs, une convergence notable des performances photoniques entre le silicium et l'arsénure de gallium a été mise en évidence en ce qui concerne les propriétés des bandes interdites photoniques.

Cette étude constitue une contribution essentielle à la détermination des dimensions optimales des réseaux photoniques permettant l'intégration de nouvelles fonctions optiques, telles que les cavités résonantes, les superprismes et les filtres add-drop. Ces dispositifs sont indispensables au développement de systèmes photoniques avancés destinés aux applications dans les télécommunications, les fibres optiques et les systèmes micro-ondes.

**Mots-clés :** Électromagnétisme, Cristaux photoniques, Métamatériaux, Bande interdite photonique, Si, GaAs, LiNbO<sub>3</sub>.

## Abstract

This thesis falls within the field of periodic artificial materials and focuses on the study and simulation of the photonic bandgap in metamaterials and two-dimensional (2D) photonic crystals with square and triangular lattices, in connected and disconnected configurations. Three dielectric materials of major interest for optical and telecommunications applications have been selected: silicon (Si), gallium arsenide (GaAs), and lithium niobate (LiNbO<sub>3</sub>). Considered as artificial materials with a periodic refractive index structure, they enable control over the propagation of electromagnetic waves. The fundamental property of these materials lies in the emergence of a photonic bandgap (Photonic Band Gap – PBG), which prevents light propagation in certain frequency ranges, regardless of the angle of incidence or polarization state, making them effective components for photonic control.

The study concentrates on the modeling and analysis of two-dimensional (2D) photonic crystals with square and triangular geometric lattices, in connected and disconnected configurations. These materials, of scientific and technological interest, were selected due to their remarkable photonic and optical properties. Numerical simulations were conducted using the Rsoft software, relying on the plane wave method (Plane Wave Expansion Method), to determine the optimal geometric parameters of the lattices that maximize the width of the photonic bandgap.

The results indicate that the connected triangular structure, for silicon and gallium arsenide, exhibits the widest photonic bandgap for both transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarizations. It has also been observed that the emergence of a common photonic bandgap, which simultaneously blocks both polarizations, is limited to connected structures. In contrast, disconnected structures prove more effective for achieving wide photonic bandgaps specific to the TE mode. Furthermore, a notable convergence in photonic performance between silicon and gallium arsenide has been highlighted regarding the properties of the photonic bandgaps.

This study represents an essential contribution to determining the optimal dimensions of photonic lattices, enabling the integration of new optical functions such as resonant cavities, superprisms, and add-drop filters. These devices are indispensable for the development of advanced photonic systems intended for applications in telecommunications, optical fibers, and microwave systems.

**Keywords:** Electromagnetic, Photonic crystals, Metamaterials, Photonic band gap, Si, GaAs, LiNbO<sub>3</sub>.

## الملخص

تدرج هذه الأطروحة ضمن مجال الفوتونيات، وتهدف إلى دراسة ومحاكاة البلورات الفوتونية بوصفها مواد اصطناعية ذات بنية دورية لمعامل الانكسار، تُمكّن من التحكم في انتشار الموجات الكهرومغناطيسية. وتتمثل الخاصية الأساسية لهذه المواد في ظهور **الفجوة الفوتونية الممنوعة (PBG)**، التي تمنع انتشار الضوء ضمن مجالات تردديّة محددة، بغضّ النظر عن زاوية السقوط أو حالة الاستقطاب، مما يجعلها عناصر فعالة في التحكم الفوتوني.

تركز الدراسة على نمذجة وتحليل بلورات فوتونية ثنائية الأبعاد (2D) ذات شبكات هندسية مربعة ومثلثية، في حالتي البني المتصلة وغير المتصلة. وقد تم اختبار ثلاثة مماثلة ذات أهمية علمية وتطبيقية في مجال الفوتونيات، وهي: السيليكون (Si)، وأرسنيد gallium(GaAs)، ونيوبات الليثيوم (LiNbO<sub>3</sub>) ، وذلك لما تتمتع به من خصائص فوتونية وانكسارية متميزة. أجريت عمليات المحاكاة العددية باستخدام برنامج **Rsoft** بالاعتماد على **(Plane Wave Expansion Method)**، بهدف تحديد القيم المثلثية لأبعاد الشبكة البلورية التي تسمح بتعظيم عرض الفجوة الفوتونية الممنوعة.

أظهرت النتائج أن البنيتين المثلثية والمتصلة لكلٍ من السيليكون وأرسنيد gallium تحقق أوسع فجوة فوتونية ممنوعة لكل من وضعية الاستقطاب العرضي المغناطيسي (TM) والعرضي الكهربائي (TE). كما بيّنت الدراسة أن ظهور فجوة فوتونية ممنوعة مشتركة، القادرة على حجب كلّ نمط الاستقطاب في آن واحد، يقتصر على الهياكل المتصلة. في المقابل، أظهرت الهياكل غير المتصلة كفاءة أعلى في تحقيق فجوات فوتونية ممنوعة واسعة، خاصةً بنمط الاستقطاب إضافةً إلى ذلك، كشفت النتائج عن تقارب ملحوظ في الأداء الفوتوني بين مادتي السيليكون وأرسنيد gallium من حيث خصائص الفجوات الفوتونية الممنوعة TE.

تُعد هذه الدراسة حاسمة في تحديد أبعاد الشبكة المثلثية التي تسمح بدمج وظائف فوتونية متقدمة، مثل التجاويف الرنينية، والموشورات الفانقة، ومرشحات الإضافة والحذف. وتُعد هذه التقنيات أساسية لتطوير أجهزة فوتونية متقدمة تُستخدم في مجالات الاتصالات، والألياف البصرية، وأنظمة الميكروويف.

**الكلمات المفتاحية :** الكهرومغناطيسية، البلورات الفوتونية، المواد الفوقية (الميتا)، الفجوة الفوتونية الممنوعة، Si، GaAs، LiNbO.

# Annexes

Résultats des simulations des Valeurs de la largeur de bande interdite, du rayon et de la période d'un réseau nécessaire à la réalisation d'une structure bande interdite photonique à la longueur d'onde 1,55 µm en fonction du rapport r/a.

Annexe 01 : Structure triangulaire et carrée du silicium connectée et déconnecté.

Si_hex_C							Joint
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0.4175	1	0.375414	0.370624	0.380205	9,581	242,940	581,892
0.4200	1	0.377940	0.372237	0.383644	11,407	246,039	585,807
0.4225	1	0.380683	0.374078	0.387288	13,209	249,300	590,059
0.4225	2	0.837048	0.832052	0.842045	9,993	548,162	1297,425
0.4250	1	0.383880	0.376416	0.391343	14,927	252,881	595,013
0.4250	2	0.849431	0.843815	0.855046	11,231	559,563	1316,618
0.4275	1	0.386875	0.378430	0.395319	16,890	256,353	599,656
0.4275	2	0.861065	0.855582	0.866548	10,966	570,563	1334,651
0.4300	1	0.389815	0.380330	0.399300	18,970	259,812	604,213
0.4300	2	0.871571	0.866368	0.876774	10,406	580,902	1350,935
0.4325	1	0.392896	0.382358	0.403435	21,077	263,388	608,989
0.4325	2	0.882515	0.877312	0.887717	10,405	591,616	1367,898
0.4350	1	0.396602	0.385071	0.408132	23,061	267,409	614,733
0.4350	2	0.895833	0.890363	0.901303	10,940	604,015	1388,541
0.4375	1	0.400104	0.387393	0.412814	25,421	271,320	620,161
0.4375	2	0.909819	0.904535	0.915103	10,568	616,971	1410,220
0.4400	1	0.403542	0.389574	0.417510	27,936	275,216	625,490
0.4400	2	0.924352	0.919004	0.929700	10,696	630,408	1432,745
0.4425	1	0.407008	0.391740	0.422275	30,535	279,156	630,862
0.4425	2	0.937847	0.932474	0.943219	10,745	643,246	1453,662
0.4450	1	0.411329	0.394795	0.427863	33,068	283,714	637,560
0.4450	2	0.954546	0.948708	0.960384	11,676	658,398	1479,547
0.4475	1	0.415466	0.397477	0.433455	35,978	288,177	643,972
0.4475	2	0.971366	0.965362	0.977370	12,008	673,763	1505,617
0.4500	1	0.419524	0.399985	0.439064	39,079	292,618	650,263
0.4500	2	0.988899	0.982986	0.994813	11,827	689,757	1532,793
0.4525	1	0.423609	0.402416	0.444802	42,385	297,109	656,594
0.4550	1	0.428534	0.405697	0.451372	45,675	302,224	664,228
0.4575	1	0.433532	0.408886	0.458179	49,293	307,429	671,975
0.4600	1	0.438412	0.411857	0.464966	53,109	312,587	679,538
0.4625	1	0.443376	0.414843	0.471909	57,067	317,845	687,233
0.4650	1	0.448705	0.418229	0.479182	60,954	323,404	695,494
0.4675	1	0.455757	0.424107	0.487406	63,299	330,253	706,423
0.4700	1	0.462091	0.428628	0.495554	66,927	336,633	716,241
0.4725	1	0.468461	0.432990	0.503931	70,941	343,089	726,114
0.4750	1	0.474902	0.437283	0.512521	75,238	349,647	736,098
0.4775	1	0.483461	0.444681	0.522241	77,560	357,821	749,364
0.4800	1	0.489050	0.450613	0.527487	76,873	363,853	758,028
0.4825	1	0.493021	0.456164	0.529877	73,713	368,718	764,182
0.4850	1	0.496852	0.461751	0.531953	70,202	373,508	770,120
0.4875	1	0.502482	0.470506	0.534458	63,951	379,688	778,847
0.4900	1	0.507442	0.478121	0.536764	58,643	385,402	786,535
0.4925	1	0.512033	0.485094	0.538972	53,878	390,873	793,651
0.4950	1	0.519290	0.497614	0.540967	43,353	398,425	804,900
0.4975	1	0.531519	0.519573	0.543466	23,893	409,868	823,855
Si_hex_C							TE
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0.3725	1	0.623357	0.618676	0.628038	9,362	359,911	966,203
0.3750	1	0.627598	0.621287	0.633908	12,620	364,791	972,776
0.3775	1	0.631917	0.623843	0.639990	16,147	369,750	979,471
0.3800	1	0.636335	0.626428	0.646243	19,814	374,802	986,320
0.3825	1	0.641283	0.629921	0.652644	22,723	380,201	993,988
0.3850	1	0.646020	0.632911	0.659129	26,219	385,512	1001,331
0.3875	1	0.650918	0.636037	0.665800	29,763	390,958	1008,923
0.3900	1	0.655967	0.639337	0.672597	33,259	396,532	1016,749
0.3925	1	0.605065	0.600637	0.609493	8,855	368,106	937,851
0.3925	2	0.661539	0.643507	0.679571	36,064	402,464	1025,385
0.3950	1	0.609492	0.603451	0.615533	12,081	373,162	944,713
0.3950	2	0.666950	0.647278	0.686623	39,345	408,340	1033,773
0.3975	1	0.613751	0.606107	0.621395	15,288	378,147	951,314
0.3975	2	0.672339	0.650904	0.693773	42,869	414,245	1042,125
0.4000	1	0.617920	0.608655	0.627185	18,530	383,110	957,776
0.4000	2	0.677538	0.654852	0.700225	45,372	420,074	1050,184

0,4025	1	0,623205	0,612067	0,634342	22,275	388,802	965,967
0,4025	2	0,683062	0,660869	0,705255	44,387	426,145	1058,746
0,4050	1	0,625951	0,615319	0,636583	21,264	392,941	970,224
0,4050	2	0,687953	0,666357	0,709549	43,192	431,863	1066,328
0,4075	1	0,628602	0,618319	0,638885	20,566	397,041	974,333
0,4075	2	0,692523	0,671346	0,713699	42,353	437,415	1073,410
0,4100	1	0,631295	0,621291	0,641299	20,008	401,188	978,507
0,4100	2	0,696923	0,676104	0,717742	41,638	442,895	1080,231
0,4125	1	0,634509	0,625024	0,643994	18,970	405,689	983,488
0,4125	2	0,701913	0,681537	0,722289	40,752	448,785	1087,965
0,4150	1	0,638253	0,629668	0,646837	17,169	410,556	989,292
0,4150	2	0,707823	0,687896	0,727751	39,855	455,307	1097,126
0,4175	1	0,375414	0,370624	0,380205	9,581	242,940	581,892
0,4175	2	0,641631	0,633667	0,649595	15,928	415,216	994,528
0,4175	3	0,712834	0,693195	0,732473	39,278	461,293	1104,893
0,4200	1	0,377940	0,372237	0,383644	11,407	246,039	585,807
0,4200	2	0,645011	0,637617	0,652404	14,786	419,902	999,766
0,4200	3	0,717356	0,698253	0,736459	38,205	466,999	1111,902
0,4225	1	0,380683	0,374078	0,387288	13,209	249,300	590,059
0,4225	2	0,648683	0,641996	0,655371	13,375	424,807	1005,459
0,4225	3	0,722843	0,704294	0,741393	37,099	473,372	1120,407
0,4250	1	0,383880	0,376416	0,391343	14,927	252,881	595,013
0,4250	2	0,652947	0,647410	0,658485	11,075	430,129	1012,068
0,4250	3	0,729719	0,711740	0,747698	35,959	480,702	1131,064
0,4275	1	0,386875	0,378430	0,395319	16,890	256,353	599,656
0,4275	2	0,656942	0,652420	0,661464	9,044	435,306	1018,260
0,4275	3	0,735425	0,718408	0,752442	34,034	487,311	1139,909
0,4300	1	0,389815	0,380330	0,399300	18,970	259,812	604,213
0,4300	2	0,740899	0,724798	0,757001	32,203	493,809	1148,394
0,4325	1	0,392896	0,382358	0,403435	21,077	263,388	608,989
0,4325	2	0,746733	0,731500	0,761966	30,466	500,591	1157,436
0,4350	1	0,396602	0,385071	0,408132	23,061	267,409	614,733
0,4350	2	0,754191	0,739898	0,768485	28,587	508,514	1168,997
0,4375	1	0,400104	0,387393	0,412814	25,421	271,320	620,161
0,4375	2	0,760355	0,747124	0,773586	26,462	515,616	1178,551
0,4400	1	0,403542	0,389574	0,417510	27,936	275,216	625,490
0,4400	2	0,766242	0,753881	0,778602	24,721	522,577	1187,675
0,4425	1	0,407008	0,391740	0,422275	30,535	279,156	630,862
0,4425	2	0,772113	0,760642	0,783584	22,943	529,573	1196,775
0,4450	1	0,411329	0,394795	0,427863	33,068	283,714	637,560
0,4450	2	0,780090	0,769840	0,790340	20,499	538,067	1209,140
0,4475	1	0,415466	0,397477	0,433455	35,978	288,177	643,972
0,4475	2	0,786777	0,777734	0,795819	18,084	545,728	1219,504
0,4500	1	0,419524	0,399985	0,439064	39,079	292,618	650,263
0,4500	2	0,793118	0,785121	0,801115	15,994	553,200	1229,333
0,4525	1	0,423609	0,402416	0,444802	42,385	297,109	656,594
0,4525	2	0,799484	0,792469	0,806499	14,030	560,738	1239,200
0,4550	1	0,428534	0,405697	0,451372	45,675	302,224	664,228
0,4550	2	0,807059	0,801436	0,812682	11,246	569,178	1250,941
0,4575	1	0,433532	0,408886	0,458179	49,293	307,429	671,975
0,4600	1	0,438412	0,411857	0,464966	53,109	312,587	679,538
0,4625	1	0,443376	0,414843	0,471909	57,067	317,845	687,233
0,4625	2	0,720184	0,715010	0,725359	10,349	516,282	1116,286
0,4650	1	0,448705	0,418229	0,479182	60,954	323,404	695,494
0,4650	2	0,726969	0,720383	0,733555	13,172	523,963	1126,802
0,4675	1	0,455757	0,424107	0,487406	63,299	330,253	706,423
0,4675	2	0,736084	0,727915	0,744253	16,338	533,385	1140,930
0,4675	3	0,845911	0,838508	0,853314	14,806	612,969	1311,163
0,4700	1	0,462091	0,428628	0,495554	66,927	336,633	716,241
0,4700	2	0,744118	0,733887	0,754349	20,462	542,090	1153,383
0,4700	3	0,855170	0,844308	0,866032	21,723	622,991	1325,514
0,4725	1	0,468461	0,432990	0,503931	70,941	343,089	726,114
0,4725	2	0,752274	0,739463	0,765085	25,622	550,947	1166,025
0,4725	3	0,864831	0,850694	0,878968	28,274	633,381	1340,488
0,4750	1	0,474902	0,437283	0,512521	75,238	349,647	736,098
0,4750	2	0,760466	0,744838	0,776093	31,254	559,893	1178,722
0,4750	3	0,875522	0,858556	0,892488	33,932	644,603	1357,059
0,4775	1	0,483461	0,444681	0,522241	77,560	357,821	749,364
0,4775	2	0,771065	0,752111	0,790019	37,908	570,685	1195,151
0,4775	3	0,891062	0,871364	0,910760	39,396	659,497	1381,146
0,4800	1	0,491247	0,450613	0,531881	81,268	365,488	761,433
0,4800	2	0,780792	0,757821	0,803763	45,942	580,909	1210,227
0,4800	3	0,904735	0,882160	0,927311	45,151	673,123	1402,340
0,4825	1	0,498993	0,456164	0,541822	85,657	373,184	773,439
0,4825	2	0,790727	0,762750	0,818704	55,954	591,365	1225,627
0,4825	3	0,918651	0,893315	0,943987	50,672	687,036	1423,909
0,4850	1	0,506791	0,461751	0,551832	90,081	380,980	785,527
0,4850	2	0,800877	0,767287	0,834468	67,181	602,060	1241,360

0,4850	3	0,933340	0,905376	0,961305	55,929	701,639	1446,678
0,4875	1	0,516754	0,470506	0,563001	92,495	390,472	800,968
0,4875	2	0,818774	0,784014	0,853534	69,520	618,686	1269,099
0,4875	3	0,953083	0,922847	0,983318	60,470	720,173	1477,278
0,4900	1	0,525977	0,478121	0,573833	95,712	399,480	815,264
0,4900	2	0,837768	0,803332	0,872204	68,872	636,285	1298,540
0,4900	3	0,972271	0,940191	1,004352	64,160	738,440	1507,021
0,4925	1	0,534918	0,485094	0,584742	99,648	408,343	829,123
0,4925	2	0,858676	0,824248	0,893104	68,855	655,492	1330,948
0,4925	3	0,991580	0,958254	1,024906	66,652	756,948	1536,949
0,4950	1	0,543695	0,492048	0,595343	103,295	417,150	842,728
0,4950	2	0,880149	0,846241	0,914058	67,817	675,295	1364,232
0,4950	3	1,011623	0,977264	1,045982	68,718	776,167	1568,015
0,4975	1	0,554503	0,502353	0,606654	104,301	427,591	859,480
0,4975	2	0,904837	0,870420	0,939253	68,833	697,742	1402,497
0,4975	3	1,037226	1,003810	1,070642	66,831	799,831	1607,700
0,5000	1	0,564858	0,512128	0,617588	105,460	437,765	875,530
0,5000	2	0,930063	0,896915	0,963210	66,294	720,798	1441,597
0,5000	3	1,063294	1,031143	1,095445	64,303	824,053	1648,106
0,5025	1	0,573585	0,521124	0,626046	104,922	446,751	889,057
0,5025	2	0,954481	0,920081	0,988881	68,799	743,421	1479,446
0,5025	3	1,085908	1,057569	1,114247	56,678	845,786	1683,157
0,5050	1	0,580823	0,529546	0,632101	102,555	454,640	900,276
0,5050	2	0,815251	0,800295	0,830207	29,912	638,138	1263,639
0,5050	3	0,973973	0,938550	1,009396	70,846	762,377	1509,658
0,5050	4	1,105270	1,082299	1,128240	45,941	865,150	1713,168
0,5075	1	0,589779	0,541347	0,638211	96,865	463,935	914,157
0,5075	2	0,828444	0,804136	0,852751	48,615	651,674	1284,087
0,5075	3	0,995446	0,957152	1,033741	76,589	783,043	1542,942
0,5075	4	1,129610	1,116059	1,143162	27,104	888,580	1750,896
0,5100	1	0,598204	0,553142	0,643266	90,124	472,880	927,216
0,5100	2	0,840412	0,808112	0,872713	64,601	664,346	1302,639
0,5100	3	1,013119	0,972863	1,053374	80,512	800,870	1570,334
0,5125	1	0,605482	0,563637	0,647327	83,690	480,980	938,497
0,5125	2	0,851634	0,811881	0,891387	79,506	676,517	1320,032
0,5125	3	1,028486	0,986998	1,069974	82,977	817,004	1594,153
0,5150	1	0,612432	0,573964	0,650900	76,935	488,874	949,270
0,5150	2	0,862910	0,815922	0,909898	93,977	688,818	1337,510
0,5150	3	1,042326	1,000944	1,083709	82,766	832,037	1615,606
0,5175	1	0,621350	0,589210	0,653491	64,281	498,401	963,093
0,5175	2	0,873407	0,824847	0,921967	97,120	700,582	1353,781
0,5175	3	1,056745	1,017996	1,095493	77,497	847,641	1637,954
0,5200	1	0,632440	0,608519	0,656362	47,842	509,747	980,283
0,5200	2	0,887061	0,836070	0,938053	101,983	714,971	1374,945
0,5200	3	1,076386	1,044829	1,107943	63,114	867,567	1668,398
0,5225	1	0,641099	0,624207	0,657990	33,783	519,210	993,703
0,5225	2	0,896683	0,845751	0,947616	101,865	726,201	1389,859
0,5225	3	1,089495	1,061597	1,117394	55,797	882,355	1688,718
0,5250	1	0,649604	0,639790	0,659418	19,628	528,615	1006,886
0,5250	2	0,905978	0,855536	0,956420	100,884	737,240	1404,266
0,5250	3	1,100974	1,076667	1,125281	48,614	895,917	1706,509
0,5275	1	0,915823	0,867120	0,964525	97,405	748,799	1419,525
0,5275	2	1,111193	1,090518	1,131868	41,350	908,539	1722,349
0,5300	1	0,931720	0,892036	0,971405	79,369	765,408	1444,166
0,5300	2	1,121550	1,105784	1,137316	31,531	921,353	1738,402
0,5325	1	0,943317	0,908974	0,977659	68,685	778,590	1462,141
0,5325	2	1,128887	1,116103	1,141670	25,566	931,755	1749,774
0,5350	1	0,953635	0,924989	0,982281	57,293	790,802	1478,134
0,5350	2	1,134247	1,123994	1,144501	20,507	940,575	1758,084
0,5375	1	0,960796	0,937385	0,984207	46,822	800,463	1489,234
0,5400	1	0,979744	0,971819	0,987669	15,850	820,046	1518,604

Si_hex_C						TM	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2000	1	0,201580	0,195188	0,207971	12,782	62,490	312,448
0,2025	1	0,202154	0,195324	0,208983	13,659	63,451	313,338
0,2050	1	0,203013	0,195521	0,210504	14,983	64,507	314,670
0,2075	1	0,203667	0,195692	0,211641	15,948	65,504	315,683
0,2100	1	0,204273	0,195858	0,212688	16,830	66,491	316,623
0,2125	1	0,204863	0,196020	0,213706	17,685	67,477	317,538
0,2150	1	0,205736	0,196230	0,215242	19,011	68,562	318,891
0,2175	1	0,206446	0,196422	0,216469	20,047	69,598	319,991
0,2200	1	0,207132	0,196606	0,217658	21,053	70,632	321,054
0,2225	1	0,207737	0,196785	0,218689	21,904	71,643	321,992
0,2250	1	0,208618	0,197004	0,220232	23,228	72,755	323,357
0,2275	1	0,209470	0,197218	0,221722	24,504	73,864	324,678

0,2300	1	0,210240	0,197419	0,223061	25,643	74,951	325,872
0,2325	1	0,210942	0,197616	0,224268	26,651	76,018	326,960
0,2350	1	0,211864	0,197850	0,225878	28,028	77,172	328,390
0,2375	1	0,212845	0,198089	0,227600	29,510	78,353	329,909
0,2400	1	0,213699	0,198313	0,229084	30,771	79,496	331,233
0,2425	1	0,214465	0,198535	0,230396	31,861	80,612	332,421
0,2450	1	0,215324	0,198783	0,231865	33,082	81,769	333,753
0,2450	2	0,545989	0,542707	0,549271	6,564	207,339	846,283
0,2475	1	0,216411	0,199071	0,233750	34,678	83,021	335,436
0,2475	2	0,548154	0,544199	0,552109	7,910	210,286	849,639
0,2500	1	0,217318	0,199336	0,235301	35,965	84,211	336,843
0,2500	2	0,550183	0,545412	0,554954	9,542	213,196	852,783
0,2525	1	0,218167	0,199599	0,236734	37,136	85,385	338,158
0,2525	2	0,552269	0,546631	0,557906	11,275	216,144	856,016
0,2550	1	0,218985	0,199865	0,238105	38,241	86,554	339,427
0,2550	2	0,554356	0,547769	0,560942	13,173	219,109	859,251
0,2575	1	0,220165	0,200241	0,240089	39,848	87,873	341,255
0,2575	2	0,556924	0,549812	0,564036	14,224	222,282	863,233
0,2600	1	0,221154	0,200558	0,241751	41,194	89,125	342,789
0,2600	2	0,559234	0,551391	0,567078	15,687	225,371	866,813
0,2625	1	0,222142	0,200868	0,243416	42,548	90,384	344,320
0,2625	2	0,561733	0,553144	0,570322	17,179	228,555	870,686
0,2650	1	0,223023	0,201176	0,244870	43,695	91,607	345,686
0,2650	2	0,563896	0,554484	0,573307	18,823	231,620	874,038
0,2675	1	0,224323	0,201587	0,247058	45,471	93,010	347,700
0,2675	2	0,566570	0,556845	0,576296	19,451	234,914	878,184
0,2700	1	0,225416	0,201948	0,248883	46,935	94,337	349,395
0,2700	2	0,569261	0,558876	0,579645	20,769	238,236	882,354
0,2725	1	0,226471	0,202295	0,250646	48,351	95,656	351,030
0,2725	2	0,571716	0,560706	0,582727	22,022	241,479	886,160
0,2750	1	0,227415	0,202639	0,252191	49,552	96,936	352,493
0,2750	2	0,574165	0,562338	0,585991	23,653	244,738	889,955
0,2775	1	0,228737	0,203072	0,254401	51,329	98,385	354,542
0,2775	2	0,577113	0,564684	0,589542	24,858	248,231	894,525
0,2800	1	0,229943	0,203474	0,256412	52,939	99,795	356,412
0,2800	2	0,579726	0,566712	0,592739	26,026	251,601	898,575
0,2825	1	0,231148	0,203853	0,258444	54,591	101,214	358,280
0,2825	2	0,582518	0,568954	0,596082	27,128	255,070	902,903
0,2850	1	0,232184	0,204236	0,260133	55,897	102,567	359,886
0,2850	2	0,585260	0,570839	0,599680	28,841	258,538	907,152
0,2875	1	0,233623	0,204700	0,262546	57,846	104,108	362,115
0,2875	2	0,587737	0,572987	0,602486	29,499	261,910	910,992
0,2900	1	0,235004	0,205152	0,264856	59,704	105,634	364,256
0,2900	2	0,589936	0,575179	0,604692	29,513	265,176	914,400
0,2925	1	0,236323	0,205570	0,267075	61,505	107,143	366,300
0,2925	2	0,592162	0,577492	0,606831	29,339	268,471	917,851
0,2950	1	0,237499	0,205997	0,269002	63,005	108,597	368,124
0,2950	2	0,594106	0,579341	0,608872	29,531	271,655	920,865
0,2975	1	0,238930	0,206488	0,271372	64,884	110,177	370,342
0,2975	2	0,596310	0,581497	0,611122	29,625	274,973	924,280
0,3000	1	0,240423	0,207011	0,273835	66,824	111,797	372,656
0,3000	2	0,598687	0,583777	0,613598	29,820	278,390	927,965
0,3025	1	0,241811	0,207490	0,276132	68,642	113,379	374,807
0,3025	2	0,600873	0,585811	0,615935	30,123	281,734	931,353
0,3050	1	0,243100	0,207971	0,278228	70,257	114,925	376,805
0,3050	2	0,602954	0,587680	0,618227	30,547	285,046	934,579
0,3075	1	0,244490	0,208502	0,280479	71,976	116,530	378,960
0,3075	2	0,605240	0,589850	0,620630	30,781	288,473	938,122
0,3100	1	0,246142	0,209134	0,283149	74,015	118,271	381,519
0,3100	2	0,608030	0,592656	0,623404	30,749	292,158	942,447
0,3125	1	0,247600	0,209710	0,285490	75,780	119,931	383,780
0,3125	2	0,610425	0,595016	0,625833	30,817	295,675	946,158
0,3150	1	0,249033	0,210286	0,287780	77,494	121,591	386,002
0,3150	2	0,612827	0,597412	0,628242	30,829	299,213	949,882
0,3175	1	0,250374	0,210845	0,289902	79,058	123,215	388,079
0,3175	2	0,614927	0,599584	0,630271	30,687	302,621	953,137
0,3200	1	0,252313	0,211572	0,293054	81,481	125,147	391,085
0,3200	2	0,617964	0,603224	0,632703	29,480	306,510	957,844
0,3225	1	0,253948	0,212224	0,295673	83,449	126,942	393,620
0,3225	2	0,620652	0,606249	0,635055	28,806	310,248	962,010
0,3250	1	0,255535	0,212869	0,298201	85,332	128,726	396,079
0,3250	2	0,623078	0,608763	0,637393	28,630	313,875	965,770
0,3275	1	0,257020	0,213506	0,300534	87,028	130,470	398,381
0,3275	2	0,625364	0,611263	0,639466	28,204	317,451	969,315
0,3300	1	0,259148	0,214282	0,304014	89,732	132,554	401,680
0,3300	2	0,628687	0,615458	0,641916	26,458	321,573	974,464
0,3325	1	0,260872	0,215003	0,306741	91,738	134,447	404,352

0,3325	2	0,631315	0,618572	0,644058	25,486	325,364	978,538
0,3350	1	0,262540	0,215719	0,309360	93,641	136,324	406,937
0,3350	2	0,633867	0,621451	0,646283	24,833	329,136	982,494
0,3375	1	0,264165	0,216439	0,311892	95,454	138,192	409,456
0,3375	2	0,636406	0,624370	0,648441	24,072	332,920	986,429
0,3400	1	0,266515	0,217289	0,315741	98,452	140,453	413,098
0,3400	2	0,639833	0,628618	0,651048	22,430	337,192	991,741
0,3425	1	0,268515	0,218128	0,318902	100,774	142,548	416,198
0,3425	2	0,642844	0,632207	0,653481	21,274	341,270	996,408
0,3450	1	0,270373	0,218943	0,321803	102,860	144,582	419,078
0,3450	2	0,645844	0,635959	0,655729	19,770	345,365	1001,058
0,3475	1	0,272178	0,219763	0,324593	104,829	146,602	421,876
0,3475	2	0,648475	0,638912	0,658039	19,127	349,285	1005,137
0,3500	1	0,274516	0,220688	0,328344	107,657	148,925	425,500
0,3500	2	0,651956	0,643087	0,660825	17,737	353,686	1010,532
0,3525	1	0,276771	0,221630	0,331912	110,282	151,221	428,995
0,3525	2	0,655291	0,646937	0,663644	16,706	358,034	1015,700
0,3550	1	0,278892	0,222569	0,335215	112,645	153,460	432,283
0,3550	2	0,658674	0,650758	0,666590	15,832	362,435	1020,944
0,3575	1	0,280840	0,223488	0,338192	114,705	155,620	435,302
0,3575	2	0,661704	0,653968	0,669440	15,472	366,667	1025,641
0,3600	1	0,283034	0,224522	0,341546	117,024	157,933	438,703
0,3600	2	0,665375	0,658231	0,672519	14,288	371,279	1031,332
0,3625	1	0,285396	0,225627	0,345164	119,537	160,357	442,363
0,3625	2	0,669335	0,662663	0,676006	13,344	376,082	1037,469
0,3650	1	0,287683	0,226699	0,348668	121,969	162,757	445,909
0,3650	2	0,673539	0,667121	0,679957	12,836	381,055	1043,986
0,3675	1	0,289788	0,227744	0,351831	124,087	165,070	449,171
0,3675	2	0,677446	0,671122	0,683770	12,648	385,890	1050,041
0,3700	1	0,292007	0,228878	0,355136	126,257	167,466	452,611
0,3700	2	0,681619	0,675364	0,687874	12,510	390,908	1056,509
0,3725	1	0,294653	0,230172	0,359135	128,963	170,125	456,713
0,3725	2	0,686257	0,680732	0,691782	11,050	396,227	1063,698
0,3750	1	0,297088	0,231354	0,362822	131,468	172,682	460,486
0,3750	2	0,690566	0,685803	0,695329	9,526	401,392	1070,378
0,3775	1	0,299437	0,232558	0,366316	133,758	175,208	464,127
0,3800	1	0,301680	0,233787	0,369572	135,785	177,689	467,604
0,3825	1	0,304746	0,235286	0,374205	138,918	180,676	472,356
0,3850	1	0,307479	0,236641	0,378316	141,675	183,488	476,592
0,3875	1	0,310091	0,238037	0,382145	144,108	186,248	480,641
0,3900	1	0,312574	0,239426	0,385722	146,296	188,951	484,489
0,3925	1	0,315843	0,241089	0,390596	149,507	192,151	489,556
0,3925	2	0,645531	0,641067	0,649995	8,927	392,725	1000,573
0,3950	1	0,318818	0,242649	0,394987	152,338	195,196	494,168
0,3975	1	0,321593	0,244243	0,398944	154,701	198,142	498,470
0,4000	1	0,324259	0,245859	0,402658	156,799	201,040	502,601
0,4025	1	0,327793	0,247802	0,407784	159,982	204,502	508,079
0,4050	1	0,331054	0,249682	0,412427	162,745	207,819	513,134
0,4075	1	0,334194	0,251546	0,416842	165,296	211,085	518,000
0,4100	1	0,337113	0,253474	0,420753	167,279	214,236	522,526
0,4125	1	0,340193	0,255608	0,424778	169,170	217,511	527,299
0,4150	1	0,343672	0,258006	0,429337	171,330	221,067	532,691
0,4175	1	0,347036	0,260280	0,433792	173,511	224,576	537,906
0,4200	1	0,350039	0,262481	0,437596	175,115	227,875	542,560
0,4225	1	0,353312	0,264895	0,441729	176,834	231,375	547,634
0,4225	2	0,837048	0,832052	0,842045	9,993	548,162	1297,425
0,4250	1	0,356927	0,267607	0,446248	178,641	235,126	553,237
0,4250	2	0,849431	0,843815	0,855046	11,231	559,563	1316,618
0,4275	1	0,360353	0,270210	0,450496	180,286	238,779	558,547
0,4275	2	0,861065	0,855582	0,866548	10,966	570,563	1334,651
0,4300	1	0,363655	0,272794	0,454516	181,722	242,376	563,666
0,4300	2	0,871571	0,866368	0,876774	10,406	580,902	1350,935
0,4325	1	0,367043	0,275504	0,458582	183,078	246,056	568,916
0,4325	2	0,882515	0,877312	0,887717	10,405	591,616	1367,898
0,4350	1	0,370960	0,278579	0,463341	184,763	250,120	574,988
0,4350	2	0,895833	0,890363	0,901303	10,940	604,015	1388,541
0,4375	1	0,374619	0,281714	0,467524	185,810	254,038	580,659
0,4375	2	0,909819	0,904535	0,915103	10,568	616,971	1410,220
0,4400	1	0,378236	0,284833	0,471639	186,806	257,957	586,266
0,4400	2	0,924352	0,919004	0,929700	10,696	630,408	1432,745
0,4425	1	0,381655	0,287996	0,475314	187,318	261,768	591,565
0,4425	2	0,937847	0,932474	0,943219	10,745	643,246	1453,662
0,4450	1	0,386039	0,291792	0,480287	188,496	266,271	598,361
0,4450	2	0,954546	0,948708	0,960384	11,676	658,398	1479,547
0,4475	1	0,390080	0,295793	0,484367	188,574	270,569	604,624
0,4475	2	0,801371	0,796030	0,806713	10,683	555,851	1242,125
0,4475	3	0,971366	0,965362	0,977370	12,008	673,763	1505,617

0,4500	1	0,394042	0,299742	0,488342	188,600	274,844	610,765
0,4500	2	0,810595	0,804367	0,816822	12,455	565,390	1256,422
0,4500	3	0,988899	0,982986	0,994813	11,827	689,757	1532,793
0,4525	1	0,397856	0,303753	0,491959	188,207	279,046	616,677
0,4525	2	0,819146	0,812918	0,825374	12,456	574,529	1269,676
0,4550	1	0,402461	0,308577	0,496344	187,766	283,835	623,814
0,4550	2	0,829532	0,823536	0,835528	11,992	585,028	1285,775
0,4575	1	0,406989	0,313764	0,500215	186,452	288,606	630,834
0,4575	2	0,839786	0,832789	0,846783	13,993	595,513	1301,668
0,4600	1	0,411629	0,319152	0,504105	184,953	293,491	638,024
0,4600	2	0,849401	0,842391	0,856412	14,021	605,623	1316,572
0,4625	1	0,415998	0,324698	0,507299	182,601	298,219	644,797
0,4625	2	0,858050	0,851826	0,864274	12,448	615,115	1329,978
0,4650	1	0,420483	0,330637	0,510328	179,690	303,063	651,748
0,4675	1	0,426142	0,338658	0,513627	174,969	308,793	660,520
0,4700	1	0,431229	0,345769	0,516688	170,919	314,150	668,404
0,4725	1	0,437872	0,356346	0,519398	163,052	320,686	678,701
0,4750	1	0,443559	0,365141	0,521977	156,836	326,571	687,517
0,4775	1	0,452055	0,379215	0,524895	145,680	334,577	700,685
0,4800	1	0,459394	0,391302	0,527487	136,185	341,789	712,061
0,4825	1	0,467701	0,405525	0,529877	124,352	349,782	724,937
0,4850	1	0,474205	0,416458	0,531953	115,495	356,484	735,018
0,4875	1	0,488754	0,443050	0,534458	91,407	369,315	757,569
0,4900	1	0,492866	0,448968	0,536764	87,795	374,332	763,942
0,4925	1	0,508792	0,478612	0,538972	60,360	388,399	788,628
0,4950	1	0,519290	0,497614	0,540967	43,353	398,425	804,900
0,4975	1	0,531519	0,519573	0,543466	23,893	409,868	823,855

Si hex D						TE	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2000	1	0,360190	0,274916	0,445464	170,548	111,659	558,294
0,2000	2	0,577222	0,562218	0,592225	30,007	178,939	894,694
0,2025	1	0,357848	0,273287	0,442410	169,124	112,320	554,665
0,2025	2	0,574766	0,557631	0,591901	34,269	180,405	890,887
0,2050	1	0,353862	0,271112	0,436613	165,501	112,440	548,487
0,2050	2	0,571109	0,550834	0,591384	40,550	181,470	885,220
0,2075	1	0,350956	0,269345	0,432567	163,221	112,876	543,982
0,2075	2	0,568179	0,545459	0,590898	45,439	182,741	880,677
0,2100	1	0,348432	0,267739	0,429125	161,386	113,415	540,069
0,2100	2	0,565506	0,540602	0,590411	49,809	184,072	876,535
0,2125	1	0,346139	0,266249	0,426030	159,781	114,010	536,516
0,2125	2	0,563278	0,536668	0,589888	53,219	185,530	873,081
0,2150	1	0,342624	0,264347	0,420901	156,553	114,179	531,067
0,2150	2	0,559937	0,530656	0,589218	58,562	186,599	867,903
0,2175	1	0,339788	0,262698	0,416878	154,180	114,551	526,671
0,2175	2	0,557201	0,525835	0,588568	62,734	187,847	863,662
0,2200	1	0,337348	0,261209	0,413487	152,278	115,036	522,889
0,2200	2	0,554674	0,521444	0,587904	66,460	189,144	859,744
0,2225	1	0,335136	0,259823	0,410449	150,626	115,580	519,461
0,2225	2	0,552417	0,517633	0,587200	69,567	190,515	856,246
0,2250	1	0,331940	0,258088	0,405792	147,704	115,764	514,507
0,2250	2	0,549256	0,512126	0,586386	74,261	191,553	851,347
0,2275	1	0,329106	0,256492	0,401721	145,230	116,051	510,115
0,2275	2	0,546402	0,507262	0,585542	78,280	192,675	846,923
0,2275	3	0,788894	0,783322	0,794466	11,144	278,184	1222,785
0,2300	1	0,326730	0,255074	0,398385	143,310	116,479	506,431
0,2300	2	0,543807	0,502933	0,584681	81,748	193,867	842,901
0,2300	3	0,785744	0,777251	0,794238	16,987	280,118	1217,904
0,2325	1	0,324560	0,253753	0,395367	141,615	116,963	503,068
0,2325	2	0,541468	0,499137	0,583798	84,660	195,131	839,275
0,2325	3	0,782982	0,771973	0,793991	22,018	282,167	1213,622
0,2350	1	0,321734	0,252193	0,391274	139,081	117,191	498,687
0,2350	2	0,538470	0,494148	0,582792	88,644	196,138	834,629
0,2350	3	0,778643	0,763659	0,793627	29,969	283,621	1206,897
0,2375	1	0,318888	0,250628	0,387147	136,518	117,391	494,276
0,2375	2	0,535738	0,489744	0,581733	91,990	197,219	830,395
0,2375	3	0,774324	0,755412	0,793235	37,823	285,048	1200,202
0,2400	1	0,316546	0,249258	0,383835	134,577	117,755	490,647
0,2400	2	0,533185	0,485663	0,580707	95,044	198,345	826,437
0,2400	3	0,771175	0,749497	0,792853	43,356	286,877	1195,321
0,2425	1	0,314443	0,247995	0,380891	132,896	118,191	487,386
0,2425	2	0,530746	0,481878	0,579614	97,736	199,494	822,656
0,2425	3	0,768412	0,744438	0,792385	47,948	288,827	1191,038
0,2450	1	0,312113	0,246686	0,377541	130,855	118,525	483,775
0,2450	2	0,528150	0,478060	0,578239	100,178	200,565	818,632
0,2450	3	0,765081	0,738556	0,791606	53,050	290,539	1185,875

0,2475	1	0,309293	0,245240	0,373346	128,106	118,652	479,404
0,2475	2	0,525323	0,474150	0,576497	102,347	201,527	814,251
0,2475	3	0,760961	0,731449	0,790473	59,024	291,924	1179,490
0,2500	1	0,307117	0,244027	0,370207	126,180	119,008	476,032
0,2500	2	0,522723	0,470564	0,574881	104,317	202,555	810,220
0,2500	3	0,757671	0,725927	0,789416	63,489	293,598	1174,390
0,2525	1	0,305184	0,242913	0,367454	124,541	119,441	473,035
0,2525	2	0,520194	0,467146	0,573242	106,096	203,591	806,301
0,2525	3	0,754609	0,720969	0,788249	67,280	295,335	1169,645
0,2550	1	0,303390	0,241861	0,364920	123,060	119,915	470,255
0,2550	2	0,517835	0,464066	0,571605	107,539	204,674	802,645
0,2550	3	0,751951	0,716844	0,787059	70,214	297,209	1165,525
0,2575	1	0,300555	0,240533	0,360577	120,043	119,959	465,860
0,2575	2	0,514593	0,460144	0,569042	108,898	205,387	797,619
0,2575	3	0,747154	0,709395	0,784912	75,517	298,208	1158,089
0,2600	1	0,298498	0,239448	0,357547	118,099	120,295	462,671
0,2600	2	0,511916	0,456893	0,566940	110,047	206,302	793,470
0,2600	3	0,743681	0,704188	0,783174	78,986	299,704	1152,706
0,2625	1	0,296659	0,238439	0,354879	116,440	120,703	459,821
0,2625	2	0,509379	0,453828	0,564930	111,102	207,254	789,538
0,2625	3	0,740646	0,699849	0,781442	81,593	301,350	1148,001
0,2650	1	0,294973	0,237493	0,352453	114,960	121,160	457,209
0,2650	2	0,507146	0,451377	0,562916	111,539	208,310	786,077
0,2650	3	0,737801	0,695986	0,779615	83,630	303,052	1143,591
0,2675	1	0,292306	0,236263	0,348348	112,085	121,197	453,074
0,2675	2	0,503821	0,447494	0,560149	112,655	208,897	780,923
0,2675	3	0,732889	0,688769	0,777009	88,240	303,874	1135,978
0,2700	1	0,290261	0,235226	0,345297	110,071	121,474	449,905
0,2700	2	0,501160	0,444520	0,557800	113,280	209,735	776,798
0,2700	3	0,729173	0,683602	0,774744	91,142	305,159	1130,218
0,2725	1	0,288461	0,234275	0,342646	108,370	121,839	447,114
0,2725	2	0,498684	0,441808	0,555559	113,752	210,631	772,960
0,2725	3	0,725864	0,679218	0,772511	93,293	306,587	1125,090
0,2750	1	0,286825	0,233390	0,340259	106,869	122,259	444,578
0,2750	2	0,496421	0,439512	0,553329	113,817	211,599	769,452
0,2750	3	0,722800	0,675449	0,770150	94,701	308,093	1120,340
0,2775	1	0,284394	0,232259	0,336530	104,271	122,325	440,811
0,2775	2	0,493266	0,435960	0,550572	114,612	212,166	764,562
0,2775	3	0,718084	0,668832	0,767336	98,504	308,866	1113,030
0,2800	1	0,282381	0,231260	0,333502	102,242	122,553	437,690
0,2800	2	0,490594	0,433092	0,548097	115,005	212,918	760,421
0,2800	3	0,714153	0,663608	0,764699	101,091	309,942	1106,937
0,2825	1	0,280628	0,230350	0,330906	100,556	122,880	434,973
0,2825	2	0,488079	0,430392	0,545766	115,375	213,718	756,522
0,2825	3	0,710678	0,659298	0,762059	102,761	311,188	1101,552
0,2850	1	0,279031	0,229499	0,328562	99,063	123,262	432,498
0,2850	2	0,485764	0,428045	0,543483	115,438	214,586	752,934
0,2850	3	0,707448	0,655556	0,759339	103,783	312,515	1096,544
0,2875	1	0,276847	0,228461	0,325233	96,773	123,370	429,113
0,2875	2	0,482845	0,424869	0,540821	115,952	215,168	748,410
0,2875	3	0,703023	0,649671	0,756376	106,705	313,285	1089,686
0,2900	1	0,274870	0,227489	0,322251	94,761	123,554	426,049
0,2900	2	0,480267	0,422231	0,538303	116,073	215,880	744,414
0,2900	3	0,698965	0,644490	0,753439	108,948	314,185	1083,395
0,2925	1	0,273173	0,226614	0,319731	93,117	123,850	423,418
0,2925	2	0,477814	0,419669	0,535959	116,290	216,629	740,612
0,2925	3	0,695396	0,640311	0,750481	110,171	315,275	1077,864
0,2950	1	0,271631	0,225802	0,317460	91,658	124,203	421,028
0,2950	2	0,475487	0,417319	0,533655	116,335	217,416	737,005
0,2950	3	0,692038	0,636671	0,747405	110,734	316,435	1072,659
0,2975	1	0,269723	0,224889	0,314557	89,668	124,376	418,070
0,2975	2	0,472902	0,414822	0,530981	116,158	218,067	732,997
0,2975	3	0,687914	0,631887	0,743941	112,055	317,214	1066,267
0,3000	1	0,267813	0,223985	0,311641	87,656	124,533	415,111
0,3000	2	0,470294	0,412350	0,528239	115,889	218,687	728,956
0,3000	3	0,683716	0,627082	0,740351	113,269	317,928	1059,760
0,3025	1	0,266215	0,223188	0,309242	86,054	124,822	412,634
0,3025	2	0,467887	0,410043	0,525731	115,688	219,381	725,225
0,3025	3	0,680055	0,623253	0,736858	113,604	318,861	1054,086
0,3050	1	0,264771	0,222453	0,307090	84,636	125,171	410,396
0,3050	2	0,465582	0,407881	0,523283	115,401	220,104	721,652
0,3050	3	0,676594	0,619901	0,733286	113,385	319,860	1048,720
0,3075	1	0,263201	0,221708	0,304693	82,985	125,448	407,961
0,3075	2	0,463148	0,405737	0,520560	114,824	220,748	717,880
0,3075	3	0,672835	0,616214	0,729455	113,241	320,690	1042,894
0,3100	1	0,261350	0,220906	0,301794	80,888	125,579	405,093
0,3100	2	0,460441	0,403474	0,517408	113,934	221,242	713,683

0,3100	3	0,668513	0,611804	0,725222	113,418	321,221	1036,196
0,3125	1	0,259860	0,220204	0,299516	79,312	125,870	402,783
0,3125	2	0,458043	0,401391	0,514695	113,303	221,865	709,966
0,3125	3	0,664197	0,608406	0,719988	111,582	321,720	1029,506
0,3150	1	0,258506	0,219547	0,297465	77,918	126,215	400,684
0,3150	2	0,455764	0,399413	0,512116	112,703	222,527	706,434
0,3150	3	0,660154	0,605365	0,714943	109,578	322,320	1023,238
0,3175	1	0,257245	0,218925	0,295565	76,640	126,597	398,730
0,3175	2	0,453273	0,397688	0,508858	111,170	223,067	702,574
0,3175	3	0,656355	0,602580	0,710130	107,550	323,009	1017,351
0,3200	1	0,255317	0,218139	0,292494	74,356	126,637	395,741
0,3200	2	0,449748	0,395407	0,504088	108,681	223,075	697,109
0,3200	3	0,650130	0,597821	0,702438	104,617	322,464	1007,701
0,3225	1	0,253883	0,217492	0,290275	72,783	126,910	393,519
0,3225	2	0,446868	0,393527	0,500210	106,683	223,378	692,646
0,3225	3	0,645811	0,594539	0,697083	102,544	322,825	1001,007
0,3250	1	0,252580	0,216883	0,288278	71,395	127,237	391,499
0,3250	2	0,444151	0,391766	0,496535	104,769	223,741	688,433
0,3250	3	0,641833	0,591612	0,692055	100,443	323,323	994,841
0,3275	1	0,251372	0,216307	0,286436	70,129	127,603	389,626
0,3275	2	0,441685	0,390339	0,493031	102,692	224,210	684,612
0,3275	3	0,638122	0,588975	0,687269	98,294	323,927	989,089
0,3300	1	0,249567	0,215569	0,283565	67,995	127,654	386,829
0,3300	2	0,438258	0,388062	0,488453	100,391	224,169	679,299
0,3300	3	0,631920	0,584395	0,679446	95,051	323,227	979,476
0,3325	1	0,248154	0,214945	0,281363	66,418	127,892	384,639
0,3325	2	0,435498	0,386291	0,484705	98,414	224,445	675,021
0,3325	3	0,627489	0,581117	0,673862	92,745	323,392	972,608
0,3350	1	0,246890	0,214370	0,279411	65,041	128,198	382,680
0,3350	2	0,432956	0,384699	0,481213	96,515	224,812	671,081
0,3350	3	0,623551	0,578284	0,668819	90,535	323,779	966,505
0,3375	1	0,245715	0,213825	0,277606	63,781	128,540	380,859
0,3375	2	0,430598	0,383325	0,477870	94,545	225,256	667,426
0,3375	3	0,619835	0,575705	0,663965	88,260	324,251	960,744
0,3400	1	0,244003	0,213123	0,274884	61,761	128,590	378,205
0,3400	2	0,427344	0,381215	0,473474	92,259	225,211	662,384
0,3400	3	0,613715	0,571231	0,656199	84,968	323,428	951,258
0,3425	1	0,2424583	0,212507	0,272659	60,151	128,781	376,003
0,3425	2	0,424662	0,379553	0,469772	90,219	225,443	658,226
0,3425	3	0,609067	0,567836	0,650298	82,462	323,338	944,054
0,3450	1	0,241331	0,211946	0,270716	58,770	129,052	374,063
0,3450	2	0,422181	0,377951	0,466410	88,459	225,761	654,380
0,3450	3	0,605093	0,564992	0,645193	80,201	323,573	937,893
0,3475	1	0,240170	0,211415	0,268924	57,509	129,361	372,263
0,3475	2	0,419840	0,376473	0,463207	86,734	226,136	650,752
0,3475	3	0,601398	0,562403	0,640393	77,990	323,928	932,167
0,3500	1	0,238660	0,210791	0,266528	55,736	129,473	369,922
0,3500	2	0,417075	0,374843	0,459307	84,464	226,263	646,466
0,3500	3	0,596221	0,558644	0,633798	75,155	323,450	924,142
0,3525	1	0,237292	0,210213	0,264372	54,159	129,651	367,803
0,3525	2	0,414531	0,373332	0,455730	82,397	226,489	642,523
0,3525	3	0,591745	0,555400	0,628091	72,691	323,315	917,205
0,3550	1	0,236104	0,209695	0,262514	52,819	129,916	365,962
0,3550	2	0,412182	0,371885	0,452480	80,594	226,803	638,883
0,3550	3	0,588065	0,552732	0,623398	70,667	323,583	911,501
0,3575	1	0,235012	0,209214	0,260811	51,597	130,226	364,269
0,3575	2	0,409965	0,370516	0,449414	78,898	227,172	635,446
0,3575	3	0,584756	0,550363	0,619149	68,786	324,028	906,372
0,3600	1	0,233723	0,208708	0,258739	50,031	130,418	362,271
0,3600	2	0,407552	0,369130	0,445973	76,843	227,414	631,705
0,3600	3	0,580789	0,547561	0,614018	66,457	324,080	900,223
0,3625	1	0,232429	0,208209	0,256650	48,442	130,596	360,266
0,3625	2	0,405145	0,367790	0,442500	74,709	227,641	627,975
0,3625	3	0,576770	0,544734	0,608806	64,072	324,073	893,994
0,3650	1	0,231317	0,207756	0,254877	47,121	130,867	358,541
0,3650	2	0,402950	0,366508	0,439392	72,884	227,969	624,573
0,3650	3	0,573439	0,542410	0,604467	62,058	324,423	888,830
0,3675	1	0,230300	0,207338	0,253261	45,923	131,184	356,964
0,3675	2	0,400870	0,365295	0,436445	71,150	228,346	621,349
0,3675	3	0,570444	0,540379	0,600508	60,129	324,939	884,187
0,3700	1	0,229191	0,206907	0,251476	44,570	131,441	355,247
0,3700	2	0,398722	0,364090	0,433355	69,265	228,667	618,020
0,3700	3	0,567109	0,538116	0,596102	57,986	325,237	879,019
0,3725	1	0,227890	0,206435	0,249346	42,911	131,578	353,230
0,3725	2	0,396373	0,362853	0,429893	67,040	228,856	614,378
0,3725	3	0,562946	0,535276	0,590617	55,342	325,031	872,567
0,3750	1	0,226824	0,206024	0,247624	41,601	131,841	351,577

0,3750	2	0,394276	0,361707	0,426844	65,137	229,173	611,127
0,3750	3	0,559595	0,533088	0,586101	53,013	325,264	867,372
0,3775	1	0,225846	0,205638	0,246053	40,415	132,148	350,061
0,3775	2	0,392307	0,360607	0,424006	63,398	229,548	608,075
0,3775	3	0,556647	0,531194	0,582101	50,907	325,708	862,804
0,3800	1	0,224928	0,205274	0,244583	39,309	132,483	348,639
0,3800	2	0,390505	0,359690	0,421320	61,630	230,007	605,282
0,3800	3	0,553954	0,529506	0,578402	48,896	326,279	858,628
0,3825	1	0,223579	0,204812	0,242346	37,534	132,554	346,547
0,3825	2	0,388109	0,358439	0,417778	59,339	230,100	601,568
0,3825	3	0,549371	0,526437	0,572304	45,867	325,708	851,525
0,3850	1	0,222536	0,204423	0,240650	36,227	132,798	344,931
0,3850	2	0,386110	0,357400	0,414821	57,421	230,411	598,471
0,3850	3	0,545961	0,524264	0,567658	43,394	325,802	846,239
0,3875	1	0,221586	0,204059	0,239112	35,053	133,090	343,458
0,3875	2	0,384258	0,356402	0,412115	55,713	230,795	595,601
0,3875	3	0,543042	0,522449	0,563635	41,186	326,165	841,715
0,3900	1	0,220694	0,203715	0,237673	33,958	133,410	342,076
0,3900	2	0,382561	0,355589	0,409534	53,945	231,258	592,970
0,3900	3	0,540333	0,520826	0,559840	39,015	326,631	837,516
0,3925	1	0,219433	0,203280	0,235585	32,305	133,497	340,120
0,3925	2	0,380305	0,354404	0,406206	51,802	231,368	589,472
0,3925	3	0,535943	0,517894	0,553992	36,097	326,054	830,712
0,3950	1	0,218409	0,202906	0,233913	31,007	133,721	338,534
0,3950	2	0,378406	0,353450	0,403362	49,912	231,679	586,530
0,3950	3	0,532550	0,515734	0,549365	33,631	326,054	825,452
0,3975	1	0,217484	0,202561	0,232407	29,846	133,997	337,100
0,3975	2	0,376657	0,352568	0,400746	48,179	232,068	583,818
0,3975	3	0,529620	0,513945	0,545294	31,348	326,312	820,910
0,4000	1	0,216616	0,202233	0,230999	28,765	134,302	335,755
0,4000	2	0,375014	0,351763	0,398266	46,503	232,509	581,272
0,4000	3	0,526933	0,512352	0,541513	29,160	326,698	816,746
0,4025	1	0,215427	0,201823	0,229032	27,209	134,400	333,912
0,4025	2	0,372941	0,350747	0,395136	44,389	232,669	578,059
0,4025	3	0,522751	0,509559	0,535944	26,385	326,132	810,265
0,4050	1	0,214379	0,201454	0,227304	25,850	134,576	332,287
0,4050	2	0,371073	0,349855	0,392291	42,436	232,941	575,163
0,4050	3	0,519211	0,507298	0,531123	23,824	325,934	804,776
0,4075	1	0,213458	0,201122	0,225794	24,672	134,825	330,860
0,4075	2	0,369374	0,349034	0,389713	40,679	233,306	572,529
0,4075	3	0,516258	0,505468	0,527048	21,580	326,082	800,200
0,4100	1	0,212606	0,200815	0,224397	23,582	135,111	329,539
0,4100	2	0,367773	0,348266	0,387281	39,015	233,720	570,048
0,4100	3	0,513645	0,503888	0,523402	19,514	326,422	796,150
0,4125	1	0,211682	0,200509	0,222855	22,347	135,344	328,107
0,4125	2	0,366096	0,347518	0,384673	37,155	234,072	567,448
0,4125	3	0,510740	0,502201	0,519279	17,078	326,554	791,647
0,4150	1	0,210653	0,200191	0,221115	20,924	135,502	326,512
0,4150	2	0,364308	0,346766	0,381850	35,083	234,341	564,677
0,4150	3	0,507416	0,500278	0,514554	14,276	326,395	786,494
0,4175	1	0,209782	0,199906	0,219658	19,752	135,755	325,162
0,4175	2	0,362715	0,346064	0,379367	33,303	234,722	562,209
0,4175	3	0,504749	0,498783	0,510716	11,933	326,636	782,362
0,4200	1	0,208980	0,199643	0,218317	18,674	136,046	323,919
0,4200	2	0,361210	0,345421	0,377000	31,578	235,148	559,876
0,4200	3	0,502319	0,497486	0,507152	9,666	327,010	778,594
0,4225	1	0,208132	0,199375	0,216888	17,512	136,300	322,604
0,4225	2	0,359663	0,344786	0,374539	29,753	235,534	557,477
0,4225	3	0,499665	0,496058	0,503272	7,213	327,218	774,481
0,4250	1	0,207159	0,199091	0,215227	16,136	136,466	321,097
0,4250	2	0,357989	0,344144	0,371834	27,690	235,825	554,883
0,4275	1	0,206325	0,198838	0,213813	14,975	136,716	319,804
0,4275	2	0,356496	0,343561	0,369432	25,870	236,223	552,569
0,4300	1	0,205552	0,198597	0,212508	13,911	137,001	318,606
0,4300	2	0,355083	0,343008	0,367157	24,148	236,663	550,378
0,4325	1	0,204772	0,198357	0,211186	12,829	137,274	317,396
0,4325	2	0,353667	0,342475	0,364859	22,384	237,089	548,184
0,4350	1	0,203833	0,198094	0,209573	11,479	137,435	315,941
0,4350	2	0,352068	0,341923	0,362213	20,290	237,382	545,706
0,4375	1	0,203016	0,197854	0,208178	10,324	137,670	314,675
0,4375	2	0,350647	0,341414	0,359880	18,465	237,782	543,503
0,4400	1	0,202265	0,197628	0,206903	9,275	137,945	313,511
0,4400	2	0,349311	0,340932	0,357691	16,759	238,230	541,433
0,4425	1	0,201557	0,197414	0,205700	8,286	138,243	312,413
0,4425	2	0,348045	0,340510	0,355579	15,070	238,715	539,469
0,4450	1	0,200633	0,197158	0,204108	6,949	138,387	310,981
0,4450	2	0,346502	0,339999	0,353005	13,005	239,000	537,078

Si_hex_D							TM
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0.4475	1	0.345146	0.339557	0.350735	11,178	239,402	534,977
0.4500	1	0.343886	0.339142	0.348629	9,488	239,860	533,023
0.4525	1	0.342695	0.338767	0.346623	7,856	240,358	531,177
0.4550	1	0.341281	0.338329	0.344234	5,905	240,689	528,986
<hr/>							
0.2000	1	0.843733	0.821620	0.865847	44,227	261,557	1307,787
0.2025	1	0.839520	0.821159	0.857880	36,721	263,504	1301,256
0.2050	1	0.834969	0.820634	0.849303	28,669	265,311	1294,201
0.2075	1	0.830615	0.820258	0.840972	20,714	267,147	1287,453
0.2100	1	0.826747	0.819909	0.833585	13,677	269,106	1281,458
0.2475	1	0.418019	0.412155	0.423884	11,729	160,363	647,930
0.2500	1	0.415372	0.408687	0.422056	13,369	160,957	643,826
0.2525	1	0.412564	0.405437	0.419690	14,253	161,467	639,474
0.2550	1	0.409987	0.402396	0.417578	15,182	162,047	635,480
0.2575	1	0.406983	0.398399	0.415566	17,167	162,437	630,824
0.2600	1	0.404553	0.395148	0.413957	18,809	163,035	627,057
0.2625	1	0.401858	0.392082	0.411634	19,552	163,506	622,880
0.2650	1	0.399278	0.389202	0.409355	20,154	164,004	618,882
0.2675	1	0.396456	0.385430	0.407482	22,053	164,381	614,507
0.2700	1	0.393983	0.382260	0.405706	23,446	164,882	610,673
0.2725	1	0.391382	0.379318	0.403446	24,128	165,310	606,642
0.2750	1	0.388814	0.376518	0.401109	24,591	165,732	602,661
0.2775	1	0.386091	0.373077	0.399105	26,028	166,067	598,441
0.2800	1	0.383581	0.370063	0.397098	27,036	166,474	594,550
0.2825	1	0.381163	0.367237	0.395089	27,852	166,902	590,802
0.2850	1	0.378629	0.364612	0.392647	28,034	167,260	586,876
0.2875	1	0.375948	0.361508	0.390387	28,879	167,532	582,719
0.2900	1	0.373509	0.358604	0.388414	29,811	167,892	578,939
0.2925	1	0.371187	0.355943	0.386431	30,488	168,287	575,340
0.2950	1	0.368773	0.353446	0.384100	30,654	168,621	571,597
0.2975	1	0.366279	0.350575	0.381982	31,407	168,900	567,732
0.3000	1	0.363875	0.347729	0.380021	32,292	169,202	564,007
0.3025	1	0.361605	0.345224	0.377985	32,761	169,547	560,487
0.3050	1	0.359364	0.342907	0.375820	32,913	169,889	557,014
0.3075	1	0.357015	0.340421	0.373609	33,188	170,162	553,374
0.3100	1	0.354640	0.337736	0.371544	33,808	170,405	549,692
0.3125	1	0.352520	0.335372	0.369669	34,297	170,752	546,406
0.3150	1	0.350279	0.333191	0.367368	34,178	171,024	542,933
0.3175	1	0.348187	0.331103	0.365272	34,169	171,352	539,690
0.3200	1	0.345835	0.328358	0.363313	34,954	171,534	536,045
0.3225	1	0.343754	0.326081	0.361428	35,347	171,834	532,819
0.3250	1	0.341583	0.323988	0.359177	35,189	172,072	529,453
0.3275	1	0.339515	0.321974	0.357056	35,083	172,346	526,248
0.3300	1	0.337139	0.319364	0.354913	35,549	172,447	522,565
0.3325	1	0.335108	0.317155	0.353061	35,905	172,706	519,417
0.3350	1	0.332983	0.315111	0.350855	35,743	172,901	516,124
0.3375	1	0.330841	0.313183	0.348499	35,317	173,071	512,803
0.3400	1	0.328465	0.310752	0.346178	35,426	173,101	509,121
0.3425	1	0.326466	0.308591	0.344342	35,751	173,313	506,023
0.3450	1	0.324346	0.306594	0.342097	35,503	173,444	502,736
0.3475	1	0.322259	0.304710	0.339807	35,097	173,577	499,501
0.3500	1	0.320027	0.302492	0.337562	35,070	173,615	496,042
0.3525	1	0.318024	0.300419	0.335629	35,210	173,760	492,938
0.3550	1	0.316102	0.298516	0.333687	35,171	173,935	489,958
0.3575	1	0.314130	0.296727	0.331533	34,806	174,067	486,902
0.3600	1	0.311983	0.294749	0.329217	34,469	174,086	483,574
0.3625	1	0.309988	0.292804	0.327172	34,368	174,174	480,481
0.3650	1	0.308218	0.291031	0.325406	34,375	174,375	477,739
0.3675	1	0.306240	0.289376	0.323104	33,728	174,442	474,672
0.3700	1	0.304214	0.287622	0.320807	33,185	174,467	471,532
0.3725	1	0.302202	0.285703	0.318702	32,999	174,484	468,413
0.3750	1	0.300459	0.284000	0.316918	32,917	174,642	465,711
0.3775	1	0.298438	0.282394	0.314482	32,088	174,623	462,578
0.3800	1	0.296632	0.280848	0.312416	31,568	174,716	459,780
0.3825	1	0.294521	0.278862	0.310180	31,318	174,614	456,507
0.3850	1	0.292794	0.277190	0.308398	31,208	174,725	453,830
0.3875	1	0.290780	0.275623	0.305937	30,314	174,650	450,709
0.3900	1	0.288883	0.274126	0.303641	29,515	174,630	447,769
0.3925	1	0.286832	0.272253	0.301410	29,157	174,501	444,589
0.3950	1	0.285067	0.270621	0.299514	28,893	174,532	441,854
0.3975	1	0.283072	0.269087	0.297057	27,970	174,408	438,762
0.4000	1	0.281098	0.267644	0.294552	26,907	174,281	435,702
0.4025	1	0.279061	0.265866	0.292255	26,389	174,099	432,544
0.4050	1	0.277203	0.264225	0.290182	25,957	174,014	429,665

0.4075	1	0.275394	0.262737	0.288052	25,315	173,946	426,861
0.4100	1	0.273393	0.261331	0.285455	24,124	173,741	423,759
0.4125	1	0.271510	0.259839	0.283180	23,341	173,596	420,840
0.4150	1	0.269612	0.258231	0.280993	22,762	173,428	417,899
0.4175	1	0.267866	0.256788	0.278943	22,155	173,342	415,192
0.4200	1	0.265912	0.255454	0.276371	20,917	173,109	412,164
0.4225	1	0.264090	0.254055	0.274125	20,070	172,946	409,339
0.4250	1	0.262206	0.252536	0.271877	19,342	172,729	406,420
0.4275	1	0.260519	0.251160	0.269879	18,719	172,626	403,805
0.4300	1	0.258543	0.249873	0.267212	17,339	172,319	400,741
0.4325	1	0.256657	0.248569	0.264746	16,176	172,057	397,819
0.4350	1	0.254714	0.247075	0.262354	15,279	171,741	394,807
0.4375	1	0.253027	0.245718	0.260337	14,619	171,584	392,192
0.4400	1	0.251000	0.244436	0.257564	13,128	171,182	389,049
0.4425	1	0.249064	0.243200	0.254928	11,729	170,827	386,049
0.4450	1	0.247102	0.241735	0.252469	10,734	170,439	383,008
0.4475	1	0.245276	0.240391	0.250160	9,769	170,129	380,177
0.4500	1	0.243085	0.239142	0.247028	7,886	169,552	376,782
Si_Rec_C							Joint
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0.4750	1	0.467668	0.461503	0.473833	12,329	344,321	724,885
0.4775	1	0.471776	0.465484	0.478069	12,586	349,174	731,253
0.4800	1	0.475715	0.469471	0.481959	12,488	353,932	737,358
0.4825	1	0.479699	0.473837	0.485561	11,724	358,755	743,533
0.4850	1	0.484044	0.477599	0.490489	12,890	363,880	750,268
0.4875	1	0.488515	0.481457	0.495573	14,116	369,134	757,199
Si_Rec_C							TE
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0.4075	1	0.227929	0.224400	0.231458	7,058	143,966	353,290
0.4100	1	0.228837	0.224888	0.232785	7,897	145,426	354,697
0.4125	1	0.230121	0.225402	0.234841	9,439	147,134	356,688
0.4150	1	0.231335	0.225957	0.236714	10,757	148,806	358,570
0.4175	1	0.232427	0.226511	0.238344	11,833	150,410	360,262
0.4200	1	0.233466	0.227069	0.239864	12,795	151,987	361,873
0.4225	1	0.234815	0.227653	0.241977	14,323	153,774	363,963
0.4250	1	0.236235	0.228281	0.244188	15,907	155,620	366,164
0.4275	1	0.237485	0.228912	0.246057	17,145	157,363	368,101
0.4300	1	0.238672	0.229544	0.247799	18,255	159,075	369,941
0.4325	1	0.240036	0.230209	0.249864	19,655	160,914	372,056
0.4350	1	0.241738	0.230914	0.252563	21,649	162,992	374,694
0.4375	1	0.243171	0.231621	0.254721	23,100	164,900	376,914
0.4400	1	0.244527	0.232332	0.256722	24,390	166,768	379,017
0.4425	1	0.245837	0.233090	0.258585	25,495	168,614	381,048
0.4450	1	0.247928	0.233877	0.261979	28,102	171,008	384,288
0.4475	1	0.249577	0.234666	0.264487	29,821	173,113	386,844
0.4500	1	0.251128	0.235491	0.266765	31,274	175,162	389,248
0.4525	1	0.252629	0.236344	0.268915	32,572	177,188	391,576
0.4525	2	0.416355	0.412483	0.420227	7,744	292,021	645,350
0.4550	1	0.254910	0.237226	0.272595	35,370	179,776	395,111
0.4550	2	0.420693	0.414983	0.426403	11,420	296,694	652,075
0.4575	1	0.256814	0.238135	0.275493	37,358	182,113	398,062
0.4575	2	0.424627	0.417593	0.431660	14,066	301,113	658,171
0.4600	1	0.258599	0.239068	0.278131	39,064	184,381	400,829
0.4600	2	0.428469	0.420273	0.436666	16,393	305,499	664,127
0.4625	1	0.260328	0.240026	0.280630	40,604	186,623	403,508
0.4625	2	0.432295	0.423037	0.441553	18,516	309,902	670,057
0.4650	1	0.262816	0.241018	0.284613	43,596	189,424	407,364
0.4650	2	0.437181	0.425886	0.448476	22,590	315,098	677,631
0.4675	1	0.265032	0.242056	0.288007	45,951	192,049	410,799
0.4675	2	0.441758	0.428831	0.454684	25,853	320,109	684,725
0.4700	1	0.267094	0.243117	0.291072	47,956	194,578	413,996
0.4700	2	0.446277	0.431888	0.460666	28,779	325,113	691,729
0.4725	1	0.269089	0.244202	0.293977	49,776	197,074	417,089
0.4725	2	0.450771	0.435041	0.466501	31,460	330,133	698,695
0.4750	1	0.271876	0.245325	0.298426	53,101	200,169	421,407
0.4750	2	0.456060	0.438287	0.473833	35,545	335,774	706,893
0.4775	1	0.274548	0.246518	0.302578	56,059	203,200	425,549
0.4775	2	0.459893	0.441717	0.478069	36,352	340,379	712,835
0.4800	1	0.276997	0.247716	0.306277	58,561	206,085	429,345
0.4800	2	0.463582	0.445204	0.481959	36,755	344,905	718,552
0.4825	1	0.279360	0.248949	0.309771	60,821	208,926	433,008
0.4825	2	0.467204	0.448847	0.485561	36,714	349,410	724,166
0.4850	1	0.282388	0.250238	0.314537	64,299	212,285	437,701
0.4850	2	0.471571	0.452653	0.490489	37,836	354,504	730,935

0,4875	1	0,285607	0,251581	0,319633	68,052	215,812	442,691
0,4875	2	0,476086	0,456599	0,495573	38,974	359,743	737,934
0,4900	1	0,288510	0,252935	0,324084	71,149	219,123	447,190
0,4900	2	0,480330	0,460620	0,500039	39,419	364,810	744,511
0,4925	1	0,291299	0,254356	0,328242	73,887	222,370	451,514
0,4925	2	0,484555	0,464864	0,504247	39,382	369,898	751,061
0,4950	1	0,294500	0,255817	0,333184	77,367	225,955	456,475
0,4950	2	0,489169	0,469217	0,509121	39,904	375,315	758,212
0,4975	1	0,298445	0,257325	0,339564	82,239	230,138	462,589
0,4975	2	0,494447	0,473667	0,515226	41,559	381,280	766,392
0,5000	1	0,301859	0,258905	0,344812	85,907	233,941	467,881
0,5000	2	0,499337	0,478381	0,520294	41,914	386,986	773,973
0,5025	1	0,305163	0,260520	0,349805	89,285	237,683	473,002
0,5025	2	0,503862	0,483174	0,524550	41,376	392,446	780,986
0,5050	1	0,308430	0,262192	0,354668	92,477	241,424	478,067
0,5050	2	0,508148	0,488136	0,528160	40,024	397,753	787,630
0,5075	1	0,311672	0,263924	0,359420	95,495	245,169	483,092
0,5075	2	0,512340	0,493293	0,531386	38,093	403,019	794,126
0,5100	1	0,314907	0,265711	0,364102	98,391	248,934	488,105
0,5100	2	0,516417	0,498578	0,534257	35,679	408,228	800,447
0,5125	1	0,318150	0,267532	0,368768	101,236	252,730	493,132
0,5125	2	0,520419	0,504003	0,536834	32,831	413,408	806,649
0,5150	1	0,321391	0,269419	0,373362	103,943	256,550	498,156
0,5150	2	0,524354	0,509575	0,539134	29,559	418,566	812,749
0,5150	3	0,721403	0,713783	0,729022	15,238	575,860	1118,174
0,5175	1	0,324629	0,271356	0,377902	106,546	260,393	503,175
0,5175	2	0,528297	0,515351	0,541242	25,892	423,760	818,860
0,5175	3	0,726459	0,715563	0,737355	21,792	582,711	1126,012
0,5200	1	0,327892	0,273335	0,382449	109,114	264,281	508,232
0,5200	2	0,532174	0,521236	0,543113	21,877	428,932	824,870
0,5200	3	0,734461	0,722889	0,746032	23,143	591,975	1138,414
0,5225	1	0,331174	0,275386	0,386962	111,576	268,210	513,320
0,5225	2	0,536050	0,527363	0,544737	17,374	434,133	830,877
0,5225	3	0,744210	0,733245	0,755174	21,930	602,717	1153,525
0,5250	1	0,334477	0,277516	0,391437	113,922	272,180	518,439
0,5250	2	0,539927	0,533765	0,546089	12,324	439,366	836,887
0,5250	3	0,754641	0,744371	0,764911	20,540	614,089	1169,694
0,5275	1	0,337789	0,279686	0,395892	116,206	276,185	523,573
0,5275	2	0,765107	0,755571	0,774643	19,073	625,570	1185,916
0,5300	1	0,341100	0,281899	0,400301	118,402	280,214	528,705
0,5300	2	0,775659	0,766925	0,784393	17,468	637,204	1202,271
0,5325	1	0,344426	0,284165	0,404687	120,522	284,281	533,861
0,5325	2	0,786750	0,778820	0,794681	15,861	649,364	1219,463
0,5350	1	0,347778	0,286503	0,409054	122,551	288,395	539,056
0,5350	2	0,798503	0,791254	0,805752	14,497	662,159	1237,680
0,5375	1	0,351117	0,288921	0,413312	124,390	292,524	544,231
0,5375	2	0,810320	0,803828	0,816812	12,984	675,098	1255,997
0,5400	1	0,354458	0,291393	0,417524	126,132	296,682	549,411
0,5400	2	0,822146	0,816456	0,827836	11,380	688,136	1274,326
0,5425	1	0,357824	0,293920	0,421729	127,810	300,886	554,628
0,5450	1	0,361180	0,296594	0,425766	129,172	305,107	559,829
0,5475	1	0,364532	0,299339	0,429725	130,386	309,351	565,025
0,5500	1	0,367875	0,302095	0,433656	131,561	313,614	570,207

Si_Rec_C						TM	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,3375	1	0,241213	0,237874	0,244552	6,678	126,184	373,880
0,3375	2	0,345405	0,342070	0,348739	6,669	180,690	535,377
0,3400	1	0,242564	0,238893	0,246236	7,344	127,831	375,975
0,3400	2	0,347674	0,343103	0,352245	9,141	183,224	538,895
0,3425	1	0,243771	0,239685	0,247858	8,174	129,412	377,846
0,3425	2	0,349730	0,344175	0,355285	11,110	185,663	542,082
0,3450	1	0,244941	0,240451	0,249431	8,980	130,982	379,659
0,3450	2	0,351685	0,345253	0,358117	12,865	188,064	545,112
0,3475	1	0,246099	0,241226	0,250972	9,747	132,555	381,454
0,3475	2	0,353422	0,346321	0,360522	14,201	190,362	547,804
0,3500	1	0,247584	0,242280	0,252887	10,607	134,314	383,755
0,3500	2	0,355454	0,347560	0,363348	15,788	192,834	550,954
0,3525	1	0,249184	0,243380	0,254988	11,607	136,148	386,235
0,3525	2	0,357531	0,348883	0,366180	17,297	195,346	554,174
0,3550	1	0,250537	0,244231	0,256842	12,611	137,858	388,332
0,3550	2	0,359423	0,350181	0,368664	18,483	197,772	557,105
0,3575	1	0,251604	0,245020	0,258188	13,169	139,420	389,986
0,3575	2	0,361121	0,351207	0,371035	19,829	200,106	559,738
0,3600	1	0,253127	0,246178	0,260076	13,898	141,245	392,347
0,3600	2	0,363201	0,352424	0,373978	21,554	202,666	562,962
0,3625	1	0,254687	0,247441	0,261932	14,491	143,102	394,764
0,3625	2	0,365259	0,353772	0,376746	22,974	205,230	566,151
0,3650	1	0,256294	0,248643	0,263945	15,302	144,998	397,255
0,3650	2	0,367455	0,355269	0,379641	24,373	207,888	569,555
0,3675	1	0,257755	0,249774	0,265736	15,962	146,824	399,520
0,3675	2	0,369720	0,356725	0,382715	25,990	210,602	573,066
0,3700	1	0,259287	0,250823	0,267751	16,927	148,701	401,895
0,3700	2	0,371673	0,358192	0,385155	26,963	213,155	576,094
0,3725	1	0,261066	0,252320	0,269811	17,491	150,733	404,652
0,3725	2	0,374100	0,359720	0,388480	28,759	215,996	579,855
0,3750	1	0,262720	0,253481	0,271960	18,479	152,706	407,217
0,3750	2	0,376480	0,361400	0,391559	30,158	218,829	583,543
0,3775	1	0,264274	0,254508	0,274040	19,532	154,633	409,624
0,3775	2	0,378472	0,363033	0,393911	30,878	221,453	586,631
0,3800	1	0,265656	0,255582	0,275731	20,150	156,472	411,767
0,3800	2	0,380452	0,364389	0,396515	32,126	224,086	589,700
0,3825	1	0,267448	0,257413	0,277483	20,070	158,563	414,544
0,3825	2	0,383157	0,365730	0,400584	34,854	227,164	593,893
0,3850	1	0,269118	0,258848	0,279388	20,540	160,596	417,132
0,3850	2	0,385509	0,367233	0,403785	36,553	230,053	597,539
0,3875	1	0,270791	0,260158	0,281424	21,267	162,644	419,726
0,3875	2	0,387968	0,368939	0,406998	38,060	233,024	601,351
0,3900	1	0,272446	0,261313	0,283579	22,267	164,694	422,291
0,3900	2	0,390047	0,370748	0,409347	38,599	235,783	604,573
0,3925	1	0,274500	0,263202	0,285799	22,597	166,999	425,475
0,3925	2	0,392913	0,372522	0,413305	40,783	239,039	609,016
0,3950	1	0,276279	0,264812	0,287745	22,933	169,152	428,232
0,3950	2	0,395505	0,374222	0,416788	42,566	242,148	613,033
0,3975	1	0,278001	0,266259	0,289743	23,485	171,283	430,901
0,3975	2	0,397983	0,375899	0,420066	44,168	245,207	616,873
0,4000	1	0,279794	0,267612	0,291975	24,363	173,472	433,680
0,4000	2	0,400256	0,377722	0,422789	45,067	248,159	620,396
0,4025	1	0,282143	0,269756	0,294530	24,774	176,022	437,321
0,4025	2	0,403311	0,379727	0,426896	47,169	251,616	625,133
0,4050	1	0,283928	0,271418	0,296437	25,020	178,236	440,088
0,4050	2	0,405952	0,381721	0,430183	48,461	254,836	629,225
0,4075	1	0,285984	0,273020	0,298949	25,929	180,635	443,276
0,4075	2	0,408734	0,384071	0,433396	49,325	258,166	633,537
0,4100	1	0,288129	0,274640	0,301617	26,977	183,106	446,599
0,4100	2	0,411417	0,386190	0,436645	50,456	261,456	637,697
0,4125	1	0,290417	0,276929	0,303906	26,977	185,686	450,147
0,4125	2	0,414054	0,388029	0,440078	52,049	264,736	641,783
0,4150	1	0,292711	0,279471	0,305951	26,480	188,286	453,702
0,4150	2	0,416592	0,389909	0,443275	53,366	267,973	645,717
0,4175	1	0,294842	0,281125	0,308560	27,435	190,800	457,006
0,4175	2	0,419538	0,392375	0,446702	54,327	271,494	650,284
0,4200	1	0,297207	0,282884	0,311530	28,646	193,482	460,671
0,4200	2	0,422167	0,394978	0,449357	54,379	274,831	654,359
0,4225	1	0,299600	0,285498	0,313701	28,202	196,200	464,379
0,4225	2	0,424819	0,396991	0,452646	55,656	278,203	658,469
0,4250	1	0,302323	0,288727	0,315920	27,193	199,155	468,601
0,4250	2	0,427752	0,399188	0,456317	57,129	281,782	663,016
0,4275	1	0,304978	0,291302	0,318655	27,352	202,086	472,716
0,4275	2	0,430522	0,401762	0,459282	57,520	285,275	667,309

0,4300	1	0,307631	0,293665	0,321598	27,933	205,036	476,829
0,4300	2	0,433244	0,404564	0,461924	57,361	288,757	671,528
0,4325	1	0,309960	0,295800	0,324120	28,320	207,790	480,438
0,4325	2	0,436028	0,406992	0,465064	58,072	292,302	675,843
0,4350	1	0,312992	0,299455	0,326529	27,073	211,035	485,138
0,4350	2	0,438792	0,409437	0,468148	58,711	295,856	680,128
0,4375	1	0,315655	0,302029	0,329280	27,251	214,053	489,265
0,4375	2	0,441567	0,412296	0,470838	58,543	299,438	684,429
0,4400	1	0,318413	0,304936	0,331890	26,954	217,158	493,540
0,4400	2	0,444327	0,414965	0,473690	58,725	303,031	688,707
0,4425	1	0,321004	0,307717	0,334291	26,573	220,169	497,556
0,4425	2	0,447061	0,417626	0,476496	58,870	306,628	692,945
0,4450	1	0,325108	0,313308	0,336908	23,601	224,243	503,917
0,4450	2	0,450123	0,420435	0,479811	59,376	310,473	697,691
0,4475	1	0,328299	0,316399	0,340198	23,799	227,716	508,863
0,4475	2	0,453090	0,423628	0,482551	58,923	314,274	702,289
0,4500	1	0,331211	0,319573	0,342849	23,276	231,020	513,377
0,4500	2	0,456050	0,426487	0,485613	59,126	318,095	706,877
0,4525	1	0,334328	0,323099	0,345557	22,458	234,489	518,208
0,4525	2	0,458996	0,429576	0,488416	58,841	321,928	711,444
0,4550	1	0,338980	0,329277	0,348683	19,406	239,066	525,419
0,4550	2	0,462518	0,433178	0,491858	58,680	326,191	716,903
0,4575	1	0,342637	0,332995	0,352280	19,286	242,973	531,088
0,4575	2	0,465717	0,437009	0,494425	57,416	330,251	721,861
0,4600	1	0,346145	0,336749	0,355541	18,792	246,802	536,525
0,4600	2	0,468930	0,440645	0,497215	56,569	334,347	726,842
0,4600	3	0,624080	0,619395	0,628765	9,370	444,969	967,324
0,4625	1	0,349752	0,340920	0,358583	17,663	250,728	542,115
0,4625	2	0,472148	0,443968	0,500328	56,360	338,471	731,829
0,4625	3	0,628884	0,623761	0,634007	10,246	450,831	974,770
0,4650	1	0,354809	0,348585	0,361034	12,450	255,729	549,955
0,4650	2	0,475326	0,447056	0,503596	56,541	342,591	736,755
0,4650	3	0,633498	0,627959	0,639036	11,076	456,593	981,921
0,4675	1	0,358901	0,353934	0,363867	9,933	260,068	556,296
0,4675	2	0,478399	0,450198	0,506601	56,403	346,660	741,519
0,4675	3	0,638007	0,631861	0,644152	12,291	462,316	988,911
0,4700	1	0,481889	0,453721	0,510058	56,337	351,056	746,928
0,4700	2	0,643291	0,636707	0,649875	13,168	468,638	997,101
0,4725	1	0,485188	0,457659	0,512716	55,058	355,339	752,041
0,4725	2	0,648240	0,641559	0,654920	13,361	474,755	1004,772
0,4750	1	0,488381	0,461503	0,515259	53,756	359,571	756,991
0,4750	2	0,653874	0,646170	0,661578	15,407	481,415	1013,505
0,4775	1	0,491837	0,465484	0,518190	52,706	364,021	762,347
0,4775	2	0,662057	0,651051	0,673062	22,011	490,005	1026,188
0,4800	1	0,495129	0,469471	0,520786	51,314	368,376	767,449
0,4800	2	0,667939	0,655904	0,679974	24,071	496,947	1035,306
0,4825	1	0,498584	0,473837	0,523331	49,494	372,878	772,805
0,4825	2	0,670801	0,661160	0,680441	19,281	501,675	1039,741
0,4850	1	0,501761	0,477599	0,525923	48,324	377,199	777,729
0,4850	2	0,679941	0,665709	0,694174	28,465	511,146	1053,909
0,4875	1	0,505152	0,481457	0,528847	47,390	381,706	782,986
0,4875	2	0,685180	0,671444	0,698916	27,472	517,739	1062,029
0,4900	1	0,515077	0,498674	0,531481	32,807	391,201	798,370
0,4900	2	0,694855	0,685684	0,704025	18,341	527,742	1077,025
0,4925	1	0,522258	0,510453	0,534062	23,610	398,678	809,499
0,4925	2	0,701579	0,693668	0,709489	15,821	535,567	1087,447
0,4950	1	0,528255	0,520202	0,536308	16,106	405,304	818,796
0,4950	2	0,707807	0,700809	0,714804	13,995	543,065	1097,100
0,5475	1	0,969542	0,962701	0,976383	13,682	822,778	1502,790
0,5500	1	0,980914	0,973061	0,988768	15,707	836,229	1520,417

<b>Si_Rec_D</b>					<b>TE</b>		
<b>r/a</b>	<b>N_Gap</b>	<b>f_c</b>	<b>f_min</b>	<b>f_max</b>	<b>L_Gap (en nm)</b>	<b>r (en nm)</b>	<b>a (en nm)</b>
0,2000	1	0,349090	0,281806	0,416374	134,568	108,218	541,089
0,2000	2	0,727226	0,717285	0,737166	19,880	225,440	1127,200
0,2025	1	0,346678	0,280104	0,413252	133,149	108,814	537,351
0,2025	2	0,725179	0,715448	0,734909	19,462	227,615	1124,027
0,2050	1	0,343938	0,277723	0,410153	132,431	109,286	533,104
0,2050	2	0,721801	0,713733	0,729869	16,136	229,352	1118,792
0,2075	1	0,341369	0,275835	0,406903	131,068	109,793	529,122
0,2075	2	0,719273	0,712078	0,726468	14,390	231,336	1114,873
0,2100	1	0,338912	0,274103	0,403722	129,619	110,316	525,314
0,2100	2	0,717004	0,710473	0,723535	13,062	233,385	1111,356
0,2125	1	0,336525	0,272487	0,400563	128,075	110,843	521,613
0,2125	2	0,539386	0,533348	0,545425	12,077	177,660	836,048
0,2125	3	0,714904	0,709004	0,720804	11,800	235,472	1108,101

0,2150	1	0,333869	0,270297	0,397442	127,146	111,262	517,498
0,2150	2	0,535526	0,525755	0,545297	19,542	178,464	830,065
0,2175	1	0,331340	0,268441	0,394238	125,797	111,703	513,577
0,2175	2	0,532711	0,520239	0,545182	24,943	179,590	825,701
0,2200	1	0,328921	0,266810	0,391032	124,223	112,162	509,828
0,2200	2	0,530426	0,515786	0,545067	29,281	180,875	822,161
0,2225	1	0,326615	0,265330	0,387899	122,569	112,641	506,253
0,2225	2	0,528320	0,511730	0,544909	33,179	182,204	818,896
0,2250	1	0,324218	0,263662	0,384775	121,112	113,071	502,539
0,2250	2	0,525459	0,506380	0,544537	38,157	183,254	814,461
0,2275	1	0,321870	0,262155	0,381585	119,430	113,499	498,899
0,2275	2	0,522978	0,501859	0,544097	42,238	184,415	810,615
0,2300	1	0,319622	0,260795	0,378448	117,653	113,945	495,414
0,2300	2	0,520854	0,498034	0,543674	45,641	185,684	807,324
0,2325	1	0,317451	0,259516	0,375385	115,868	114,401	492,049
0,2325	2	0,518889	0,494522	0,543257	48,735	186,995	804,278
0,2350	1	0,315194	0,258113	0,372275	114,162	114,809	488,550
0,2350	2	0,516413	0,490178	0,542649	52,471	188,104	800,441
0,2375	1	0,312949	0,256720	0,369178	112,458	115,204	485,070
0,2375	2	0,513894	0,485803	0,541984	56,181	189,177	796,535
0,2400	1	0,310802	0,255479	0,366125	110,645	115,618	481,743
0,2400	2	0,511808	0,482245	0,541371	59,126	190,392	793,302
0,2425	1	0,308712	0,254335	0,363090	108,756	116,037	478,504
0,2425	2	0,509923	0,479137	0,540709	61,572	191,667	790,380
0,2450	1	0,306595	0,253116	0,360074	106,957	116,429	475,222
0,2450	2	0,507754	0,475568	0,539940	64,372	192,820	787,019
0,2450	3	0,671400	0,666532	0,676267	9,736	254,964	1040,669
0,2475	1	0,304417	0,251742	0,357091	105,349	116,782	471,846
0,2475	2	0,505009	0,471003	0,539015	68,012	193,734	782,764
0,2500	1	0,303244	0,250582	0,354106	103,524	117,158	468,633
0,2500	2	0,502910	0,467679	0,538141	70,462	194,878	779,510
0,2525	1	0,300340	0,249500	0,351179	101,679	117,545	465,526
0,2525	2	0,500996	0,464721	0,537272	72,551	196,077	776,544
0,2550	1	0,298371	0,248475	0,348268	99,793	117,931	462,476
0,2550	2	0,499230	0,462080	0,536381	74,301	197,321	773,807
0,2575	1	0,296231	0,247079	0,345383	98,304	118,233	459,158
0,2575	2	0,496188	0,457171	0,535205	78,035	198,041	769,092
0,2600	1	0,294233	0,245966	0,342500	96,534	118,576	456,062
0,2600	2	0,494047	0,453945	0,534149	80,204	199,101	765,772
0,2625	1	0,292306	0,244938	0,339675	94,737	118,932	453,075
0,2625	2	0,492105	0,451107	0,533103	81,996	200,225	762,762
0,2650	1	0,290416	0,243964	0,336868	92,904	119,288	450,144
0,2650	2	0,490317	0,448586	0,532048	83,462	201,398	759,991
0,2675	1	0,288372	0,242664	0,334080	91,416	119,566	446,976
0,2675	2	0,487407	0,444066	0,530747	86,680	202,091	755,480
0,2700	1	0,286444	0,241588	0,331299	89,711	119,877	443,988
0,2700	2	0,485204	0,440875	0,529533	88,659	203,058	752,066
0,2725	1	0,284586	0,240590	0,328583	87,993	120,202	441,109
0,2725	2	0,483228	0,438088	0,528368	90,280	204,103	749,003
0,2725	3	0,691984	0,685564	0,698322	12,676	292,277	1072,575
0,2750	1	0,282758	0,239660	0,325856	86,196	120,525	438,274
0,2750	2	0,481416	0,435694	0,527138	91,445	205,204	746,195
0,2750	3	0,689346	0,680953	0,697738	16,785	293,834	1068,486
0,2775	1	0,280810	0,238428	0,323193	84,766	120,784	435,256
0,2775	2	0,478634	0,431499	0,525769	94,271	205,872	741,883
0,2775	3	0,686081	0,675041	0,697122	22,081	295,101	1063,426
0,2800	1	0,278948	0,237359	0,320536	83,177	121,063	432,369
0,2800	2	0,476353	0,428270	0,524437	96,167	206,737	738,348
0,2800	3	0,683144	0,669886	0,696401	26,514	296,484	1058,873
0,2825	1	0,277160	0,236396	0,317923	81,527	121,361	429,597
0,2825	2	0,474333	0,425562	0,523104	97,542	207,699	735,216
0,2825	3	0,680397	0,665215	0,695579	30,364	297,929	1054,616
0,2850	1	0,275432	0,235531	0,315334	79,803	121,672	426,920
0,2850	2	0,472425	0,423207	0,521642	98,435	208,694	732,259
0,2850	3	0,677761	0,660923	0,694598	33,675	299,401	1050,529
0,2875	1	0,273692	0,234583	0,312800	78,217	121,964	424,222
0,2875	2	0,469906	0,420207	0,519605	99,398	209,402	728,355
0,2875	3	0,674796	0,656090	0,693501	37,411	300,706	1045,934
0,2900	1	0,272002	0,233699	0,310305	76,606	122,265	421,604
0,2900	2	0,467565	0,417492	0,517638	100,146	210,170	724,726
0,2900	3	0,671944	0,651595	0,692292	40,697	302,039	1041,513
0,2925	1	0,270361	0,232906	0,307816	74,910	122,575	419,060
0,2925	2	0,465499	0,415233	0,515764	100,531	211,045	721,523
0,2925	3	0,669219	0,647507	0,690932	43,425	303,407	1037,290
0,2950	1	0,268758	0,232170	0,305345	73,175	122,889	416,574
0,2950	2	0,463570	0,413234	0,513906	100,672	211,967	718,534
0,2950	3	0,666555	0,643634	0,689476	45,842	304,782	1033,160

0,2975	1	0,267146	0,231355	0,302937	71,582	123,188	414,076
0,2975	2	0,461197	0,410677	0,511718	101,041	212,670	714,856
0,2975	3	0,663663	0,639296	0,688030	48,735	306,032	1028,677
0,3000	1	0,265547	0,230552	0,300541	69,989	123,479	411,597
0,3000	2	0,458787	0,408140	0,509433	101,293	213,336	711,120
0,3000	3	0,660700	0,634987	0,686413	51,425	307,226	1024,085
0,3025	1	0,263993	0,229838	0,298149	68,310	123,780	409,190
0,3025	2	0,456707	0,406091	0,507324	101,232	214,139	707,897
0,3025	3	0,657864	0,631116	0,684611	53,495	308,456	1019,689
0,3050	1	0,262479	0,229163	0,295796	66,633	124,087	406,843
0,3050	2	0,454763	0,404224	0,505303	101,079	214,989	704,883
0,3050	3	0,655098	0,627458	0,682737	55,279	309,697	1015,401
0,3075	1	0,260971	0,228458	0,293485	65,027	124,386	404,506
0,3075	2	0,452615	0,402110	0,503119	101,009	215,728	701,553
0,3075	3	0,652211	0,623602	0,680820	57,218	310,860	1010,927
0,3100	1	0,259431	0,227681	0,291182	63,500	124,657	402,119
0,3100	2	0,450091	0,399550	0,500631	101,081	216,269	697,641
0,3100	3	0,649037	0,619308	0,678765	59,458	311,862	1006,007
0,3125	1	0,257953	0,227014	0,288893	61,879	124,946	399,827
0,3125	2	0,447475	0,397591	0,497359	99,767	216,746	693,586
0,3125	3	0,646055	0,615572	0,676538	60,966	312,933	1001,386
0,3150	1	0,256508	0,226386	0,286630	60,244	125,240	397,588
0,3150	2	0,444595	0,395846	0,493344	97,498	217,074	689,122
0,3150	3	0,643143	0,612058	0,674227	62,169	314,014	996,871
0,3175	1	0,255100	0,225788	0,284412	58,624	125,541	395,406
0,3175	2	0,441844	0,394219	0,489468	95,250	217,442	684,857
0,3175	3	0,640304	0,608699	0,671908	63,209	315,109	992,471
0,3200	1	0,253604	0,225003	0,282206	57,203	125,788	393,087
0,3200	2	0,438511	0,391462	0,485560	94,098	217,501	679,692
0,3200	3	0,636872	0,604275	0,669469	65,194	315,889	987,152
0,3225	1	0,252185	0,224368	0,280002	55,634	126,061	390,887
0,3225	2	0,435583	0,389570	0,481595	92,025	217,737	675,153
0,3225	3	0,633716	0,600637	0,666794	66,157	316,779	982,259
0,3250	1	0,250802	0,223772	0,277833	54,061	126,342	388,743
0,3250	2	0,432792	0,387887	0,477698	89,811	218,019	670,828
0,3250	3	0,630639	0,597213	0,664064	66,851	317,684	977,490
0,3275	1	0,249451	0,223202	0,275701	52,499	126,628	386,649
0,3275	2	0,430120	0,386331	0,473909	87,577	218,340	666,686
0,3275	3	0,627623	0,593957	0,661289	67,332	318,597	972,816
0,3300	1	0,248024	0,222460	0,273589	51,129	126,864	384,438
0,3300	2	0,426946	0,383736	0,470156	86,420	218,383	661,766
0,3300	3	0,624106	0,589805	0,658407	68,603	319,230	967,364
0,3325	1	0,246658	0,221839	0,271478	49,639	127,122	382,320
0,3325	2	0,424085	0,381854	0,466316	84,462	218,563	657,332
0,3325	3	0,620735	0,586287	0,655183	68,896	319,911	962,139
0,3350	1	0,245332	0,221256	0,269408	48,152	127,389	380,264
0,3350	2	0,421365	0,380189	0,462540	82,351	218,794	653,115
0,3350	3	0,617433	0,582987	0,651879	68,893	320,602	957,021
0,3375	1	0,244033	0,220709	0,267356	46,647	127,660	378,251
0,3375	2	0,418783	0,378704	0,458861	80,156	219,076	649,113
0,3375	3	0,614182	0,579892	0,648472	68,579	321,294	951,982
0,3400	1	0,242674	0,220007	0,265341	45,334	127,889	376,145
0,3400	2	0,415775	0,376279	0,455271	78,992	219,113	644,451
0,3400	3	0,610533	0,576032	0,645035	69,003	321,751	946,326
0,3425	1	0,241359	0,219392	0,263326	43,934	128,131	374,106
0,3425	2	0,412958	0,374378	0,451539	77,161	219,229	640,085
0,3425	3	0,606827	0,572611	0,641043	68,432	322,149	940,582
0,3450	1	0,240089	0,218834	0,261344	42,509	128,388	372,138
0,3450	2	0,410319	0,372756	0,447882	75,127	219,418	635,994
0,3450	3	0,603241	0,569484	0,636998	67,513	322,583	935,023
0,3475	1	0,238861	0,218333	0,259388	41,055	128,656	370,234
0,3475	2	0,407802	0,371314	0,444290	72,975	219,652	632,093
0,3475	3	0,599857	0,566628	0,633086	66,458	323,098	929,779
0,3500	1	0,237640	0,217803	0,257476	39,674	128,920	368,341
0,3500	2	0,405214	0,369591	0,440837	71,246	219,828	628,081
0,3500	3	0,596431	0,563561	0,629302	65,741	323,564	924,469
0,3525	1	0,236442	0,217309	0,255576	38,267	129,186	366,485
0,3525	2	0,402669	0,368034	0,437303	69,269	220,008	624,137
0,3525	3	0,592942	0,560673	0,625212	64,539	323,969	919,061
0,3550	1	0,235274	0,216867	0,253680	36,813	129,459	364,674
0,3550	2	0,400256	0,366719	0,433794	67,075	220,241	620,397
0,3550	3	0,589571	0,558014	0,621129	63,115	324,412	913,835
0,3575	1	0,234133	0,216451	0,251815	35,364	129,739	362,906
0,3575	2	0,397928	0,365501	0,430355	64,854	220,502	616,789
0,3575	3	0,586317	0,555476	0,617159	61,683	324,893	908,792
0,3600	1	0,232996	0,216003	0,249989	33,987	130,012	361,144
0,3600	2	0,395535	0,364041	0,427029	62,988	220,708	613,079

0,3600	3	0,583009	0,552730	0,613288	60,557	325,319	903,664
0,3625	1	0,231863	0,215566	0,248161	32,596	130,278	359,388
0,3625	2	0,393142	0,362616	0,423667	61,050	220,897	609,370
0,3625	3	0,579634	0,550042	0,609226	59,184	325,682	898,433
0,3650	1	0,230757	0,215168	0,246345	31,177	130,551	357,673
0,3650	2	0,390851	0,361409	0,420293	58,884	221,124	605,819
0,3650	3	0,576320	0,547566	0,605073	57,507	326,053	893,295
0,3675	1	0,229676	0,214792	0,244560	29,768	130,829	355,997
0,3675	2	0,388655	0,360296	0,417015	56,719	221,388	602,416
0,3675	3	0,573129	0,545204	0,601054	55,850	326,469	888,350
0,3700	1	0,228604	0,214406	0,242803	28,397	131,105	354,337
0,3700	2	0,386460	0,359078	0,413842	54,764	221,635	599,013
0,3700	3	0,569983	0,542776	0,597190	54,414	326,885	883,473
0,3725	1	0,227522	0,213988	0,241056	27,068	131,365	352,659
0,3725	2	0,384141	0,357650	0,410631	52,982	221,793	595,418
0,3725	3	0,566634	0,540145	0,593123	52,978	327,161	878,283
0,3750	1	0,226467	0,213625	0,239308	25,682	131,634	351,023
0,3750	2	0,381959	0,356535	0,407382	50,847	222,013	592,036
0,3750	3	0,563368	0,537809	0,588928	51,119	327,458	873,221
0,3775	1	0,225438	0,213283	0,237594	24,311	131,909	349,429
0,3775	2	0,379869	0,355504	0,404234	48,729	222,271	588,797
0,3775	3	0,560223	0,535576	0,584870	49,294	327,801	868,346
0,3800	1	0,224429	0,212954	0,235904	22,950	132,189	347,865
0,3800	2	0,377850	0,354542	0,401159	46,617	222,554	585,668
0,3800	3	0,557196	0,533423	0,580968	47,546	328,188	863,653
0,3825	1	0,223386	0,212546	0,234225	21,678	132,440	346,248
0,3825	2	0,375581	0,353065	0,398097	45,032	222,673	582,151
0,3825	3	0,553864	0,530790	0,576939	46,149	328,372	858,490
0,3850	1	0,222375	0,212204	0,232547	20,344	132,703	344,682
0,3850	2	0,373471	0,351985	0,394958	42,973	222,869	578,880
0,3850	3	0,550582	0,528530	0,572635	44,105	328,560	853,403
0,3875	1	0,221390	0,211883	0,230897	19,014	132,972	343,154
0,3875	2	0,371467	0,351012	0,391922	40,910	223,113	575,774
0,3875	3	0,547471	0,526399	0,568543	42,144	328,824	848,579
0,3900	1	0,220425	0,211577	0,229273	17,696	133,247	341,659
0,3900	2	0,369546	0,350111	0,388980	38,868	223,390	572,796
0,3900	3	0,544487	0,524356	0,564618	40,262	329,143	843,955
0,3925	1	0,219430	0,211194	0,227665	16,471	133,496	340,116
0,3925	2	0,367377	0,348717	0,386036	37,319	223,503	569,434
0,3925	3	0,541202	0,521848	0,560555	38,707	329,253	838,862
0,3950	1	0,218460	0,210868	0,226052	15,184	133,752	338,613
0,3950	2	0,365335	0,347671	0,383000	35,329	223,676	566,270
0,3950	3	0,537930	0,519660	0,556200	36,540	329,348	833,792
0,3975	1	0,217515	0,210568	0,224462	13,894	134,016	337,148
0,3975	2	0,363408	0,346753	0,380063	33,311	223,905	563,282
0,3975	3	0,534854	0,517614	0,552095	34,482	329,537	829,024
0,4000	1	0,216592	0,210277	0,222906	12,629	134,287	335,717
0,4000	2	0,361546	0,345882	0,377210	31,328	224,159	560,397
0,4000	3	0,531862	0,515627	0,548097	32,470	329,754	824,386
0,4025	1	0,215642	0,209920	0,221364	11,444	134,534	334,245
0,4025	2	0,359475	0,344581	0,374368	29,788	224,267	557,186
0,4025	3	0,528650	0,513244	0,544056	30,812	329,812	819,408
0,4050	1	0,214707	0,209608	0,219807	10,199	134,782	332,796
0,4050	2	0,357477	0,343559	0,371394	27,834	224,406	554,089
0,4050	3	0,525397	0,511099	0,539695	28,596	329,818	814,365
0,4075	1	0,213803	0,209323	0,218283	8,960	135,044	331,395
0,4075	2	0,355592	0,342656	0,368528	25,872	224,601	551,168
0,4075	3	0,522347	0,509113	0,535582	26,469	329,928	809,638
0,4100	1	0,212929	0,209063	0,216795	7,731	135,316	330,040
0,4100	2	0,353778	0,341811	0,365745	23,934	224,826	548,356
0,4100	3	0,519511	0,507268	0,531753	24,485	330,149	805,242
0,4125	1	0,212062	0,208809	0,215316	6,507	135,587	328,697
0,4125	2	0,351959	0,340937	0,362982	22,045	225,034	545,537
0,4125	3	0,516736	0,505442	0,528030	22,587	330,388	800,941
0,4150	1	0,350128	0,340150	0,360105	19,955	225,220	542,698
0,4150	2	0,513871	0,503711	0,524030	20,318	330,547	796,500
0,4175	1	0,348376	0,339420	0,357333	17,913	225,443	539,984
0,4175	2	0,511164	0,502078	0,520250	18,171	330,787	792,304
0,4200	1	0,346691	0,338731	0,354651	15,920	225,696	537,371
0,4200	2	0,508580	0,500520	0,516639	16,119	331,085	788,299
0,4225	1	0,344987	0,338007	0,351967	13,960	225,924	534,730
0,4225	2	0,505990	0,498937	0,513043	14,106	331,360	784,285
0,4250	1	0,343269	0,337313	0,349225	11,911	226,128	532,067
0,4250	2	0,503317	0,497404	0,509229	11,824	331,560	780,141
0,4275	1	0,341623	0,336682	0,346563	9,881	226,368	529,516
0,4275	2	0,500761	0,495956	0,505566	9,610	331,817	776,179
0,4300	1	0,340035	0,336085	0,343986	7,901	226,634	527,055

0,4300	2	0,498297	0,494566	0,502027	7,461	332,115	772,360
0,4325	1	0,338445	0,335491	0,341398	5,906	226,885	524,589

Si Rec D	TM						
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2000	1	0,820566	0,813856	0,827276	13,420	254,375	1271,877
0,2025	1	0,817088	0,809788	0,824387	14,598	256,463	1266,486
0,2050	1	0,808523	0,801681	0,815364	13,683	256,908	1253,210
0,2075	1	0,802101	0,794592	0,809610	15,018	257,976	1243,256
0,2100	1	0,795804	0,787960	0,803648	15,688	259,034	1233,497
0,2125	1	0,788246	0,780668	0,795825	15,157	259,629	1221,782
0,2150	1	0,779216	0,771776	0,786657	14,881	259,674	1207,785
0,2175	1	0,772568	0,764693	0,780442	15,748	260,452	1197,480
0,2200	1	0,766358	0,758399	0,774317	15,918	261,328	1187,855
0,2225	1	0,760232	0,752817	0,767647	14,830	262,185	1178,360
0,2250	1	0,753451	0,745489	0,761413	15,924	262,766	1167,849
0,2275	1	0,747045	0,738803	0,755287	16,484	263,427	1157,920
0,2300	1	0,740557	0,732471	0,748642	16,171	264,008	1147,863
0,2325	1	0,735260	0,727857	0,742662	14,805	264,969	1139,652
0,2350	1	0,729446	0,722018	0,736873	14,855	265,701	1130,641
0,2375	1	0,723698	0,716555	0,730841	14,286	266,411	1121,732
0,2400	1	0,718584	0,711695	0,725473	13,779	267,313	1113,805
0,2425	1	0,713783	0,707559	0,720007	12,447	268,293	1106,364
0,2450	1	0,708637	0,703209	0,714066	10,857	269,105	1098,387
0,2475	1	0,703057	0,697523	0,708591	11,068	269,710	1089,739
0,2500	1	0,698268	0,693183	0,703352	10,170	270,579	1082,315
0,2900	1	0,781516	0,776660	0,786373	9,713	351,292	1211,350
0,2925	1	0,775107	0,770405	0,779809	9,405	351,414	1201,416
0,2950	1	0,769560	0,764465	0,774656	10,192	351,882	1192,819
0,2975	1	0,763749	0,758885	0,768613	9,728	352,184	1183,811
0,3525	1	0,547092	0,542867	0,551317	8,450	298,917	847,993
0,3550	1	0,544995	0,540312	0,549677	9,365	299,883	844,742
0,3575	1	0,542807	0,537744	0,547870	10,126	300,783	841,351
0,3600	1	0,540436	0,535351	0,545521	10,169	301,563	837,676
0,3625	1	0,538037	0,532788	0,543285	10,496	302,309	833,957
0,3650	1	0,535815	0,530392	0,541239	10,847	303,138	830,514
0,3675	1	0,533332	0,527999	0,538666	10,667	303,799	826,665
0,3700	1	0,531516	0,525824	0,537208	11,384	304,824	823,850
0,3725	1	0,529073	0,523320	0,534825	11,504	305,473	820,063
0,3750	1	0,526720	0,521138	0,532302	11,164	306,156	816,416
0,3775	1	0,525154	0,519142	0,531166	12,025	307,281	813,989
0,3800	1	0,522995	0,516906	0,529085	12,179	308,044	810,643
0,3825	1	0,519815	0,514124	0,525505	11,381	308,185	805,713
0,3850	1	0,517308	0,511692	0,522925	11,233	308,704	801,828
0,3875	1	0,515097	0,509538	0,520656	11,118	309,380	798,400
0,3900	1	0,513391	0,507695	0,519086	11,392	310,345	795,756
0,3925	1	0,510923	0,505303	0,516543	11,240	310,833	791,931
0,3950	1	0,508169	0,502895	0,513442	10,548	311,126	787,661
0,3975	1	0,505892	0,500741	0,511043	10,302	311,692	784,132
0,4000	1	0,504276	0,498870	0,509682	10,812	312,651	781,627
0,4025	1	0,502024	0,496554	0,507495	10,940	313,200	778,138
0,4050	1	0,499010	0,494223	0,503797	9,574	313,253	773,465
0,4075	1	0,497193	0,492380	0,502007	9,627	314,040	770,650
0,4100	1	0,495822	0,490820	0,500824	10,004	315,095	768,524
0,4125	1	0,493165	0,488605	0,497724	9,119	315,317	764,405
0,4150	1	0,490074	0,486109	0,494038	7,928	315,240	759,614
0,4175	1	0,488334	0,484635	0,492034	7,399	316,013	756,918
0,4200	1	0,487066	0,483420	0,490712	7,292	317,080	754,953
0,4750	1	0,318611	0,314796	0,322425	7,629	234,577	493,847

Annexe 02 : Structure triangulaire et carrée de l'arseniure de Galium connectée et déconnecté.

GAs Hex C	Joint						
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,4200	1	0,388173	0,383070	0,393276	10,206	252,700	601,668
0,4225	1	0,390958	0,384954	0,396962	12,008	256,029	605,985
0,4225	2	0,857776	0,852725	0,862827	10,102	561,736	1329,553
0,4250	1	0,394205	0,387346	0,401063	13,716	259,682	611,017
0,4250	2	0,870255	0,864571	0,875940	11,369	573,281	1348,896
0,4275	1	0,397242	0,389406	0,405079	15,672	263,223	615,726
0,4275	2	0,881718	0,876400	0,887035	10,635	584,248	1366,662
0,4300	1	0,400223	0,391350	0,409095	17,745	266,748	620,345
0,4300	2	0,892350	0,887260	0,897441	10,181	594,752	1383,143
0,4325	1	0,403345	0,393425	0,413265	19,840	270,392	625,185
0,4325	2	0,903393	0,898268	0,908519	10,250	605,612	1400,260
0,4350	1	0,407100	0,396200	0,418001	21,801	274,487	631,006
0,4350	2	0,916789	0,911403	0,922174	10,771	618,145	1421,022

0,4375	1	0,410644	0,398575	0,422713	24,138	278,468	636,499
0,4375	2	0,930793	0,925591	0,935996	10,405	631,194	1442,730
0,4400	1	0,414121	0,400806	0,427435	26,629	282,430	641,887
0,4400	2	0,945270	0,940025	0,950515	10,490	644,674	1465,168
0,4425	1	0,417620	0,403021	0,432220	29,199	286,435	647,312
0,4425	2	0,958733	0,953486	0,963980	10,494	657,571	1486,036
0,4450	1	0,421988	0,406146	0,437831	31,686	291,067	654,082
0,4450	2	0,975371	0,969711	0,981032	11,321	672,762	1511,826
0,4475	1	0,426162	0,408887	0,443436	34,548	295,596	660,551
0,4475	2	0,992073	0,986307	0,997839	11,532	688,127	1537,714
0,4500	1	0,430251	0,411452	0,449049	37,596	300,100	666,889
0,4500	2	1,009288	1,003777	1,014798	11,021	703,978	1564,396
0,4525	1	0,434360	0,413938	0,454782	40,843	304,649	673,258
0,4550	1	0,439318	0,417292	0,461344	44,051	309,829	680,943
0,4575	1	0,444339	0,420553	0,468126	47,574	315,092	688,726
0,4600	1	0,449232	0,423589	0,474874	51,285	320,302	696,309
0,4625	1	0,454200	0,426640	0,481759	55,119	325,604	704,010
0,4650	1	0,459527	0,430099	0,488956	58,857	331,204	712,267
0,4675	1	0,466585	0,436099	0,497071	60,972	338,099	723,207
0,4700	1	0,472897	0,440713	0,505081	64,368	344,505	732,990
0,4725	1	0,479224	0,445165	0,513284	68,119	350,972	742,798
0,4750	1	0,485605	0,449545	0,521665	72,120	357,527	752,688
0,4775	1	0,491709	0,457087	0,526331	69,244	363,926	762,149
0,4800	1	0,495973	0,463135	0,528810	65,675	369,004	768,758
0,4825	1	0,499958	0,468793	0,531123	62,331	373,906	774,935
0,4850	1	0,503811	0,474486	0,533136	58,650	378,740	780,907
0,4875	1	0,509465	0,483403	0,535527	52,124	384,965	789,671
0,4900	1	0,514452	0,491157	0,537747	46,590	390,726	797,400
0,4925	1	0,519078	0,498256	0,539899	41,643	396,251	804,570
0,4950	1	0,523593	0,505335	0,541852	36,517	401,727	811,569
0,4975	1	0,533633	0,522997	0,544269	21,272	411,498	827,131

GAAs Hex C						TE	a (en nm)
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,3725	1	0,640943	0,636450	0,645436	8,986	370,064	993,462
0,3750	1	0,645271	0,639117	0,651426	12,309	375,064	1000,171
0,3775	1	0,649681	0,641730	0,657633	15,903	380,145	1007,006
0,3800	1	0,654193	0,644373	0,664012	19,639	385,319	1013,999
0,3825	1	0,659240	0,647936	0,670544	22,608	390,847	1021,822
0,3850	1	0,664076	0,650991	0,677162	26,171	396,288	1029,318
0,3875	1	0,669007	0,654043	0,683971	29,928	401,822	1036,961
0,3900	1	0,674166	0,657421	0,690910	33,489	407,533	1044,957
0,3925	1	0,679855	0,661679	0,698032	36,353	413,607	1053,775
0,3950	1	0,625374	0,620998	0,629750	8,751	382,885	969,330
0,3950	2	0,685387	0,665539	0,705234	39,695	419,628	1062,349
0,3975	1	0,629646	0,623723	0,635570	11,847	387,941	975,952
0,3975	2	0,690899	0,669258	0,712539	43,281	425,680	1070,893
0,4000	1	0,633826	0,626337	0,641314	14,977	392,972	982,430
0,4000	2	0,696421	0,672934	0,719907	46,973	431,781	1079,452
0,4025	1	0,639150	0,629840	0,648461	18,621	398,750	990,683
0,4025	2	0,701590	0,678610	0,724570	45,959	437,705	1087,465
0,4050	1	0,643643	0,633177	0,654109	20,933	404,047	997,646
0,4050	2	0,706524	0,684223	0,728824	44,600	443,520	1095,112
0,4075	1	0,646344	0,636255	0,656433	20,179	408,247	1001,833
0,4075	2	0,711131	0,689359	0,732903	43,544	449,168	1102,253
0,4100	1	0,649085	0,639302	0,658867	19,565	412,493	1006,081
0,4100	2	0,715598	0,694279	0,736916	42,637	454,762	1109,176
0,4125	1	0,652354	0,643128	0,661581	18,453	417,099	1011,149
0,4125	2	0,720702	0,699852	0,741552	41,700	460,799	1117,089
0,4150	1	0,656166	0,647888	0,664443	16,555	422,079	1017,057
0,4150	2	0,726465	0,706334	0,746597	40,263	467,299	1126,021
0,4175	1	0,385607	0,381419	0,389795	8,376	249,536	597,691
0,4175	2	0,659599	0,651986	0,667213	15,228	426,843	1022,379
0,4175	3	0,731495	0,711796	0,751194	39,398	473,369	1133,817
0,4200	1	0,388173	0,383070	0,393276	10,206	252,700	601,668
0,4200	2	0,6663029	0,656032	0,670026	13,993	431,632	1027,695
0,4200	3	0,736360	0,717035	0,755685	38,649	479,370	1141,358
0,4225	1	0,390958	0,384954	0,396962	12,008	256,029	605,985
0,4225	2	0,666755	0,660517	0,672992	12,475	436,641	1033,470
0,4225	3	0,741635	0,722819	0,760451	37,631	485,678	1149,534
0,4250	1	0,394205	0,387346	0,401063	13,716	259,682	611,017
0,4250	2	0,671082	0,666063	0,676101	10,038	442,076	1040,178
0,4250	3	0,747705	0,729777	0,765633	35,856	492,551	1158,943
0,4275	1	0,397242	0,389406	0,405079	15,672	263,223	615,726
0,4275	2	0,753058	0,735558	0,770558	35,000	498,995	1167,240
0,4300	1	0,400223	0,391350	0,409095	17,745	266,748	620,345

0,4300	2	0,758438	0,741467	0,775408	33,941	505,499	1175,578
0,4325	1	0,403345	0,393425	0,413265	19,840	270,392	625,185
0,4325	2	0,764141	0,747954	0,780328	32,374	512,261	1184,419
0,4350	1	0,407100	0,396200	0,418001	21,801	274,487	631,006
0,4350	2	0,770681	0,755743	0,785619	29,876	519,631	1194,555
0,4375	1	0,410644	0,398575	0,422713	24,138	278,468	636,499
0,4375	2	0,776665	0,762659	0,790670	28,010	526,676	1203,830
0,4400	1	0,414121	0,400806	0,427435	26,629	282,430	641,887
0,4400	2	0,782500	0,769310	0,795691	26,381	533,665	1212,876
0,4425	1	0,417620	0,403021	0,432220	29,199	286,435	647,312
0,4425	2	0,788295	0,775951	0,800638	24,688	540,672	1221,857
0,4450	1	0,421988	0,406146	0,437831	31,686	291,067	654,082
0,4450	2	0,795239	0,784580	0,805898	21,318	548,516	1232,621
0,4475	1	0,426162	0,408887	0,443436	34,548	295,596	660,551
0,4475	2	0,801702	0,792400	0,811005	18,605	556,081	1242,639
0,4500	1	0,430251	0,411452	0,449049	37,596	300,100	666,889
0,4500	2	0,807968	0,799936	0,816000	16,064	563,558	1252,350
0,4525	1	0,434360	0,413938	0,454782	40,843	304,649	673,258
0,4525	2	0,814308	0,807596	0,821020	13,423	571,135	1262,177
0,4550	1	0,439318	0,417292	0,461344	44,051	309,829	680,943
0,4550	2	0,821665	0,816656	0,826675	10,019	579,479	1273,581
0,4575	1	0,444339	0,420553	0,468126	47,574	315,092	688,726
0,4600	1	0,449232	0,423589	0,474874	51,285	320,302	696,309
0,4600	2	0,731364	0,725864	0,736864	11,001	521,463	1133,614
0,4625	1	0,454200	0,426640	0,481759	55,119	325,604	704,010
0,4625	2	0,737584	0,730499	0,744669	14,169	528,755	1143,255
0,4625	3	0,843483	0,837663	0,849303	11,640	604,672	1307,399
0,4650	1	0,459527	0,430099	0,488956	58,857	331,204	712,267
0,4650	2	0,744251	0,735494	0,753008	17,514	536,419	1153,589
0,4650	3	0,851442	0,843142	0,859743	16,601	613,677	1319,736
0,4675	1	0,466585	0,436099	0,497071	60,972	338,099	723,207
0,4675	2	0,753256	0,742630	0,763882	21,253	545,828	1167,547
0,4675	3	0,863312	0,851752	0,874872	23,120	625,577	1338,133
0,4700	1	0,472897	0,440713	0,505081	64,368	344,505	732,990
0,4700	2	0,761147	0,748164	0,774130	25,965	554,496	1179,778
0,4700	3	0,873459	0,859780	0,887137	27,357	636,315	1353,861
0,4725	1	0,479224	0,445165	0,513284	68,119	350,972	742,798
0,4725	2	0,769143	0,753278	0,785008	31,730	563,301	1192,171
0,4725	3	0,883424	0,867558	0,899290	31,732	646,998	1369,307
0,4750	1	0,485605	0,449545	0,521665	72,120	357,527	752,688
0,4750	2	0,777158	0,758171	0,796146	37,975	572,183	1204,595
0,4750	3	0,893860	0,875476	0,912243	36,767	658,104	1385,482
0,4775	1	0,494101	0,457087	0,531114	74,027	365,696	765,856
0,4775	2	0,787599	0,764976	0,810221	45,245	582,922	1220,778
0,4775	3	0,9098578	0,887502	0,929654	42,152	672,461	1408,296
0,4800	1	0,501786	0,463135	0,540438	77,302	373,329	777,769
0,4800	2	0,797148	0,770215	0,824082	53,868	593,078	1235,580
0,4800	3	0,922269	0,898381	0,946157	47,776	686,168	1429,517
0,4825	1	0,509396	0,468793	0,549998	81,206	380,964	789,563
0,4825	2	0,806898	0,774689	0,839107	64,417	603,459	1250,692
0,4825	3	0,936436	0,910014	0,962858	52,844	700,337	1451,475
0,4850	1	0,517030	0,474486	0,559574	85,089	388,677	801,397
0,4850	2	0,819778	0,784648	0,854908	70,261	616,268	1270,656
0,4850	3	0,951419	0,922707	0,980130	57,423	715,229	1474,699
0,4875	1	0,526805	0,483403	0,570207	86,804	398,067	816,548
0,4875	2	0,838435	0,802886	0,873984	71,098	633,542	1299,574
0,4875	3	0,971471	0,940704	1,002238	61,534	734,068	1505,780
0,4900	1	0,535806	0,491157	0,580456	89,299	406,945	830,500
0,4900	2	0,857370	0,822148	0,892592	70,444	651,172	1328,923
0,4900	3	0,991075	0,958802	1,023347	64,546	752,721	1536,166
0,4925	1	0,544485	0,498256	0,590713	92,457	415,646	843,951
0,4925	2	0,878113	0,842928	0,913298	70,370	670,330	1361,076
0,4925	3	1,010568	0,977760	1,043376	65,616	771,442	1566,380
0,4950	1	0,552983	0,505335	0,600632	95,297	424,276	857,124
0,4950	2	0,899314	0,864702	0,933926	69,224	689,999	1393,937
0,4950	3	1,030691	0,997680	1,063703	66,023	790,798	1597,572
0,4975	1	0,563496	0,515819	0,611173	95,354	434,526	873,418
0,4975	2	0,923505	0,888421	0,958590	70,169	712,138	1431,433
0,4975	3	1,056286	1,025066	1,087505	62,439	814,528	1637,243
0,5000	1	0,573545	0,525760	0,621330	95,570	444,498	888,995
0,5000	2	0,948044	0,914301	0,981787	67,487	734,734	1469,468
0,5000	3	1,082144	1,053301	1,110987	57,686	838,661	1677,323
0,5025	1	0,582030	0,534909	0,629150	94,241	453,328	902,146
0,5025	2	0,971496	0,936676	1,006316	69,641	756,674	1505,819
0,5025	3	1,104239	1,080486	1,127992	47,506	860,064	1711,570
0,5050	1	0,589102	0,543471	0,634733	91,262	461,119	913,108
0,5050	2	0,825846	0,810434	0,841258	30,824	646,431	1280,061

0,5050	3	0,989987	0,954361	1,025614	71,253	774,913	1534,480
0,5050	4	1,123581	1,105784	1,141378	35,594	879,483	1741,551
0,5075	1	0,597914	0,555461	0,640366	84,905	470,334	926,766
0,5075	2	0,838676	0,814468	0,862884	48,417	659,724	1299,948
0,5075	3	1,010033	0,971870	1,048195	76,325	794,517	1565,550
0,5075	4	1,148059	1,139985	1,156132	16,148	903,092	1779,491
0,5100	1	0,606234	0,567441	0,645027	77,587	479,228	939,663
0,5100	2	0,850280	0,818660	0,881901	63,241	672,147	1317,934
0,5100	3	1,026315	0,986572	1,066057	79,485	811,302	1590,788
0,5125	1	0,613434	0,578094	0,648774	70,680	487,297	950,823
0,5125	2	0,861106	0,822621	0,899592	76,972	684,041	1334,715
0,5125	3	1,040374	0,999854	1,080893	81,039	826,447	1612,579
0,5150	1	0,620323	0,588571	0,652075	63,504	495,173	961,501
0,5150	2	0,871954	0,826842	0,917065	90,223	696,037	1351,528
0,5150	3	1,052997	1,013002	1,092992	79,990	840,555	1632,145
0,5175	1	0,629230	0,603994	0,654467	50,473	504,721	975,307
0,5175	2	0,8882141	0,835956	0,928326	92,371	707,587	1367,319
0,5175	3	1,065816	1,028408	1,103224	74,816	854,917	1652,014
0,5200	1	0,640313	0,623506	0,657119	33,613	516,092	992,484
0,5200	2	0,895329	0,847427	0,943230	95,803	721,635	1387,759
0,5200	3	1,083723	1,053586	1,113860	60,274	873,481	1679,771
0,5225	1	0,648976	0,639332	0,658621	19,289	525,590	1005,913
0,5225	2	0,904633	0,857288	0,951978	94,689	732,640	1402,181
0,5225	3	1,095518	1,069144	1,121891	52,747	887,233	1698,053
0,5250	1	0,913630	0,867226	0,960034	92,808	743,466	1416,126
0,5250	2	1,105877	1,083101	1,128653	45,553	899,908	1714,110
0,5275	1	0,923195	0,878926	0,967463	88,536	754,827	1430,952
0,5275	2	1,115123	1,095885	1,134362	38,477	911,753	1728,441
0,5300	1	0,938745	0,903785	0,973705	69,920	771,179	1455,055
0,5300	2	1,124422	1,109761	1,139082	29,322	923,712	1742,854
0,5325	1	0,950041	0,920686	0,979395	58,709	784,140	1472,563
0,5325	2	1,131037	1,119176	1,142898	23,722	933,530	1753,108
0,5350	1	0,960099	0,936573	0,983624	47,051	796,162	1488,153
0,5375	1	0,967088	0,948790	0,985386	36,597	805,705	1498,986

GAAs Hex C						TM	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2000	1	0,207302	0,200962	0,213642	12,680	64,264	321,318
0,2025	1	0,207886	0,201101	0,214671	13,570	65,250	322,223
0,2050	1	0,208759	0,201303	0,216215	14,912	66,333	323,576
0,2075	1	0,209424	0,201478	0,217370	15,892	67,356	324,608
0,2100	1	0,210042	0,201647	0,218436	16,789	68,369	325,565
0,2125	1	0,210642	0,201813	0,219471	17,657	69,380	326,495
0,2150	1	0,211528	0,202028	0,221028	18,999	70,492	327,868
0,2175	1	0,212251	0,202225	0,222278	20,053	71,555	328,990
0,2200	1	0,212949	0,202412	0,223485	21,073	72,616	330,071
0,2225	1	0,213564	0,202596	0,224533	21,937	73,653	331,025
0,2250	1	0,214459	0,202820	0,226098	23,278	74,793	332,411
0,2275	1	0,215324	0,203039	0,227610	24,571	75,929	333,753
0,2300	1	0,216107	0,203245	0,228969	25,724	77,042	334,966
0,2325	1	0,216821	0,203448	0,230194	26,747	78,137	336,072
0,2350	1	0,217756	0,203687	0,231825	28,138	79,318	337,522
0,2375	1	0,218750	0,203931	0,233568	29,636	80,527	339,062
0,2400	1	0,219617	0,204161	0,235073	30,913	81,698	340,406
0,2425	1	0,220396	0,204387	0,236404	32,017	82,841	341,613
0,2450	1	0,221267	0,204641	0,237892	33,251	84,026	342,964
0,2475	1	0,222369	0,204937	0,239800	34,864	85,306	344,671
0,2475	2	0,563422	0,560055	0,566788	6,733	216,143	873,304
0,2500	1	0,223291	0,205207	0,241374	36,167	86,525	346,100
0,2500	2	0,565477	0,561299	0,569654	8,355	219,122	876,489
0,2525	1	0,224151	0,205476	0,242827	37,350	87,727	347,435
0,2525	2	0,567585	0,562544	0,572626	10,082	222,139	879,757
0,2550	1	0,224982	0,205748	0,244216	38,468	88,924	348,723
0,2550	2	0,569694	0,563708	0,575680	11,972	225,171	883,025
0,2575	1	0,226178	0,206133	0,246223	40,091	90,273	350,576
0,2575	2	0,572287	0,565792	0,578783	12,991	228,414	887,045
0,2600	1	0,227183	0,206457	0,247909	41,452	91,555	352,134
0,2600	2	0,574623	0,567407	0,581838	14,431	231,573	890,665
0,2625	1	0,228184	0,206775	0,249594	42,820	92,842	353,686
0,2625	2	0,577142	0,569188	0,585096	15,908	234,825	894,570
0,2650	1	0,229078	0,207089	0,251067	43,978	94,094	355,071
0,2650	2	0,579326	0,570559	0,588092	17,532	237,958	897,955
0,2675	1	0,230394	0,207510	0,253278	45,767	95,527	357,111
0,2675	2	0,582032	0,572969	0,591095	18,126	241,325	902,150
0,2700	1	0,231503	0,207880	0,255126	47,246	96,884	358,829
0,2700	2	0,584745	0,575041	0,594449	19,408	244,716	906,355

0,2725	1	0,232573	0,208235	0,256911	48,676	98,233	360,488
0,2725	2	0,587226	0,576911	0,597541	20,629	248,030	910,200
0,2750	1	0,233531	0,208586	0,258476	49,889	99,543	361,973
0,2750	2	0,589697	0,578585	0,600809	22,224	251,358	914,030
0,2775	1	0,234870	0,209029	0,260712	51,682	101,024	364,049
0,2775	2	0,592673	0,580986	0,604360	23,374	254,924	918,644
0,2800	1	0,236093	0,209440	0,262745	53,305	102,464	365,944
0,2800	2	0,595312	0,583066	0,607558	24,493	258,365	922,733
0,2825	1	0,237312	0,209828	0,264796	54,968	103,913	367,834
0,2825	2	0,598127	0,585348	0,610905	25,557	261,905	927,096
0,2850	1	0,238363	0,210220	0,266506	56,286	105,297	369,462
0,2850	2	0,600884	0,587272	0,614495	27,222	265,440	931,369
0,2875	1	0,239817	0,210694	0,268940	58,246	106,868	371,716
0,2875	2	0,603789	0,589476	0,618103	28,627	269,064	935,873
0,2900	1	0,241214	0,211156	0,271271	60,115	108,425	373,881
0,2900	2	0,606095	0,591720	0,620471	28,751	272,440	939,448
0,2925	1	0,242548	0,211584	0,273511	61,927	109,965	375,949
0,2925	2	0,608333	0,594080	0,622585	28,505	275,803	942,916
0,2950	1	0,243738	0,212020	0,275455	63,435	111,449	377,793
0,2950	2	0,610286	0,595970	0,624602	28,632	279,053	945,943
0,2975	1	0,245184	0,212523	0,277844	65,321	113,060	380,034
0,2975	2	0,612501	0,598180	0,626823	28,643	282,440	949,377
0,3000	1	0,246691	0,213057	0,280324	67,268	114,711	382,371
0,3000	2	0,614890	0,600513	0,629266	28,753	285,924	953,079
0,3025	1	0,248095	0,213547	0,282642	69,095	116,325	384,547
0,3025	2	0,617094	0,602598	0,631590	28,993	289,340	956,496
0,3050	1	0,249399	0,214040	0,284759	70,720	117,904	386,569
0,3050	2	0,619196	0,604513	0,633879	29,366	292,725	959,753
0,3075	1	0,250806	0,214583	0,287029	72,446	119,540	388,749
0,3075	2	0,621504	0,606734	0,636275	29,542	296,225	963,332
0,3100	1	0,252473	0,215229	0,289717	74,488	121,313	391,333
0,3100	2	0,624312	0,609596	0,639028	29,432	299,982	967,684
0,3125	1	0,253948	0,215818	0,292078	76,260	123,006	393,619
0,3125	2	0,626791	0,612012	0,641570	29,558	303,602	971,526
0,3150	1	0,255393	0,216406	0,294380	77,974	124,696	395,860
0,3150	2	0,629302	0,614451	0,644154	29,703	307,257	975,418
0,3175	1	0,256747	0,216976	0,296517	79,541	126,351	397,957
0,3175	2	0,631526	0,616669	0,646382	29,714	310,790	978,865
0,3200	1	0,258700	0,217721	0,299680	81,960	128,315	400,986
0,3200	2	0,634582	0,620382	0,648782	28,400	314,753	983,602
0,3225	1	0,260350	0,218386	0,302313	83,927	130,142	403,542
0,3225	2	0,637285	0,623461	0,651110	27,650	318,563	987,792
0,3250	1	0,261950	0,219045	0,304856	85,811	131,958	406,023
0,3250	2	0,639733	0,626031	0,653435	27,404	322,265	991,586
0,3275	1	0,263449	0,219696	0,307202	87,506	133,733	408,346
0,3275	2	0,642052	0,628592	0,655511	26,919	325,921	995,180
0,3300	1	0,265587	0,220490	0,310684	90,195	135,848	411,660
0,3300	2	0,645365	0,632868	0,657861	24,993	330,104	1000,315
0,3325	1	0,267326	0,221227	0,313426	92,199	137,773	414,356
0,3325	2	0,648012	0,636055	0,659968	23,913	333,969	1004,418
0,3350	1	0,269010	0,221958	0,316061	94,103	139,683	416,965
0,3350	2	0,650597	0,639007	0,662186	23,178	337,822	1008,425
0,3375	1	0,270649	0,222693	0,318605	95,912	141,583	419,505
0,3375	2	0,653166	0,641991	0,664342	22,351	341,688	1012,408
0,3400	1	0,273006	0,223562	0,322451	98,888	143,874	423,160
0,3400	2	0,656576	0,646332	0,666821	20,489	346,016	1017,693
0,3425	1	0,275019	0,224419	0,325619	101,200	146,001	426,279
0,3425	2	0,659607	0,650000	0,669215	19,216	350,169	1022,391
0,3450	1	0,276888	0,225250	0,328525	103,274	148,066	429,176
0,3450	2	0,662621	0,653807	0,671435	17,629	354,337	1027,063
0,3475	1	0,278703	0,226087	0,331320	105,233	150,117	431,990
0,3475	2	0,665290	0,656831	0,673749	16,917	358,342	1031,199
0,3500	1	0,281047	0,227031	0,335064	108,033	152,468	435,623
0,3500	2	0,668766	0,661091	0,676441	15,350	362,805	1036,587
0,3525	1	0,283308	0,227993	0,338624	110,631	154,793	439,128
0,3525	2	0,672115	0,665023	0,679208	14,185	367,227	1041,778
0,3550	1	0,285434	0,228950	0,341917	112,967	157,060	442,422
0,3550	2	0,675519	0,668907	0,682130	13,223	371,704	1047,054
0,3575	1	0,287390	0,229887	0,344893	115,006	159,250	445,455
0,3575	2	0,678612	0,672189	0,685034	12,844	376,036	1051,848
0,3600	1	0,289592	0,230945	0,348240	117,295	161,593	448,868
0,3600	2	0,682338	0,676534	0,688142	11,608	380,744	1057,623
0,3625	1	0,291959	0,232073	0,351845	119,771	164,044	452,536
0,3625	2	0,686375	0,681045	0,691706	10,661	385,657	1063,882
0,3650	1	0,294251	0,233167	0,355335	122,168	166,472	456,089
0,3650	2	0,690668	0,685574	0,695763	10,188	390,746	1070,536
0,3675	1	0,296362	0,234234	0,358489	124,254	168,815	459,360

0,3675	2	0,694623	0,689643	0,699603	9,960	395,675	1076,665
0,3700	1	0,298584	0,235393	0,361776	126,384	171,238	462,806
0,3700	2	0,698267	0,693966	0,702568	8,602	400,456	1082,314
0,3725	1	0,301227	0,236713	0,365741	129,029	173,921	466,902
0,3750	1	0,303659	0,237919	0,369399	131,480	176,502	470,672
0,3775	1	0,306004	0,239147	0,372862	133,715	179,051	474,307
0,3800	1	0,308248	0,240400	0,376096	135,696	181,558	477,784
0,3825	1	0,311297	0,241929	0,380664	138,735	184,560	482,510
0,3850	1	0,314016	0,243311	0,384721	141,410	187,389	486,725
0,3875	1	0,316619	0,244733	0,388506	143,773	190,170	490,760
0,3900	1	0,319092	0,246148	0,392036	145,888	192,891	494,592
0,3925	1	0,322334	0,247844	0,396823	148,978	196,100	499,617
0,3950	1	0,325289	0,249434	0,401144	151,710	199,158	504,198
0,3975	1	0,328050	0,251057	0,405043	153,986	202,120	508,477
0,4000	1	0,330700	0,252701	0,408698	155,997	205,034	512,585
0,4025	1	0,334192	0,254678	0,413706	159,028	208,494	517,997
0,4050	1	0,337416	0,256590	0,418242	161,652	211,813	522,995
0,4075	1	0,340525	0,258486	0,422565	164,080	215,084	527,814
0,4100	1	0,343423	0,260445	0,426402	165,957	218,246	532,306
0,4125	1	0,346472	0,262614	0,430329	167,715	221,525	537,031
0,4150	1	0,349901	0,265051	0,434751	169,700	225,074	542,347
0,4175	1	0,353226	0,267362	0,439090	171,728	228,581	547,500
0,4200	1	0,356195	0,269601	0,442790	173,189	231,883	552,103
0,4225	1	0,359420	0,272055	0,446785	174,730	235,375	557,101
0,4225	2	0,857776	0,852725	0,862827	10,102	561,736	1329,553
0,4250	1	0,362977	0,274813	0,451141	176,328	239,111	562,614
0,4250	2	0,870255	0,864571	0,875940	11,369	573,281	1348,896
0,4275	1	0,366356	0,277460	0,455252	177,791	242,757	567,852
0,4275	2	0,881718	0,876400	0,887035	10,635	584,248	1366,662
0,4300	1	0,369611	0,280089	0,459133	179,044	246,346	572,897
0,4300	2	0,892350	0,887260	0,897441	10,181	594,752	1383,143
0,4325	1	0,372944	0,282842	0,463047	180,205	250,013	578,064
0,4325	2	0,903393	0,898268	0,908519	10,250	605,612	1400,260
0,4350	1	0,376777	0,285967	0,467587	181,620	254,042	584,004
0,4350	2	0,916789	0,911403	0,922174	10,771	618,145	1421,022
0,4375	1	0,380379	0,289148	0,471611	182,463	257,945	589,588
0,4375	2	0,930793	0,925591	0,935996	10,405	631,194	1442,730
0,4400	1	0,383931	0,292311	0,475552	183,241	261,841	595,094
0,4400	2	0,945270	0,940025	0,950515	10,490	644,674	1465,168
0,4425	1	0,387295	0,295516	0,479073	183,557	265,636	600,307
0,4425	2	0,958733	0,953486	0,963980	10,494	657,571	1486,036
0,4450	1	0,391576	0,299361	0,483792	184,431	270,090	606,943
0,4450	2	0,975371	0,969711	0,981032	11,321	672,762	1511,826
0,4475	1	0,395552	0,303405	0,487700	184,295	274,365	613,106
0,4475	2	0,992073	0,986307	0,997839	11,532	688,127	1537,714
0,4500	1	0,399447	0,307394	0,491500	184,106	278,614	619,143
0,4500	2	1,009288	1,003777	1,014798	11,021	703,978	1564,396
0,4525	1	0,403199	0,311445	0,494953	183,508	282,794	624,958
0,4550	1	0,407707	0,316310	0,499104	182,794	287,536	631,946
0,4575	1	0,412160	0,321531	0,502788	181,257	292,273	638,847
0,4600	1	0,416721	0,326943	0,506500	179,557	297,122	645,918
0,4625	1	0,421031	0,332508	0,509553	177,045	301,826	652,597
0,4650	1	0,425457	0,338467	0,512448	173,981	306,648	659,459
0,4675	1	0,431018	0,346466	0,515569	169,103	312,326	668,077
0,4700	1	0,436046	0,353592	0,518500	164,908	317,660	675,872
0,4725	1	0,442555	0,364011	0,521100	157,088	324,117	685,961
0,4750	1	0,448177	0,372779	0,523574	150,795	329,970	694,674
0,4775	1	0,456437	0,386543	0,526331	139,788	337,820	707,477
0,4800	1	0,463633	0,398456	0,528810	130,355	344,943	718,631
0,4825	1	0,471756	0,412388	0,531123	118,735	352,814	731,222
0,4850	1	0,478187	0,423239	0,533136	109,897	359,477	741,190
0,4875	1	0,492190	0,448853	0,535527	86,674	371,911	762,895
0,4900	1	0,496397	0,455048	0,537747	82,699	377,014	769,416
0,4925	1	0,511662	0,483424	0,539899	56,475	390,590	793,076
0,4950	1	0,521834	0,501817	0,541852	40,035	400,377	808,843
0,4975	1	0,533633	0,522997	0,544269	21,272	411,498	827,131

**GAAs Hex D**

r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)	TE
0,2000	1	0,367735	0,282467	0,453003	170,536	113,998	569,989	
0,2000	2	0,588667	0,577318	0,600016	22,699	182,487	912,434	
0,2025	1	0,365408	0,280807	0,450010	169,203	114,692	566,383	
0,2025	2	0,586198	0,572657	0,599739	27,082	183,993	908,608	
0,2050	1	0,361448	0,278589	0,444307	165,718	114,850	560,245	
0,2050	2	0,582509	0,565706	0,599312	33,606	185,092	902,889	
0,2075	1	0,358554	0,276787	0,440321	163,533	115,320	555,759	

0,2075	2	0,579568	0,560230	0,598907	38,677	186,404	898,331
0,2100	1	0,356037	0,275149	0,436926	161,777	115,890	551,858
0,2100	2	0,576890	0,555283	0,598498	43,215	187,778	894,180
0,2125	1	0,353749	0,273629	0,433869	160,240	116,516	548,311
0,2125	2	0,574661	0,551264	0,598058	46,794	189,279	890,725
0,2150	1	0,350244	0,271689	0,428799	157,111	116,719	542,878
0,2150	2	0,571313	0,545122	0,597505	52,382	190,390	885,536
0,2175	1	0,347411	0,270006	0,424817	154,811	117,121	538,488
0,2175	2	0,568580	0,540198	0,596962	56,765	191,683	881,299
0,2200	1	0,344971	0,268486	0,421456	152,969	117,635	534,705
0,2200	2	0,566058	0,535714	0,596403	60,689	193,026	877,391
0,2225	1	0,342756	0,267072	0,418441	151,368	118,208	531,272
0,2225	2	0,563814	0,531821	0,595806	63,984	194,445	873,911
0,2250	1	0,339561	0,265302	0,413820	148,519	118,422	526,320
0,2250	2	0,560658	0,526197	0,595120	68,922	195,530	869,021
0,2275	1	0,336724	0,263672	0,409776	146,104	118,737	521,922
0,2275	2	0,557815	0,521229	0,594400	73,171	196,699	864,613
0,2300	1	0,334341	0,262225	0,406456	144,231	119,192	518,228
0,2300	2	0,555234	0,516809	0,593659	76,850	197,941	860,613
0,2325	1	0,332164	0,260876	0,403452	142,576	119,703	514,854
0,2325	2	0,552913	0,512932	0,592894	79,962	199,256	857,015
0,2325	3	0,798167	0,792446	0,803888	11,442	287,639	1237,159
0,2350	1	0,329330	0,259283	0,399377	140,093	119,958	510,462
0,2350	2	0,549930	0,507837	0,592022	84,185	200,312	852,391
0,2350	3	0,793763	0,783966	0,803561	19,595	289,128	1230,333
0,2375	1	0,326475	0,257686	0,395264	137,578	120,184	506,036
0,2375	2	0,547215	0,503330	0,591100	87,770	201,444	848,183
0,2375	3	0,789384	0,775551	0,803218	27,667	290,592	1223,545
0,2400	1	0,324123	0,256287	0,391959	135,672	120,574	502,390
0,2400	2	0,544680	0,499162	0,590199	91,037	202,621	844,254
0,2400	3	0,786226	0,769541	0,802911	33,370	292,476	1218,650
0,2425	1	0,322007	0,254997	0,389018	134,021	121,035	499,112
0,2425	2	0,542262	0,495294	0,589229	93,934	203,823	840,505
0,2425	3	0,783474	0,764411	0,802536	38,125	294,488	1214,384
0,2450	1	0,319664	0,253660	0,385667	132,008	121,392	495,478
0,2450	2	0,539692	0,491393	0,587990	96,597	204,948	836,522
0,2450	3	0,780157	0,758423	0,801890	43,467	296,265	1209,243
0,2475	1	0,316825	0,252183	0,381468	129,285	121,542	491,079
0,2475	2	0,536901	0,487395	0,586406	99,010	205,968	832,196
0,2475	3	0,775758	0,750582	0,800935	50,354	297,600	1202,426
0,2500	1	0,314633	0,250944	0,378322	127,378	121,920	487,681
0,2500	2	0,534329	0,483730	0,584928	101,198	207,052	828,210
0,2500	3	0,772573	0,745094	0,800052	54,958	299,372	1197,489
0,2525	1	0,312683	0,249806	0,375561	125,755	122,376	484,659
0,2525	2	0,531827	0,480235	0,583419	103,184	208,144	824,332
0,2525	3	0,769784	0,740499	0,799069	58,570	301,274	1193,165
0,2550	1	0,310874	0,248730	0,373018	124,288	122,873	481,854
0,2550	2	0,529498	0,477090	0,581907	104,817	209,284	820,723
0,2550	3	0,767190	0,736318	0,798063	61,745	303,232	1189,145
0,2575	1	0,308012	0,247373	0,368651	121,278	122,935	477,419
0,2575	2	0,526295	0,473075	0,579515	106,441	210,057	815,757
0,2575	3	0,762390	0,728536	0,796245	67,709	304,289	1181,705
0,2600	1	0,305934	0,246264	0,365604	119,340	123,292	474,198
0,2600	2	0,523649	0,469749	0,577549	107,800	211,031	811,656
0,2600	3	0,759067	0,723372	0,794762	71,390	305,904	1176,554
0,2625	1	0,304076	0,245232	0,362920	117,688	123,721	471,318
0,2625	2	0,521140	0,466617	0,575664	109,048	212,039	807,768
0,2625	3	0,756118	0,718962	0,793273	74,311	307,645	1171,982
0,2650	1	0,302372	0,244266	0,360479	116,213	124,199	468,677
0,2650	2	0,518940	0,464112	0,573768	109,656	213,155	804,358
0,2650	3	0,753365	0,715041	0,791689	76,648	309,445	1167,716
0,2675	1	0,299676	0,243008	0,356345	113,337	124,253	464,499
0,2675	2	0,515645	0,460137	0,571152	111,016	213,799	799,249
0,2675	3	0,748538	0,707647	0,789429	81,782	310,363	1160,234
0,2700	1	0,297609	0,241948	0,353271	111,324	124,550	461,295
0,2700	2	0,513011	0,457094	0,568927	111,833	214,695	795,167
0,2700	3	0,744911	0,702374	0,787449	85,075	311,745	1154,613
0,2725	1	0,295788	0,240976	0,350599	109,624	124,933	458,471
0,2725	2	0,510559	0,454320	0,566797	112,478	215,647	791,366
0,2725	3	0,741696	0,697911	0,785481	87,570	313,274	1149,628
0,2750	1	0,294132	0,240071	0,348193	108,122	125,374	455,904
0,2750	2	0,508320	0,451970	0,564669	112,700	216,671	787,895
0,2750	3	0,738733	0,694082	0,783384	89,302	314,885	1145,036
0,2775	1	0,291673	0,238913	0,344433	105,519	125,456	452,093
0,2775	2	0,505185	0,448334	0,562035	113,701	217,293	783,037
0,2775	3	0,734098	0,687310	0,780887	93,577	315,754	1137,852
0,2800	1	0,289635	0,237892	0,341379	103,487	125,702	448,935

0,2800	2	0,502532	0,445399	0,559665	114,266	218,099	778,924
0,2800	3	0,730251	0,681975	0,778528	96,553	316,929	1131,890
0,2825	1	0,287860	0,236961	0,338759	101,798	126,047	446,183
0,2825	2	0,500031	0,442636	0,557425	114,789	218,951	775,047
0,2825	3	0,726866	0,677584	0,776147	98,564	318,276	1126,642
0,2850	1	0,286242	0,236092	0,336393	100,301	126,447	443,675
0,2850	2	0,497729	0,440234	0,555224	114,990	219,872	771,480
0,2850	3	0,723729	0,673778	0,773680	99,902	319,707	1121,780
0,2875	1	0,284031	0,235029	0,33033	98,004	126,571	440,248
0,2875	2	0,494819	0,436982	0,552656	115,674	220,504	766,969
0,2875	3	0,719372	0,667760	0,770984	103,224	320,570	1115,027
0,2900	1	0,282029	0,234036	0,330021	95,986	126,772	437,144
0,2900	2	0,492252	0,434282	0,550221	115,939	221,267	762,990
0,2900	3	0,715384	0,662469	0,768300	105,832	321,565	1108,846
0,2925	1	0,280308	0,233141	0,327476	94,335	127,085	434,478
0,2925	2	0,489804	0,431660	0,547948	116,288	222,065	759,195
0,2925	3	0,711895	0,658208	0,765583	107,375	322,756	1103,438
0,2950	1	0,278745	0,232310	0,325180	92,870	127,456	432,055
0,2950	2	0,487480	0,429255	0,545705	116,450	222,900	755,594
0,2950	3	0,708623	0,654503	0,762743	108,240	324,018	1098,365
0,2975	1	0,276810	0,231376	0,322245	90,869	127,644	429,056
0,2975	2	0,484897	0,426699	0,543095	116,396	223,598	751,591
0,2975	3	0,704558	0,649613	0,759503	109,891	324,889	1092,065
0,3000	1	0,274874	0,230452	0,319296	88,844	127,816	426,054
0,3000	2	0,482290	0,424168	0,540411	116,243	224,265	747,549
0,3000	3	0,700409	0,644701	0,756117	111,416	325,690	1085,634
0,3025	1	0,273252	0,229636	0,316868	87,232	128,121	423,541
0,3025	2	0,479879	0,421807	0,537951	116,144	225,003	743,813
0,3025	3	0,696807	0,640794	0,752820	112,026	326,715	1080,051
0,3050	1	0,271786	0,228884	0,314689	85,805	128,487	421,269
0,3050	2	0,477568	0,419594	0,535542	115,948	225,770	740,230
0,3050	3	0,693407	0,637376	0,749437	112,061	327,808	1074,781
0,3075	1	0,270191	0,228122	0,312261	84,139	128,780	418,797
0,3075	2	0,475126	0,417398	0,532854	115,457	226,457	736,445
0,3075	3	0,689683	0,633610	0,745757	112,148	328,720	1069,009
0,3100	1	0,268312	0,227301	0,309322	82,021	128,924	415,883
0,3100	2	0,472407	0,415080	0,529733	114,653	226,992	732,231
0,3100	3	0,685362	0,629093	0,741630	112,537	329,316	1062,310
0,3125	1	0,266798	0,226582	0,307013	80,431	129,230	413,536
0,3125	2	0,469997	0,412948	0,527045	114,097	227,655	728,495
0,3125	3	0,681704	0,625622	0,737787	112,165	330,201	1056,642
0,3150	1	0,265421	0,225910	0,304933	79,023	129,592	411,403
0,3150	2	0,467705	0,410922	0,524487	113,565	228,357	724,942
0,3150	3	0,678131	0,622517	0,733744	111,227	331,097	1051,103
0,3175	1	0,264140	0,225273	0,303007	77,733	129,990	409,417
0,3175	2	0,465503	0,409157	0,521849	112,692	229,086	721,530
0,3175	3	0,674245	0,619676	0,728813	109,137	331,813	1045,079
0,3200	1	0,262180	0,224469	0,299892	75,423	130,041	406,379
0,3200	2	0,461911	0,406819	0,517002	110,183	229,108	715,962
0,3200	3	0,667862	0,614796	0,720927	106,130	331,259	1035,185
0,3225	1	0,260723	0,223807	0,297639	73,833	130,329	404,121
0,3225	2	0,458977	0,404893	0,513060	108,167	229,431	711,414
0,3225	3	0,663439	0,611440	0,715438	103,998	331,637	1028,331
0,3250	1	0,259398	0,223183	0,295613	72,430	130,672	402,067
0,3250	2	0,456208	0,403091	0,509326	106,234	229,815	707,123
0,3250	3	0,659369	0,608450	0,710288	101,838	332,157	1022,021
0,3275	1	0,258169	0,222594	0,293743	71,150	131,053	400,161
0,3275	2	0,453697	0,401630	0,505764	104,134	230,308	703,230
0,3275	3	0,655573	0,605758	0,705388	99,630	332,785	1016,137
0,3300	1	0,256334	0,221839	0,290829	68,991	131,115	397,318
0,3300	2	0,450204	0,399296	0,501111	101,815	230,279	697,816
0,3300	3	0,649224	0,601063	0,697384	96,321	332,078	1006,296
0,3325	1	0,254897	0,221199	0,288594	67,395	131,367	395,090
0,3325	2	0,447391	0,397482	0,497301	99,818	230,574	693,457
0,3325	3	0,644691	0,597710	0,691672	93,962	332,258	999,271
0,3350	1	0,253611	0,220610	0,286612	66,001	131,688	393,097
0,3350	2	0,444801	0,395852	0,493751	97,899	230,963	689,442
0,3350	3	0,640664	0,594815	0,686514	91,699	332,665	993,030
0,3375	1	0,252415	0,220052	0,284778	64,726	132,045	391,244
0,3375	2	0,442398	0,394444	0,490351	95,907	231,429	685,716
0,3375	3	0,636865	0,592180	0,681551	89,371	333,160	987,141
0,3400	1	0,250674	0,219334	0,282015	62,681	132,105	388,545
0,3400	2	0,439082	0,392282	0,485882	93,599	231,396	680,577
0,3400	3	0,630608	0,587596	0,673621	86,025	332,331	977,443
0,3425	1	0,249229	0,218704	0,279754	61,050	132,309	386,305
0,3425	2	0,436349	0,390579	0,482118	91,538	231,647	676,340
0,3425	3	0,625858	0,584122	0,667594	83,472	332,252	970,079

0,3450	1	0,247954	0,218129	0,277780	59,652	132,594	384,329
0,3450	2	0,433819	0,388939	0,478699	89,760	231,985	672,419
0,3450	3	0,621797	0,581214	0,662380	81,166	332,506	963,785
0,3475	1	0,246773	0,217586	0,275959	58,373	132,918	382,498
0,3475	2	0,431433	0,387425	0,475441	88,016	232,380	668,721
0,3475	3	0,618023	0,578568	0,657477	78,909	332,882	957,935
0,3500	1	0,245235	0,216947	0,273524	56,577	133,040	380,115
0,3500	2	0,428614	0,385755	0,471472	85,717	232,523	664,351
0,3500	3	0,612730	0,574717	0,650742	76,025	332,406	949,731
0,3525	1	0,243843	0,216355	0,2711332	54,977	133,230	377,957
0,3525	2	0,426020	0,384208	0,467832	83,625	232,767	660,331
0,3525	3	0,608154	0,571397	0,644912	73,514	332,280	942,639
0,3550	1	0,242634	0,215825	0,269443	53,618	133,509	376,082
0,3550	2	0,423625	0,382725	0,464524	81,799	233,100	656,618
0,3550	3	0,604390	0,568667	0,640113	71,446	332,566	936,805
0,3575	1	0,241521	0,215332	0,267711	52,379	133,833	374,358
0,3575	2	0,421362	0,381322	0,461402	80,080	233,487	653,112
0,3575	3	0,601006	0,566246	0,635767	69,521	333,033	931,560
0,3600	1	0,240208	0,214814	0,265603	50,789	134,036	372,323
0,3600	2	0,418899	0,379903	0,457896	77,993	233,746	649,294
0,3600	3	0,596941	0,563375	0,630506	67,132	333,093	925,258
0,3625	1	0,238890	0,214302	0,263477	49,175	134,226	370,279
0,3625	2	0,416442	0,378530	0,454355	75,825	233,989	645,486
0,3625	3	0,592820	0,560478	0,625162	64,684	333,091	918,871
0,3650	1	0,237756	0,213839	0,261673	47,834	134,510	368,521
0,3650	2	0,414202	0,377216	0,451187	73,971	234,335	642,013
0,3650	3	0,589407	0,558099	0,620715	62,616	333,457	913,581
0,3675	1	0,236719	0,213411	0,260028	46,617	134,841	366,915
0,3675	2	0,412079	0,375974	0,448184	72,210	234,730	638,722
0,3675	3	0,586338	0,556021	0,616655	60,634	333,993	908,824
0,3700	1	0,235590	0,212969	0,258210	45,241	135,111	365,164
0,3700	2	0,409885	0,374738	0,445033	70,294	235,069	635,322
0,3700	3	0,582920	0,553703	0,612137	58,434	334,305	903,526
0,3725	1	0,234263	0,212486	0,256041	43,556	135,258	363,108
0,3725	2	0,407486	0,373471	0,441502	68,030	235,273	631,604
0,3725	3	0,578652	0,550791	0,606514	55,723	334,099	896,911
0,3750	1	0,233176	0,212065	0,254288	42,223	135,534	361,423
0,3750	2	0,405345	0,372297	0,438393	66,097	235,607	628,285
0,3750	3	0,575218	0,548350	0,601885	53,335	334,345	891,588
0,3775	1	0,232179	0,211669	0,252688	41,018	135,853	359,877
0,3775	2	0,403335	0,371170	0,435499	64,329	236,001	625,169
0,3775	3	0,572199	0,546612	0,597786	51,174	334,808	886,908
0,3800	1	0,231243	0,211296	0,251189	39,893	136,202	358,426
0,3800	2	0,401495	0,370230	0,432761	62,531	236,481	622,318
0,3800	3	0,569440	0,544884	0,593995	49,111	335,400	882,631
0,3825	1	0,229867	0,210823	0,248911	38,088	136,283	356,294
0,3825	2	0,399048	0,368948	0,429148	60,200	236,585	618,524
0,3825	3	0,564744	0,541736	0,587751	46,015	334,822	875,352
0,3850	1	0,228804	0,210425	0,247183	36,758	136,539	354,646
0,3850	2	0,397007	0,367883	0,426132	58,249	236,914	615,361
0,3850	3	0,561252	0,539509	0,582994	43,485	334,927	869,940
0,3875	1	0,227834	0,210052	0,245616	35,564	136,843	353,143
0,3875	2	0,395116	0,366860	0,423373	56,513	237,317	612,430
0,3875	3	0,558264	0,537651	0,578877	41,226	335,307	865,309
0,3900	1	0,226925	0,209700	0,244150	34,450	137,176	351,734
0,3900	2	0,393384	0,366027	0,420741	54,714	237,801	609,746
0,3900	3	0,555491	0,535989	0,574993	39,004	335,794	861,011
0,3925	1	0,225638	0,209254	0,242022	32,768	137,273	349,739
0,3925	2	0,391079	0,364813	0,417346	52,533	237,923	606,173
0,3925	3	0,550997	0,532983	0,569012	36,028	335,213	854,046
0,3950	1	0,224594	0,208871	0,240318	31,447	137,508	348,121
0,3950	2	0,389141	0,363836	0,414446	50,610	238,251	603,168
0,3950	3	0,547525	0,530770	0,564281	33,511	335,222	848,664
0,3975	1	0,223650	0,208518	0,238783	30,265	137,797	346,658
0,3975	2	0,387355	0,362932	0,411778	48,847	238,659	600,400
0,3975	3	0,544527	0,528938	0,560116	31,179	335,497	844,017
0,4000	1	0,222765	0,208182	0,237347	29,165	138,114	345,285
0,4000	2	0,385678	0,362106	0,409249	47,142	239,120	597,800
0,4000	3	0,541778	0,527307	0,556250	28,943	335,903	839,756
0,4025	1	0,221552	0,207761	0,235342	27,581	138,221	343,405
0,4025	2	0,383560	0,361066	0,406055	44,990	239,294	594,519
0,4025	3	0,537501	0,524443	0,550559	26,117	335,333	833,126
0,4050	1	0,220482	0,207384	0,233580	26,197	138,408	341,747
0,4050	2	0,381652	0,360151	0,403153	43,002	239,582	591,561
0,4050	3	0,533878	0,522126	0,545631	23,505	335,142	827,511
0,4075	1	0,219542	0,207044	0,232041	24,997	138,668	340,290
0,4075	2	0,379917	0,359311	0,400523	41,212	239,965	588,871

0,4075	3	0,530857	0,520251	0,541464	21,214	335,303	822,829
0,4100	1	0,218673	0,206729	0,230616	23,887	138,966	338,942
0,4100	2	0,378282	0,358523	0,398041	39,518	240,398	586,338
0,4100	3	0,528183	0,518632	0,537734	19,102	335,660	818,684
0,4125	1	0,217729	0,206415	0,229043	22,628	139,211	337,480
0,4125	2	0,376568	0,357757	0,395380	37,622	240,768	583,681
0,4125	3	0,525207	0,516903	0,533512	16,610	335,805	814,072
0,4150	1	0,216679	0,206090	0,227267	21,177	139,379	335,852
0,4150	2	0,374741	0,356987	0,392496	35,509	241,052	580,849
0,4150	3	0,521800	0,514930	0,528671	13,742	335,648	808,791
0,4175	1	0,215789	0,205798	0,225781	19,983	139,643	334,473
0,4175	2	0,373114	0,356267	0,389961	33,695	241,451	578,327
0,4175	3	0,519069	0,513397	0,524741	11,343	335,903	804,557
0,4200	1	0,214970	0,205528	0,224412	18,884	139,946	333,204
0,4200	2	0,371577	0,355609	0,387545	31,936	241,896	575,944
0,4200	3	0,516579	0,512090	0,521090	9,022	336,293	800,698
0,4225	1	0,214104	0,205254	0,222954	17,699	140,211	331,861
0,4225	2	0,369995	0,354958	0,385032	30,074	242,300	573,492
0,4225	3	0,513861	0,510605	0,517117	6,512	336,514	796,484
0,4250	1	0,213111	0,204963	0,221258	16,295	140,387	330,322
0,4250	2	0,368284	0,354300	0,382269	27,969	242,607	570,841
0,4275	1	0,212259	0,204703	0,219815	15,111	140,648	329,001
0,4275	2	0,366759	0,353702	0,379815	26,113	243,024	568,476
0,4300	1	0,211469	0,204456	0,218483	14,026	140,944	327,778
0,4300	2	0,365314	0,353136	0,377492	24,357	243,482	566,237
0,4325	1	0,210672	0,204211	0,217133	12,922	141,229	326,542
0,4325	2	0,363867	0,352589	0,375146	22,556	243,928	563,994
0,4350	1	0,209713	0,203941	0,215485	11,544	141,399	325,056
0,4350	2	0,362233	0,352024	0,372443	20,419	244,236	561,462
0,4375	1	0,208879	0,203695	0,214062	10,366	141,646	323,762
0,4375	2	0,360781	0,351502	0,370059	18,557	244,655	559,210
0,4400	1	0,208111	0,203464	0,212759	9,295	141,932	322,573
0,4400	2	0,359416	0,351007	0,367825	16,817	245,122	557,095
0,4425	1	0,207388	0,203244	0,211531	8,286	142,242	321,451
0,4425	2	0,358122	0,350575	0,365668	15,093	245,627	555,088
0,4450	1	0,206443	0,202983	0,209904	6,922	142,394	319,987
0,4450	2	0,356545	0,350052	0,363037	12,985	245,927	552,645
0,4475	1	0,355159	0,349599	0,360719	11,120	246,347	550,497
0,4500	1	0,353871	0,349173	0,358568	9,395	246,825	548,500
0,4525	1	0,352654	0,348790	0,356518	7,729	247,343	546,614

GAAs Hex D						TM	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2000	1	0,857738	0,829160	0,886316	57,156	265,899	1329,494
0,2025	1	0,853440	0,828623	0,878257	49,634	267,874	1322,832
0,2050	1	0,848783	0,828031	0,869535	41,504	269,701	1315,614
0,2075	1	0,844335	0,827611	0,861059	33,449	271,559	1308,719
0,2100	1	0,840380	0,827232	0,853527	26,295	273,544	1302,589
0,2125	1	0,836414	0,826849	0,845980	19,130	275,494	1296,442
0,2150	1	0,832150	0,826410	0,837891	11,481	277,314	1289,833
0,21600	1	0,410331	0,404722	0,415941	11,218	165,364	636,014
0,2625	1	0,407644	0,401621	0,413668	12,047	165,860	631,849
0,2650	1	0,405059	0,398706	0,411413	12,708	166,378	627,842
0,2675	1	0,402225	0,394884	0,409565	14,681	166,772	623,448
0,2700	1	0,399743	0,391673	0,407812	16,139	167,292	619,601
0,2725	1	0,397147	0,388694	0,405601	16,908	167,745	615,578
0,2750	1	0,394576	0,385858	0,403295	17,437	168,188	611,593
0,2775	1	0,391844	0,382367	0,401320	18,953	168,542	607,358
0,2800	1	0,389327	0,379310	0,399345	20,035	168,968	603,457
0,2825	1	0,386912	0,376446	0,397378	20,932	169,419	599,714
0,2850	1	0,384379	0,373784	0,394974	21,190	169,799	595,787
0,2875	1	0,381695	0,370633	0,392758	22,124	170,093	591,628
0,2900	1	0,379252	0,367685	0,390819	23,133	170,474	587,840
0,2925	1	0,376929	0,364986	0,388872	23,886	170,890	584,240
0,2950	1	0,374510	0,362450	0,386569	24,119	171,244	580,490
0,2975	1	0,372011	0,359537	0,384484	24,947	171,543	576,617
0,3000	1	0,369601	0,356647	0,382554	25,907	171,864	572,881
0,3025	1	0,367329	0,354102	0,380555	26,453	172,231	569,360
0,3050	1	0,365082	0,351746	0,378417	26,670	172,592	565,876
0,3075	1	0,362730	0,349219	0,376241	27,022	172,886	562,232
0,3100	1	0,360351	0,346486	0,374217	27,730	173,149	558,545
0,3125	1	0,358225	0,344082	0,372369	28,288	173,515	555,250
0,3150	1	0,355981	0,341861	0,370101	28,240	173,808	551,771
0,3175	1	0,353877	0,339736	0,368018	28,282	174,152	548,509
0,3200	1	0,351518	0,336942	0,366095	29,153	174,353	544,853
0,3225	1	0,349430	0,334623	0,364238	29,615	174,671	541,617

0.3250	1	0.347256	0.332491	0.362020	29,530	174,930	538,246
0.3275	1	0.345177	0.330440	0.359914	29,474	175,220	535,024
0.3300	1	0.342796	0.327783	0.357808	30,024	175,340	531,333
0.3325	1	0.340754	0.325533	0.355975	30,442	175,616	528,168
0.3350	1	0.338628	0.323450	0.353806	30,355	175,833	524,873
0.3375	1	0.336480	0.321485	0.351475	29,990	176,021	521,544
0.3400	1	0.334102	0.319007	0.349197	30,190	176,072	517,859
0.3425	1	0.332095	0.316805	0.347385	30,580	176,301	514,747
0.3450	1	0.329973	0.314770	0.345176	30,406	176,453	511,458
0.3475	1	0.327879	0.312851	0.342907	30,057	176,604	508,213
0.3500	1	0.325642	0.310590	0.340695	30,104	176,661	504,746
0.3525	1	0.323630	0.308478	0.338783	30,306	176,824	501,627
0.3550	1	0.321699	0.306538	0.336861	30,323	177,015	498,634
0.3575	1	0.319718	0.304714	0.334722	30,008	177,164	495,563
0.3600	1	0.317564	0.302696	0.332433	29,737	177,201	492,225
0.3625	1	0.315561	0.300710	0.330412	29,702	177,306	489,120
0.3650	1	0.313781	0.298901	0.328661	29,760	177,521	486,360
0.3675	1	0.311795	0.297210	0.326380	29,170	177,606	483,282
0.3700	1	0.309762	0.295419	0.324105	28,686	177,649	480,131
0.3725	1	0.307740	0.293458	0.322022	28,564	177,682	476,998
0.3750	1	0.305984	0.291720	0.320248	28,528	177,853	474,275
0.3775	1	0.303959	0.290079	0.317839	27,760	177,854	471,137
0.3800	1	0.302140	0.288501	0.315780	27,278	177,961	468,318
0.3825	1	0.300020	0.286472	0.313568	27,096	177,874	465,031
0.3850	1	0.298281	0.284765	0.311798	27,034	177,999	462,336
0.3875	1	0.296266	0.283164	0.309367	26,203	177,945	459,212
0.3900	1	0.294357	0.281635	0.307079	25,444	177,939	456,254
0.3925	1	0.292294	0.279721	0.304868	25,147	177,825	453,056
0.3950	1	0.290519	0.278054	0.302985	24,931	177,870	450,305
0.3975	1	0.288524	0.276487	0.300561	24,074	177,767	447,213
0.4000	1	0.286542	0.275013	0.298070	23,058	177,656	444,140
0.4025	1	0.284493	0.273195	0.295791	22,596	177,488	440,964
0.4050	1	0.282623	0.271517	0.293729	22,212	177,417	438,066
0.4075	1	0.280808	0.269997	0.291618	21,621	177,365	435,252
0.4100	1	0.278799	0.268560	0.289039	20,479	177,177	432,139
0.4125	1	0.276902	0.267034	0.286770	19,736	177,044	429,198
0.4150	1	0.274992	0.265389	0.284594	19,205	176,889	426,237
0.4175	1	0.273237	0.263915	0.282560	18,646	176,819	423,518
0.4200	1	0.271273	0.262548	0.279997	17,449	176,599	420,473
0.4225	1	0.269437	0.261117	0.277756	16,639	176,447	417,627
0.4250	1	0.267540	0.259561	0.275518	15,957	176,242	414,687
0.4275	1	0.265840	0.258152	0.273527	15,375	176,152	412,051
0.4300	1	0.263858	0.256835	0.270882	14,048	175,862	408,981
0.4325	1	0.261963	0.255499	0.268427	12,928	175,614	406,043
0.4350	1	0.260009	0.253968	0.266050	12,082	175,311	403,014
0.4375	1	0.258309	0.252579	0.264039	11,461	175,166	400,379
0.4400	1	0.256281	0.251266	0.261296	10,029	174,784	397,235
0.4425	1	0.254336	0.250001	0.258671	8,670	174,443	394,221
0.4450	1	0.252365	0.248500	0.256231	7,731	174,069	391,166
0.4475	1	0.250531	0.247123	0.253939	6,816	173,774	388,322

**GAAs\_Rec\_C**

r/a	N_Gap	f_e	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	Joint	
						r (en nm)	a (en nm)
0.4750	1	0.467668	0.461503	0.473833	12,329	344,321	724,885
0.4775	1	0.471776	0.465484	0.478069	12,586	349,174	731,253
0.4800	1	0.475715	0.469471	0.481959	12,488	353,932	737,358
0.4825	1	0.479699	0.473837	0.485561	11,724	358,755	743,533
0.4850	1	0.484044	0.477599	0.490489	12,890	363,880	750,268
0.4875	1	0.488515	0.481457	0.495573	14,116	369,134	757,199

**GAAs\_Rec\_C**

r/a	N_Gap	f_e	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	TE	
						r (en nm)	a (en nm)
0.4075	1	0.227929	0.224400	0.231458	7,058	143,966	353,290
0.4100	1	0.228837	0.224888	0.232785	7,897	145,426	354,697
0.4125	1	0.230121	0.225402	0.234841	9,439	147,134	356,688
0.4150	1	0.231335	0.225957	0.236714	10,757	148,806	358,570
0.4175	1	0.232427	0.226511	0.238344	11,833	150,410	360,262
0.4200	1	0.233466	0.227069	0.239864	12,795	151,987	361,873
0.4225	1	0.234815	0.227653	0.241977	14,323	153,774	363,963
0.4250	1	0.236235	0.228281	0.244188	15,907	155,620	366,164
0.4275	1	0.237485	0.228912	0.246057	17,145	157,363	368,101
0.4300	1	0.238672	0.229544	0.247799	18,255	159,075	369,941
0.4325	1	0.240036	0.230209	0.249864	19,655	160,914	372,056
0.4350	1	0.241738	0.230914	0.252563	21,649	162,992	374,694
0.4375	1	0.243171	0.231621	0.254721	23,100	164,900	376,914
0.4400	1	0.244527	0.232332	0.256722	24,390	166,768	379,017

0,4425	1	0,245837	0,233090	0,258585	25,495	168,614	381,048
0,4450	1	0,247928	0,233877	0,261979	28,102	171,008	384,288
0,4475	1	0,249577	0,234666	0,264487	29,821	173,113	386,844
0,4500	1	0,251128	0,235491	0,266765	31,274	175,162	389,248
0,4525	1	0,252629	0,236344	0,268915	32,572	177,188	391,576
0,4525	2	0,416355	0,412483	0,420227	7,744	292,021	645,350
0,4550	1	0,254910	0,237226	0,272595	35,370	179,776	395,111
0,4550	2	0,420693	0,414983	0,426403	11,420	296,694	652,075
0,4575	1	0,256814	0,238135	0,275493	37,358	182,113	398,062
0,4575	2	0,424627	0,417593	0,431660	14,066	301,113	658,171
0,4600	1	0,258599	0,239068	0,278131	39,064	184,381	400,829
0,4600	2	0,428469	0,420273	0,436666	16,393	305,499	664,127
0,4625	1	0,260328	0,240026	0,280630	40,604	186,623	403,508
0,4625	2	0,432295	0,423037	0,441553	18,516	309,902	670,057
0,4650	1	0,262816	0,241018	0,284613	43,596	189,424	407,364
0,4650	2	0,437181	0,425886	0,448476	22,590	315,098	677,631
0,4675	1	0,265032	0,242056	0,288007	45,951	192,049	410,799
0,4675	2	0,441758	0,428831	0,454684	25,853	320,109	684,725
0,4700	1	0,267094	0,243117	0,291072	47,956	194,578	413,996
0,4700	2	0,446277	0,431888	0,460666	28,779	325,113	691,729
0,4725	1	0,269089	0,244202	0,293977	49,776	197,074	417,089
0,4725	2	0,450771	0,435041	0,466501	31,460	330,133	698,695
0,4750	1	0,271876	0,245325	0,298426	53,101	200,169	421,407
0,4750	2	0,456060	0,438287	0,473833	35,545	335,774	706,893
0,4775	1	0,274548	0,246518	0,302578	56,059	203,200	425,549
0,4775	2	0,459893	0,441717	0,478069	36,352	340,379	712,835
0,4800	1	0,276997	0,247716	0,306277	58,561	206,085	429,345
0,4800	2	0,463582	0,445204	0,481959	36,755	344,905	718,552
0,4825	1	0,279360	0,248949	0,309771	60,821	208,926	433,008
0,4825	2	0,467204	0,448847	0,485561	36,714	349,410	724,166
0,4850	1	0,282388	0,250238	0,314537	64,299	212,285	437,701
0,4850	2	0,471571	0,452653	0,490489	37,836	354,504	730,935
0,4875	1	0,285607	0,251581	0,319633	68,052	215,812	442,691
0,4875	2	0,476086	0,456599	0,495573	38,974	359,743	737,934
0,4900	1	0,288510	0,252935	0,324084	71,149	219,123	447,190
0,4900	2	0,480330	0,460620	0,500039	39,419	364,810	744,511
0,4925	1	0,291299	0,254356	0,328242	73,887	222,370	451,514
0,4925	2	0,484555	0,464864	0,504247	39,382	369,898	751,061
0,4950	1	0,294500	0,255817	0,333184	77,367	225,955	456,475
0,4950	2	0,489169	0,469217	0,509121	39,904	375,315	758,212
0,4975	1	0,298445	0,257325	0,339564	82,239	230,138	462,589
0,4975	2	0,494447	0,473667	0,515226	41,559	381,280	766,392
0,5000	1	0,301859	0,258905	0,344812	85,907	233,941	467,881
0,5000	2	0,499337	0,478381	0,520294	41,914	386,986	773,973
0,5025	1	0,305163	0,260520	0,349805	89,285	237,683	473,002
0,5025	2	0,503862	0,483174	0,524550	41,376	392,446	780,986
0,5050	1	0,308430	0,262192	0,354668	92,477	241,424	478,067
0,5050	2	0,508148	0,488136	0,528160	40,024	397,753	787,630
0,5075	1	0,311672	0,263924	0,359420	95,495	245,169	483,092
0,5075	2	0,512340	0,493293	0,531386	38,093	403,019	794,126
0,5100	1	0,314907	0,265711	0,364102	98,391	248,934	488,105
0,5100	2	0,516417	0,498578	0,534257	35,679	408,228	800,447
0,5125	1	0,318150	0,267532	0,368768	101,236	252,730	493,132
0,5125	2	0,520419	0,504003	0,536834	32,831	413,408	806,649
0,5150	1	0,321391	0,269419	0,373362	103,943	256,550	498,156
0,5150	2	0,524354	0,509575	0,539134	29,559	418,566	812,749
0,5150	3	0,721403	0,713783	0,729022	15,238	575,860	1118,174
0,5175	1	0,324629	0,271356	0,377902	106,546	260,393	503,175
0,5175	2	0,528297	0,515351	0,541242	25,892	423,760	818,860
0,5175	3	0,726459	0,715563	0,737355	21,792	582,711	1126,012
0,5200	1	0,327892	0,273335	0,382449	109,114	264,281	508,232
0,5200	2	0,532174	0,521236	0,543113	21,877	428,932	824,870
0,5200	3	0,734461	0,722889	0,746032	23,143	591,975	1138,414
0,5225	1	0,331174	0,275386	0,386962	111,576	268,210	513,320
0,5225	2	0,536050	0,527363	0,544737	17,374	434,133	830,877
0,5225	3	0,744210	0,733245	0,755174	21,930	602,717	1153,525
0,5250	1	0,334477	0,277516	0,391437	113,922	272,180	518,439
0,5250	2	0,539927	0,533765	0,546089	12,324	439,366	836,887
0,5250	3	0,754641	0,744371	0,764911	20,540	614,089	1169,694
0,5275	1	0,337789	0,279686	0,395892	116,206	276,185	523,573
0,5275	2	0,765107	0,755571	0,774643	19,073	625,570	1185,916
0,5300	1	0,341100	0,281899	0,400301	118,402	280,214	528,705
0,5300	2	0,775659	0,766925	0,784393	17,468	637,204	1202,271
0,5325	1	0,344426	0,284165	0,404687	120,522	284,281	533,861
0,5325	2	0,786750	0,778820	0,794681	15,861	649,364	1219,463
0,5350	1	0,347778	0,286503	0,409054	122,551	288,395	539,056
0,5350	2	0,798503	0,791254	0,805752	14,497	662,159	1237,680

0,5375	1	0,351117	0,288921	0,413312	124,390	292,524	544,231
0,5375	2	0,810320	0,803828	0,816812	12,984	675,098	1255,997
0,5400	1	0,354458	0,291393	0,417524	126,132	296,682	549,411
0,5400	2	0,822146	0,816456	0,827836	11,380	688,136	1274,326
0,5425	1	0,357824	0,293920	0,421729	127,810	300,886	554,628
0,5450	1	0,361180	0,296594	0,425766	129,172	305,107	559,829
0,5475	1	0,364532	0,299339	0,429725	130,386	309,351	565,025
0,5500	1	0,367875	0,302095	0,433656	131,561	313,614	570,207

GAAs_Rec_C						TM	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,3375	1	0,241213	0,237874	0,244552	6,678	126,184	373,880
0,3375	2	0,345405	0,342070	0,348739	6,669	180,690	535,377
0,3400	1	0,242564	0,238893	0,246236	7,344	127,831	375,975
0,3400	2	0,347674	0,343103	0,352245	9,141	183,224	538,895
0,3425	1	0,243771	0,239685	0,247858	8,174	129,412	377,846
0,3425	2	0,349730	0,344175	0,355285	11,110	185,663	542,082
0,3450	1	0,244941	0,240451	0,249431	8,980	130,982	379,659
0,3450	2	0,351685	0,345253	0,358117	12,865	188,064	545,112
0,3475	1	0,246099	0,241226	0,250972	9,747	132,555	381,454
0,3475	2	0,353422	0,346321	0,360522	14,201	190,362	547,804
0,3500	1	0,247584	0,242280	0,252887	10,607	134,314	383,755
0,3500	2	0,355454	0,347560	0,363348	15,788	192,834	550,954
0,3525	1	0,249184	0,243380	0,254988	11,607	136,148	386,235
0,3525	2	0,357531	0,348883	0,366180	17,297	195,346	554,174
0,3550	1	0,250537	0,244231	0,256842	12,611	137,858	388,332
0,3550	2	0,359423	0,350181	0,368664	18,483	197,772	557,105
0,3575	1	0,251604	0,245020	0,258188	13,169	139,420	389,986
0,3575	2	0,361121	0,351207	0,371035	19,829	200,106	559,738
0,3600	1	0,253127	0,246178	0,260076	13,898	141,245	392,347
0,3600	2	0,363201	0,352424	0,373978	21,554	202,666	562,962
0,3625	1	0,254687	0,247441	0,261932	14,491	143,102	394,764
0,3625	2	0,365259	0,353772	0,376746	22,974	205,230	566,151
0,3650	1	0,256294	0,248643	0,263945	15,302	144,998	397,255
0,3650	2	0,367455	0,355269	0,379641	24,373	207,888	569,555
0,3675	1	0,257755	0,249774	0,265736	15,962	146,824	399,520
0,3675	2	0,369720	0,356725	0,382715	25,990	210,602	573,066
0,3700	1	0,259287	0,250823	0,267751	16,927	148,701	401,895
0,3700	2	0,371673	0,358192	0,385155	26,963	213,155	576,094
0,3725	1	0,261066	0,252320	0,269811	17,491	150,733	404,652
0,3725	2	0,374100	0,359720	0,388480	28,759	215,996	579,855
0,3750	1	0,262720	0,253481	0,271960	18,479	152,706	407,217
0,3750	2	0,376480	0,361400	0,391559	30,158	218,829	583,543
0,3775	1	0,264274	0,254508	0,274040	19,532	154,633	409,624
0,3775	2	0,378472	0,363033	0,393911	30,878	221,453	586,631
0,3800	1	0,265656	0,255582	0,275731	20,150	156,472	411,767
0,3800	2	0,380452	0,364389	0,396515	32,126	224,086	589,700
0,3825	1	0,267448	0,257413	0,277483	20,070	158,563	414,544
0,3825	2	0,383157	0,365730	0,400584	34,854	227,164	593,893
0,3850	1	0,269118	0,258848	0,279388	20,540	160,596	417,132
0,3850	2	0,385509	0,367233	0,403785	36,553	230,053	597,539
0,3875	1	0,270791	0,260158	0,281424	21,267	162,644	419,726
0,3875	2	0,387968	0,368939	0,406998	38,060	233,024	601,351
0,3900	1	0,272446	0,261313	0,283579	22,267	164,694	422,291
0,3900	2	0,390047	0,370748	0,409347	38,599	235,783	604,573
0,3925	1	0,274500	0,263202	0,285799	22,597	166,999	425,475
0,3925	2	0,392913	0,372522	0,413305	40,783	239,039	609,016
0,3950	1	0,276279	0,264812	0,287745	22,933	169,152	428,232
0,3950	2	0,395505	0,374222	0,416788	42,566	242,148	613,033
0,3975	1	0,278001	0,266259	0,289743	23,485	171,283	430,901
0,3975	2	0,397983	0,375899	0,420066	44,168	245,207	616,873
0,4000	1	0,279794	0,267612	0,291975	24,363	173,472	433,680
0,4000	2	0,400256	0,377722	0,422789	45,067	248,159	620,396
0,4025	1	0,282143	0,269756	0,294530	24,774	176,022	437,321
0,4025	2	0,403311	0,379727	0,426896	47,169	251,616	625,133
0,4050	1	0,283928	0,271418	0,296437	25,020	178,236	440,088
0,4050	2	0,405952	0,381721	0,430183	48,461	254,836	629,225
0,4075	1	0,285984	0,273020	0,298949	25,929	180,635	443,276
0,4075	2	0,408734	0,384071	0,433396	49,325	258,166	633,537
0,4100	1	0,288129	0,274640	0,301617	26,977	183,106	446,599
0,4100	2	0,411417	0,386190	0,436645	50,456	261,456	637,697
0,4125	1	0,290417	0,276929	0,303906	26,977	185,686	450,147
0,4125	2	0,414054	0,388029	0,440078	52,049	264,736	641,783
0,4150	1	0,292711	0,279471	0,305951	26,480	188,286	453,702
0,4150	2	0,416592	0,389909	0,443275	53,366	267,973	645,717
0,4175	1	0,294842	0,281125	0,308560	27,435	190,800	457,006

							TE
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0.2000	1	0.355723	0.289610	0.421836	132,226	110,274	551,371
0.2000	2	0.737224	0.728032	0.746415	18,383	228,539	1142,697
0.2025	1	0.353356	0.287874	0.418838	130,964	110,910	547,702
0.2025	2	0.735175	0.725957	0.744394	18,437	230,753	1139,522
0.4175	2	0.419538	0.392375	0.446702	54,327	271,494	650,284
0.4200	1	0.297207	0.282884	0.311530	28,646	193,482	460,671
0.4200	2	0.422167	0.394978	0.449357	54,379	274,831	654,359
0.4225	1	0.299600	0.285498	0.313701	28,202	196,200	464,379
0.4225	2	0.424819	0.396991	0.452646	55,656	278,203	658,469
0.4250	1	0.302323	0.288727	0.315920	27,193	199,155	468,601
0.4250	2	0.427752	0.399188	0.456317	57,129	281,782	663,016
0.4275	1	0.304978	0.291302	0.318655	27,352	202,086	472,716
0.4275	2	0.430522	0.401762	0.459282	57,520	285,275	667,309
0.4300	1	0.307631	0.293665	0.321598	27,933	205,036	476,829
0.4300	2	0.433244	0.404564	0.461924	57,361	288,757	671,528
0.4325	1	0.309960	0.295800	0.324120	28,320	207,790	480,438
0.4325	2	0.436028	0.406992	0.465064	58,072	292,302	675,843
0.4350	1	0.312992	0.299455	0.326529	27,073	211,035	485,138
0.4350	2	0.438792	0.409437	0.468148	58,711	295,856	680,128
0.4375	1	0.315655	0.302029	0.329280	27,251	214,053	489,265
0.4375	2	0.441567	0.412296	0.470838	58,543	299,438	684,429
0.4400	1	0.318413	0.304936	0.331890	26,954	217,158	493,540
0.4400	2	0.444327	0.414965	0.473690	58,725	303,031	688,707
0.4425	1	0.321004	0.307717	0.334291	26,573	220,169	497,556
0.4425	2	0.447061	0.417626	0.476496	58,870	306,628	692,945
0.4450	1	0.325108	0.313308	0.336908	23,601	224,243	503,917
0.4450	2	0.450123	0.420435	0.479811	59,376	310,473	697,691
0.4475	1	0.328299	0.316399	0.340198	23,799	227,716	508,863
0.4475	2	0.453090	0.423628	0.482551	58,923	314,274	702,289
0.4500	1	0.331211	0.319573	0.342849	23,276	231,020	513,377
0.4500	2	0.456050	0.426487	0.485613	59,126	318,095	706,877
0.4525	1	0.334328	0.323099	0.345557	22,458	234,489	518,208
0.4525	2	0.458996	0.429576	0.488416	58,841	321,928	711,444
0.4550	1	0.338980	0.329277	0.348683	19,406	239,066	525,419
0.4550	2	0.462518	0.433178	0.491858	58,680	326,191	716,903
0.4575	1	0.342637	0.332995	0.352280	19,286	242,973	531,088
0.4575	2	0.465717	0.437009	0.494425	57,416	330,251	721,861
0.4600	1	0.346145	0.336749	0.355541	18,792	246,802	536,525
0.4600	2	0.468930	0.440645	0.497215	56,569	334,347	726,842
0.4600	3	0.624080	0.619395	0.628765	9,370	444,969	967,324
0.4625	1	0.349752	0.340920	0.358583	17,663	250,728	542,115
0.4625	2	0.472148	0.443968	0.500328	56,360	338,471	731,829
0.4625	3	0.628884	0.623761	0.634007	10,246	450,831	974,770
0.4650	1	0.354809	0.348585	0.361034	12,450	255,729	549,955
0.4650	2	0.475326	0.447056	0.503596	56,541	342,591	736,755
0.4650	3	0.633498	0.627959	0.639036	11,076	456,593	981,921
0.4675	1	0.358901	0.353934	0.363867	9,933	260,068	556,296
0.4675	2	0.478399	0.450198	0.506601	56,403	346,660	741,519
0.4675	3	0.638007	0.631861	0.644152	12,291	462,316	988,911
0.4700	1	0.481889	0.453721	0.510058	56,337	351,056	746,928
0.4700	2	0.643291	0.636707	0.649875	13,168	468,638	997,101
0.4725	1	0.485188	0.457659	0.512716	55,058	355,339	752,041
0.4725	2	0.648240	0.641559	0.654920	13,361	474,755	1004,772
0.4750	1	0.488381	0.461503	0.515259	53,756	359,571	756,991
0.4750	2	0.653874	0.646170	0.661578	15,407	481,415	1013,505
0.4775	1	0.491837	0.465484	0.518190	52,706	364,021	762,347
0.4775	2	0.662057	0.651051	0.673062	22,011	490,005	1026,188
0.4800	1	0.495129	0.469471	0.520786	51,314	368,376	767,449
0.4800	2	0.667939	0.655904	0.679974	24,071	496,947	1035,306
0.4825	1	0.498584	0.473837	0.523331	49,494	372,878	772,805
0.4825	2	0.670801	0.661160	0.680441	19,281	501,675	1039,741
0.4850	1	0.501761	0.477599	0.525923	48,324	377,199	777,729
0.4850	2	0.679941	0.665709	0.694174	28,465	511,146	1053,909
0.4875	1	0.505152	0.481457	0.528847	47,390	381,706	782,986
0.4875	2	0.685180	0.671444	0.698916	27,472	517,739	1062,029
0.4900	1	0.515077	0.498674	0.531481	32,807	391,201	798,370
0.4900	2	0.694855	0.685684	0.704025	18,341	527,742	1077,025
0.4925	1	0.522258	0.510453	0.534062	23,610	398,678	809,499
0.4925	2	0.701579	0.693668	0.709489	15,821	535,567	1087,447
0.4950	1	0.528255	0.520202	0.536308	16,106	405,304	818,796
0.4950	2	0.707807	0.700809	0.714804	13,995	543,065	1097,100
0.5475	1	0.969542	0.962701	0.976383	13,682	822,778	1502,790
0.5500	1	0.980914	0.973061	0.988768	15,707	836,229	1520,417

GAAs_Rec_D						TE	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0.2000	1	0.355723	0.289610	0.421836	132,226	110,274	551,371
0.2000	2	0.737224	0.728032	0.746415	18,383	228,539	1142,697
0.2025	1	0.353356	0.287874	0.418838	130,964	110,910	547,702
0.2025	2	0.735175	0.725957	0.744394	18,437	230,753	1139,522

0,2050	1	0,350651	0,285446	0,415856	130,410	111,419	543,509
0,2050	2	0,731965	0,724015	0,739915	15,901	232,582	1134,546
0,2075	1	0,348121	0,283521	0,412722	129,202	111,965	539,588
0,2075	2	0,729490	0,722134	0,736846	14,712	234,622	1130,709
0,2100	1	0,345702	0,281753	0,409650	127,898	112,526	535,837
0,2100	2	0,727246	0,720310	0,734183	13,873	236,719	1127,232
0,2125	1	0,343349	0,280104	0,406594	126,490	113,091	532,191
0,2125	2	0,725164	0,718634	0,731693	13,059	238,851	1124,004
0,2150	1	0,340720	0,277869	0,403570	125,701	113,545	528,116
0,2150	2	0,546121	0,540025	0,552216	12,191	181,995	846,487
0,2175	1	0,338218	0,275976	0,400461	124,485	114,022	524,239
0,2175	2	0,543256	0,534403	0,552109	17,706	183,145	842,047
0,2200	1	0,335826	0,274310	0,397342	123,032	114,517	520,530
0,2200	2	0,540936	0,529861	0,552012	22,150	184,459	838,451
0,2225	1	0,333541	0,272800	0,394283	121,483	115,030	516,989
0,2225	2	0,538804	0,525725	0,551183	26,158	185,820	835,147
0,2250	1	0,331161	0,271096	0,391225	120,129	115,492	513,299
0,2250	2	0,535919	0,520260	0,5511579	31,319	186,902	830,675
0,2275	1	0,328827	0,269557	0,388097	118,540	115,953	509,682
0,2275	2	0,533426	0,515640	0,551213	35,573	188,100	826,811
0,2300	1	0,326592	0,268168	0,385015	116,848	116,430	506,217
0,2300	2	0,531297	0,511733	0,550861	39,128	189,407	823,510
0,2325	1	0,324431	0,266861	0,382002	115,141	116,917	502,869
0,2325	2	0,529330	0,508146	0,550513	42,367	190,757	820,461
0,2350	1	0,322182	0,265427	0,378936	113,510	117,355	499,381
0,2350	2	0,526856	0,503705	0,550006	46,300	191,907	816,626
0,2375	1	0,319942	0,264003	0,375881	111,878	117,779	495,910
0,2375	2	0,524341	0,499233	0,549450	50,217	193,023	812,729
0,2400	1	0,317800	0,262735	0,372865	110,130	118,222	492,591
0,2400	2	0,522265	0,495595	0,548934	53,339	194,282	809,510
0,2425	1	0,315715	0,261565	0,369864	108,299	118,669	489,358
0,2425	2	0,520395	0,492418	0,548372	55,954	195,603	806,612
0,2450	1	0,313599	0,260320	0,366878	106,558	119,089	486,078
0,2450	2	0,518241	0,488770	0,547713	58,943	196,802	803,274
0,2475	1	0,311419	0,258916	0,363922	105,007	119,468	482,700
0,2475	2	0,515510	0,484102	0,546918	62,816	197,762	799,040
0,2475	3	0,679015	0,673668	0,684362	10,695	260,487	1052,473
0,2500	1	0,309345	0,257729	0,360961	103,232	119,871	479,485
0,2500	2	0,513431	0,480703	0,546159	65,456	198,955	795,818
0,2525	1	0,307339	0,256623	0,358056	101,432	120,285	476,376
0,2525	2	0,511540	0,477768	0,545402	67,723	200,204	792,887
0,2550	1	0,305369	0,255575	0,355163	99,588	120,697	473,322
0,2550	2	0,509798	0,474978	0,544619	69,641	201,498	790,188
0,2575	1	0,303221	0,254148	0,352294	98,146	121,023	469,992
0,2575	2	0,506775	0,469959	0,543591	73,632	202,267	785,502
0,2600	1	0,301218	0,253010	0,349425	96,415	121,391	466,888
0,2600	2	0,504659	0,466660	0,542659	75,999	203,378	782,222
0,2625	1	0,299285	0,251958	0,346611	94,653	121,772	463,892
0,2625	2	0,502744	0,463758	0,541731	77,973	204,554	779,254
0,2650	1	0,297388	0,250962	0,343814	92,851	122,152	460,952
0,2650	2	0,500985	0,461179	0,540790	79,612	205,779	776,526
0,2675	1	0,295333	0,249633	0,341033	91,400	122,452	457,766
0,2675	2	0,498097	0,456559	0,539636	83,077	206,524	772,051
0,2700	1	0,293396	0,248533	0,338258	89,725	122,786	454,764
0,2700	2	0,495923	0,453294	0,538551	85,256	207,544	768,680
0,2725	1	0,291529	0,247512	0,335546	88,034	123,135	451,870
0,2725	2	0,493974	0,450444	0,537504	87,060	208,642	765,660
0,2750	1	0,289691	0,246561	0,332821	86,260	123,481	449,021
0,2750	2	0,492192	0,447995	0,536389	88,394	209,797	762,897
0,2775	1	0,287730	0,245301	0,330159	84,859	123,760	445,982
0,2775	2	0,489430	0,443707	0,535153	91,446	210,516	758,617
0,2775	3	0,699894	0,693776	0,706012	12,236	301,042	1084,835
0,2800	1	0,285855	0,244208	0,327502	83,294	124,061	443,075
0,2800	2	0,487173	0,440405	0,533941	93,536	211,433	755,118
0,2800	3	0,696959	0,688526	0,705393	16,867	302,480	1080,287
0,2825	1	0,284054	0,243223	0,324886	81,663	124,380	440,284
0,2825	2	0,485177	0,437636	0,532719	95,083	212,447	752,025
0,2825	3	0,694227	0,683766	0,704689	20,923	303,985	1076,052
0,2850	1	0,282314	0,242338	0,322290	79,952	124,712	437,586
0,2850	2	0,483296	0,435227	0,531364	96,137	213,496	749,108
0,2850	3	0,691625	0,679386	0,703864	24,477	305,525	1072,019
0,2875	1	0,280557	0,241368	0,319747	78,379	125,023	434,864
0,2875	2	0,480806	0,432157	0,529455	97,299	214,259	745,249
0,2875	3	0,688695	0,674449	0,702941	28,491	306,900	1067,477
0,2900	1	0,278852	0,240464	0,317241	76,777	125,344	432,221
0,2900	2	0,478491	0,429377	0,527605	98,227	215,082	741,661
0,2900	3	0,685888	0,669857	0,701919	32,062	308,307	1063,127

0,2925	1	0,277196	0,239652	0,314739	75,087	125,674	429,653
0,2925	2	0,476450	0,427065	0,525834	98,769	216,010	738,497
0,2925	3	0,683221	0,665678	0,700763	35,085	309,755	1058,992
0,2950	1	0,275577	0,238899	0,312255	73,356	126,008	427,144
0,2950	2	0,474546	0,425019	0,524073	99,054	216,986	735,546
0,2950	3	0,680620	0,661718	0,699522	37,804	311,214	1054,962
0,2975	1	0,273948	0,238064	0,309832	71,768	126,324	424,620
0,2975	2	0,472197	0,422401	0,521993	99,592	217,742	731,905
0,2975	3	0,677787	0,657282	0,698293	41,011	312,545	1050,570
0,3000	1	0,272332	0,237243	0,307421	70,178	126,634	422,114
0,3000	2	0,469808	0,419803	0,519813	100,010	218,461	728,203
0,3000	3	0,674888	0,652875	0,696900	44,025	313,823	1046,076
0,3025	1	0,270762	0,236512	0,305011	68,499	126,953	419,680
0,3025	2	0,467749	0,417705	0,517792	100,087	219,316	725,010
0,3025	3	0,672122	0,648915	0,695330	46,415	315,141	1041,789
0,3050	1	0,269231	0,235821	0,302641	66,821	127,279	417,308
0,3050	2	0,465822	0,415793	0,515852	100,059	220,217	722,024
0,3050	3	0,669429	0,645173	0,693685	48,512	316,473	1037,615
0,3075	1	0,267706	0,235099	0,300312	65,213	127,595	414,944
0,3075	2	0,463690	0,413629	0,513751	100,123	221,006	718,719
0,3075	3	0,666610	0,641227	0,691993	50,766	317,723	1033,246
0,3100	1	0,266147	0,234304	0,297990	63,686	127,884	412,528
0,3100	2	0,461180	0,411007	0,511353	100,346	221,597	714,829
0,3100	3	0,663501	0,636834	0,690168	53,334	318,812	1028,427
0,3125	1	0,264651	0,233621	0,295682	62,061	128,190	410,210
0,3125	2	0,458696	0,409001	0,508391	99,390	222,181	710,979
0,3125	3	0,660594	0,633011	0,688176	55,164	319,975	1023,920
0,3150	1	0,263189	0,232979	0,293400	60,421	128,502	407,943
0,3150	2	0,455785	0,407213	0,504357	97,144	222,537	706,467
0,3150	3	0,657753	0,629415	0,686091	56,675	321,148	1019,517
0,3175	1	0,261764	0,232367	0,291162	58,795	128,821	405,734
0,3175	2	0,453003	0,405546	0,500460	94,914	222,934	702,155
0,3175	3	0,654984	0,625978	0,683990	58,012	322,334	1015,225
0,3200	1	0,260249	0,231562	0,288935	57,372	129,083	403,385
0,3200	2	0,449626	0,402723	0,496528	93,805	223,014	696,920
0,3200	3	0,651611	0,621452	0,681771	60,318	323,199	1009,998
0,3225	1	0,258811	0,230913	0,286709	55,797	129,373	401,157
0,3225	2	0,446661	0,400786	0,492536	91,750	223,275	692,325
0,3225	3	0,648525	0,617729	0,679321	61,591	324,181	1005,214
0,3250	1	0,257410	0,230302	0,284519	54,217	129,670	398,986
0,3250	2	0,443836	0,399062	0,488610	89,548	223,582	687,946
0,3250	3	0,645517	0,614226	0,676809	62,583	325,179	1000,552
0,3275	1	0,256042	0,229718	0,282365	52,646	129,973	396,864
0,3275	2	0,441130	0,397469	0,484792	87,323	223,929	683,752
0,3275	3	0,642568	0,610893	0,674242	63,348	326,183	995,980
0,3300	1	0,254595	0,228959	0,280231	51,272	130,225	394,622
0,3300	2	0,437909	0,394812	0,481007	86,195	223,991	678,760
0,3300	3	0,639103	0,606647	0,671560	64,912	326,901	990,610
0,3325	1	0,253210	0,228323	0,278097	49,774	130,498	392,476
0,3325	2	0,435009	0,392885	0,477133	84,249	224,193	674,264
0,3325	3	0,635800	0,603048	0,668551	65,503	327,675	985,490
0,3350	1	0,251865	0,227726	0,276005	48,279	130,781	390,391
0,3350	2	0,432251	0,391179	0,473323	82,144	224,446	669,989
0,3350	3	0,632568	0,599672	0,665465	65,794	328,461	980,481
0,3375	1	0,250548	0,227166	0,273930	46,764	131,068	388,349
0,3375	2	0,429632	0,389658	0,469606	79,948	224,751	665,930
0,3375	3	0,629380	0,596505	0,662256	65,751	329,245	975,540
0,3400	1	0,249169	0,226447	0,271892	45,444	131,312	386,213
0,3400	2	0,426577	0,387175	0,465979	78,804	224,806	661,195
0,3400	3	0,625782	0,592557	0,659006	66,449	329,787	969,961
0,3425	1	0,247835	0,225818	0,269853	44,036	131,570	384,145
0,3425	2	0,423719	0,385229	0,462208	76,980	224,942	656,764
0,3425	3	0,622146	0,589058	0,655235	66,176	330,282	964,327
0,3450	1	0,246547	0,225247	0,267847	42,600	131,841	382,148
0,3450	2	0,421040	0,383567	0,458513	74,946	225,151	652,612
0,3450	3	0,618622	0,585858	0,651385	65,527	330,808	958,864
0,3475	1	0,245300	0,224734	0,265866	41,133	132,125	380,215
0,3475	2	0,418485	0,382091	0,454879	72,788	225,406	648,651
0,3475	3	0,615277	0,582934	0,647620	64,686	331,404	953,680
0,3500	1	0,244060	0,224191	0,263930	39,739	132,403	378,293
0,3500	2	0,415855	0,380325	0,451385	71,060	225,601	644,575
0,3500	3	0,611876	0,579793	0,643958	64,165	331,943	948,407
0,3525	1	0,242844	0,223684	0,262004	38,319	132,684	376,408
0,3525	2	0,413270	0,378731	0,447809	69,079	225,800	640,568
0,3525	3	0,608410	0,576835	0,639985	63,150	332,420	943,035
0,3550	1	0,241657	0,223232	0,260082	36,850	132,972	374,568
0,3550	2	0,410819	0,377383	0,444255	66,873	226,053	636,769

0,3550	3	0,605049	0,574110	0,635987	61,877	332,928	937,826
0,3575	1	0,240498	0,222806	0,258190	35,384	133,266	372,773
0,3575	2	0,408454	0,376135	0,440772	64,637	226,334	633,103
0,3575	3	0,601797	0,571509	0,632085	60,576	333,471	932,785
0,3600	1	0,239343	0,222347	0,256339	33,992	133,553	370,981
0,3600	2	0,406021	0,374638	0,437403	62,765	226,560	629,332
0,3600	3	0,598484	0,568696	0,628271	59,575	333,954	927,650
0,3625	1	0,238192	0,221899	0,254484	32,585	133,834	369,197
0,3625	2	0,403587	0,373179	0,433995	60,816	226,765	625,560
0,3625	3	0,595094	0,565941	0,624247	58,306	334,369	922,396
0,3650	1	0,237067	0,221492	0,252642	31,150	134,121	367,454
0,3650	2	0,401258	0,371942	0,430574	58,632	227,012	621,949
0,3650	3	0,591761	0,563404	0,620117	56,713	334,789	917,229
0,3675	1	0,235968	0,221106	0,250830	29,723	134,413	365,751
0,3675	2	0,399025	0,370801	0,427249	56,448	227,295	618,489
0,3675	3	0,588547	0,560983	0,616111	55,128	335,251	912,248
0,3700	1	0,234879	0,220711	0,249047	28,336	134,703	364,062
0,3700	2	0,396792	0,369553	0,424030	54,477	227,560	615,027
0,3700	3	0,585372	0,558495	0,612250	53,755	335,711	907,327
0,3725	1	0,233778	0,220283	0,247273	26,990	134,978	362,356
0,3725	2	0,394431	0,368090	0,420772	52,683	227,735	611,368
0,3725	3	0,581989	0,555799	0,608178	52,379	336,026	902,082
0,3750	1	0,232705	0,219912	0,245498	25,586	135,260	360,692
0,3750	2	0,392211	0,366948	0,417474	50,526	227,972	607,927
0,3750	3	0,578684	0,553404	0,603963	50,559	336,360	896,960
0,3775	1	0,231659	0,219561	0,243757	24,196	135,549	359,071
0,3775	2	0,390085	0,365891	0,414278	48,387	228,248	604,631
0,3775	3	0,575499	0,551116	0,599883	48,767	336,739	892,024
0,3800	1	0,230633	0,219224	0,242041	22,817	135,843	357,481
0,3800	2	0,388030	0,364904	0,411156	46,251	228,550	601,447
0,3800	3	0,572430	0,548909	0,595952	47,044	337,161	887,267
0,3825	1	0,229571	0,218807	0,240335	21,528	136,107	355,835
0,3825	2	0,385719	0,363392	0,408046	44,654	228,683	597,864
0,3825	3	0,569049	0,546211	0,591887	45,676	337,375	882,026
0,3850	1	0,228543	0,218456	0,238631	20,175	136,383	354,242
0,3850	2	0,383571	0,362284	0,404857	42,572	228,896	594,534
0,3850	3	0,565716	0,543895	0,587537	43,643	337,591	876,860
0,3875	1	0,227540	0,218127	0,236954	18,827	136,666	352,687
0,3875	2	0,381530	0,361288	0,401772	40,484	229,157	591,372
0,3875	3	0,562553	0,541710	0,583396	41,686	337,883	871,957
0,3900	1	0,226559	0,217814	0,235303	17,489	136,955	351,166
0,3900	2	0,379573	0,360365	0,398782	38,417	229,452	588,338
0,3900	3	0,559519	0,539617	0,579421	39,804	338,229	867,254
0,3925	1	0,225545	0,217422	0,233669	16,247	137,216	349,595
0,3925	2	0,377363	0,358936	0,395790	36,854	229,578	584,913
0,3925	3	0,556175	0,537047	0,575303	38,256	338,363	862,071
0,3950	1	0,224558	0,217088	0,232029	14,941	137,486	348,066
0,3950	2	0,375284	0,357864	0,392704	34,840	229,767	581,690
0,3950	3	0,552844	0,534805	0,570884	36,079	338,479	856,908
0,3975	1	0,223596	0,216780	0,230412	13,632	137,763	346,574
0,3975	2	0,373320	0,356923	0,389718	32,795	230,012	578,646
0,3975	3	0,549710	0,532707	0,566713	34,006	338,690	852,050
0,4000	1	0,222656	0,216483	0,228830	12,348	138,047	345,117
0,4000	2	0,371424	0,356031	0,386817	30,785	230,283	575,707
0,4000	3	0,546660	0,530670	0,562650	31,980	338,929	847,324
0,4025	1	0,221689	0,216117	0,227262	11,145	138,306	343,618
0,4025	2	0,369312	0,354698	0,383927	29,229	230,405	572,434
0,4025	3	0,543386	0,528230	0,558543	30,313	339,005	842,249
0,4050	1	0,220737	0,215797	0,225678	9,881	138,568	342,143
0,4050	2	0,367276	0,353651	0,380901	27,250	230,558	569,278
0,4050	3	0,540068	0,526031	0,554105	28,074	339,028	837,105
0,4075	1	0,219817	0,215505	0,224128	8,623	138,842	340,716
0,4075	2	0,365356	0,352726	0,377987	25,261	230,768	566,302
0,4075	3	0,536957	0,523996	0,549919	25,923	339,156	832,284
0,4100	1	0,218926	0,215239	0,222613	7,374	139,127	339,335
0,4100	2	0,363508	0,351859	0,375156	23,297	231,009	563,437
0,4100	3	0,534063	0,522105	0,546020	23,915	339,397	827,797
0,4125	1	0,218043	0,214978	0,221108	6,130	139,411	337,967
0,4125	2	0,361654	0,350964	0,372345	21,381	231,233	560,564
0,4125	3	0,531229	0,520233	0,542225	21,992	339,655	823,406
0,4150	1	0,359787	0,350157	0,369418	19,261	231,433	557,671
0,4150	2	0,528303	0,518459	0,538147	19,688	339,831	818,869
0,4175	1	0,358003	0,349409	0,366597	17,188	231,673	554,905
0,4175	2	0,525538	0,516784	0,534292	17,508	340,089	814,584
0,4200	1	0,356285	0,348703	0,363867	15,164	231,942	552,242
0,4200	2	0,522898	0,515186	0,530610	15,424	340,407	810,492
0,4225	1	0,354549	0,347961	0,361136	13,175	232,185	549,550

0,4225	2	0,520252	0,513563	0,526941	13,378	340,700	806,391
0,4250	1	0,352797	0,347250	0,358343	11,093	232,405	546,835
0,4250	2	0,517519	0,511991	0,523047	11,056	340,916	802,155
0,4275	1	0,351118	0,346603	0,355634	9,030	232,660	544,234
0,4275	2	0,514907	0,510506	0,519308	8,802	341,190	798,106
0,4300	1	0,349500	0,345991	0,353009	7,018	232,942	541,725
0,4300	2	0,512388	0,509080	0,515697	6,616	341,507	794,202

GAAs Rec D						TM	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2000	1	0,830364	0,823592	0,837136	13,544	257,413	1287,064
0,2075	1	0,816763	0,810256	0,823270	13,015	262,691	1265,983
0,2100	1	0,810818	0,804091	0,817546	13,455	263,921	1256,768
0,2125	1	0,803675	0,797077	0,810272	13,196	264,710	1245,696
0,2150	1	0,794940	0,788372	0,801508	13,136	264,914	1232,157
0,2175	1	0,788535	0,781420	0,795650	14,229	265,835	1222,229
0,2200	1	0,782469	0,775165	0,789773	14,608	266,822	1212,827
0,2225	1	0,776470	0,769617	0,783322	13,705	267,785	1203,528
0,2250	1	0,769785	0,762337	0,777232	14,896	268,462	1193,166
0,2275	1	0,763465	0,755660	0,771269	15,608	269,217	1183,370
0,2300	1	0,757002	0,749231	0,764772	15,541	269,871	1173,352
0,2325	1	0,751229	0,743560	0,758898	15,338	270,724	1164,405
0,2350	1	0,745372	0,737581	0,753164	15,583	271,502	1155,327
0,2375	1	0,739602	0,732028	0,747175	15,147	272,266	1146,383
0,2400	1	0,734463	0,727079	0,741848	14,769	273,220	1138,418
0,2425	1	0,729600	0,722829	0,736371	13,542	274,238	1130,880
0,2450	1	0,724379	0,718361	0,730396	12,034	275,083	1122,787
0,2475	1	0,718699	0,712498	0,724901	12,403	275,711	1113,984
0,2500	1	0,713822	0,708016	0,719629	11,613	276,606	1106,425
0,2900	1	0,801685	0,796382	0,806988	10,606	360,358	1242,612
0,2925	1	0,795198	0,790068	0,800328	10,260	360,523	1232,557
0,2950	1	0,789547	0,784051	0,795042	10,990	361,020	1223,797
0,2975	1	0,783615	0,778370	0,788859	10,489	361,344	1214,603
0,4725	1	0,328407	0,324913	0,331900	6,987	240,517	509,030

Annexe 03 : Structure triangulaire et carrée du niobate de lithium connecté et déconnecté.

LiNbO3 Hex C						TE	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,3575	1	0,835280	0,829707	0,840853	11,145	462,849	1294,684
0,3600	1	0,838620	0,832338	0,844902	12,564	467,950	1299,861
0,3625	1	0,841986	0,834968	0,849003	14,035	473,091	1305,078
0,3650	1	0,845371	0,837578	0,853165	15,587	478,269	1310,325
0,3675	1	0,849380	0,841215	0,857546	16,331	483,828	1316,539
0,3700	1	0,853994	0,846033	0,861955	15,921	489,766	1323,691
0,3725	1	0,858631	0,850877	0,866384	15,507	495,752	1330,878
0,3750	1	0,863459	0,855900	0,871018	15,119	501,886	1338,362
0,3775	1	0,868352	0,860993	0,875710	14,718	508,094	1345,945
0,3800	1	0,873260	0,866108	0,880412	14,304	514,350	1353,553
0,3825	1	0,877240	0,871291	0,883190	11,900	520,094	1359,723
0,3825	2	0,960439	0,955039	0,965840	10,802	569,421	1488,681
0,3850	1	0,965879	0,958377	0,973382	15,005	576,388	1497,113
0,3875	1	0,969454	0,961699	0,977209	15,510	582,278	1502,654
0,3900	1	0,972258	0,964910	0,979606	14,696	587,730	1507,000
0,3925	1	0,975649	0,968078	0,983220	15,143	593,560	1512,256
0,3950	1	0,978788	0,971043	0,986534	15,490	599,263	1517,122
0,3975	1	0,981872	0,973902	0,989842	15,940	604,956	1521,901
0,4000	1	0,984945	0,976654	0,993237	16,583	610,666	1526,665
0,4025	1	0,988647	0,979314	0,997979	18,665	616,792	1532,402
0,4050	1	0,992240	0,981883	1,002597	20,714	622,879	1537,972
0,4075	1	0,995723	0,984469	1,006977	22,509	628,924	1543,371
0,4100	1	0,999265	0,987074	1,011456	24,382	635,033	1548,861
0,4125	1	1,003112	0,989850	1,016375	26,525	641,365	1554,824
0,4150	1	1,007195	0,992881	1,021508	28,627	647,878	1561,152
0,4175	1	1,011248	0,995962	1,026534	30,572	654,404	1567,435
0,4200	1	1,015400	0,999136	1,031663	32,527	661,025	1573,869
0,4225	1	1,019810	1,002563	1,037056	34,492	667,848	1580,705
0,4250	1	1,025191	1,007503	1,042880	35,377	675,345	1589,047
0,4275	1	1,030005	1,011650	1,048360	36,710	682,507	1596,507
0,4300	1	1,034727	1,015596	1,053859	38,263	689,646	1603,828
0,4325	1	1,039752	1,019934	1,059570	39,636	697,024	1611,616
0,4350	1	1,046045	1,026161	1,065928	39,767	705,296	1621,369
0,4375	1	1,051715	1,031507	1,071924	40,417	713,194	1630,159
0,4400	1	1,058302	1,038647	1,077958	39,311	721,762	1640,368
0,4425	1	1,065151	1,046146	1,084157	38,011	730,561	1650,985
0,4450	1	1,073657	1,055938	1,091376	35,438	740,555	1664,168
0,4475	1	1,081674	1,065062	1,098285	33,223	750,276	1676,594

0,4500	1	1,089464	1,073735	1,105194	31,458	759,901	1688,670
0,4525	1	1,097288	1,082193	1,112382	30,190	769,610	1700,796
0,4550	1	1,106534	1,092670	1,120398	27,729	780,383	1715,128
0,4575	1	1,115537	1,103286	1,127788	24,502	791,055	1729,082
0,4600	1	1,124085	1,113332	1,134839	21,507	801,473	1742,332
0,4625	1	1,132647	1,123216	1,142078	18,863	811,966	1755,603
0,4650	1	1,141864	1,133832	1,149897	16,066	822,999	1769,890

LiNbO <sub>3</sub> Hex C						TM	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2125	1	0,311952	0,306943	0,316962	10,019	102,749	483,526
0,2150	1	0,312927	0,307226	0,318627	11,401	104,283	485,036
0,2175	1	0,313770	0,307486	0,320054	12,568	105,780	486,344
0,2200	1	0,314565	0,307734	0,321396	13,663	107,267	487,575
0,2225	1	0,315277	0,307976	0,322577	14,601	108,731	488,679
0,2250	1	0,316268	0,308273	0,324263	15,990	110,298	490,215
0,2275	1	0,317228	0,308563	0,325893	17,330	111,863	491,704
0,2300	1	0,318102	0,308837	0,327366	18,529	113,403	493,058
0,2325	1	0,318914	0,309107	0,328721	19,614	114,929	494,317
0,2350	1	0,319925	0,309420	0,330429	21,010	116,533	495,883
0,2375	1	0,320995	0,309743	0,332247	22,504	118,166	497,542
0,2400	1	0,321954	0,310045	0,333864	23,818	119,767	499,029
0,2425	1	0,322821	0,310344	0,335299	24,955	121,340	500,373
0,2450	1	0,323773	0,310677	0,336869	26,191	122,953	501,848
0,2475	1	0,324958	0,311071	0,338845	27,774	124,662	503,684
0,2500	1	0,325978	0,311428	0,340527	29,098	126,316	505,265
0,2525	1	0,326924	0,311782	0,342067	30,285	127,950	506,732
0,2550	1	0,327838	0,312135	0,343541	31,406	129,578	508,149
0,2575	1	0,329116	0,312638	0,345593	32,955	131,358	510,129
0,2600	1	0,330216	0,313062	0,347370	34,308	133,077	511,834
0,2625	1	0,331285	0,313473	0,349097	35,623	134,792	513,492
0,2650	1	0,332258	0,313882	0,350635	36,753	136,475	515,000
0,2675	1	0,333631	0,314433	0,352830	38,397	138,332	517,129
0,2700	1	0,334822	0,314914	0,354730	39,816	140,123	518,974
0,2725	1	0,335965	0,315376	0,356553	41,177	141,903	520,746
0,2750	1	0,337004	0,315834	0,358174	42,340	143,648	522,356
0,2775	1	0,338409	0,316415	0,360404	43,989	145,558	524,534
0,2800	1	0,339693	0,316949	0,362437	45,488	147,427	526,524
0,2825	1	0,340953	0,317456	0,364450	46,993	149,295	528,477
0,2850	1	0,342075	0,317964	0,366187	48,224	151,112	530,217
0,2875	1	0,343545	0,318576	0,368513	49,938	153,092	532,494
0,2900	1	0,344962	0,319171	0,370752	51,581	155,060	534,691
0,2925	1	0,346323	0,319729	0,372916	53,186	157,014	536,800
0,2950	1	0,347544	0,320289	0,374799	54,510	158,914	538,693
0,2975	1	0,348992	0,320940	0,377045	56,105	160,929	540,938
0,3000	1	0,350493	0,321627	0,379360	57,733	162,979	543,265
0,3025	1	0,351920	0,322265	0,381575	59,309	165,006	545,476
0,3050	1	0,353255	0,322903	0,383608	60,704	167,001	547,546
0,3075	1	0,354677	0,323609	0,385745	62,137	169,048	549,750
0,3100	1	0,356313	0,324442	0,388184	63,742	171,208	552,285
0,3125	1	0,357793	0,325195	0,390390	65,195	173,306	554,579
0,3150	1	0,359209	0,325936	0,392483	66,547	175,384	556,775
0,3175	1	0,360556	0,326662	0,394450	67,788	177,438	558,861
0,3200	1	0,362403	0,327625	0,397181	69,556	179,752	561,725
0,3225	1	0,364000	0,328472	0,399528	71,057	181,954	564,200
0,3250	1	0,365546	0,329302	0,401790	72,488	184,144	566,597
0,3275	1	0,367005	0,330125	0,403885	73,761	186,301	568,858
0,3300	1	0,368942	0,331148	0,406735	75,587	188,714	571,860
0,3325	1	0,370609	0,332086	0,409132	77,046	191,003	574,444
0,3350	1	0,372236	0,333010	0,411463	78,453	193,284	576,967
0,3375	1	0,373797	0,333929	0,413665	79,736	195,542	579,385
0,3400	1	0,375863	0,335038	0,416688	81,649	198,080	582,588
0,3425	1	0,377713	0,336106	0,419319	83,212	200,518	585,455
0,3450	1	0,379439	0,337139	0,421740	84,601	202,905	588,131
0,3475	1	0,381116	0,338171	0,424061	85,890	205,278	590,729
0,3500	1	0,383150	0,339362	0,426938	87,576	207,859	593,883
0,3525	1	0,385126	0,340556	0,429695	89,138	210,423	596,945
0,3550	1	0,386992	0,341726	0,432258	90,532	212,942	599,837
0,3575	1	0,388762	0,342884	0,434639	91,755	215,423	602,581
0,3600	1	0,390707	0,344222	0,437193	92,972	218,015	605,596
0,3625	1	0,392757	0,345630	0,439883	94,253	220,680	608,773
0,3650	1	0,394742	0,346973	0,442511	95,538	223,325	611,850
0,3675	1	0,396603	0,348296	0,444910	96,614	225,915	614,735
0,3700	1	0,398529	0,349730	0,447328	97,598	228,556	617,720
0,3725	1	0,400719	0,351359	0,450080	98,721	231,365	621,115
0,3750	1	0,402761	0,352844	0,452677	99,833	234,105	624,279

0,3775	1	0,404725	0,354332	0,455119	100,787	236,815	627,324
0,3800	1	0,406648	0,355841	0,457455	101,614	239,516	630,305
0,3825	1	0,409043	0,357720	0,460366	102,646	242,512	634,017
0,3850	1	0,411221	0,359396	0,463045	103,649	245,396	637,392
0,3875	1	0,413345	0,361090	0,465600	104,511	248,265	640,685
0,3900	1	0,415361	0,362774	0,467948	105,174	251,086	643,810
0,3925	1	0,417830	0,364826	0,470834	106,007	254,197	647,637
0,3950	1	0,420143	0,366727	0,473559	106,831	257,233	651,222
0,3975	1	0,422354	0,368630	0,476079	107,449	260,223	654,649
0,4000	1	0,424483	0,370542	0,478423	107,881	263,179	657,948
0,4025	1	0,427057	0,372846	0,481267	108,421	266,430	661,938
0,4050	1	0,429487	0,375071	0,483902	108,831	269,610	665,704
0,4075	1	0,431880	0,377259	0,486502	109,243	272,786	669,415
0,4100	1	0,434176	0,379491	0,488862	109,370	275,919	672,973
0,4125	1	0,436562	0,381959	0,491165	109,206	279,127	676,671
0,4150	1	0,439160	0,384725	0,493594	108,869	282,489	680,698
0,4175	1	0,441717	0,387335	0,496099	108,764	285,846	684,661
0,4200	1	0,444069	0,389892	0,498246	108,354	289,089	688,307
0,4225	1	0,446548	0,392656	0,500440	107,784	292,433	692,150
0,4250	1	0,449258	0,395780	0,502736	106,955	295,949	696,350
0,4275	1	0,451897	0,398760	0,505034	106,274	299,438	700,441
0,4300	1	0,454436	0,401704	0,507169	105,465	302,882	704,376
0,4325	1	0,457013	0,404755	0,509272	104,518	306,370	708,371
0,4350	1	0,459851	0,408232	0,511471	103,239	310,055	712,769
0,4375	1	0,462670	0,411676	0,513663	101,988	313,748	717,138
0,4400	1	0,465403	0,415066	0,515741	100,675	317,405	721,375
0,4425	1	0,468051	0,418463	0,517639	99,176	321,024	725,479
0,4450	1	0,471191	0,422533	0,519848	97,314	325,004	730,345
0,4475	1	0,474295	0,426649	0,521941	95,292	328,983	735,158
0,4500	1	0,477310	0,430666	0,523953	93,287	332,923	739,830
0,4525	1	0,480250	0,434708	0,525792	91,084	336,835	744,387
0,4550	1	0,483637	0,439482	0,527792	88,310	341,085	749,637
0,4575	1	0,487079	0,444449	0,529710	85,261	345,400	754,973
0,4600	1	0,490554	0,449418	0,531689	82,272	349,765	760,358
0,4625	1	0,493917	0,454445	0,533390	78,945	354,077	765,572
0,4650	1	0,497404	0,459775	0,535033	75,258	358,504	770,976
0,4675	1	0,501604	0,466510	0,536698	70,187	363,475	777,486
0,4700	1	0,505550	0,472692	0,538408	65,716	368,293	783,602
0,4725	1	0,510013	0,480049	0,539977	59,928	373,521	790,520
0,4750	1	0,514206	0,486926	0,541486	54,560	378,584	797,019
0,4775	1	0,519418	0,495849	0,542986	47,137	384,434	805,097
0,4800	1	0,524301	0,504102	0,544500	40,398	390,080	812,666
0,4825	1	0,529498	0,512970	0,546026	33,056	395,998	820,722
0,4850	1	0,534107	0,520806	0,547407	26,601	401,515	827,865

<b>LiNbO<sub>3</sub>_Hex_D</b>						<b>TE</b>	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2000	1	0,471054	0,409535	0,532573	123,038	146,027	730,134
0,2025	1	0,469315	0,407571	0,531059	123,488	147,306	727,438
0,2050	1	0,466481	0,404928	0,528034	123,106	148,224	723,046
0,2075	1	0,464316	0,402774	0,525858	123,084	149,336	719,690
0,2100	1	0,462388	0,400809	0,523967	123,158	150,507	716,702
0,2125	1	0,460606	0,398980	0,522232	123,252	151,712	713,939
0,2150	1	0,457976	0,396637	0,519314	122,677	152,620	709,862
0,2175	1	0,455777	0,394599	0,516955	122,356	153,654	706,454
0,2200	1	0,453835	0,392753	0,514918	122,164	154,758	703,445
0,2225	1	0,452042	0,391031	0,513052	122,022	155,898	700,664
0,2250	1	0,449536	0,388873	0,510200	121,327	156,776	696,781
0,2275	1	0,447258	0,386881	0,507635	120,754	157,714	693,250
0,2300	1	0,445288	0,385107	0,505468	120,361	158,745	690,196
0,2325	1	0,443463	0,383449	0,503478	120,029	159,813	687,368
0,2350	1	0,441134	0,381491	0,500778	119,287	160,683	683,758
0,2375	1	0,438762	0,379523	0,498000	118,478	161,519	680,080
0,2400	1	0,436751	0,377793	0,495709	117,916	162,471	676,965
0,2425	1	0,434912	0,376195	0,493629	117,434	163,473	674,114
0,2450	1	0,432863	0,374532	0,491193	116,661	164,380	670,937
0,2450	2	0,724799	0,717807	0,731791	13,983	275,242	1123,438
0,2475	1	0,430380	0,372689	0,488071	115,382	165,104	667,089
0,2475	2	0,722191	0,712791	0,731591	18,800	277,050	1119,396
0,2500	1	0,428409	0,371138	0,485681	114,544	166,009	664,035
0,2500	2	0,719799	0,708190	0,731407	23,218	278,922	1115,688
0,2525	1	0,426626	0,369709	0,483544	113,835	166,971	661,271
0,2525	2	0,717506	0,703805	0,731206	27,401	280,814	1112,134
0,2550	1	0,424954	0,368356	0,481553	113,198	167,963	658,679
0,2550	2	0,715484	0,699970	0,730998	31,028	282,795	1109,000
0,2575	1	0,422325	0,366639	0,478011	111,372	168,560	654,603

0,2575	2	0,712677	0,694724	0,730631	35,907	284,447	1104,650
0,2600	1	0,420376	0,365234	0,475517	110,283	169,411	651,582
0,2600	2	0,710401	0,690483	0,730319	39,836	286,292	1101,122
0,2625	1	0,418610	0,363925	0,473295	109,369	170,322	648,846
0,2625	2	0,708295	0,686586	0,730004	43,418	288,188	1097,857
0,2650	1	0,416972	0,362697	0,471247	108,550	171,271	646,307
0,2650	2	0,706557	0,683446	0,729667	46,220	290,218	1095,163
0,2675	1	0,414416	0,361094	0,467737	106,643	171,827	642,345
0,2675	2	0,703732	0,678282	0,729182	50,900	291,785	1090,784
0,2700	1	0,412420	0,359742	0,465098	105,356	172,598	639,251
0,2700	2	0,701555	0,674360	0,728750	54,389	293,601	1087,410
0,2725	1	0,410638	0,358500	0,462777	104,276	173,443	636,490
0,2725	2	0,699553	0,670800	0,728306	57,505	295,474	1084,307
0,2750	1	0,408998	0,357342	0,460655	103,314	174,336	633,948
0,2750	2	0,697781	0,667739	0,727823	60,084	297,429	1081,560
0,2775	1	0,406602	0,355860	0,457344	101,484	174,890	630,233
0,2775	2	0,695126	0,663024	0,727227	64,203	298,991	1077,445
0,2800	1	0,404586	0,354550	0,454621	100,071	175,590	627,108
0,2800	2	0,692931	0,659205	0,726657	67,452	300,732	1074,043
0,2825	1	0,402806	0,353356	0,452256	98,901	176,379	624,349
0,2825	2	0,690859	0,655644	0,726073	70,430	302,510	1070,831
0,2850	1	0,401165	0,352237	0,450093	97,855	177,215	621,806
0,2850	2	0,688989	0,652523	0,725454	72,931	304,361	1067,932
0,2875	1	0,398952	0,350872	0,447032	96,160	177,783	618,375
0,2875	2	0,686492	0,648257	0,724727	76,470	305,918	1064,062
0,2900	1	0,396927	0,349593	0,444260	94,666	178,419	615,236
0,2900	2	0,684372	0,644740	0,724003	79,263	307,625	1060,776
0,2925	1	0,395162	0,348440	0,441884	93,445	179,157	612,501
0,2925	2	0,682297	0,641320	0,723274	81,954	309,337	1057,561
0,2950	1	0,393542	0,347367	0,439716	92,348	179,947	609,990
0,2950	2	0,680340	0,638187	0,722493	84,307	311,085	1054,527
0,2950	3	0,966426	0,959565	0,973286	13,721	441,898	1497,960
0,2975	1	0,391539	0,346159	0,436918	90,759	180,548	606,885
0,2975	2	0,678178	0,634844	0,721513	86,670	312,725	1051,177
0,2975	3	0,963147	0,953472	0,972821	19,349	444,131	1492,877
0,3000	1	0,389521	0,344963	0,434080	89,117	181,127	603,758
0,3000	2	0,675986	0,631539	0,720432	88,893	314,333	1047,778
0,3000	3	0,959768	0,947306	0,972230	24,924	446,292	1487,640
0,3025	1	0,387811	0,343905	0,431717	87,812	181,835	601,107
0,3025	2	0,673914	0,628446	0,719382	90,936	315,981	1044,567
0,3025	3	0,957102	0,942566	0,971638	29,072	448,761	1483,508
0,3050	1	0,386250	0,342928	0,429572	86,644	182,600	598,688
0,3050	2	0,671913	0,625540	0,718286	92,747	317,647	1041,465
0,3050	3	0,954742	0,938495	0,970988	32,493	451,354	1479,849
0,3075	1	0,384842	0,341935	0,427149	85,214	183,282	596,040
0,3075	2	0,669803	0,622647	0,716958	94,312	319,245	1038,194
0,3075	3	0,951983	0,933774	0,970193	36,419	453,739	1475,574
0,3100	1	0,382519	0,340863	0,424176	83,313	183,801	592,905
0,3100	2	0,667448	0,619585	0,715310	95,725	320,709	1034,544
0,3100	3	0,948516	0,927821	0,969210	41,388	455,762	1470,199
0,3125	1	0,380876	0,339924	0,421828	81,905	184,487	590,358
0,3125	2	0,665313	0,616768	0,713859	97,091	322,261	1031,235
0,3125	3	0,945859	0,923481	0,968236	44,755	458,150	1466,081
0,3150	1	0,379372	0,339044	0,419700	80,656	185,229	588,027
0,3150	2	0,663264	0,614092	0,712437	98,345	323,839	1028,059
0,3150	3	0,943431	0,919660	0,967203	47,543	460,630	1462,319
0,3175	1	0,377964	0,338211	0,417718	79,507	186,006	585,845
0,3175	2	0,661406	0,611803	0,711010	99,207	325,495	1025,180
0,3175	3	0,941150	0,916203	0,966098	49,895	463,164	1458,783
0,3200	1	0,375825	0,337155	0,414494	77,339	186,409	582,528
0,3200	2	0,658833	0,608651	0,709014	100,363	326,781	1021,191
0,3200	3	0,937195	0,909616	0,964774	55,158	464,849	1452,652
0,3225	1	0,374214	0,336286	0,412143	75,857	187,060	580,032
0,3225	2	0,656696	0,606088	0,707304	101,216	328,266	1017,879
0,3225	3	0,934389	0,905342	0,963436	58,094	467,078	1448,304
0,3250	1	0,372742	0,335467	0,410018	74,551	187,769	577,751
0,3250	2	0,654205	0,603724	0,704686	100,962	329,556	1014,018
0,3250	3	0,931836	0,901600	0,962072	60,472	469,412	1444,346
0,3275	1	0,371369	0,334692	0,408045	73,353	188,516	575,622
0,3275	2	0,651468	0,601782	0,701154	99,372	330,702	1009,776
0,3275	3	0,929441	0,898273	0,960610	62,337	471,808	1440,634
0,3300	1	0,369337	0,333699	0,404975	71,276	188,916	572,473
0,3300	2	0,647538	0,598651	0,696425	97,775	331,216	1003,684
0,3300	3	0,925497	0,891979	0,959015	67,036	473,392	1434,520
0,3325	1	0,367727	0,332857	0,402597	69,740	189,517	569,977
0,3325	2	0,644402	0,596237	0,692567	96,329	332,109	998,823
0,3325	3	0,921814	0,887671	0,955956	68,286	475,080	1428,811

0,3350	1	0,366278	0,332081	0,400475	68,393	190,190	567,731
0,3350	2	0,641509	0,594073	0,688945	94,872	333,104	994,339
0,3350	3	0,917223	0,884014	0,950432	66,418	476,268	1421,696
0,3375	1	0,364924	0,331346	0,398502	67,156	190,901	565,632
0,3375	2	0,638824	0,592190	0,685458	93,268	334,185	990,177
0,3375	3	0,912918	0,880716	0,945120	64,404	477,570	1415,023
0,3400	1	0,362971	0,330399	0,395543	65,144	191,286	562,605
0,3400	2	0,635040	0,589283	0,680796	91,512	334,666	984,311
0,3400	3	0,905695	0,874607	0,936782	62,175	477,301	1403,827
0,3425	1	0,361333	0,329568	0,393098	63,530	191,823	560,066
0,3425	2	0,631947	0,587012	0,676883	89,872	335,485	979,519
0,3425	3	0,900228	0,870100	0,930356	60,255	477,909	1395,353
0,3450	1	0,359879	0,328809	0,390949	62,140	192,445	557,813
0,3450	2	0,629066	0,584820	0,673311	88,491	336,393	975,052
0,3450	3	0,895564	0,866395	0,924734	58,339	478,903	1388,125
0,3475	1	0,358525	0,328092	0,388957	60,865	193,110	555,713
0,3475	2	0,626341	0,582803	0,669879	87,076	337,363	970,829
0,3475	3	0,891235	0,863050	0,919420	56,370	480,041	1381,414
0,3500	1	0,356770	0,327248	0,386291	59,042	193,548	552,993
0,3500	2	0,623094	0,580570	0,665617	85,047	338,028	965,795
0,3500	3	0,885004	0,857953	0,912056	54,103	480,115	1371,757
0,3525	1	0,355170	0,326465	0,383874	57,408	194,056	550,513
0,3525	2	0,620101	0,578503	0,661699	83,196	338,808	961,157
0,3525	3	0,879594	0,853607	0,905581	51,974	480,588	1363,370
0,3550	1	0,353769	0,325763	0,381775	56,011	194,661	548,342
0,3550	2	0,617317	0,576520	0,658114	81,594	339,679	956,841
0,3550	3	0,875094	0,850090	0,900097	50,006	481,520	1356,395
0,3575	1	0,352475	0,325111	0,379839	54,728	195,315	546,336
0,3575	2	0,614670	0,574641	0,654698	80,057	340,604	952,738
0,3575	3	0,871028	0,846998	0,895059	48,060	482,659	1350,094
0,3600	1	0,350941	0,324422	0,377460	53,038	195,825	543,958
0,3600	2	0,611745	0,572735	0,650755	78,019	341,354	948,205
0,3600	3	0,865892	0,843160	0,888625	45,465	483,168	1342,133
0,3625	1	0,349396	0,323742	0,375050	51,307	196,317	541,564
0,3625	2	0,608817	0,570892	0,646742	75,850	342,079	943,666
0,3625	3	0,860641	0,839261	0,882021	42,760	483,573	1333,994
0,3650	1	0,348061	0,323126	0,372996	49,870	196,916	539,495
0,3650	2	0,606150	0,569127	0,643172	74,044	342,929	939,532
0,3650	3	0,856346	0,836135	0,876557	40,422	484,478	1327,337
0,3675	1	0,346835	0,322556	0,371115	48,558	197,566	537,595
0,3675	2	0,603616	0,567457	0,639775	72,318	343,835	935,604
0,3675	3	0,852476	0,833433	0,871519	38,086	485,592	1321,338
0,3700	1	0,345498	0,321967	0,369028	47,061	198,143	535,522
0,3700	2	0,600983	0,565795	0,636170	70,376	344,663	931,523
0,3700	3	0,848114	0,830350	0,865878	35,529	486,393	1314,577
0,3725	1	0,343928	0,321323	0,366532	45,209	198,575	533,088
0,3725	2	0,598084	0,564089	0,632080	67,991	345,319	927,030
0,3725	3	0,842616	0,826367	0,858865	32,498	486,505	1306,055
0,3750	1	0,342633	0,320762	0,364505	43,743	199,156	531,082
0,3750	2	0,595504	0,562506	0,628502	65,996	346,137	923,032
0,3750	3	0,838244	0,823375	0,853113	29,738	487,229	1299,278
0,3775	1	0,341441	0,320234	0,362648	42,413	199,786	529,234
0,3775	2	0,593085	0,560988	0,625183	64,194	347,029	919,282
0,3775	3	0,834420	0,820823	0,848016	27,193	488,240	1293,351
0,3800	1	0,340319	0,319736	0,360903	41,167	200,448	527,495
0,3800	2	0,590882	0,559731	0,622034	62,303	348,030	915,868
0,3800	3	0,830940	0,818570	0,843311	24,741	489,424	1287,957
0,3825	1	0,338677	0,319104	0,358250	39,146	200,793	524,950
0,3825	2	0,587884	0,557990	0,617779	59,789	348,542	911,220
0,3825	3	0,824918	0,814219	0,835618	21,399	489,073	1278,623
0,3850	1	0,337401	0,318571	0,356230	37,659	201,344	522,971
0,3850	2	0,585409	0,556653	0,614266	57,713	349,343	907,384
0,3850	3	0,820506	0,811225	0,829788	18,563	489,637	1271,785
0,3875	1	0,336232	0,318074	0,354390	36,317	201,949	521,160
0,3875	2	0,583119	0,555174	0,611064	55,889	350,236	903,835
0,3875	3	0,816748	0,808764	0,824732	15,968	490,559	1265,959
0,3900	1	0,335133	0,317602	0,352663	35,061	202,588	519,456
0,3900	2	0,581033	0,554057	0,608008	53,952	351,234	900,601
0,3900	3	0,813275	0,806579	0,819970	13,391	491,624	1260,576
0,3925	1	0,333584	0,317007	0,350161	33,154	202,944	517,055
0,3925	2	0,578203	0,552411	0,60394	51,583	351,764	896,214
0,3925	3	0,807585	0,802452	0,812719	10,267	491,315	1251,757
0,3950	1	0,332320	0,316494	0,348147	31,653	203,463	515,097
0,3950	2	0,575840	0,551093	0,600586	49,492	352,558	892,551
0,3975	1	0,331174	0,316022	0,346326	30,304	204,044	513,319
0,3975	2	0,573662	0,549873	0,597452	47,579	353,448	889,177
0,4000	1	0,330095	0,315572	0,344617	29,045	204,659	511,646

0,4000	2	0,571621	0,548763	0,594479	45,716	354,405	886,013
0,4025	1	0,328622	0,315009	0,342234	27,224	205,019	509,363
0,4025	2	0,569017	0,547357	0,590677	43,319	354,996	881,977
0,4050	1	0,327316	0,314504	0,340128	25,624	205,473	507,340
0,4050	2	0,566674	0,546126	0,587221	41,095	355,729	878,344
0,4075	1	0,326164	0,314048	0,338280	24,232	206,014	505,555
0,4075	2	0,564541	0,544993	0,584088	39,095	356,578	875,038
0,4100	1	0,325096	0,313627	0,336564	22,937	206,598	503,898
0,4100	2	0,562525	0,543931	0,581119	37,188	357,485	871,914
0,4125	1	0,323933	0,312306	0,334660	21,454	207,114	502,096
0,4125	2	0,560396	0,542897	0,577894	34,996	358,303	868,613
0,4150	1	0,322635	0,312769	0,332500	19,731	207,535	500,084
0,4150	2	0,558109	0,541857	0,574361	32,503	359,004	865,069
0,4175	1	0,321533	0,312376	0,330689	18,313	208,072	498,375
0,4175	2	0,556083	0,540886	0,571279	30,394	359,855	861,928
0,4200	1	0,320515	0,312014	0,329016	17,002	208,655	496,799
0,4200	2	0,554166	0,539997	0,568336	28,339	360,762	858,958
0,4225	1	0,319438	0,311645	0,327230	15,585	209,192	495,129
0,4225	2	0,552187	0,539118	0,565257	26,140	361,614	855,891
0,4250	1	0,318201	0,311254	0,325148	13,894	209,615	493,211
0,4250	2	0,550034	0,538228	0,561839	23,611	362,335	852,553
0,4275	1	0,317137	0,310904	0,323370	12,466	210,143	491,562
0,4275	2	0,548122	0,537421	0,558823	21,403	363,199	849,589
0,4300	1	0,316149	0,310571	0,321726	11,155	210,713	490,031
0,4300	2	0,546313	0,536655	0,555972	19,317	364,118	846,786
0,4325	1	0,315150	0,310241	0,320059	9,818	211,268	488,482
0,4325	2	0,544499	0,535916	0,553082	17,166	365,019	843,974
0,4350	1	0,542435	0,535151	0,549719	14,568	365,737	840,774
0,4375	1	0,540607	0,534446	0,546768	12,323	366,599	837,941
0,4400	1	0,538893	0,533777	0,544010	10,233	367,525	835,285

<b>LiNbO<sub>3</sub>_Hex_D</b>						<b>TM</b>	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,2000	1	1,023166	1,003185	1,043148	39,963	317,182	1585,908
0,2025	1	1,020053	0,999894	1,040212	40,318	320,169	1581,082
0,2050	1	1,015904	0,995727	1,036080	40,352	322,803	1574,650
0,2075	1	1,012387	0,992416	1,032357	39,940	325,609	1569,199
0,2100	1	1,009277	0,989486	1,029069	39,583	328,520	1564,380
0,2125	1	1,006150	0,986882	1,025418	38,536	331,401	1559,532
0,2150	1	1,002449	0,983612	1,021287	37,676	334,066	1553,797
0,2175	1	0,999207	0,980920	1,017494	36,574	336,858	1548,771
0,2200	1	0,996146	0,978581	1,013711	35,129	339,686	1544,026
0,2225	1	0,993181	0,976480	1,009883	33,402	342,523	1539,431
0,2250	1	0,989705	0,973777	1,005633	31,856	345,160	1534,043
0,2275	1	0,986468	0,971428	1,001508	30,080	347,853	1529,025
0,2300	1	0,983516	0,969455	0,997577	28,122	350,623	1524,449
0,2325	1	0,980761	0,967696	0,993826	26,129	353,442	1520,180
0,2350	1	0,977352	0,965505	0,989199	23,694	356,000	1514,895
0,2375	1	0,974126	0,963371	0,984882	21,512	358,600	1509,896
0,2400	1	0,971218	0,961632	0,980804	19,173	361,293	1505,388
0,2425	1	0,968283	0,960072	0,976494	16,422	363,953	1500,838
0,2450	1	0,965308	0,958524	0,972093	13,570	366,576	1496,228

<b>LiNbO<sub>3</sub>_Rec_C</b>						<b>TE</b>	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,4500	1	0,359837	0,354026	0,365648	11,622	250,986	557,748
0,4525	1	0,361421	0,355137	0,367704	12,568	253,491	560,202
0,4550	1	0,363749	0,356286	0,371212	14,926	256,534	563,811
0,4575	1	0,365699	0,357469	0,373930	16,461	259,327	566,834
0,4600	1	0,367527	0,358679	0,376375	17,696	262,047	569,667
0,4625	1	0,369292	0,359922	0,378661	18,739	264,736	572,402
0,4650	1	0,371759	0,361207	0,382311	21,104	267,945	576,226
0,4675	1	0,373955	0,362550	0,385360	22,810	270,977	579,630
0,4700	1	0,375995	0,363919	0,388071	24,153	273,912	582,792
0,4725	1	0,377959	0,365317	0,390600	25,283	276,808	585,836
0,4750	1	0,380603	0,366764	0,394441	27,677	280,219	589,934
0,4775	1	0,383120	0,368297	0,397944	29,647	283,557	593,837
0,4800	1	0,385422	0,369834	0,401010	31,177	286,754	597,404
0,4825	1	0,387631	0,371414	0,403849	32,435	289,900	600,828
0,4850	1	0,390386	0,373061	0,407712	34,651	293,473	605,099
0,4875	1	0,393270	0,374776	0,411763	36,988	297,164	609,568
0,4900	1	0,395855	0,376502	0,415208	38,705	300,652	613,575
0,4925	1	0,398326	0,378308	0,418343	40,035	304,072	617,405
0,4950	1	0,401106	0,380163	0,422048	41,885	307,748	621,714
0,4975	1	0,404459	0,382077	0,426841	44,764	311,888	626,911

0,5000	1	0,407346	0,384074	0,430618	46,544	315,693	631,386
0,5025	1	0,410106	0,386111	0,434101	47,990	319,421	635,664
0,5050	1	0,412794	0,388214	0,437374	49,160	323,115	639,831
0,5075	1	0,415432	0,390388	0,440476	50,087	326,789	643,920
0,5100	1	0,418033	0,392624	0,443441	50,817	330,455	647,951
0,5125	1	0,420602	0,394896	0,446309	51,413	334,116	651,934
0,5150	1	0,423143	0,397244	0,449042	51,798	337,774	655,871
0,5175	2	0,852728	0,846377	0,859078	12,700	683,994	1321,728
0,5175	1	0,425658	0,399644	0,451672	52,029	341,431	659,770
0,5200	2	0,859956	0,851540	0,868372	16,833	693,125	1332,932
0,5200	1	0,428158	0,402090	0,454225	52,136	345,095	663,644
0,5225	2	0,866936	0,856471	0,877402	20,930	702,110	1343,751
0,5225	1	0,430642	0,404617	0,456667	52,050	348,766	667,495
0,5250	2	0,872186	0,861159	0,883213	22,054	709,741	1351,888
0,5250	1	0,433114	0,407230	0,458998	51,768	352,447	671,327
0,5275	2	0,876597	0,865663	0,887532	21,869	716,728	1358,726
0,5275	1	0,435569	0,409885	0,461254	51,369	356,132	675,132
0,5300	2	0,880985	0,870075	0,891894	21,819	723,729	1365,526
0,5300	1	0,438007	0,412581	0,463434	50,853	359,823	678,911
0,5325	2	0,885432	0,874443	0,896422	21,979	730,814	1372,420
0,5325	1	0,440434	0,415331	0,465537	50,206	363,523	682,673
0,5350	2	0,889997	0,878692	0,901303	22,611	738,030	1379,496
0,5350	1	0,442851	0,418158	0,467544	49,387	367,234	686,419
0,5375	2	0,894612	0,883009	0,906216	23,207	745,324	1386,649
0,5375	1	0,445260	0,421066	0,469453	48,388	370,957	690,152
0,5400	2	0,899284	0,887417	0,911150	23,733	752,700	1393,890
0,5400	1	0,447665	0,424025	0,471305	47,280	374,695	693,880
0,5425	2	0,904059	0,891784	0,916333	24,549	760,201	1401,291
0,5425	1	0,450063	0,427039	0,473087	46,047	378,447	697,598
0,5450	2	0,909076	0,896416	0,921737	25,321	767,942	1409,068
0,5450	1	0,452465	0,430208	0,474722	44,514	382,220	701,321
0,5475	2	0,914200	0,901251	0,927149	25,898	775,813	1417,010
0,5475	1	0,454869	0,433444	0,476295	42,851	386,013	705,047
0,5500	2	0,919356	0,906175	0,932538	26,363	783,751	1425,002
0,5500	1	0,457256	0,436679	0,477834	41,156	389,811	708,747

LiNbO <sub>3</sub> Rec. C						TM	
r/a	N_Gap	f_c	f_min	f_max	L_Gap (en nm)	r (en nm)	a (en nm)
0,4625	1	0,801762	0,788845	0,814680	25,836	574,763	1242,732
0,4650	1	0,805912	0,792730	0,819094	26,364	580,861	1249,163
0,4675	1	0,809793	0,796196	0,823390	27,194	586,796	1255,180
0,4700	1	0,814333	0,800374	0,828292	27,918	593,242	1262,216
0,4725	1	0,819062	0,805192	0,832932	27,740	599,861	1269,546
0,4750	1	0,823461	0,809617	0,837304	27,687	606,273	1276,364
0,4775	1	0,829445	0,816845	0,842046	25,201	613,893	1285,640
0,4800	1	0,834710	0,822758	0,846661	23,902	621,024	1293,800
0,4825	1	0,837529	0,823819	0,851240	27,422	626,367	1298,171
0,4850	1	0,845632	0,835933	0,855331	19,398	635,704	1310,729