

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Technologie des Systèmes de Télécommunications

**Par** : DAHMANI Abdelfattah

### **Sujet**

# **OPTIMISATION DES FILTRES SELECTIFS À BASE DES CRISTAUX PHOTONIQUES UNIDIMENSIONNELS PAR UNE APPROCHE HYBRIDE**

Soutenu publiquement, le 15 / 06 /2017, devant le jury composé de :

ABRIMehadji	Prof	Univ. Tlemcen	Président
ABRI née BADAOUI Hadjira	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
BAHRI Sidi Mohammed	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur

# *Dédicaces*

*A mon cher père*

*Sans restriction*

*Pour son amour, sa patience et ses considérables sacrifices*

*Pour me parvenir à ce niveau*

*A ma chère mère*

*Pour son grand amour, ses sacrifices et toute l'affection*

*Qu'elle me toujours offerte*

*À ma famille*

*À tous mes amis*

*A tous ceux qui j'aime et qui m'aiment*

*"En essayant continuellement on finit par réussir. Donc plus ça rate, plus on*

*a*

*des chances que ça marche !" Devise Shaddock*

*Dahmani Abdelfattah*

# Remerciements

Nous remercions DIEU le tout puissant qui nous a donné durant toutes ces années, la santé, le courage et la foi en nous même pour pouvoir avancer et mener nos études à leurs termes.

Nous ne saurions, réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite notre encadreur Madame ABRI Née BADAOUI Hadjira Maitre de conférences A à l'université Abou-BekrBelkaid pour sa patience, son encouragement, son aide, son dévouement, son apport précieux ainsi que sa pédagogie, sa compétences, sa disponibilité, sa modestie et son aide précieuse tout au long de ce modeste travail.

Nos premiers mots de reconnaissance vont à Monsieur ABRI Mehadji professeur à l'université Abou-BekrBelkaid qu'il trouve ici l'expression de nos sincères remerciements d'avoir accepté de présider cette jury.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur BAHRI Sidi Mohammed Maitre de conférences (B) à l'université Abou-BekrBelkaid, qui a bien voulu assurer la tâche d'examineur et de consacrer une partie de son temps à l'examen de ce travail.

Ensuite, je réilère mes vifs remerciements aux membres du jury pour avoir bien voulu nous honorer de leur présence afin de porter leur jugement sur ce modeste travail.

En fin, j'exprime ma profonde gratitude à tous les enseignants de l'université de Tlemcen pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont prodigué durant notre parcours universitaire.

## Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Ce travail de mémoire constitue une contribution sur les cristaux photoniques planaires unidimensionnels. Nous avons étudié le phénomène d'ouverture de bandes interdites et les différents types de cristaux photoniques, et plus précisément les cristaux unidimensionnels.

En effet, notre travail a présenté un intérêt très particulier sur la capacité de filtrage des cristaux photoniques unidimensionnels planaires d'une longueur finie en intervenant sur la géométrie des couches des semi-conducteurs qui les composent afin que le filtre sélectif à base de CP-1D puisse résonner à une fréquence exigée par un cahier des charges. Pour se faire, nous avons utilisés un modèle hybride qui est la « *PSO* », ainsi que « *l'algorithme génétique* » implémentés sous le logiciel de calcul *MATLAB*, pour pouvoir intervenir sur les dimensions des différentes couches qui forment le filtre sélectif. Grâce à ce modèle, nous avons appris que changer l'épaisseur des couches qui composent le filtre induisait à changer la fréquence de résonance de ce dernier, mais aussi que pour une fréquence donnée, les résultats obtenus montrent la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de modèle hybride.

**Mots clés:** Cristaux photoniques unidimensionnels, algorithme génétique, PSO, filtres sélectifs en longueur d'ondes, optimisation.

# Liste des acronymes

2017

Dans ce manuscrit nous avons utilisés quelques abréviations dont nous rappelons la signification ci-dessous :

$\lambda$  : Longueur d'onde.

$r$  : Rayon du cristal photonique.

$a$  : Période du cristal photonique.

$n$  : Indice de réfraction.

$K$  : Vecteur d'onde.

$\epsilon$ : Permittivité diélectrique.

$c$ : vitesse de la lumière dans le vide.

$f$  : Facteur de remplissage.

$CP$  : cristal photonique.

$1D$ : une dimension.

$2D$  : deux dimensions

$3D$  : 3 dimensions.

$PBG$  : Photonique Band Gap

$BIP$ : Bande Interdite Photonique.

$\Delta_n$  : Contraste d'indice.

$\delta_{ij}$  : Symbole de Kronecker..

$FDTD$ : finite difference in the time domain.

$OEP (PSO)$  :L'optimisation par essais particulaires

$AG$ : algorithme génétique

$RS$ : Recuit simulé

$BPM$ :Beam Propagation Method.

$FFF$ :Fast Fourier Factorization.

$VCSEL$ :Vertical Cavity Surface Emitting Laser.

$TMM$  :Transfert Matrix Method.

# Liste des acronymes



2017

## Liste des figures

<b>Figure I. 1 :</b> (a) Aile de papillon,(b) Coupe d'une aile de papillon observée au MEB .....	6
<b>Figure I. 2:</b> Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge).....	7
<b>Figure I. 3:</b> (a)Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b)Image au microscope électronique d'une opale naturelle [Réf 4] .....	7
<b>Figure I.4:</b> Représentation schématique de l'interface des ondes réfléchies par chaque dioptr	8
<b>Figure I. 5:</b> Exemple de Bips 2D: réseaux de tiges dans l'air et de trous d'air dans un matériau	9
<b>Figure I. 6:</b> Image Microscope à Balayage Electronique (MEB) d'un cristal photonique gravé dans une hétéro-structure .....	9
<b>Figure I. 7</b> Exemples de cristaux photoniques 2D planaires à haut contraste d'indice vertical: (a) Membrane suspendue dans l'air d'épaisseur 270 nm, (b) Cristal photonique planaire avec des trous profonds de $\approx 0.5 \mu\text{m}$ , gravés partiellement dans la couche $Al_xO_y$ .....	10
<b>Figure I. 8 :</b> Structure 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.....	11
<b>Figure I. 9:</b> La première structure BIP 3D: la Yablonovite[Réf 8].....	12
<b>Figure I. 10:</b> Exemples des structures artificiels 3D : Structure cubique (1), tas de bois (2), structure spirale (3), quasi-diamant (4).....	12
<b>Figure I.11:</b> Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel .....	13
<b>Figure I.12:</b> Réseau direct .....	15
<b>Figure I.13 :</b> Zones de Brillouin (ZB) d'un réseau carré .....	16
<b>Figure I.13 :</b> Réseau triangulaire.....	16
<b>Figure I.15 :</b> structure hexagonale : (a) réseau direct(b) réseaureciproque (c) Zone de Brillouin irréductible .....	17
<b>Figure I. 16:</b> Cartes des bandes interdites pour les deux polarisations dans le cas d'un cristal photonique de trous d'air dans une matrice de constante diélectrique $\epsilon_1 = 10,5$ : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré. Le recouvrement entre les deux polarisations ne se fait que pour des valeurs élevées de $r/a$ .....	18
<b>Figure I. 17 :</b> Premières bandes interdites TE des cristaux photoniques bidimensionnels avec des contrastes d'indices différents : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré .....	19
<b>Figure I.18 :</b> les défauts ponctuels : (a) défauts lacunaire, (b) et (c) défauts de substitution.	20
<b>Figure I.19 :</b> Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant .....	20
<b>Figure I. 20 :</b> structure VCSEL simple .....	24
<b>Figure I. 21:</b> schéma d'un résonateur Fabry-pérot vertical constitué par deux miroirs de Bragg .....	25
<b>Figure. I. 22:</b> Principe de démultiplexeur spectrographe : le guide PC de largeur proche de « W3 » couple le mode fondamental au mode d'ordre supérieur uniquement dans la section où la diffraction de Bragg entre les deux modes est autorisée. Ce mode est ensuite extrait latéralement à travers les trois rangées de trous .....	26

23(b), illustre le couplage de mode de W3 de façon générique. Dans le dispositif, la position de la mini-stopband évolue avec la largeur du guide, comme indiqué en figure 23(c).

<b>Figure I. 23</b> : illustration de l'utilisation de la mini-stopband : (a) relation de dispersion locale, le mode fondamental étant le plus raide, le mode d'ordre supérieur le moins raide ; (b) schéma du couplage de mode dans le guide W3 ; (c) superposition des relations de dispersion pour des guides dont la largeur est modifiée de 0.1 rangée en plus ou moins comparé à W3. On voit que ce changement de largeur de 40 nm, dans un cas typique, conduit à des mini-stopband bien séparées.....	27
<b>Figure I.24</b> : Cartographie du champ électrique lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans un guide d'onde faisant un virage à 90° dans un cristal photonique .....	28
<b>Figure I.25</b> : Méthodes d'optimisations stochastiques.....	29
<b>Figure I.26</b> : Quatre niveaux d'organisation de l'algorithme génétique .....	31
<b>Figure I.27</b> : Illustration du codage des variables d'optimisation.....	31
<b>Figure I.28</b> : Représentation schématique du croisement en 1 point .....	33
<b>Figure I.29</b> : Représentation schématique du croisement en deux points.....	34
<b>Figure I.30</b> : Représentation schématique du croisement uniforme .....	35
<b>Figure I.31</b> : Représentation schématique d'une mutation dans un chromosome .....	35
<b>Figure I.32</b> : Parcours de l'espace de recherche avec le recuit simulé. Le principe de "recuit" qui se traduit par une augmentation du niveau d'énergie, permet de sortir des minimums locaux .....	36
<b>Figure II.1</b> :Principe de la méthode TMM.....	46
<b>Figure II.2</b> : Les ondes utilisées dans le calcul de $l_1$ .....	46
<b>Figure II.3</b> : Processus d'optimisation.....	51
<b>Figure II.4</b> : Organigramme de la PSO standard .....	52
<b>Figure II.5</b> : Organigramme de la méthode hybride entre la « PSO » et l'AG.....	53
<b>Figure III.1</b> : Représentation schématique d'un CP 1D ayant un défaut ponctuel	
<b>Figure III.2</b> :Structure d'un cristal à base des CP-1D .....	58
<b>Figure III. 3</b> : Spécification des fonctions désirée et synthétisée .....	59
<b>Figure III. 4</b> : Réponse de transmission désirée ( $F_d$ ) et synthétisée ( $F_s$ ) en fonction de la longueur d'onde.....	61
<b>Figure III. 5</b> : La transmission en fonction de la longueur d'onde [27] .....	62
<b>Figure III.6</b> : Evolution de la fonction coût associée.....	62
<b>Figure III.7</b> :La transmission en fonction de la longueur d'onde .....	64
<b>Figure III.8</b> : La transmission en fonction de la longueur d'onde pour $1.31 \mu m$ .....	65
<b>Figure III.9</b> : Evolution de la fonction coût associée.....	65
<b>Figure III.10</b> :La transmission en fonction de la longueur d'onde pour $\lambda = 1.55 \mu m$ .....	67
<b>Figure III.11</b> : Evolution de la fonction coût associée.....	68
<b>Figure III.12</b> :La transmission en fonction de la longueur d'onde.....	69
<b>Figure III.13</b> : Evolution de la fonction coût associée.....	70



## Liste de tableaux

### CHAPITRE I

<b>Tableau I. 1:</b> Caractéristiques géométriques principales des réseaux bidimensionnels carré et triangulaire .....	11
<b>Tableau. I.2 :</b> Lois de décroissance de la température les plus utilisées.....	37

### CHPITRE III

<b>Tableau III. 1</b> Épaisseurs optimales [ $\mu\text{m}$ ] des couches du filtre sélectif pour $\lambda=1.8\mu\text{m}$ .....	63
<b>Tableau III. 2. :</b> Épaisseur en $\mu\text{m}$ des couches du filtre CP 1D pour $1.31\mu\text{m}$ .....	66
<b>Tableau III. 3.</b> Épaisseur en $\mu\text{m}$ des couches du filtre CP 1D pour $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .....	68
<b>Tableau III. 4 :</b> Épaisseur en $\mu\text{m}$ des couches du filtre CP 1D pour deuxième optimisation $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .....	70

# Table des matières

Remerciements	
Liste des acronymes .....	i
Liste des figures .....	ii
Liste des tableaux.....	iv

<b>Introduction Générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## Chapitre I

I.1	Introduction .....	5
I.2	Matériaux à bandes interdites photoniques naturels .....	5
I.2.1.	Les Papillons .....	5
I.2.2.	Les oiseaux .....	6
I.2.3.	Les Opales.....	7
I.3	Les cristaux photoniques artificiels .....	8
I.3.1.	Les cristaux photoniques unidimensionnels (Miroirs de Bragg) (CPs -1D).....	8
I.3.2.	Les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs -2D).....	8
I.3.3.	Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D) .....	11
I.4	Caractéristiques physiques et géométriques d'un cristal photonique unidimensionnel.....	13
I.4.1.	Contraste d'indice $\delta$ .....	13
I.4.2.	La Période .....	13
I.4.3.	Facteur de remplissage $f$ .....	14
I.5	Quelques concept de base .....	14
I.5.1.	Maille élémentaire et zone de Brillouin.....	14
I.5.2.	Cristal photonique 2D –carte de bandes interdites .....	17
I.6	Cristaux photoniques avec et sans défauts.....	19
I.6.1.	Les défauts ponctuels.....	19
I.6.2.	Les défauts linéaires.....	20
I.7	Les méthodes pour l'analyse des cristaux photonique.....	21
I.7.1.	La Méthode FEM.....	21
I.7.2	La TMM (Transfert Matrix Method).....	21
I.7.3	La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain).....	21
I.7.4	La FDTD d'ordre N.....	22
I.7.5	La méthode des fonctions localisées.....	23
I.7.6	La BPM (Beam Propagation Method).....	23

1.7.7	La FFF (Fast Fourier Factorization)	23
I.8	Applications des cristaux photoniques	24
I.8.1	Les applications des CPs-1D	24
I.8.2	DEMUX-coupler	26
I.8.2	Guides d'onde dans les cristaux photoniques	27
I.9	Méthodes de synthèse employées dans les cristaux photonique	28
I.9.1	Algorithmes génétiques	29
I.9.1.1	Applications de l'AG	30
I.9.1.2	Principe	30
I.9.1.3	Codage	31
I.9.1.4	Création de la population initiale	31
I.9.1.5	Fonction d'adaptation	32
I.9.1.6	Opérateurs de l'AG	32
I.9.1.7	Sélection	32
I.9.1.8	Croisement	33
I.9.1.9	Croisement en un point	33
I.9.1.10	Croisement en deux points	33
I.9.1.11	Croisement uniforme	34
I.9.1.12	Mutation	34
I.9.1.13	Critères d'arrêt	34
I.9.1.14	Avantages et inconvénients	35
I.9.2	Recuit simulé	35
I.9.2.1	Caractéristiques du Recuit Simulé	36
I.9.2.2	Gestion des déplacements	38
I.9.2.3	Chaîne de Markov	38
I.9.2.4	Critère de Metropolis	39
I.9.2.5	L'algorithme de BOLTZMANN (BA: Boltzmann Annealing)	40
I.9.3	Recherche Tabou	40
I.9.3.1	Recherche taboue à variables continues	40
I.9.3.2	Principe	41
I.9.3.3	La recherche taboue de Hu	42
I.9.3.4	Recherche taboue dite universelle	42
I.9.3.5	Exploration du domaine de recherche	42
I.9	Conclusion	43

## Chapitre II

II.1	Introduction .....	45
II.2	La méthode d'analyse des cristaux photoniques.....	45
II.2.1	La méthode de matrice de transfert.....	45
II.3	Les méthodes des synthèses des cristaux photoniques .....	48
II.3.1	Le modèle hybride .....	48
II.3.2	Etape du processus d'optimisation .....	50
II.4	Conclusion .....	54

## Chapitre III

III.1	Introduction .....	56
III.2	Défaut dans les cristaux photoniques unidimensionnels CPs-1D .....	56
III.3	Optimisation des filtres sélectifs à base des CPs-1D .....	57
III.4	Présentation des résultats de simulation .....	60
III.4.1	Filtre sélectif à longueur d'onde 1.8 $\mu\text{m}$ .....	60
III.4.2	Filtre sélectif à longueur d'onde 1.31 $\mu\text{m}$ .....	63
III.4.3	Filtre sélectif à la longueur d'onde 1.55 $\mu\text{m}$ .....	66
a.	Première optimisation .....	66
b.	Deuxième optimisation .....	69
III.5	Conclusion .....	71

## Introduction générale

Depuis des années, la recherche scientifique s'est intéressée à contrôler la propagation de la lumière afin de remplacer la communication classique à courant électrique. La recherche des scientifiques comme, Yablonovitch [1] et John [2] (1987) a abouti à la réalisation et caractérisation d'une nouvelle génération des matériaux : les cristaux photoniques.

Les cristaux photoniques ou matériaux à bandes interdites photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une ou plusieurs directions de l'espace [Réf 4]. Dans les cristaux, l'arrangement périodique des atomes et des molécules introduit un potentiel périodique aux électrons traversant le cristal. En particulier, le réseau peut introduire une bande interdite d'énergie de telle sorte que les électrons soient interdits de se propager avec certaines énergies dans quelques directions. Si le potentiel est suffisamment élevé, la bande interdite pourra couvrir toutes les directions, on dit que le matériau a une bande interdite complète.

Si l'on introduit des défauts dans le cristal photonique, de nouveaux états permis apparaissent dans la bande interdite photonique. La lumière peut être confinée selon plusieurs dimensions selon le défaut et la dimensionnalité du cristal photonique [Réf 4]. L'introduction d'éléments à base de cristaux photoniques permettrait de traiter toute l'information sous forme lumineuse et de miniaturiser les circuits actuels. C'est la raison pour laquelle de nombreuses propositions pour des dispositifs à base de cristaux photoniques ont été faites et parfois déjà réalisées, comme les filtres sélectifs, et les multiplexeurs. [Réf 4]

Les cristaux photoniques suscitent un très vif intérêt de la part de la communauté scientifique car dans le domaine actuel de nos connaissances, ils font partie des seuls matériaux capables de « contrôler » les propriétés optiques de la lumière et de repousser les limites actuelles de la physique: en effet, ces structures permettent de contourner certains freins aux progrès scientifiques dans différents domaines comme l'optique ondulatoire ou encore l'électromagnétisme.

L'objectif principal d'un cristal photonique est sa capacité d'interdire la propagation de la lumière. Pour cet effet, la création d'un défaut engendre l'ouverture d'une certaine bande de transmission à l'intérieur du gap. En effet, des méthodes d'optimisation dites méthode de synthèse sont introduites qui permettent d'agir sur les paramètres d'entrée de la structure afin

d'obtenir une réponse en terme de transmission désirée. Parmi ces méthode que nous allons utiliser par la suite dans notre travail, nous trouverons les algorithmes génétiques (AG) et la « PSO ».

En incluant les opérateurs génétiques à la PSO, ceci va permettre une combinaison entre les particules de différents sous essaim, et ainsi créer un mécanisme d'interaction entre les sous populations [26].

Dans ce mémoire, nous allons nous concentrer sur l'optimisation, d'un filtre sélectif en longueur d'onde à base de cristaux photoniques à une dimension .Ce dernier va subir des changements géométriques à l'aide des deux méthodes citées ci-dessus.

Ce mémoire s'articule autour des trois chapitres suivants :

Le chapitre 1 est une introduction générale à l'étude des cristaux photoniques. Nous citons les différents types de cristaux photoniques, le principe d'ouverture de la bande interdite photonique, leur application, les méthodes pour l'analyse des cristaux, et puis après des méthodes de synthèses employées dans les cristaux photonique. Une attention particulière sera portée sur les cristaux photoniques unidimensionnels planaires qui serviront de support aux études théoriques de ce mémoire.

Le chapitre 2 décrit la technique utilisée pour l'optimisation des structures étudiées durant ce travail de mémoire. Il s'agit d'un modèle hybride qui combine l'essaim de particules avec le concept des algorithmes génétiques qui offre un rapport qualité de résultats / temps de calcul très satisfaisant.

Dans le troisième chapitre, une étude sera portée sur l'optimisation des filtres sélectifs à base de cristaux photoniques 1D planaires, qui constitue l'un des dispositifs clés de l'optique intégrée. Les réponses spectrales en transmission seront présentées en utilisant deux méthodes très adaptées à ce genre de structure, celle du « PSO » et de l'algorithme génétique à l'aide du logiciel de calcul MATLAB.

Ce mémoire se terminera par une conclusion générale, suivie par une référence bibliographique

## Chapitre I

# Généralités sur les cristaux photoniques

## I.1 Introduction

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques de matériaux diélectriques ou métal-diélectriques modifiant la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur affecte le déplacement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites. Les longueurs d'ondes pouvant se propager dans le cristal se nomment des modes propagatifs, et les groupes de modes autorisés s'appellent des bandes d'énergie transmises. L'absence de modes propagatifs des ondes électromagnétiques (EM) dans de telles structures, dans une plage de fréquences ou de longueurs d'onde, est alors qualifiée de bande interdite (Band gap) [Réf 1].

C'est Lord Rayleigh en 1887 qui a le premier montré que l'on pouvait ainsi produire un gap ou bande interdite, même si le terme de «cristal photonique» ne fut introduit qu'en 1987 avec de la parution de deux articles majeurs de Eli Yablonovitch et Sajeev John [Réf1, Réf2]. Ces matériaux, appelés «cristaux photoniques» (PC, Photonic Crystal) sont des milieux transparents dans lesquels l'indice optique varie de manière périodique. Cette variation périodique peut être réalisée dans une, deux ou trois directions de l'espace [Réf 4].

Ce chapitre offre une introduction générale à l'étude des cristaux photoniques. Nous étudierons le phénomène d'ouverture de bandes interdites et les différents types de cristaux photoniques.

## I.2 Matériaux à bandes interdites photoniques naturels

En réalité, les cristaux photoniques artificiels ont été inspirés de la nature. Donc, il existe des structures naturelles qui peuvent avoir des propriétés ayant les mêmes caractéristiques que les cristaux photoniques artificiels.

En effet les colorations vives de certaines espèces sont parfois dues à la présence de structures très complexes, à caractère périodique.

### I.2.1. Les Papillons

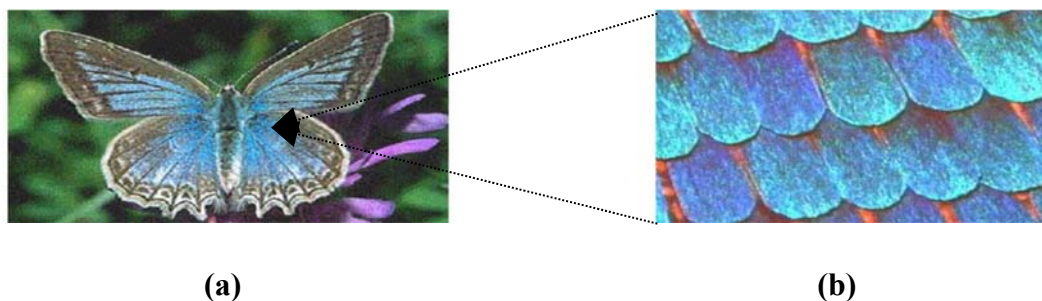
Les Papillons sont parmi les insectes les plus colorés que nous offre la nature. Ils sont en fait très largement tributaires de la lumière et ont développé un arsenal impressionnant pour gérer cette interaction avec les ondes électromagnétiques au mieux de leur intérêt [Réf 4].



Si on effectue une analyse microscopique des ailes, on trouve que les ailes du papillon *Cyanophrysremus* possèdent une nano-architecture complexe, et les couleurs bleu métallique sur le côté dorsal et verte pois sur le côté ventral sont attribuées à la structure type des cristaux photoniques. Elles sont composées de chitine et d'air [Réf 3].

Sur la figure I.1 apparaît un papillon et la coupe d'une aile, dont un détail apparaît en insert en bas à droite. Sur cette coupe observée au microscope électronique apparaît une structure qui a un comportement de matériau à bande photonique interdite.

C'est elle qui donne à certains papillons des couleurs iridescentes. En effet ce réseau réfléchit la lumière pour certaines longueurs d'onde dans des directions différentes en fonction de la longueur d'onde.



**Figure I. 1 :** (a) Aile de papillon,(b)Coupe d'une aile de papillon observée au MEB.

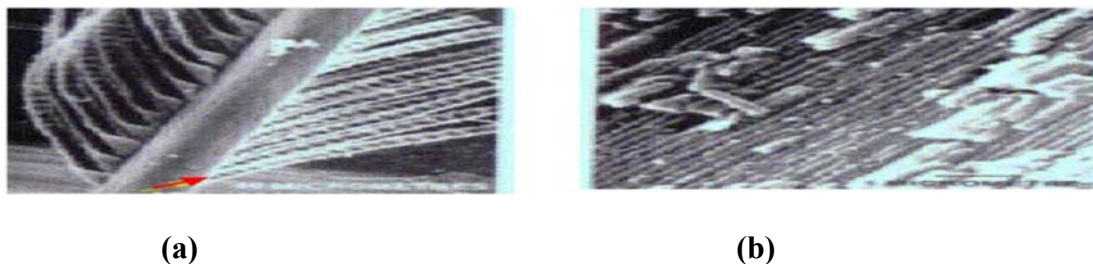
### I.2.2. Les oiseaux

Une des caractéristiques les plus admirables des oiseaux est leurs couleurs. Elles leur permettent d'affirmer leur identité. Pour produire une telle couleur, ils emploient la technologie structurale des plumes et leurs pigments dans leurs pièces de corps.

Les pigments et la structure périodique des plumes contribuent à l'absorption et la diffraction de la lumière. Les couleurs pigmentaires sont liées au phénomène d'absorption.

En effet, les pigments absorbent une partie de la lumière solaire et renvoient d'autres couleurs structurales, qui naissent de la diffraction du rayonnement lumineux par des microstructures des plumes. Alors que les couleurs pigmentaires sont stables, les couleurs structurales varient souvent selon l'incidence de la lumière. En effet quand on observe une plume de paon au microscope, on voit que toutes les couleurs naissent dans les barbules des plumes. Les barbules sont des lames étroites faites d'une succession de petites cuvettes séparées par un seuil transversal [Réf 5].

Au fond de ces cuvettes se trouvent de minces lamelles parallèles. On peut considérer ces lamelles comme des miroirs réfléchissant la lumière incidente. On peut alors rapprocher l'étude de ce phénomène de l'étude d'un cristal photonique unidimensionnel.

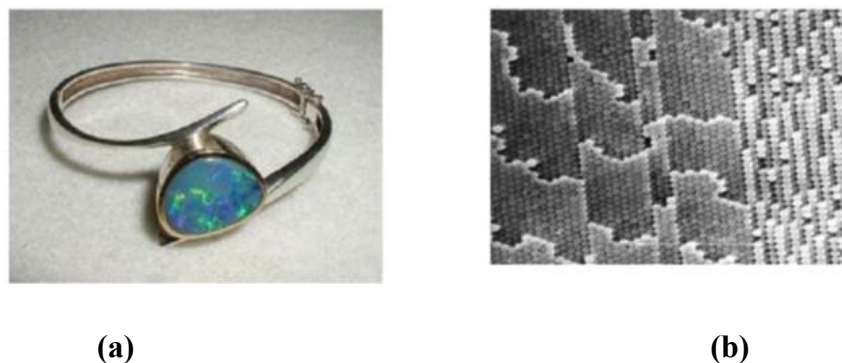


**Figure I. 2:** Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge).

On peut en déduire que l'intensité réfléchiée par la plume dépend de la longueur d'onde et de l'angle d'observation d'où la sensation de ruissellement de couleur sur les plumes du paon. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge).

### I.2.3. Les Opales

Des opales sont obtenues chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation. Ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées.



**Figure I. 3:** (a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b) Image au microscope électronique d'une opale naturelle [Réf 4].

En 1887, Rayleigh montre qu'une structure périodique de type miroir de Bragg peut créer une bande de fréquence au sein de laquelle toute propagation électromagnétique est impossible.

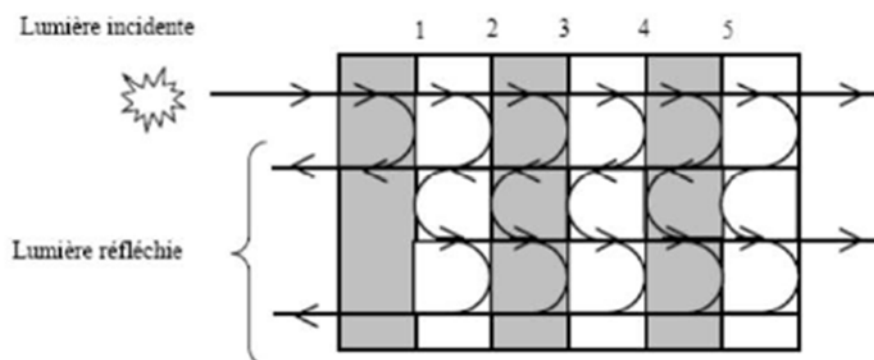
Comme les phénomènes d'interférences lumineuses dans les miroirs de Bragg sont tout à fait analogues à la diffraction des rayons X par les plans d'atomes dans un cristal.

Ces structures portent le nom du physicien qui expliqua les phénomènes de diffraction cristalline: W. L. Bragg.

## I.4 Les cristaux photoniques artificiels

### I.3.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels (Miroirs de Bragg) (CPs-1D)

Les cristaux photoniques à une dimension, appelés aussi « *Miroirs de Bragg* » sont des successions de couches d'indices de réfraction différents, empilées, de manière périodique. Le comportement du réflecteur de Bragg est expliqué à partir du processus d'interférences multiples. Comme le montre la figure I.4 une onde qui se propage dans la succession de couches, subit une réflexion à interface. Cette réflexion s'accompagne d'un changement de phase si l'onde va d'un milieu de faible indice vers un milieu de fort indice. Elle s'effectue sans changement de phase dans le cas contraire [Réf 4].

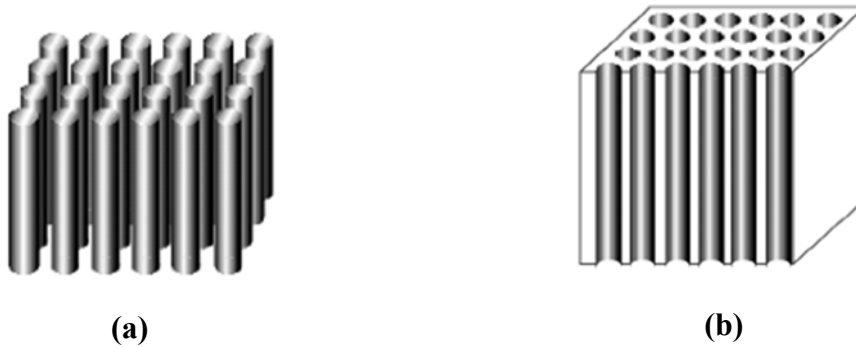


**Figure I.4:** Représentation schématique de l'interface des ondes réfléchies par chaque dioptré.

### I.3.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs -2D)

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles (ainsi que les structures unidimensionnelles en incidence non normale) sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique. Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, on peut placer des tiges diélectriques dans l'air ou encore dans un autre diélectrique. Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut un contraste d'indice (différence entre les indices du milieu et des tiges) suffisamment grand [Réf 6]. Un BIP bidimensionnel peut aussi être constitué d'un ensemble de trous percés dans un

diélectrique. Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation et peuvent ne pas posséder une bande interdite complète. On parle d'une bande interdite complète.



**Figure I. 5:**Exemple de Bips 2D: réseaux de tiges dans l'air et de trous d'air dans un matériau.

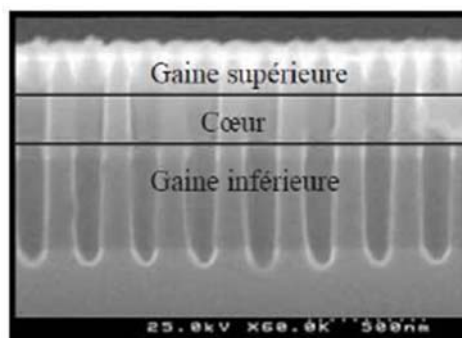
Un cristal photonique 2D parfait est périodique dans le plan (Oxy) et infiniment long dans la direction (Oz). Il possède une bande interdite photonique dans le plan (Oxy).

Ces systèmes n'existent pas dans la réalité.

Pour compenser l'absence de bande interdite dans la direction perpendiculaire au plan de périodicité des cristaux 2D, la lumière peut être confinée dans une hétéro-structure d'indice. Cette dernière se compose d'une couche diélectrique de fort indice de réfraction (cœur) entourée de deux autres couches diélectriques d'indices de réfraction plus faibles (gaine) (Figure I. 6).

Ces guides d'ondes planaires sont couramment utilisés en optique intégrée et sont facilement fabriqués par des techniques habituelles d'épitaxie [Réf 4].

Les cristaux photoniques obtenus portent le nom des cristaux photoniques bidimensionnels planaires ou des cristaux photoniques en géométrie de guides d'ondes (2D+1D) ou bien CP-2.5D.

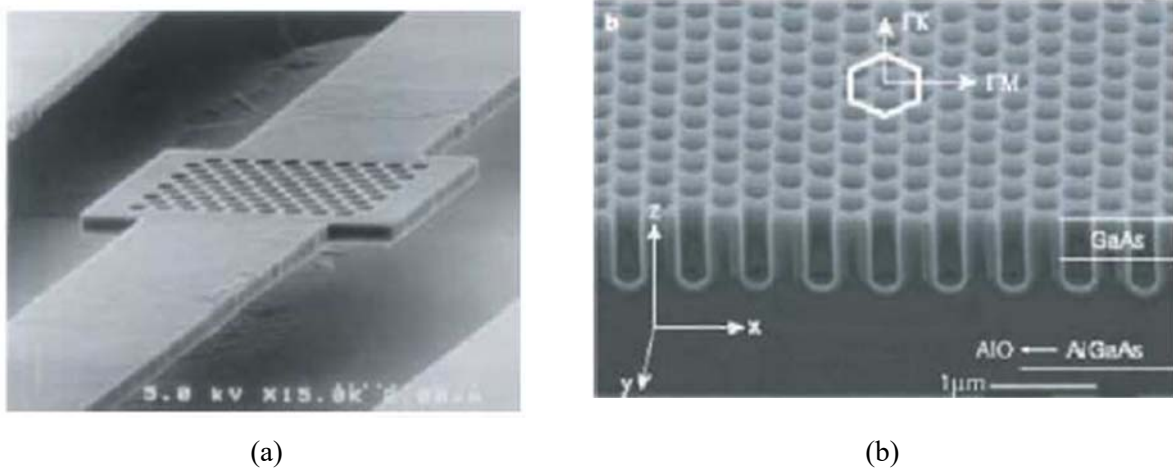


**Figure I. 6:** Image Microscope à Balayage Electronique (MEB) d'un cristal photonique gravé dans une hétéro-structure.

La nécessité de confiner la lumière à trois dimensions pour des applications d'optique intégrée conduit à envisager des systèmes hybrides 2D+1D où le confinement vertical est assuré par le contraste d'indice et le confinement latéral par un cristal photonique bidimensionnel. Ces hétéro-structures d'indice sont classés en deux catégories, et se distinguent par l'intensité du contraste d'indice.

### A. Fort contraste d'indice (approche membrane)

Les confinements à fort contraste d'indice sont généralement obtenus à l'aide d'une membrane semi-conductrice suspendue dans l'air, une couche de  $S_i$  déposée sur  $S_iO_2$  ou encore une couche de  $G_aA_s$  déposée sur  $AL_xO_y$  (Figure I.7) [Réf 4].



**Figure I. 7** Exemples de cristaux photoniques 2D planaires à haut contraste d'indice vertical: (a) Membrane suspendue dans l'air d'épaisseur 270 nm, (b) Cristal photonique planaire avec des trous profonds de  $\approx 0.5 \mu\text{m}$ , gravés partiellement dans la couche  $AL_xO_y$ .

Un fort contraste d'indice permet un bon confinement vertical de la lumière et limite les pertes de propagation. De plus, la profondeur nécessaire des trous est plus petite que dans le cas des faibles contrastes d'indice (quelques centaines de nanomètres au lieu de plusieurs micromètres), donc la gravure est plus facile. En revanche, ces structures sont plus fragiles (membranes suspendues dans l'air) et souffrent d'une mauvaise évacuation thermique qui peut poser des problèmes pour certaines applications comme les lasers.

### B. Faible contraste d'indice (approche substrat)

Si la différence d'indice entre les deux milieux est faible ( $\Delta n \approx 0,1 - 0,2$ ), on parle d'approche substrat. Dans ce cas, le confinement vertical est faible et les pertes de propagation peuvent être importantes dans certaines situations.

L'épaisseur de la couche guidante doit être relativement importante (supérieure au micromètre) pour conserver un guidage monomode.

Les structures 2D sont des cristaux dont la permittivité diélectrique est périodique dans les deux dimensions et reste invariante dans la troisième dimension. Elles se regroupent principalement suivant trois familles qui sont illustrées sur la figure I.8 [Réf 4].

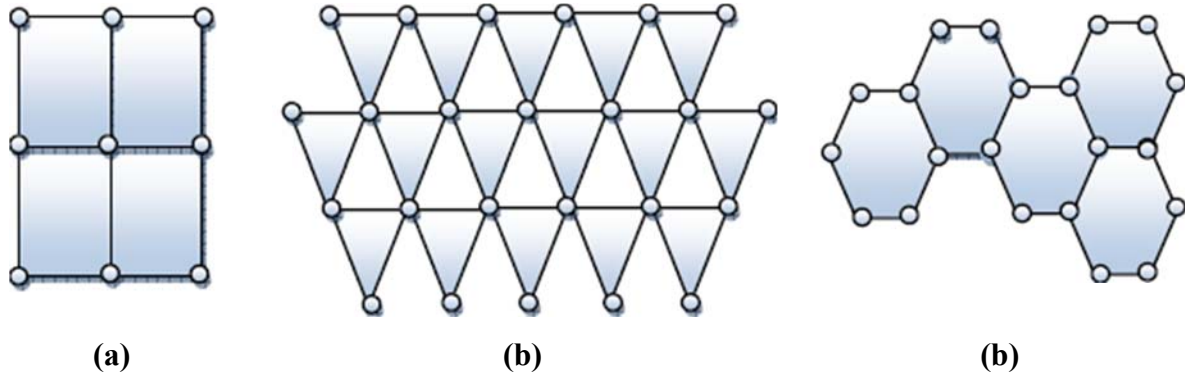


Figure I. 8 :Structure 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.

Les propriétés géométriques élémentaires des réseaux bidimensionnels carrés et triangulaires de trous circulaires sont résumées dans le Tableau I. 1. Le facteur de remplissage en air  $f$  désigne le rapport entre l'aire occupée par le motif (ici un disque) et l'aire de la maille élémentaire du réseau considéré.

	Réseaux Carrée	Réseau triangulaire
Vecteur directs ( $a_1, a_2$ )	$a_1=a(1,0), a_2=a(0,1)$	$a_1=a(1,0), a_2=a(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2})$
Vecteurs réciproques ( $b_1, b_2$ )	$b_1=\frac{2\pi}{a}(1,0)$ $b_2=\frac{2\pi}{a}(0,1)$	$b_1=\frac{2\pi}{a}(1, \frac{\sqrt{3}}{3})$ $b_2=\frac{2\pi}{a}(0, \frac{2\sqrt{3}}{3})$
Facteur de remplissage en air $f$	$f=\pi(\frac{r^2}{a^2})$	$f=\frac{2\pi}{\sqrt{3}}(\frac{r^2}{a^2})$

Tableau I. 1:Caractéristiques géométriques principales des réseaux bidimensionnels carré et triangulaire.

### I.3.3. Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D)

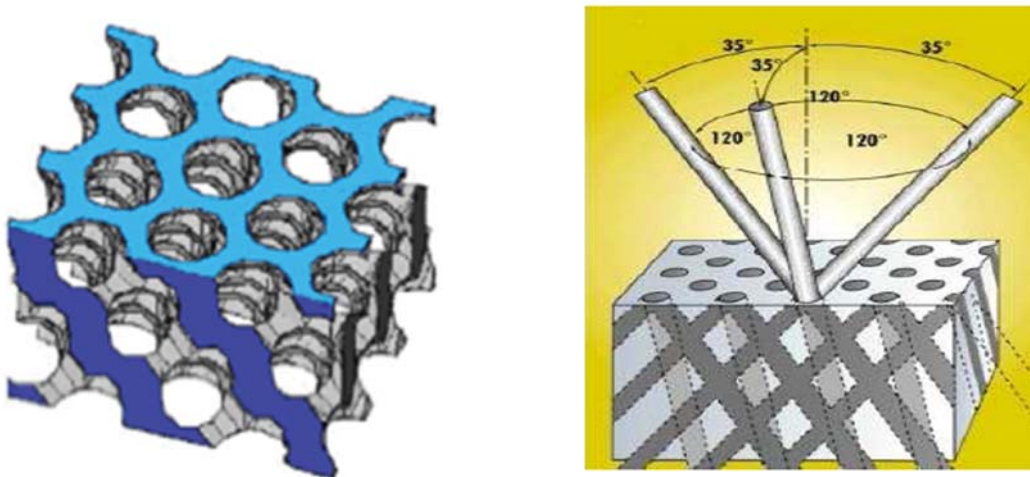
Les cristaux photoniques tridimensionnels (3D) suscitent encore beaucoup d'intérêts. Ce sont des structures tridimensionnelles périodiques suivant les trois directions de l'espace.



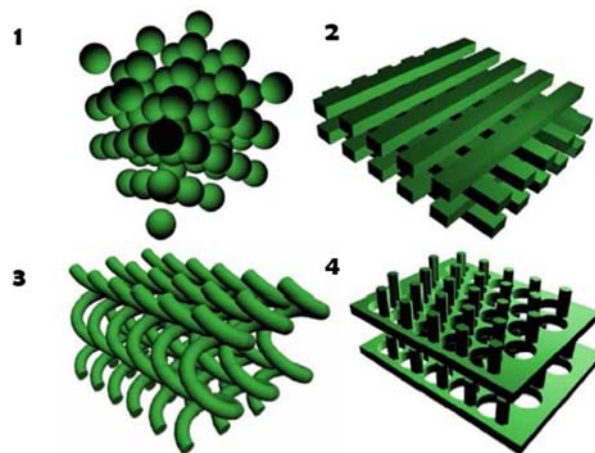
Il existe un grand nombre de structures possibles. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par S. Y. Lin et al. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant. En 1993, E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de  $120^\circ$  figure I.9 [Réf 7].

Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "la Yablonovite", avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois.

De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées [Réf 7].



**Figure I. 9:**La première structure BIP 3D: la Yablonovite[Réf 8].



**Figure I. 10:**Exemples des structures artificielles 3D : Structure cubique (1), tas de bois (2), structure spirale (3), quasi-diamant (4).

## I.4 Caractéristiques physiques et géométriques d'un cristal photonique unidimensionnel

Un cristal photonique unidimensionnel (CP1D) est caractérisé par les différents matériaux qui le composent, le système selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal. Les quantités représentatives de ces différentes caractéristiques sont :

### I.4.1. Contraste d'indice $\delta$

Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique solide.

$$\delta = \frac{n_h}{n_l} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$n_h$  : L'indice de réfraction du matériau de haut indice.

$n_l$  : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

### I.4.2. La Période

Ces paramètres géométriques, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influent sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. La période  $a = (a_1 + a_2)$  avec  $a_1$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_1$  et  $a_2$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_2$ .

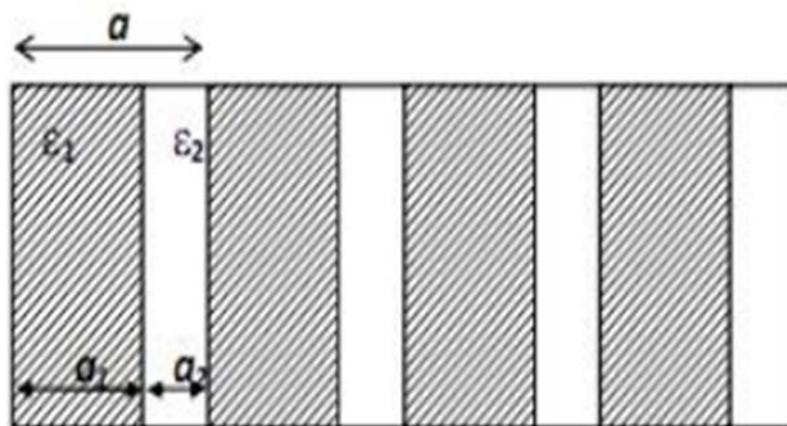


Figure I.11: Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel



### I.4.3. Facteur de remplissage $f$

Peut être comparé à la largeur du potentiel périodique. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière.

$$f = \frac{\vartheta_i}{\Lambda} \quad (I.2)$$

Avec

$\vartheta_i$  : Volume occupé par le matériau de permittivité  $\epsilon_i$ .

$\Lambda$  : Volume de la cellule.

## I.5 Quelques concept de base

### I.5.1. Maille élémentaire et zone de Brillouin

Les matériaux à Bande Interdite Photonique, plus simplement appelés BIP (en anglais, Photonic Band Gap, PBG) sont composés d'un assemblage périodique de deux ou plusieurs matériaux diélectriques ou métalliques. Ils présentent des bandes de fréquence pour lesquelles la propagation des ondes électromagnétiques est interdite [Réf 10].

Pour calculer les diagrammes de bandes, il faut considérer pour chaque cristal, toutes les directions de propagation possibles. Comme en physique du solide [Réf 9], on montre que pour certaines symétries du cristal, on peut limiter l'étude aux vecteurs d'ondes  $k$  situés à l'intérieur d'une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur  $k$  varie le long des directions de hautes symétries de cette zone qui fait partie du réseau réciproque.

Nous allons définir dans la section suivante le réseau réciproque et la zone de Brillouin. Beaucoup de propriétés des cristaux photoniques (CPs) sont directement compréhensibles par l'étude de leur diagramme de bandes. Pour les étudier, on utilise les notions de réseau réciproque et de zones de Brillouin. Le réseau réciproque d'un CP 2D est défini à partir du réseau réel par la relation suivante:

$$a_i b_j = 2\pi \delta_{ij} \quad (I.3)$$

Où les  $a_i$  et  $b_j$  sont les vecteurs des réseaux réels et réciproques.

$\delta_{ij}$  Est le symbole de Kronecker.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq k \\ 1 & \text{si } i = k \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

### A. Réseau carré

Considérons une structure périodique à deux dimensions représentée sur la figure (I.11).

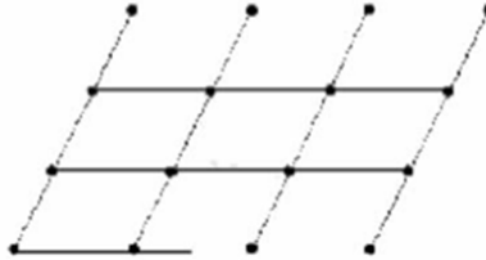


Figure I.12: Réseau direct

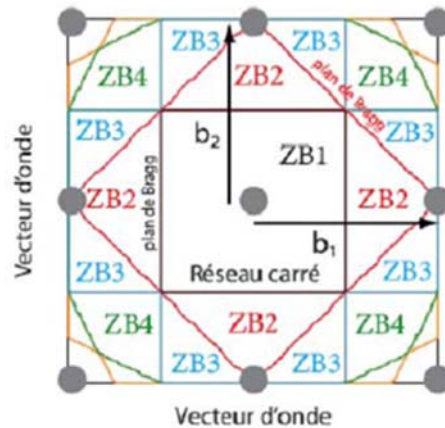
Sur cette figure apparaissent neuf mailles élémentaires, l'ensemble de ces mailles constitue un réseau direct. Nous pouvons obtenir une maille élémentaire de même surface de la manière suivante :

- on trace les lignes qui relient un nœud donné à tous ses voisins.
- on trace les médiatrices de ces segments.

Les zones de Brillouin (ZB) sont des régions qui partitionnent l'espace réciproque associé au cristal. Il en existe une infinité et peuvent être définies à l'aide des plans de Bragg qui sont les plans médiateurs de l'ensemble des vecteurs formés par des combinaisons linéaires des vecteurs du réseau réciproque.

La définition de la nième zone de Brillouin est la suivante : ensemble des points pouvant être atteint depuis l'origine en croisant  $1 - n$  plans de Bragg (Figure I.13).

On appelle zone de Brillouin irréductible la plus petite surface qui permet de déduire la relation de dispersion dans tout l'espace réciproque. Elle correspond à la plus petite surface qui peut être utilisée pour reconstruire la première zone de Brillouin (ZB) en utilisant les symétries du réseau réciproque [Réf 12].

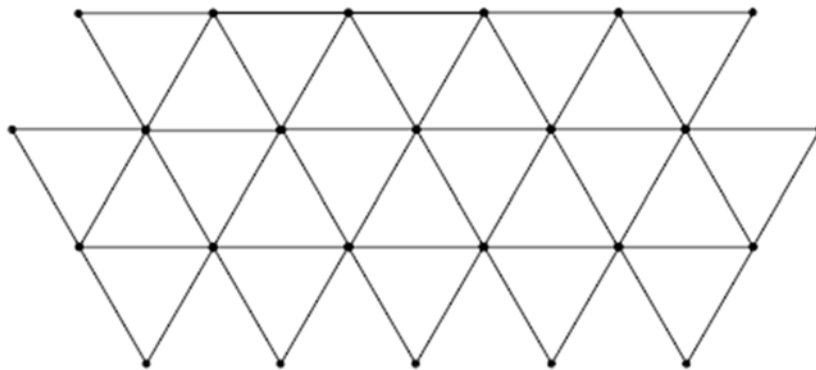


**Figure I.13 :** Zones de Brillouin (ZB) d'un réseau carré.

Les plans de Bragg sont tracés en différentes couleurs. La ZB n°3 est atteinte en traversant 2 plans de Bragg (droite noire puis droite rouge).

### B. Le réseau triangulaire

Considérons une structure périodique à maille élémentaire triangulaire à deux dimensions représentées sur la figure I.14.

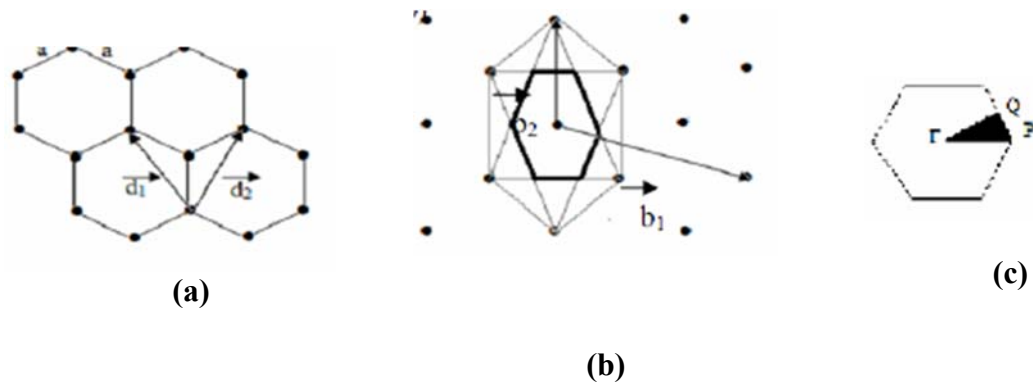


**Figure I.13 :** Réseau triangulaire

Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance. Cette structure est moins sensible à l'angle d'incidence que le réseau carré mais la bande interdite complète reste difficile à obtenir [Réf 10].

La géométrie la plus utilisée dans la littérature pour réaliser les structures BIP 2D est la structure hexagonale [Réf 11].

On peut obtenir un réseau hexagonal en ôtant quelques motifs au réseau triangulaire précédent. La figure 15 en donne les principales caractéristiques.



**Figure I.15** : structure hexagonale : (a) réseau direct (b) réseaux réciproques (c) Zone de Brillouin irréductible.

### I.5.2. Cristal photonique 2D—carte de bandes interdites

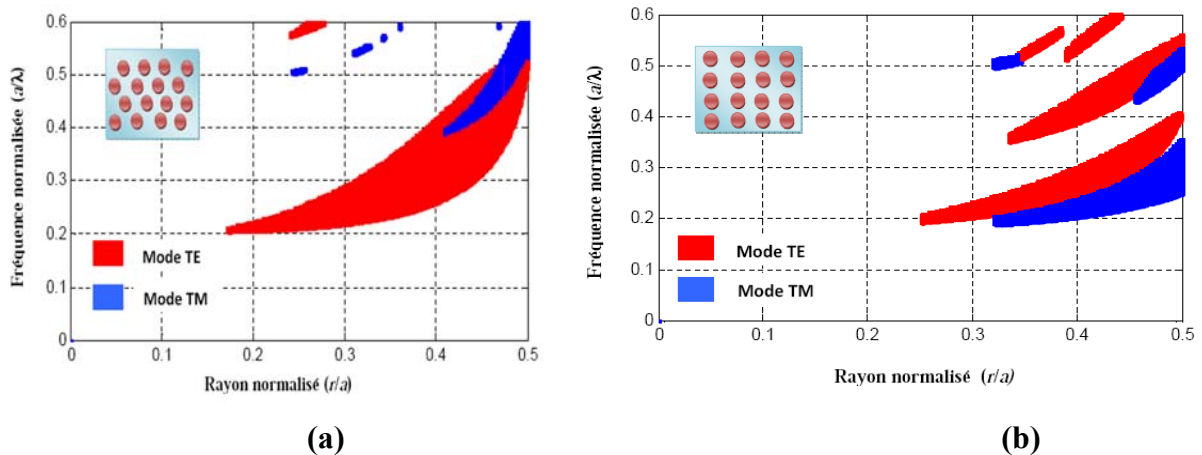
Un cristal BIP bidimensionnel est une structure dont la permittivité diélectrique est modulée périodiquement dans deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Ces structures périodiques sont par exemple composées de cylindres diélectriques parallèles.

Elles présentent une relative simplicité géométrique qui facilite les modélisations théoriques et les études expérimentales.

Pour étudier le comportement d'une onde électromagnétique incidente sur une telle structure deux polarisations sont possibles : La polarisation électrique TE correspond au cas où le champ électrique  $E$  est parallèle aux cylindres infinis. Alors que celle magnétique TM correspond au cas où  $E$  leur est perpendiculaire.

Pour un matériau donné (donc pour un indice de la matrice donné), il est intéressant de connaître l'influence du facteur  $r/a$  sur la position et la largeur des gaps photoniques : c'est la carte des bandes interdites.

Un exemple est donné sur la figure I.16 dans le cas d'une matrice de constante diélectrique  $\epsilon_1 = 10,5$  [27]. Pour de faibles facteurs de remplissage en air, il n'y a pas de bande interdite car le système est peu perturbé. Il faut atteindre  $r/a = 0,18$  pour voir apparaître la bande interdite TE de plus basse énergie et c'est seulement pour un rayon des trous important (lorsque leur diamètre vaut 90 % de la période environ) que l'on a un recouvrement des gaps pour les deux polarisations, donc une bande interdite complète.

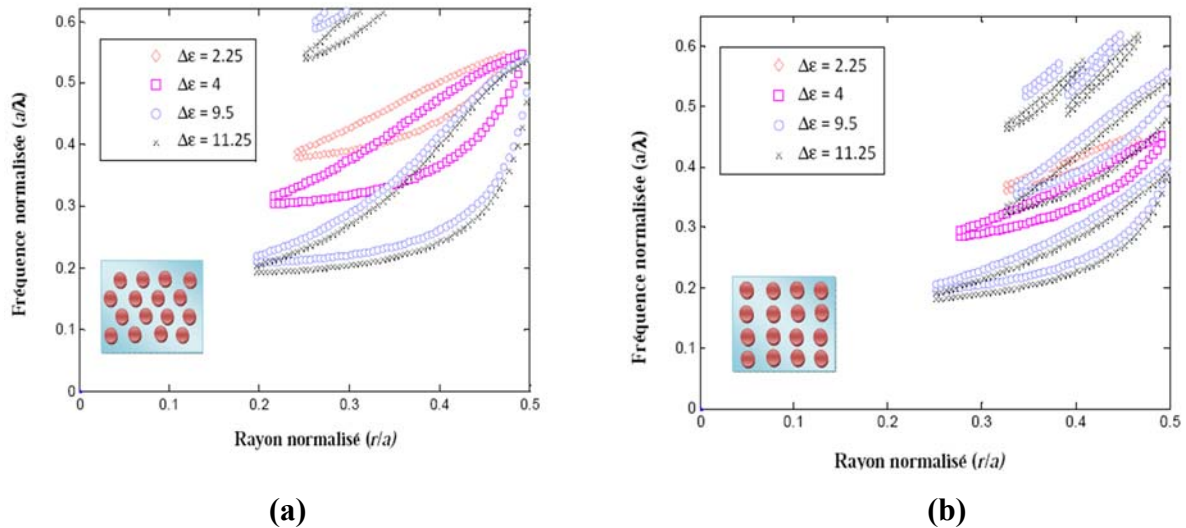


**Figure I. 16:** Cartes des bandes interdites pour les deux polarisations dans le cas d'un cristal photonique de trous d'air dans une matrice de constante diélectrique  $\epsilon_1 = 10,5$  : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré. Le recouvrement entre les deux polarisations ne se fait que pour des valeurs élevées de  $r/a$ .

Le réseau triangulaire et le réseau hexagonale sont généralement préférés au réseau carré : les bande interdites TE sont plus larges et s'ouvrent pour des facteurs de remplissage plus faibles. Notons que les énergies des bords de bandes se décalent vers les hautes énergies lorsque le facteur de remplissage augmente.

Cette carte des bandes interdites est très pratique pour décider les paramètres du cristal photonique en vue d'une application. Il paraît donc intéressant de travailler avec le gap le plus large possible. En comparaison entre les figure I. 16 (a) et (b), il n'est pas toujours judicieux de se placer dans une zone de fort facteur de remplissage en air (lorsque les trous ont un diamètre important), là où le gap est le plus large, pour des raisons de fuites hors du plan du cristal.

Les figures I. 17 (a) et (b) montrent la première bande interdite TE en fonction du facteur de remplissage pour des contrastes d'indice différents ( $\Delta\epsilon = \epsilon_{substrat} - \epsilon_{trou}$ ) pour respectivement un réseau triangulaire et carré. Si le contraste d'indice augmente, la position de la bande interdite se déplace vers les basses énergies et la largeur de la bande interdite augmente. Notons enfin que les bandes interdites se décalent vers les hautes énergies lorsque le facteur de remplissage augmente. Donc, le réseau triangulaire est privilégiées au réseau carré car les bandes interdite TE sont plus larges et s'ouvrent pour des facteurs de remplissage en air plus faibles.



**Figure I. 17 :** Premières bandes interdites TE des cristaux photoniques bidimensionnels avec des contrastes d'indices différents : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré.

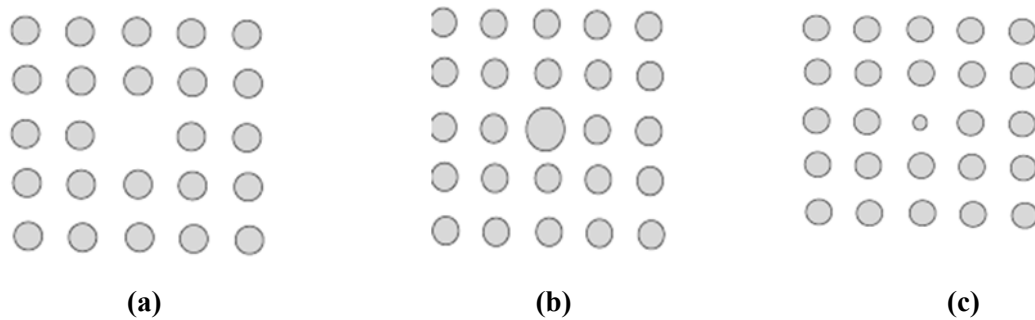
## I.6 Cristaux photoniques avec et sans défauts

Un CP sans défaut est celui qui possède tous ces motifs. Les applications des cristaux photoniques tournent autour de la bande interdite. Afin d'assurer une propagation permise on introduit un défaut dans la structure périodique de celui-ci, ces défauts sont obtenus en modifiant localement la périodicité du cristal. Un défaut dans un cristal photonique 2D peut être soit "0D", un élément modifié, soit "1D", une ligne.

Dans un cristal photonique, la création d'un défaut est causée par la rupture de la périodicité diélectrique  $\epsilon$ . Cette rupture va engendrer l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite photonique. La largeur et la position de cette bande autorisée sont gérées par les caractéristiques du défaut [Réf 15].

### I.6.1. Les défauts ponctuels

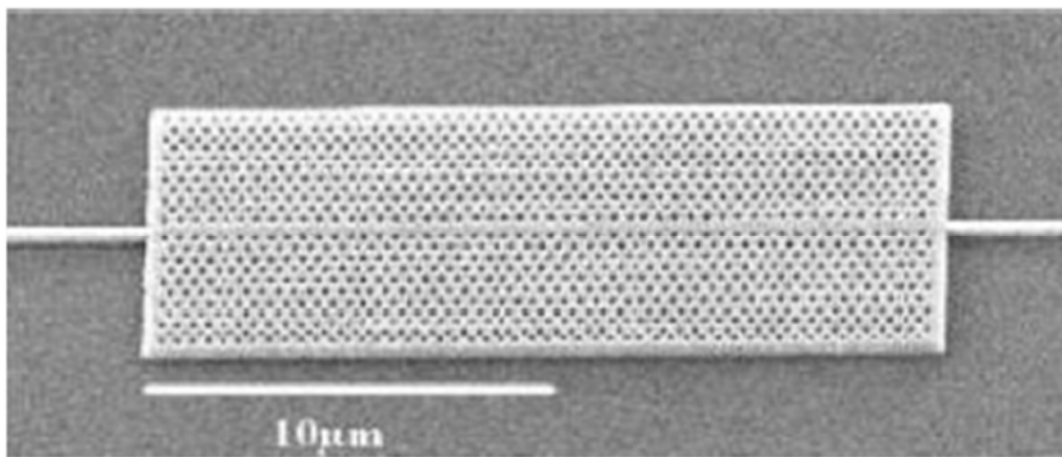
Ces défauts se comportent comme des micro-résonateurs. Les défauts ponctuels sont obtenus en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Pour les cristaux photoniques composés de cylindres diélectriques, le constant diélectrique d'un cylindre peut être changé. Le cylindre peut être enlevé, ce qui crée une lacune dans le cristal. Cela correspond à une micro-cavité à l'intérieur du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique, ces trous peuvent être modifiés géométriquement. Par suite, on distingue deux types de défauts, lacunaires et de substitution [Réf18].



**Figure I.18** : les défauts ponctuels : (a) défauts lacunaire, (b) et (c) défauts de substitution

### I.6.2. Les défauts linéaires

Ces défauts permettent de réaliser un guidage diffractif des ondes appelé aussi défauts étendus, de dimension 1,2 ou 3, ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalente. Parmi ces défauts, les défauts 1D (**W1**) sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études car ils ont vocation à être utilisés comme guides de lumière au sein d'un cristal donné. On peut d'ailleurs imaginer des défauts 2D (**W2**) ou 3D (**W3**) constitués d'une suite de guides W1, mis bout à bout et orientés dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal. L'exemple de base est celui du guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique 2D. Une façon de réaliser un tel guide consiste à placer des défauts ponctuels, couplés et régulièrement espacés, dans une direction du cristal 2D. Le couplage entre une infinité de résonateurs conduit à une bande de propagation permise dans la direction de l'alignement. Ce type de guide à résonateurs couplés a été proposé en 1999 [Réf 19].



**Figure I.19** : Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.

## I.7 Les méthodes pour l'analyse des cristaux photonique

### I.7.1. La Méthode FEM

Cette méthode très utilisée en électromagnétisme peut être appliquée à l'étude des cristaux photoniques, de dimension finie ou non, via l'emploi de conditions aux limites absorbantes ou miroir. Elle se révèle toutefois assez lente et est peu employée pour les CPs. Elle est par contre un outil de choix dans l'étude des métas matériaux :

L'utilisation de maillage très petit devant la longueur d'onde permet à des logiciels commerciaux comme HFSS de traiter par exemple les métas matériaux à base de pistes de cuivre dans le domaine micro-onde [Réf 16].

### 1.7.2 La TMM (Transfert Matrix Method)

Développée par Pendry et McKinnon c'est une méthode aux différences finies dans le domaine fréquentiel : elle repose sur la discrétisation des équations de Maxwell pour des champs électromagnétiques.

Au lieu de passer en espace de Fourier comme dans la FFF ou la RCWA, on reste ici en espace réel et l'on détermine la matrice de transfert de chaque fine « tranche » de notre cristal photonique.

Le calcul de la matrice de transfert de l'ensemble se fait via un algorithme récursif : la méthode S.

La méthode fournit bien sûr la transmission et la réflexion du cristal mais aussi les modes de Bloch via la détermination des valeurs propres de la matrice de transfert.

Le maillage était à l'origine cartésien, mais une méthode de transformation des coordonnées donne aujourd'hui de meilleurs résultats.

Le code est disponible librement sous le nom de Translight, et la méthode est largement utilisée [Réf 16].

### 1.7.3 La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain).

La méthode FDTD (FiniteDifference Time Domain) ou la méthode des différences finies dans le domaine temporel, est une approche numérique permettant la résolution des équations de Maxwell portant sur les variables spatiales et la variable temporelle [Réf 4].



Abordons tout de suite la méthode la plus communément utilisée actuellement dans les simulations de structures complexes faces à des ondes électromagnétiques, il s'agit de la FDTD.

Issue de l'algorithme présenté par Yee en 1966 cette méthode revient à mailler finement l'intégralité de la structure ainsi qu'une partie du vide qui l'entoure puis à appliquer les équations de Maxwell discrétisées dans le temps et l'espace en chaque point du maillage afin d'obtenir l'évolution temporelle du champ en réponse à une excitation donnée. Les autres points importants de la méthode sont un artefact mathématique se comportant comme la source d'une onde électromagnétique et des conditions sur les bords de l'espace maillé qui empêchent toute réflexion (On utilise couramment la condition de Bérenger, plus connue sous le nom de PML (Perfectly Matched Layer)).

Extrêmement versatile cette méthode peut en théorie traiter tous les problèmes (de l'Airbus complet au coupleur optronique), d'où sa popularité dans les laboratoires de R&D. Elle traite les matériaux linéaires comme non linéaires et fournit les cartes de champ, la transmission et les diagrammes de rayonnement.

Elle souffre toutefois de deux handicaps : le maillage devant être précis nous sommes très vite menés à des occupations mémoires gigantesques. La réponse fournie étant une évolution temporelle, il faut de nombreux cycles de calculs avant d'atteindre le régime permanent qui caractérise par exemple la réponse à une onde monochromatique

La FDTD se prête très bien à une exécution en parallèle sur plusieurs processeurs comme dans un supercalculateur ou dans une grappe, plus couramment appelée « cluster » ce qui devrait encore augmenter sa popularité dans les années à venir car de grands progrès sont actuellement faits dans ce domaine. Mais la FDTD peine à simuler rapidement des cristaux photoniques de forme non triviale non linéaires 2D (et encore moins 3D) sur un ordinateur individuel contemporain [Réf 16].

#### 1.7.4 La FDTD d'ordre N

Pour pallier au temps de calcul exagéré et à la quantité de RAM nécessaire à l'emploi de la FDTD pour la simulation des cristaux photoniques. Ward et Pendry ont amélioré la FDTD d'ordre N pour en faire une méthode adaptée au problème.

Le principe est de ne traiter via la FDTD qu'une seule maille du cristal photonique et d'appliquer des conditions aux limites tirées des modes de Bloch. La complexité du programme est alors grandement diminuée.

Cette méthode aurait la réputation d'être plus rapide que la méthode des ondes planes pour le calcul des bandes [Réf 16].

### 1.7.5 La méthode des fonctions localisées

Cette méthode a été conçue afin d'optimiser les calculs dans des guides d'ondes créés dans des cristaux photoniques. Elle n'a pas pour but d'étudier un cristal photonique dénué de guide d'onde.

Il existe deux versions de cette méthode. La première version consiste d'abord à trouver les modes de Bloch du cristal photonique dénué de défaut en utilisant par exemple la méthode des ondes planes puis de construire une base avec des fonctions de Wagnier adaptée à ce cristal. Une fois la base trouvée, on peut y exprimer le cristal photonique avec son guide d'onde en utilisant peu de coefficients et sans recourir aux super cellules.

La deuxième version de cette méthode utilise une base de fonction prédéfinie, les fonctions de Gauss-Hermite. Elle est utilisée dans le cadre des fibres à cristaux photoniques.

### 1.7.6 La BPM (Beam Propagation Method)

La BPM est une méthode qui a fait ses preuves dans la simulation des faisceaux optiques. Très peu gourmande en puissance de calcul et simple à mettre en œuvre c'est aujourd'hui un produit commercial très utilisé dans le domaine des fibres optiques.

La théorie se base sur l'approximation d'une enveloppe lentement variable le long de l'axe de propagation. L'étude n'est possible que pour des faisceaux très peu divergents, l'acceptance angulaire de la méthode étant faible.

L'approximation de variations faibles le long de l'axe de propagation s'accommode mal de la géométrie d'un cristal photonique où la permittivité subit des variations très rapides et contrastées. Pourtant, via une approximation de Padé, on a réussi à adapter la méthode à un cristal photonique 2D présentant un guide d'onde « coudé » brutalement

### 1.7.7 La FFF (Fast Fourier Factorization)

Avancée relativement récente de la méthode différentielle, Cette méthode est basée sur l'algorithme S. qui permet de traiter le cas d'objets épais ainsi que sur les règles de calcul de Lifeng Li qui permettent la convergence dans les cas difficiles (polarisation TM et/ou forts contrastes d'indices). La nouveauté remarquable de la FFF est l'utilisation d'une base mobile épousant la normale à la surface des inclusions du cristal photonique ce qui permet de profiter

du cas le plus favorable des règles de Li en tout point d'un profil diélectrique quelconque. La convergence s'en trouve fortement amélioré [Réf 16].

## I.8 Applications des cristaux photoniques

### I.8.1 Les applications des CPs-1D

Parmi les applications couramment utilisés par l'exploitation des miroirs de Bragg, on trouve :

#### A. Les VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)

Les VCSEL permettant d'obtenir des faisceaux de longueur d'onde comprise entre 650 nm et 1300 nm sont en général fabriqués sur des wafers d'arséniure de galium (GaAs). Les miroirs de Bragg sont composés d'une alternance de couches de GaAs et d'arséniure de galium aluminium ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ ). L'alternance GaAs/AlGaAs est intéressante pour la construction de VCSEL, car la constante de réseau du matériau varie peu lorsque la composition change, permettant ainsi la croissance épitaxiale de multiples couches sur substrat GaAs avec accord de maille. Par contre, l'indice de réfraction de l'AlGaAs varie fortement en fonction de la fraction volumique d'aluminium : cela permet de minimiser le nombre de couches requises pour obtenir un miroir de Bragg efficace (en comparaison avec d'autres matériaux). De plus, pour de fortes concentrations d'aluminium, il est possible de former un oxyde d'AlGaAs, pouvant servir à limiter le courant dans un VCSEL, permettant ainsi d'utiliser de très faibles courants de seuil [10].

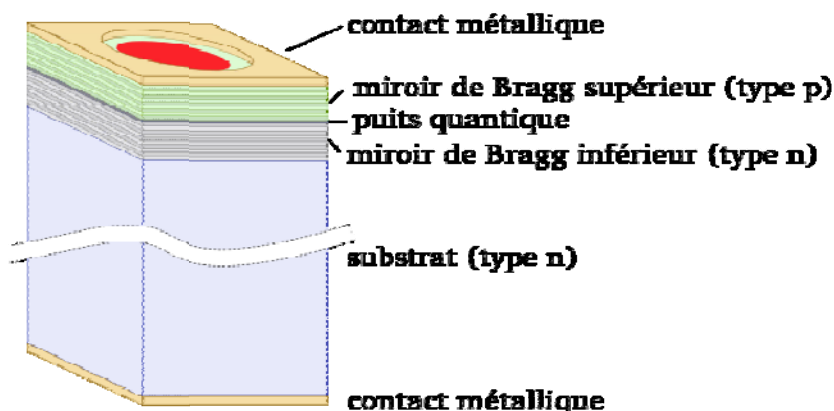


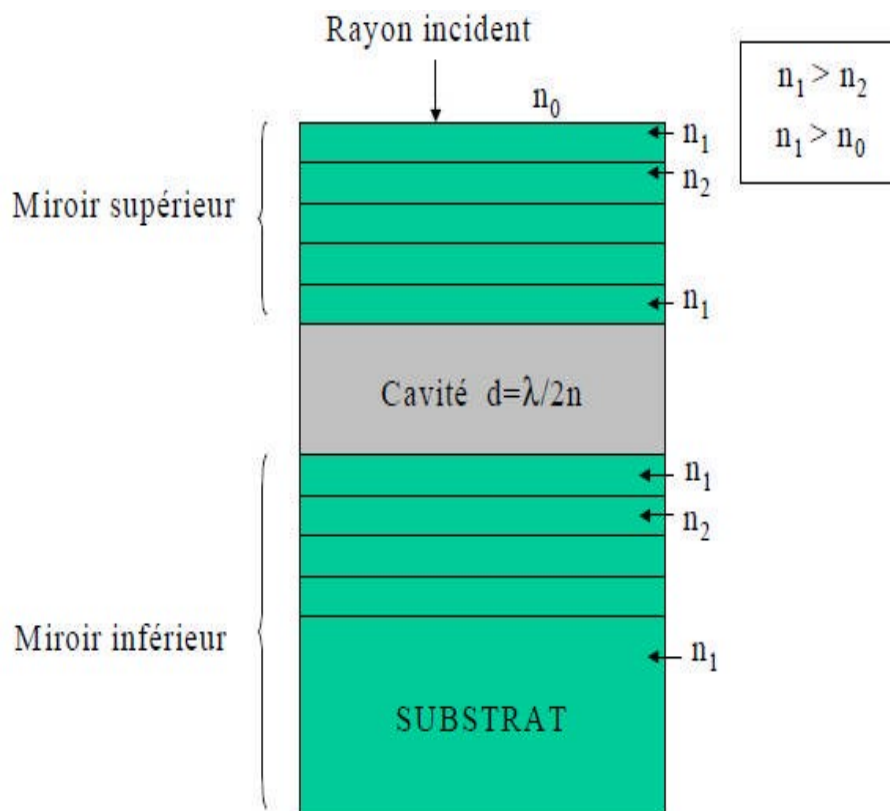
Figure I. 20 : structure VCSEL simple

La figure I.20 démontre que le confinement obtenu par le miroir de Bragg se trouve dans les Laser à émission vertical.

### B. Filtres de type Fabry –Pérot

Ce sont des filtres sélectifs en longueur d'onde qui fonctionnent sur le principe d'une cavité Fabry-Pérot. Ils sont constitués de deux lames partiellement réfléchissantes. L'onde qui s'installe entre ces deux lames ne peut être constituée que de quelques longueurs d'onde bien définies. Ainsi ces filtres permettent de réduire fortement la bande passante de la lumière utilisée. Ils sont souvent utilisés en optique afin de travailler en lumière quasi monochromatique.

Dans la figure I.21, nous retrouvons le schéma typique d'un filtre Fabry-pérot avec une cavité centrale entourée par deux miroirs de Bragg. Nous pouvons remarquer que le miroir supérieur est composé par un nombre impair de couche pour atteindre une réflectivité importante. Dans le cas du miroir inférieur, la dernière couche est constituée par le substrat.

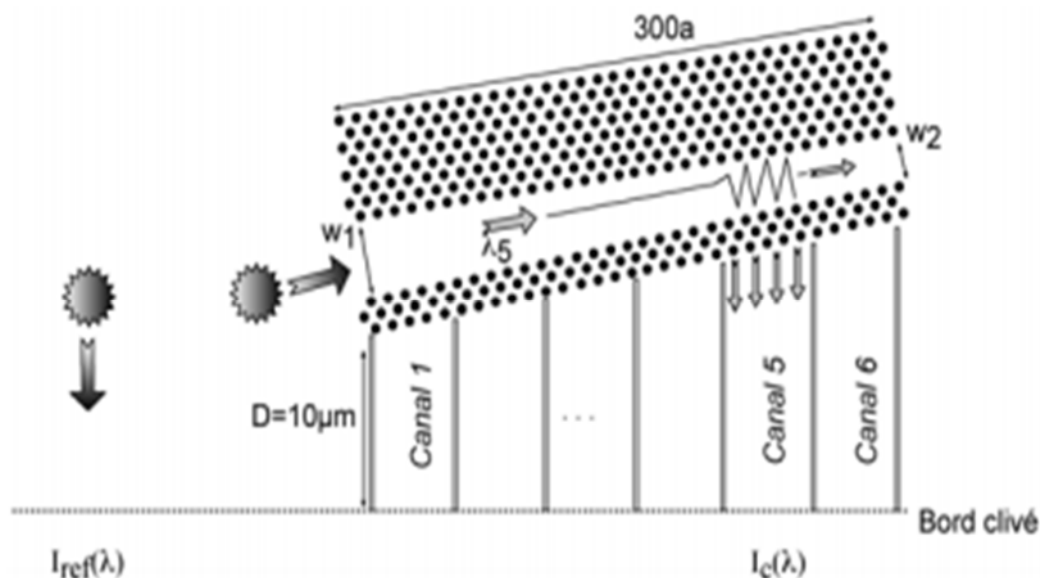


**Figure I .21:** schéma d'un résonateur Fabry-pérot vertical constitué par deux miroirs de Bragg.

### I.8.2 DEMUX-coupler

Les propositions de démultiplexeurs à cristaux photoniques tendent à favoriser des cavités très petites (quelques périodes) et la fonctionnalité « add-drop », la plus exigeante [Réf 20].

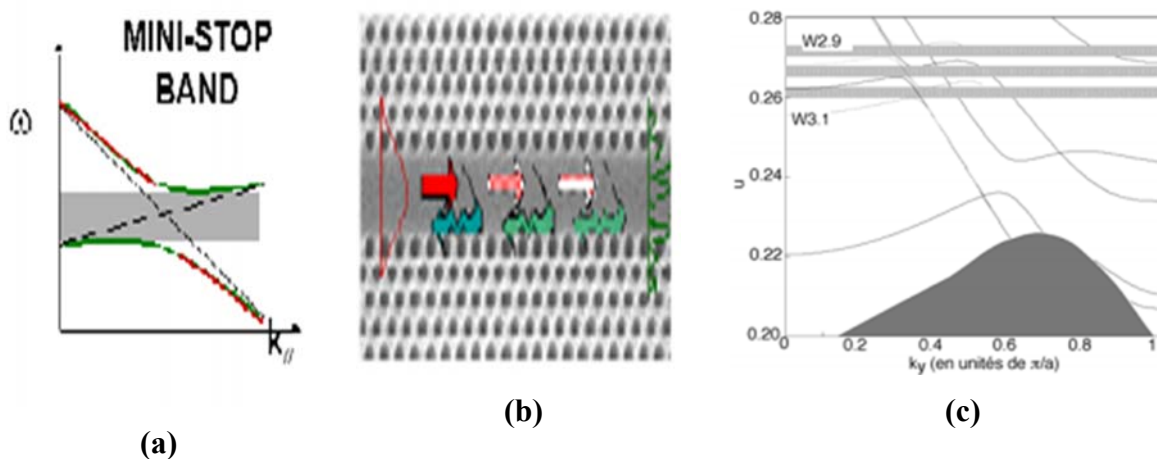
Le principe du dispositif proposé est de se servir du couplage par diffraction de Bragg entre un mode fondamental rapide pour la propagation du signal et un mode d'ordre supérieur, lent, pour l'extraction latérale du signal. Pour des guides à cristaux photoniques (CP) "W3" ou "W5", formés de 3 ou 5 rangées manquantes, ce couplage correspond à une mini-stopband [Réf 21], dont la largeur typique est de 3-20 nanomètres à 1500 nm, tout fait adaptée au coarse WDM (CWDM), et donc aux réseaux métropolitains.



**Figure. I. 22:** Principe de démultiplexeur spectrographique : le guide PC de largeur proche de « W3 » couple le mode fondamental au mode d'ordre supérieur uniquement dans la section où la diffraction de Bragg entre les deux modes est autorisée. Ce mode est ensuite extrait latéralement à travers les trois rangées de trous.

Comme le montre la figure 22, il suffit en première approximation d'affiner une des parois du guide et de varier lentement un de ses paramètres (la largeur dans l'illustration, mais ce pourrait être aussi la période) : une longueur d'onde donnée est alors aiguillée dans une section donnée parce que le couplage au mode d'ordre supérieur n'a lieu que dans cette section là, et la paroi affinée laisse la lumière du mode d'ordre supérieur sortir latéralement, alors que le guidage du mode fondamental reste très robuste à toutes les longueurs d'onde restantes, l'effet tunnel sur ce mode « réfractif » étant très faible.

La figure 23 (a), 23(b), illustre le couplage de mode de W3 de façon générique. Dans le dispositif, la position de la mini-stopband évolue avec la largeur du guide, comme indiqué en figure 23(c).

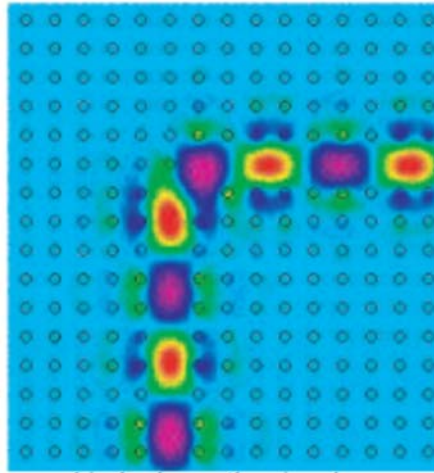


**Figure I.23** : illustration de l'utilisation de la mini-stopband : (a) relation de dispersion locale, le mode fondamental étant le plus raide, le mode d'ordre supérieur le moins raide ; (b) schéma du couplage de mode dans le guide W3 ; (c) superposition des relations de dispersion pour des guides dont la largeur est modifiée de 0.1 rangée en plus ou moins comparé à W3. On voit que ce changement de largeur de 40 nm, dans un cas typique, conduit à des mini-stopband bien séparés.

## I.8.2 Guides d'onde dans les cristaux photoniques

Deux types de guides d'onde ont été principalement développés pour guider des ondes électromagnétiques le long d'une ligne, soit en formant des guides d'onde par des tubes métalliques, soit des guides d'onde diélectriques pour les domaines de l'infrarouge ou du visible. Les guides d'onde métalliques permettent des transmissions sans perte uniquement pour le domaine des microondes, alors que les guides d'onde diélectriques ont pour leur part le défaut de provoquer de grandes pertes dans le cas de virage de fortes courbures.

Par contre, si une ligne de défauts est introduite dans un cristal photonique parfait possédant une bande interdite photonique, la lumière y sera guidée, dans les gammes de fréquence comprises dans la BIP, d'un bout à l'autre de cette ligne de défaut, la lumière n'ayant pas la possibilité de se propager dans le cristal photonique. Les études théoriques et expérimentales de ce type de composants ont montré de faibles pertes en transmission, même dans le cas extrême de virage à  $90^\circ$ . Par exemple, le Fig. I.24 montre une transmission de 100% [Réf 22].



**Figure I.24 :** Cartographie du champ électrique lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans un guide d'onde faisant un virage à  $90^\circ$  dans un cristal photonique.

Cette propriété semble très prometteuse en application dans les systèmes de communication optique et pourra permettre à terme à une forte miniaturation des composants optiques intégrés si les structures peuvent être fabriquées avec la précision nécessaire.

Les guides d'onde sur cristaux photoniques monomodes ont malheureusement une faible efficacité en couplage avec les fibres optiques ou les guides d'onde optiques conventionnels utilisés. Des études ont permis d'améliorer le couplage dans de telles structures [Réf 22].

Ces études et réalisations sont toutes dans le cadre de CP bidimensionnels, dont la fabrication est plus aisée, mais qui ne garantit pas un confinement de la lumière dans la direction transversale. Des études ont donc été faites dans le but de diminuer les pertes en propagation. D'autres configurations ont été tentées, notamment des guides d'ondes sur des CP formés par des tiges [35] ou encore mieux, des guides d'onde dans des CPs tridimensionnels [Réf 22].

## **I.9 Méthodes de synthèse employées dans les cristaux photonique**

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation. Les trois méthodes stochastiques les plus répandues sont les algorithmes génétiques, le recuit simulé et la recherche taboue, elles sont capables de trouver le minimum global d'une fonction même dans des cas très difficiles, mais le temps de calcul peut être élevé. Ceci est particulièrement pénalisant lorsque le calcul de la

performance de chaque nouvelle solution proposée par le processus aléatoire nécessite la résolution d'un modèle éléments fini [Réf 24]. La figure I.25 présente les méthodes stochastiques les plus utilisées.

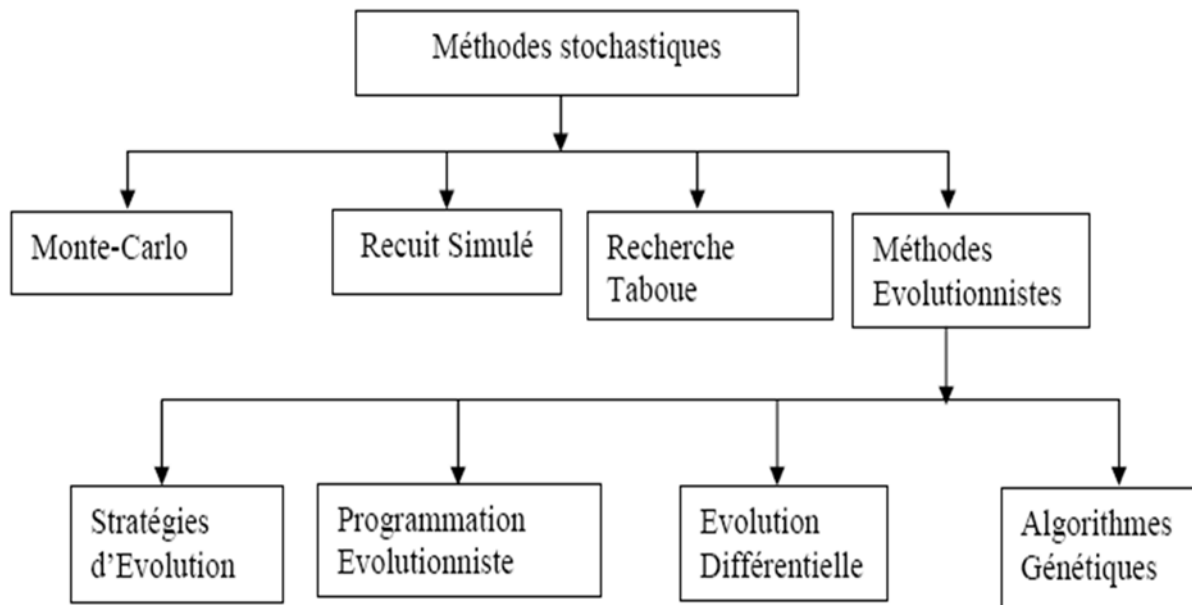


Figure I.25 : Méthodes d'optimisations stochastiques

### I.9.1 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques reposent sur l'analogie entre la théorie de l'évolution naturelle de Darwin et l'optimisation. Selon la théorie de Darwin, les individus d'une population les mieux adaptés à leur environnement ont une plus grande probabilité de survivre et de se reproduire, en donnant des descendants encore mieux adaptés. Comme dans les mécanismes naturels de la reproduction, les principaux opérateurs qui affectent la constitution d'un chromosome, qui code les caractéristiques des individus, sont le croisement et la mutation. Les AG ont été proposées par Holland en 1975 [Réf 23], puis développées par d'autres chercheurs tels que De Jong, Goldberg et Michalewicz.

J. Holland et D. Goldberg ont proposé les trois principes fondamentaux des algorithmes génétiques :

- a. Le codage des paramètres sous forme de gène.
- b. L'opérateur de sélection des individus les mieux adaptés ou les plus performants.

Les opérateurs de reproduction : croisement et mutation qui agissent sur les gènes sachant que au niveau de codage binaire, le croisement favorise plus l'exploration ou diversification tandis que la mutation favorise plus l'exploitation ou l'intensification



du domaine de conception.

### I.9.1.1 Applications de l'AG

Les applications des AG sont multiples intelligence artificielle, recherche opérationnelle, optimisation combinatoire, optimisation des fonctions numériques difficiles (discontinue multimodales) traitement d'image (alignement des photos satellites) optimisation d'emploi du temps, contrôle de systèmes industriels [Réf 24] et apprentissage des réseaux de neurones. Les AG peuvent être utilisées pour contrôler un système évoluant dans le temps (chaîne de production, centrale nucléaire) car la population peut s'adapter à des conditions changeantes. En particulier, ils supportent bien l'existence de bruit dans la fonction à optimiser. Ils peuvent aussi servir à déterminer la configuration d'énergie minimale d'une molécule ou à modéliser le comportement animal.

Les AG sont également utilisées pour optimiser des réseaux (câbles, fibres optiques, mais aussi eau, gaz), des circuits VLSI, des antennes. Ils peuvent être utilisés pour trouver les paramètres d'un modèle petit-signal à partir des mesures expérimentales. Des commutateurs optiques adiabatiques ont été optimisés à l'aide des Stratégies d'évolutions chez SIEMENS. On envisage l'intégration d'AG dans certaines puces électroniques afin qu'elles soient capables de se reconfigurer automatiquement en fonction de leur environnement (Evolving Hardware).

### I.9.1.2 Principe

Les AG sont des algorithmes d'optimisation qui s'appuient sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes de sélection naturelle. Pour transposer les processus génétiques observés dans l'évolution des espèces au domaine de l'optimisation, Holland a introduit deux points fondamentaux [Réf 23]. Dans les algorithmes génétiques, on transforme tout point de l'espace de recherche en un chromosome appelé encore chaîne ou individu. Chacune de ces chaînes représente, sous forme codée, l'ensemble des valeurs des paramètres.

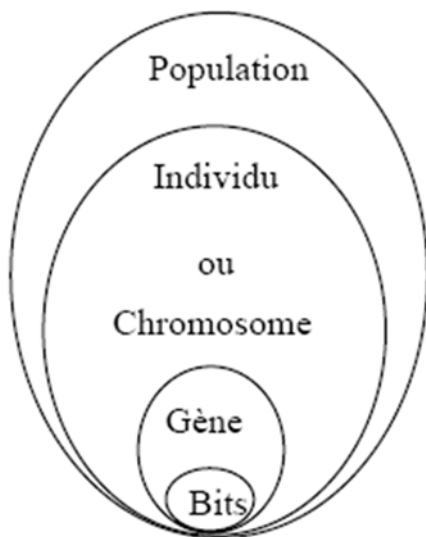
La performance d'un individu est mesurée par une fonction de performance ou d'adaptation (Fitness en anglais) qui se déduit de la fonction objectif car les AG sont naturellement formulés en termes de maximisation.

Le codage des paramètres et les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation sont présentés en détails.

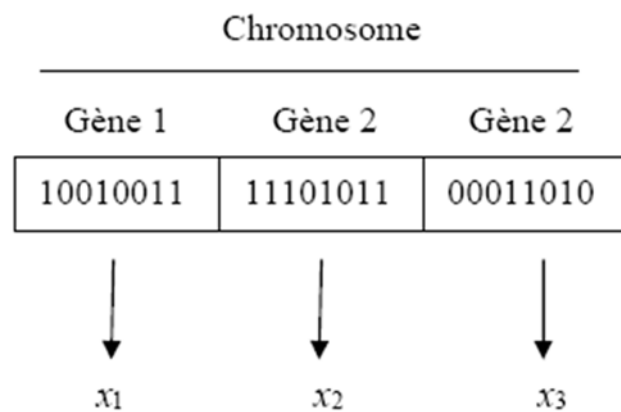
### I.9.1.3 Codage

Pour utiliser les AG, la première chose à se demander est: "Comment décrire un individu?". C'est à dire, comment les paramètres peuvent se coder ?

La réponse à cette question a une influence forte sur l'implémentation des mécanismes de croisement et de mutation. un gène correspond de fait à un paramètre et un seul  $x_i$  un chromosome est constitué par un ensemble des gènes décrit complètement un individu. L'ensemble des individus est appelée structure présentant quatre niveaux d'organisation illustre dans la figure I.26. La Figure I.27 présente un chromosome est une concaténation des gènes.



**Figure I.26 :** Quatre niveaux d'organisation de l'algorithme génétique



**Figure I.27 :** Illustration du codage des variables d'optimisation

Il y a plusieurs types de codage : binaire, réel, codage de Gray et codage dynamique des paramètres. Chacun ayant ses propres avantages et inconvénients.

### I.9.1.4 Création de la population initiale

La première étape de l'algorithme est la genèse de la population initiale. Elle peut être obtenue en générant aléatoirement les individus dans l'espace de recherche suivant une loi de probabilité uniforme. Pour privilégier une direction de recherche ou lorsque le problème est fortement contraint, les individus peuvent être également initialisés de façon heuristique ou directement introduits par l'utilisateur. Mais cette méthode peut faire converger trop rapidement la recherche vers un optimum local [Réf 23].

### I.9.1.5 Fonction d'adaptation

La construction d'une fonction d'adaptation appropriée à partir de la fonction objectif est très importante pour obtenir un bon fonctionnement des AG.

La transformation de la fonction objectif en fonction d'adaptation : Dans le cas d'une minimisation, la fonction objectif peut être transformée par :

$$f_a(X) = f_{max} - f(X) \quad \text{I.5}$$

Avec  $f_a(X) = f_{max} - f(X)$  dans la génération courante.

Dans le cas où la fonction objectif à maximiser prendrait des valeurs négatives, elle peut être transformée de la façon suivante [Réf 24] :

$$f_a(X) = f(X) - f_{min} \quad \text{I.6}$$

Où  $f_{min}$  la valeur minimal de  $f(X)$

### I.9.1.6 Opérateurs de l'AG

Les opérateurs génétiques sont appliqués à une population initiale de façon à réduire dans le temps, des populations successives de qualité. Nous étudions dans cette section les trois opérateurs génétiques de base : la sélection, le croisement et la mutation [Réf 27].

#### I.9.1.7 Sélection

Par analogie au processus de sélection naturelle, un caractère aléatoire est conféré à la sélection des individus tout en exploitant les valeurs de la fonction d'adaptation. Plusieurs procédures existent [Réf 25] [Réf 24].

La sélection est le processus selon lequel des chaînes de la population globale sont choisis suivant la valeur de leur fonction *fitness*, qu'on désire maximiser. Plus la valeur de la fonction d'évaluation d'une chaîne n'est élevée, plus cette chaîne a des chances d'être choisie pour la reproduction. Une partie des chaînes choisies contribuera à une solution chromosome dans les générations futures.

Il existe plusieurs techniques pour la sélection des chromosomes à reproduire. Les plus utilisées sont [Réf 27] :

- la sélection par décimation.

- La sélection proportionnelle.
- La sélection par tournois

**I.9.1.8 Croisement**

Les individus survivants à la phase de sélection sont appariés aléatoirement et chaque paire formée va subir le croisement avec une probabilité  $P_{cross}$ , les paires croisées sont remplacées dans la population par leurs descendance. Différentes types de croisement existent.

**I.9.1.9 Croisement en un point**

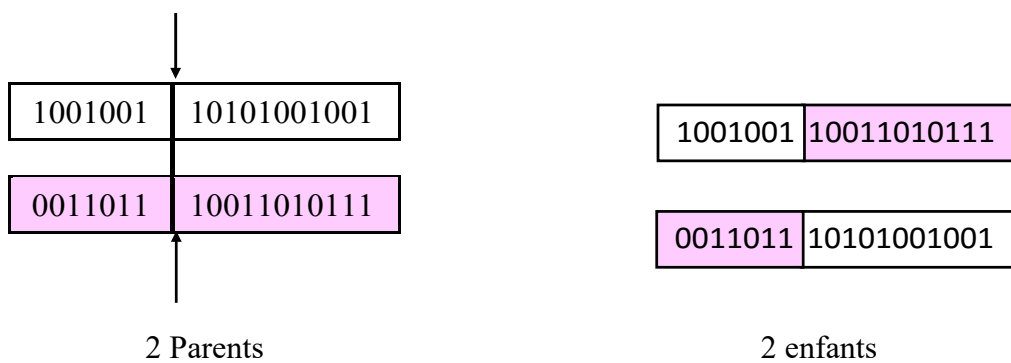


Figure I.28 : Représentation schématique du croisement en 1 point

**I.9.1.10 Croisement en deux points**

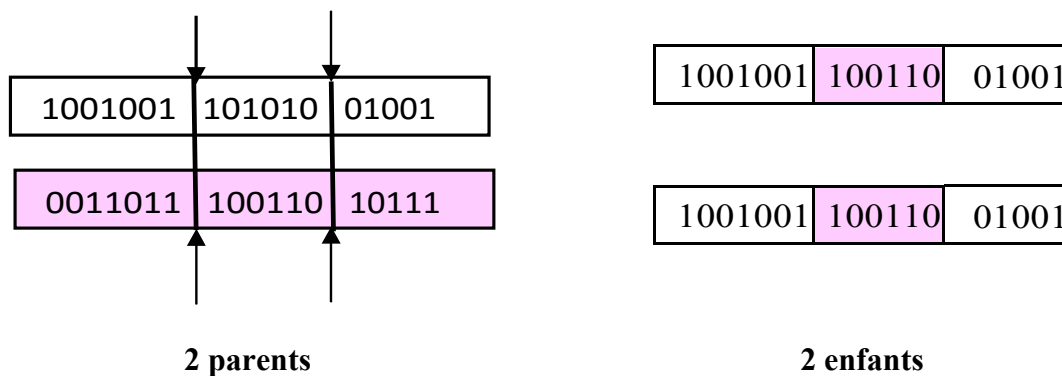


Figure I.29 : Représentation schématique du croisement en deux points

### I.9.1.11 Croisement uniforme

Le croisement uniforme est obtenu à partir d'un masque binaire initialisé aléatoirement et possédant un nombre de bits égal au nombre de bits des individus de la population. Le premier enfant est créé en prenant les gènes du premier parent lorsque les bits correspondant dans le masque valent 1 et les gènes du deuxième parent si ces derniers valent 0 [Réf 24].

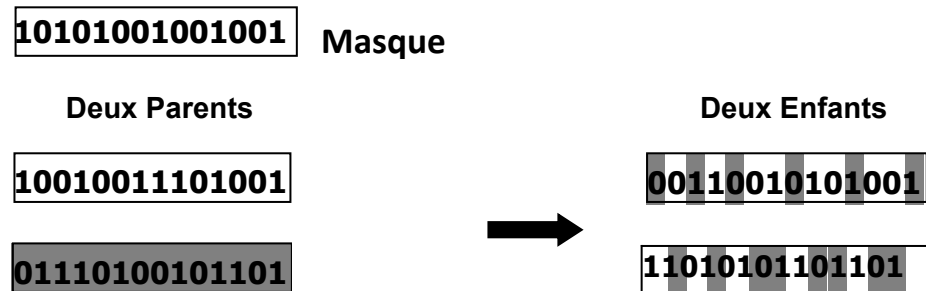


Figure I.30 : Représentation schématique du croisement uniforme

### I.9.1.12 Mutation

La mutation revient à modifier aléatoirement la valeur d'un paramètre. Elle constitue un opérateur de recherche secondaire qui favorise l'apparition de nouveaux génotypes. En effet, il arrive parfois que les informations importantes contenues dans les gènes disparaissent au cours des opérations de croisement. Le rôle essentiel de la mutation est de remédier à ce type de dégénérescence. Une implémentation possible est la complémentation d'un bit dans un chromosome [Réf 24].

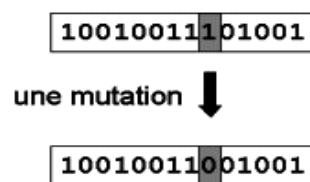


Figure I.31 : Représentation schématique d'une mutation dans un chromosome.

### I.9.1.13 Critères d'arrêt

Le critère d'arrêt est une caractéristique essentielle des AG. Un critère peu performant peut en effet conduire à de nombreuses évaluations inutiles de la fonction d'adaptation. Les critères proposés dans la littérature sont [Réf 24]:

1. nombre maximal de générations (itération).
2. Temps écoulé.
3. le meilleur individu de la dernière génération atteint un seuil critique (meilleur).
4. performances en ligne et hors ligne (PERL) et (PERHL).
5. convergence des bits (CB).

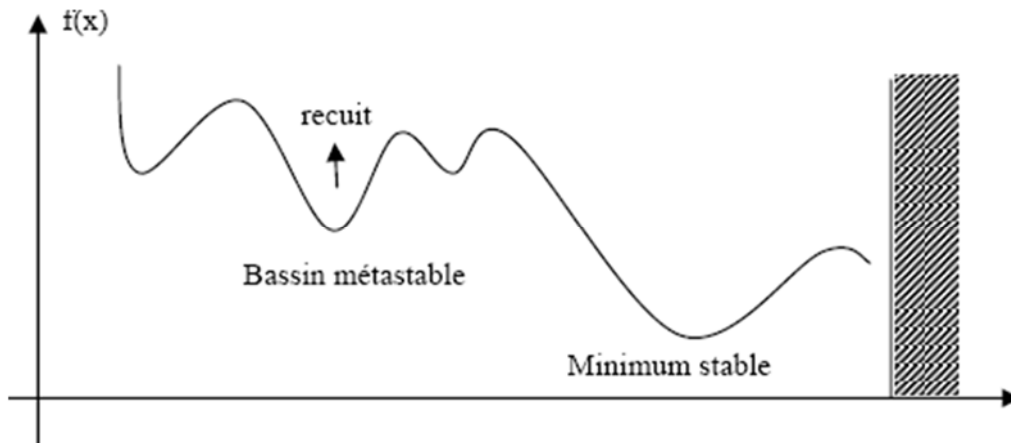
#### I.9.1.14 Avantages et inconvénients

Le grand avantage de l'algorithme génétique est le fait que, pour parvenir au résultat, nous n'avons nullement besoin de connaître les caractéristiques de la solution du problème, mais seulement de déterminer parmi deux solutions quelle est la meilleure. Par contre, ce genre d'algorithme est très coûteux en temps de calcul, difficile à programmer (les paramètres comme la taille de la population et la fonction d'évaluation sont difficiles à établir), et il n'a qu'une très faible chance, voire aucune, de trouver la solution idéale, il ne fait que s'en rapprocher.

#### I.9.2 Recuit simulé

Le recuit simulé est une version améliorée de la méthode d'amélioration itérative. Il a été proposé en 1983 par Kirkpatrick pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire comme par exemple le problème de déplacement du voyageur de commerce (traveling salesman problem). La méthode imite le principe thermodynamique. Elle s'inspire du phénomène physique de refroidissement lent d'un corps en fusion qui le conduit à un état solide de basse énergie. Un métal est chauffé à une température très élevée, il devient liquide et peut occuper toute configuration. Quand la température décroît, le métal va se figer peu à peu dans une configuration qu'il est de plus en plus difficile à déformer, il est refroidi. En le réchauffant (recuit), le métal peut être retravaillé de nouveau pour lui donner la forme désirée. Il faut baisser lentement la température en marquant des paliers suffisamment longs pour que le corps atteigne l'équilibre thermodynamique à chaque palier de la température, ce qui permet d'obtenir à la fin du processus un matériau dans un état cristallin bien ordonné correspondant à un état d'énergie minimum. Par contre, si la baisse de température se fait de manière trop brutale, le matériau est amorphe et ses atomes sont figés dans un état désordonné traduisant un minimum local d'énergie [Réf 24].

Le comportement des atomes a été caractérisé par une loi statistique de distribution proposée par Boltzman : pour une température donnée  $T$  la probabilité pour qu'un système d'atomes soit dans un état d'énergie  $E$  est proportionnelle à  $\exp(\frac{-E}{T})$ . Ainsi quand la température décroît et devient proche de zéro, seuls les états d'énergie minimum ont une probabilité non nulle d'apparaître.



**Figure I.32 :** Parcours de l'espace de recherche avec le recuit simulé. Le principe de "recuit" qui se traduit par une augmentation du niveau d'énergie, permet de sortir des minimums locaux.

### I.9.2.1 Caractéristiques du Recuit Simulé

#### ➤ Température

La température est un paramètre de contrôle important. Le but est d'avoir une température assez haute pour éviter les minimums locaux et suffisamment basse pour réduire le temps d'optimisation. En diminuant lentement la température, on permet au système de rechercher les "bassins d'attraction" dont la préférence est toujours donnée à celui dont le coût est minimal. La loi selon laquelle la température décroît est importante pour l'efficacité de l'algorithme puisqu'elle doit laisser le temps au système de tester le maximum de configurations pour être sûr d'obtenir le minimum global. Aussi, la température initiale doit-elle être suffisamment élevée pour que la descente en température soit aussi lente que possible.

#### ➤ Température Initiale $T_0$

La température initiale est déterminée, sinon fixée arbitrairement, lors d'une phase de pré-traitement avec une exploration initiale partielle de l'espace de configurations, d'après Kirkpatrick [Réf 25],  $T_0$  doit être choisie de sorte que la probabilité d'acceptation de la plus

mauvaise solution ,noté  $P_r$ ,soit environ 80%.Ensuite, dans l'expression de  $P(X, Y)$ , l'utilisateur doit fixer l'accroissement maximal acceptable de la fonction objectif, noté  $\Delta f^+$  pour en déduire la valeur de  $T_0$ L'expression suivante est obtenue :

$$T_0 = \frac{\Delta f^+}{\ln(P_r)} \tag{I.7}$$

Cette relation peut être déduite de la probabilité de Boltzmann selon l’application.

➤ **Décroissance de la température**

Le changement de température de  $T_K$ vers  $T_{K+1}$ effectué au moment où l'équilibrethermique (ou l'état de *quasi-équilibre*) est détecté. La recherche de cet équilibre s'effectue en générant une succession de chaînes de Markov. La variation de température se fait donc par paliers suivant la fonction de décroissance utilisée. Les fonctions les plus couramment rencontrées dans la littérature sont les fonctions linéaires, discrètes ou exponentielles.

Type	Fonctions	Paramètres
Linéaire	$T_{k+1}=a \cdot T_k$	$a < 1$ (typ. 0.99 à 0.8)
Discrète	$T_{k+1}=T_k - \Delta T$	$\Delta T > 0$
Exponentielle	$T_{k+1}=T_k \cdot \exp\left(\frac{-\lambda \cdot T_k}{\sigma_k}\right)$ <p>avec <math>0 \leq \frac{T_{k+1}}{T_k} \leq 1</math></p>	$\sigma_k$ est l'écart type des fonctions objectifs des configurations acceptées à la température $T_k$ , $\lambda$ est un paramètre de réglage fixé par l'utilisateur, positif

**Tab. I.2 :** Lois de décroissance de la température les plus utilisées

La plus utilisée est la loi linéaire qui permet d'avoir une décroissance rapide au début de l’optimisation et lente proche de la convergence. La décroissance exponentielle permet de tenir compte de l'état précédent par l'utilisation de l'écart type des valeurs de la fonction objectif obtenues au palier de température précédent. Au début de la recherche, presque toutes les configurations sont acceptées. Comme ces configurations peuvent être très dispersées dans l'espace de recherche, l'écart type peut être alors relativement grand et donc la température



décroît plus lentement selon la valeur donnée. La décroissance est donc dynamique et adaptative. Pour la fonction discrète, la décroissance est indépendante de la valeur de l'état précédent du système et dépend uniquement de  $\Delta T$ .

➤ **Nombre d'itérations à température constante**

Cette valeur doit être assez élevée pour atteindre le quasi-équilibre et suffisamment faible pour réduire le temps d'optimisation.

### **I.9.2.2 Gestion des déplacements**

L'algorithme RS a été proposé initialement pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire, c'est-à-dire avec des variables discrètes. Dans ce cas, les mouvements aléatoires correspondent à des permutations dans la liste des mouvements possibles. Comme exemple, nous pouvons citer le problème de la détermination du meilleur itinéraire (le plus court) pour parcourir un ensemble de villes dont on connaît les coordonnées. Pour ce problème, les mouvements aléatoires correspondent à des permutations dans la liste chronologiques des villes visitées [Réf 24].

### **I.9.2.3 Chaîne de Markov**

La chaîne de Markov est l'ensemble des états finis aléatoires constitué d'une suite des probabilités associées à chaque configuration visitée à la température  $T_k$ . Lorsque  $T_k$  est constante, la probabilité est homogène. Et si le nombre de transitions tend vers l'infini, l'état le plus probable apparaît plus souvent et on obtient alors l'équilibre statistique à cette température. Théoriquement, on montre que si l'on fait tendre la longueur de la chaîne de Markov vers l'infini, on peut obtenir la convergence asymptotique de l'algorithme.

En pratique, il n'est pas toujours possible de connaître à priori le nombre exact d'itérations nécessaire et le temps de calcul est limité, si bien que la convergence asymptotique ne peut être qu'approchée.

A cause de cette approximation, l'algorithme de recuit simulé ne peut garantir d'atteindre le minimum global avec une probabilité égale à 1. Ainsi, pour augmenter la chance d'obtenir une solution la plus proche du minimum global, il est important de trouver les valeurs de compromis entre les paramètres de contrôle de l'algorithme.

En résumé, le recuit simulé utilise un double dynamique :

- 1°) recherche de minima à température fixée avec la chaîne de Markov.
- 2°) diminution par étape de la température [Réf 27].

### I.9.2.4 Critère de Metropolis

Dans le contexte d'optimisation par la méthode du RS, l'énergie est remplacée par la fonction objectif, ainsi l'obtention d'un solide à énergie minimum est équivalente à la recherche de l'optimum global de la fonction objectif. Cette recherche se fait par explorations successives de différentes configurations.

Après chaque passage d'un point  $x_0$  à un autre point  $x_1$ , on calcule la variation de la fonction de coût  $\Delta E = f(x_1) - f(x_0)$ . La probabilité d'acceptation déterminée par une fonction  $H$ , dépend de la température  $T$  et de la différence entre les deux valeurs de la fonction. En se référant à la loi de Boltzmann, définie comme suit :

$$H = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right) \quad \text{I.8}$$

Où  $E = (f_x)$  représente l'énergie du système

Lorsque la variation  $\Delta E \leq 0$ , l'exponentielle est supérieure ou égale à 1, le nouveau point doit être accepté, on lui affecte alors la probabilité maximale de 1.

Si  $\Delta E > 0$ , on compare  $H$  à un nombre aléatoire  $r$  dans  $[0,1[$ :

- Si  $r < H$  le nouveau point  $x_1$  est accepté.
- sinon il est rejeté et on essaie un autre point.

Les solutions ayant une forte augmentation en  $\Delta E$  sont donc moins probables pour une température donnée, d'autant moins que la température est faible [Réf Mémoire Bend].

Quand la température est nulle, la probabilité de transition devient unitaire et l'algorithme de Metropolis est alors identique à un algorithme d'amélioration itérative, dans ce cas, on risque de finir piégé dans des minimums locaux.

En revanche, quand la température n'est pas nulle, l'algorithme peut choisir des points avec une valeur de la fonction plus élevée, ce qui permet d'éviter les minimums locaux en faveur d'un minimum global et la recherche continue avec celle-ci jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

### I.9.2.5 L'algorithme de BOLTZMANN (BA: Boltzmann Annealing)

La première fonction  $g(\Delta x)$  est connue sous le nom de la fonction génératrice de recuit de Boltzmann. Elle a été employée par de nombreux utilisateurs de recuit simulé car elle permet une réduction de la zone de recherche. L'algorithme de Boltzmann permet de choisir aléatoirement des valeurs  $\Delta x$  qui satisfont à la densité de probabilité gaussienne suivante :

$$g(\Delta x) = (2\pi T)^{-D/2} \text{Exp}(-\Delta x^2 / (2T)) \quad \text{I.5}$$

Où  $T$  est la température du système et  $D$  la dimension de l'espace de travail.

Le système peut alors trouver un minimum global à la fonction  $f(x)$ , si la température du recuit  $T(K) = T_0 / \ln(K)$  a diminuée lentement pour tendre vers la température nulle.  $K$  est alors le pas du recuit simulé.

### I.9.3 Recherche Tabou

La recherche taboue (RT) est une méta-heuristique originalement développée par Glover en 1986 spécifiquement pour des problèmes d'optimisation combinatoire et qui permet de trouver d'une manière flexible un compromis entre la qualité de la solution et le temps de calcul. Elle est basée sur l'utilisation d'une mémoire flexible qui joue un rôle essentiel dans le processus de recherche et permet d'exploiter son historique en évitant de se faire piéger dans des optimums locaux et de revenir à des solutions déjà visitées. Une liste taboue est utilisée pour stocker les meilleures solutions pendant une durée dépendante de la taille de la liste. Cette méthode a été appliquée avec succès pour résoudre de nombreux problèmes d'optimisation réputés difficiles tels que le voyageur de commerce, le routage de véhicule, l'ordonnancement et la planification des restaurations ou des rencontres sportives. [Réf 24].

#### I.9.3.1 Recherche taboue à variables continues

Dans la recherche taboue avec des variables continues, deux concepts sont mis en jeu : le voisinage d'un point donné et un mouvement aléatoire dans le voisinage. Pour un point  $X$  et un pas donnée  $P$  le voisinage  $V(X, p)$  est défini de la façon suivante :

$$v(X, p) = \{Y : |X - Y| \leq P\} \quad \text{I.10}$$

Où le point  $Y$  est aléatoirement généré dans le voisinage  $v(X, p)$  de  $X$ . De plus s'il répond aux contraintes, il est appelé mouvement aléatoire faisable. Ce voisinage est noté  $V_x$ .

### I.9.3.2 Principe

Dans une première phase, la méthode de recherche taboue peut être vue comme une généralisation des méthodes d'amélioration locale. En effet, en partant d'une solution quelconque  $X$  appartenant à l'ensemble des solutions  $S$ . La recherche se déplace vers une solution  $Y$  située dans le voisinage  $V_x$  par exploration [Réf 24] itérativement de l'espace des solutions.

Au début, le vecteur pas couvre la totalité de l'espace de recherche puis il diminue à chaque itération.

L'originalité de la méthode de recherche taboue par rapport aux méthodes locales, qui s'arrêtent dès qu'il n'y a pas d'amélioration de la valeur de la fonction objectif  $f$ , réside dans

Le fait qu'il est possible de dégrader la solution. Cette caractéristique évite ainsi à l'algorithme d'être piégé dans un minimum local mais elle induit également un risque de revenir à des solutions déjà explorées.

Pour régler ce problème, l'algorithme a besoin d'une mémoire qui conserve pendant un moment la trace des dernières solutions visitées. Ces solutions sont déclarées taboues, d'où le nom de la méthode. Elles sont stockées dans une liste de la longueur  $L$  fixe appelé liste taboue. Une nouvelle solution n'est acceptée que si elle n'appartient pas à la liste taboue. Le retour vers des solutions déjà explorées dépendant donc de la longueur de liste taboue. Elle sera d'autant plus difficile que cette dernière est longue. En conséquence, la recherche sera dirigée vers des régions non explorées. Dans le cas des variables continues, c'est le pas de déplacement ayant conduit à cette solution, et non la solution elle-même, qui est stocké dans la liste taboue.

La liste taboue est gérée comme une liste circulaire FIFO (premier entré, premier sorti). À chaque itération, le pas de déplacement tabou le plus ancien est éliminé et il est remplacé par le plus récent.

Dans la littérature, on trouve deux structures fondamentales des algorithmes de recherche taboue. Elles sont implémentées ici pour l'optimisation avec des variables continues. Ces méthodes sont la recherche taboue de Hu (RTHu) et la recherche taboue dite

universelle (RTU).

### I.9.3.3 La recherche taboue de Hu

En suivant les idées de Glover, Hu a proposé un algorithme de recherche taboue pour l'optimisation de variables continues. Pour générer un mouvement aléatoire en utilisant (II.73) et définir un voisinage, Hu a proposé un ensemble de pas  $p_i, P[p_1, p_2, \dots, p_{N_a}]$ . Mais le codage d'une liste taboue est encombrant car il faudrait garder en mémoire tous les éléments qui définissent une solution. Pour pallier à cet inconvénient, la liste taboue des solutions interdites est remplacée par la liste des derniers pas  $p_i$  correspondant aux solutions ayant amélioré la fonction objectif. Cette recherche taboue ne permet pas de dégrader la fonction objective, même temporairement.

### I.9.3.4 Recherche taboue dite universelle

La recherche taboue dite universelle pour l'optimisation des fonctions à variables continues est dérivée de la recherche taboue de Hu. Essentiellement, les améliorations concernent la détermination des pas de déplacement, le critère d'arrêt et la possibilité de dégrader temporairement la fonction objective. Son intérêt est justifié par le fait que la recherche taboue proposée par Hu converge parfois vers un optimum local.

### I.9.3.5 Exploration du domaine de recherche

Dans la recherche taboue de Hu, seuls les mouvements conduisant à une diminution de la fonction objectif sont gardés. Ainsi, chaque nouvelle solution est générée à partir de la meilleure solution courante. Cette solution peut donc rester la même durant plusieurs itérations, ce qui ne donnera pas suffisamment accès à l'exploration de tout le domaine de recherche. Pour cette raison, l'algorithme de RTHu risque de converger vers un optimum local.

Dans la recherche taboue universelle, la meilleure solution dans le voisinage de l'état courant est gardée comme nouveau point de départ même si sa fonction objective n'est pas la meilleure. La RTU autorise ainsi une dégradation de la fonction objective.

## I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les concepts de base sur les cristaux photoniques et plus particulièrement les cristaux photoniques unidimensionnels. En premier lieu nous

sommes orientés directement à des aperçus liés aux matériaux à bande interdite photonique qui sont évidemment inspiré par la nature. Certainement, avant d'étudier n'importe qu'elle structure cristalline, il est judicieux d'analyser la structure de bande pour le choix correct des paramètres d'entrée. En effet, à partir de la structure de bande qui présente les relations de dispersions de différents modes, on peut synthétiser notre structure. Par conséquent, la majorité des applications découlent de la bande interdite apparue comme propriété intéressante aussi présente dans le monde des cristaux photoniques. Afin d'obtenir la réponse spectrale en terme de transmission plusieurs méthode d'analyse ont été exposées.

Nous nous intéressons dans le chapitre suivant à l'application de modèle hybride dans la synthèse de cristaux photoniques unidimensionnels par action sur les dimensions des différentes couches qui vont former le filtre à base d'un CP-1D, permettant d'obtenir une courbe de transmission désirée, exigée à l'avance par l'utilisateur.

## Chapitre II

# Méthodes d'analyse et de la synthèse des filtres à base de Cps -1D

## II.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre consiste à déterminer les caractéristiques de réflexion et de transmission d'une structure périodique unidimensionnelle donnée. A ce stade nous allons analyser notre structure pour le choix correct des paramètres tel que l'épaisseur qui forme le cristal photonique pour obtenir la courbe approchant à celle désirée.

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un gros investissement en programmation et en analyse numérique et constitue une activité exigeante en compétences et en temps. A partir de là, plusieurs méthodes de résolution du problème sont applicable tel que la méthode de matrice transfert qui peut être appliquée judicieusement à des cas spécifiques des structures unidimensionnelles.

Il existe aussi des méthodes développées pour résoudre les problèmes d'optimisation globale, on trouve parmi celles-ci les méta-heuristique d'Optimisation mathématiques « PSO», cette méthode d'optimisation se base sur la collaboration des individus entre eux. Elle a d'ailleurs des similarités avec l'algorithme de colonies de fourmis [Réf 26].

## II.2 La méthode d'analyse des cristaux photoniques

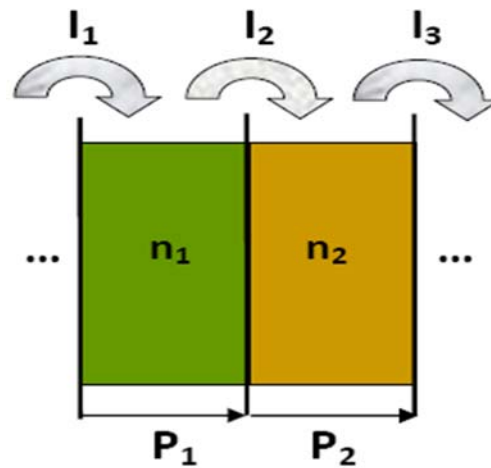
### II.2.1 La méthode de matrice de transfert

La méthode théorique la plus appropriée pour l'étude des structures cristallines photoniques unidimensionnelle est la technique de la matrice de transfert appelée Méthode(TMM) introduite par J.B. Pendry et A. Mackinnon (1992).

La technique consiste à discrétiser les équations de Maxwell sur un maillage. En d'autres termes, le volume total de la cellule unitaire est divisé en de plus petites cellules et les champs électromagnétiques de chaque cellule sont couplés aux cellules avoisinantes. La réponse de la structure totale est ensuite obtenue en multipliant toutes les matrices élémentaires ensemble. Nous définissons ensuite une matrice de transfert reliant le champ électromagnétique incident au champ électromagnétique transmis.

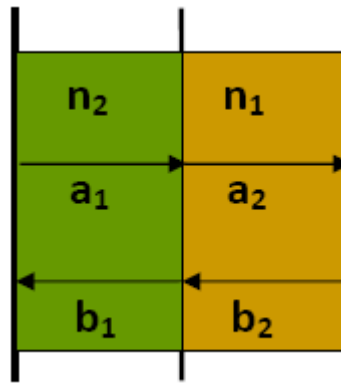
Considérons un réseau de Bragg uniforme illustré selon la figure II.1 dans laquelle elle est divisée en trois petites cellules.





**Figure II.1** : Principe de la méthode TMM.

Pour chaque interface de la structure de Bragg, on définit les ondes incidentes  $i$  et les ondes réfléchies  $b_i$  illustrées sur la figure II.2.



**Figure II.2** : Les ondes utilisées dans le calcul de  $l_1$ .

Le principe de la technique de la matrice de transfert s'explique comme suit :

- ✚ la première interface en passant du milieu d'indice  $n_2$  vers  $n_1$  : matrice  $I_1$ .
- ✚ la propagation à travers la première couche de longueur  $d_1$  : matrice  $P_1$ .
- ✚ la deuxième interface en passant du milieu d'indice  $n_1$  vers  $n_2$  : matrice  $I_2$ .
- ✚ la propagation à travers la deuxième couche de la longueur  $d_2$  : matrice  $P_2$ .

Comme exemple, la matrice  $I_1$  définit la propagation des ondes transmises ( $a_2$ ) et les ondes réfléchies ( $b_1$ ), qui sont données par les deux équations suivantes:

$$a_2 = t_{21}a_1 + r_{12}b_2 \quad (\text{II.1})$$

$$b_1 = t_{12}b_2 + r_{21}a_2 \quad (\text{II.2})$$

Où :  $t_{ij}$  et  $r_{ij}$  indiquent la transmission et la réflexion en passant de la couche  $i$  à la couche  $j$ . Ces équations peuvent être réécrites comme suit :

$$a_2 = \frac{1}{t_{12}} a_1 - \frac{r_{12}}{t_{12}} b_2 \quad (\text{II.3})$$

$$b_1 = t_{12} b_2 + r_{21} a_2 \quad (\text{II.4})$$

Les coefficients de réflexion  $R$  et de transmission  $T$  sont liés par la relation :

$$r^2 + t^2 = 1 \quad (\text{II.5})$$

Avec :  $R = r^2$  et  $T = t^2$

En outre, les relations de Fresnel qui peuvent être directement dérivées à partir des équations de Maxwell donnent :

$$r_{ij} = \frac{n_i - n_j}{n_i + n_j} \quad (\text{II.6})$$

De sorte que :  $r_{12} = -r_{21}$  et

$$t_{ij} = t_{ji} = \frac{2\sqrt{n_i n_j}}{n_i + n_j} \quad (\text{II.7})$$

Par conséquent les équations (II.3) et (II.4) peuvent être réécrites comme suit :

$$a_1 = \frac{1}{t_1} a_2 + \frac{r_{21}}{t_1} b_2 \quad (\text{II.8})$$

$$b_1 = \frac{1}{t_1} b_2 + \frac{r_{21}}{t_1} a_2 \quad (\text{II.9})$$

Les équations (II.8) et (II.9) forment une matrice sous forme :

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = M_I^n \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Où :  $M_I^n$  est la matrice de transfert par rapport à la  $n^{\text{ième}}$  interface :

$$M_I^{1,2} = \frac{1}{t} \begin{pmatrix} 1 & r_{21,12} \\ r_{21,12} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Donc, nous avons maintenant les matrices de transfert pour chaque interface entre deux couches différentes.

Les matrices de transfert  $P^{1,2}$  qui décrivent la propagation à travers les couches uniformes 1 et 2 sont beaucoup plus simples à trouver en raison du fait que le champ se propageant dans un milieu uniforme n'accumule un facteur de phase  $\exp$  (italique).

$$P^{1,2} = \begin{pmatrix} e^{jk_{1,2} d_{1,2}} & 0 \\ 0 & e^{-jk_{1,2} d_{1,2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Où:  $K_{1,2} = \frac{2\pi n_{1,2}}{\lambda}$  et  $d_{1,2}$  la est la longueur de propagation dans les couches 1 et 2.

Nous pouvons maintenant définir la matrice de transfert pour la cellule élémentaire comme  $M = (M_1^1) \cdot P^1 \cdot M_1^2 \cdot P^2$ .

Si nous considérons maintenant un milieu parfaitement périodique composé de  $N$  cellules élémentaires alors la matrice de transfert total d'une telle structure est tout simplement  $M_{tot}$  donnée par l'équation:

$$M_{tot} = M^N \quad (\text{II.13})$$

Enfin, nous pouvons récupérer la réflectivité (et transmission) d'un cristal périodique complet. Ceci peut être fait simplement en réécrivant les équations explicitement à partir de la matrice de transfert:

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} = M_{tot} \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Nous rappelons maintenant la condition au limite  $B(L) = 0$  (il n'y a pas de lumière entrant de la main-extrême droite). Ceci implique que les ondes réfléchies sont nulles ( $b_n = 0$ ) de sorte que les équations définies selon le système (II.14) se réduisent aux équations suivantes:

$$a_0 = m_{11} a_n \quad (\text{II.15})$$

$$b_0 = m_{21} a_n \quad (\text{II.16})$$

Donc, on obtient finalement :

$$r = \frac{b_0}{a_0} = \frac{m_{21}}{m_{11}} \quad \text{et} \quad t = \frac{a_n}{b_n} = \frac{1}{m_{11}} \quad (\text{II.17})$$

Donc, en conclusion, si nous voulons calculer le coefficient de réflexion ou de la transmission d'une structure périodique, nous devrions tout simplement sélectionner une cellule élémentaire, écrire les matrices individuelles I et P de chaque élément dans la cellule (interfaces et propagations) et les multiplier pour obtenir la matrice totale  $M_{tot}$ .

Alors, à partir des éléments de matrice de  $M_{tot}$ , et en utilisant l'équation (II.17), nous trouvons le  $r$  et  $t$ . Tout cela se fait numériquement en utilisant le logiciel MATLAB.

## II.3 Les méthodes des synthèses des cristaux photoniques

### II.3.1 Le modèle hybride

Au milieu des années 1970, sont apparues des méthodes qui supervisent l'évolution de solutions fournies par des techniques heuristiques. Ces méthodes assurent un compromis entre diversification (cas où la recherche se concentre sur de mauvaises zones de l'espace de recherche) et intensification (cas de la recherche des meilleures solutions dans la région de l'espace de recherche en cours d'analyse). Ces algorithmes ont été appelés "métaheuristiques" et ont pour objectif de trouver des solutions dont la qualité est au-delà de ce qu'il aurait été possible de réaliser avec une simple méthode heuristique.

Les méthodes heuristiques modernes sont considérées comme un outil pratique pour les problèmes d'optimisation non linéaire qui n'exige pas que la fonction objective soit différentiable ou continue. La résolution satisfaisante d'un problème d'optimisation difficile, qui comporte un grand nombre de solutions sous optimales, justifie souvent le recours à une méta-heuristique puissante. Cette nouvelle classe de méthodes d'optimisation permet de rechercher les optimums globaux d'un problème d'optimisation, en évitant le piègeage dans l'un de ses minimums locaux. Les principales méta-heuristiques sont la méthode du recuit simulé, la méthode de recherche tabou, les algorithmes évolutionnaires, les algorithmes de colonies de fourmis, toutes inspirées d'analogies avec la physique, la biologie ou l'éthologie

[Réf 26]. Une nouvelle méthode inspirée de la dynamique d'animaux se déplaçant en foules compactes : (essaims d'abeilles, vols groupes d'oiseaux, banc de poissons, a été introduite à cette famille de méthodes méta-heuristiques d'optimisation.

L'optimisation par essaim de particules (PSO) peut être utilisée comme un outil puissant pour les problèmes d'optimisation en électromagnétiques. En effet, PSO est capable de trouver l'optimum global dans l'espace de recherche limité par l'ensemble de contraintes.

Elle devient prolifique dans beaucoup d'application en raison de sa simplicité algorithmique et de sa facilité de manipulation. Elle est facilement adaptable à tous types de problèmes d'optimisations. Aussi, elle est le plus judicieusement employée sur des problèmes d'optimisations difficiles.

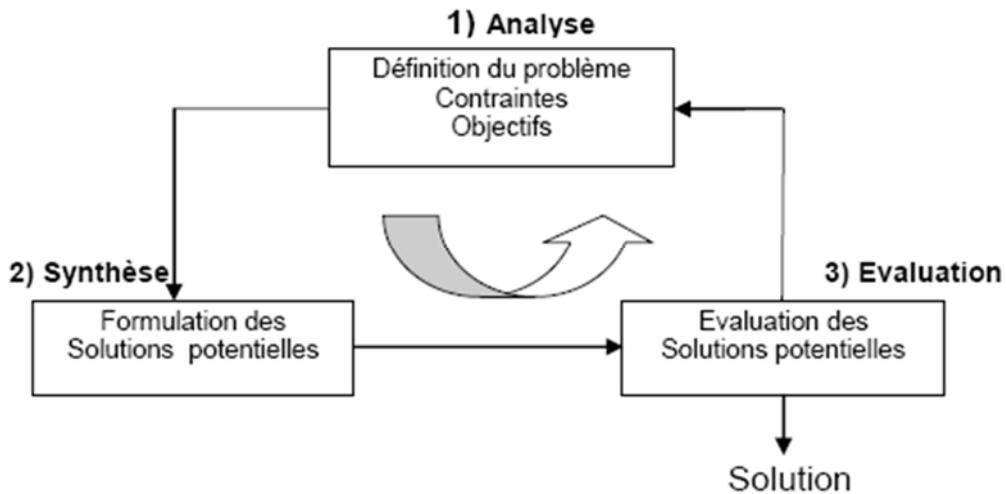
Dans cette session, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'application des algorithmes à essaim de particules (APSO) à la synthèse des filtres sélectifs à base des CPs-1D.

### II.3.2 Etape du processus d'optimisation

La figure II. 3 présentes les trois étapes du processus d'optimisation : analyse, synthèse et évaluation. Tout d'abord, il convient d'analyser le problème et d'opérer un certain nombre de choix préalables :

- ✓ **Variables du problème**, quels sont les paramètres intéressants à faire varier ?
- ✓ **Espace de recherche**, dans quelles limites faire varier ces paramètres ?
- ✓ **Fonctions objectif**, quels sont les objectifs à atteindre ?
- ✓ **Méthode d'optimisation**, quelle méthode choisir ?

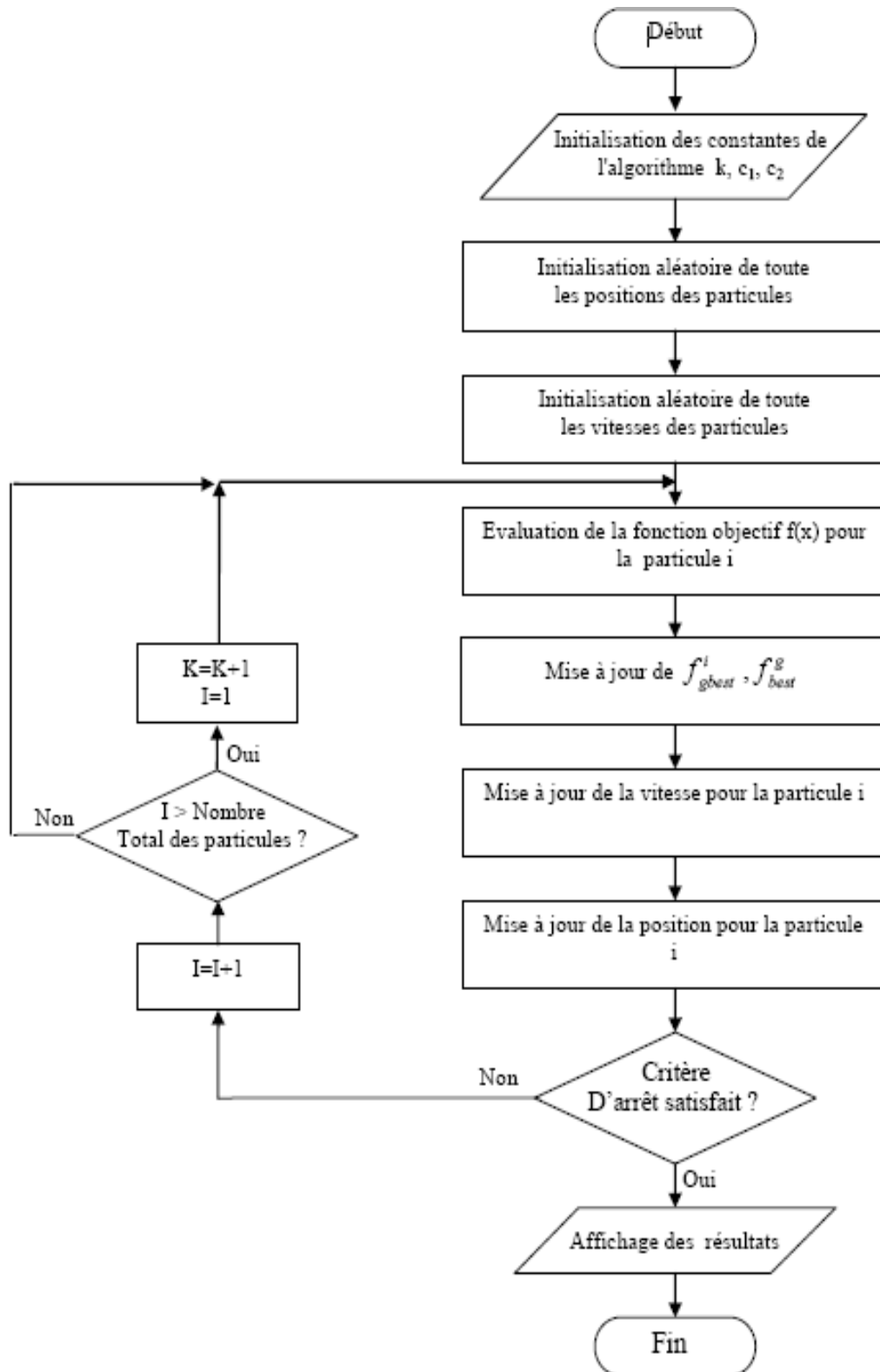
Une fois effectués ces différents choix, la méthode choisie synthétise des solutions potentielles qui sont évaluées, puis éliminées jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable. Si nécessaire, le problème peut être redéfini à partir des solutions déjà obtenues.



**Figure II.3:** Processus d'optimisation.

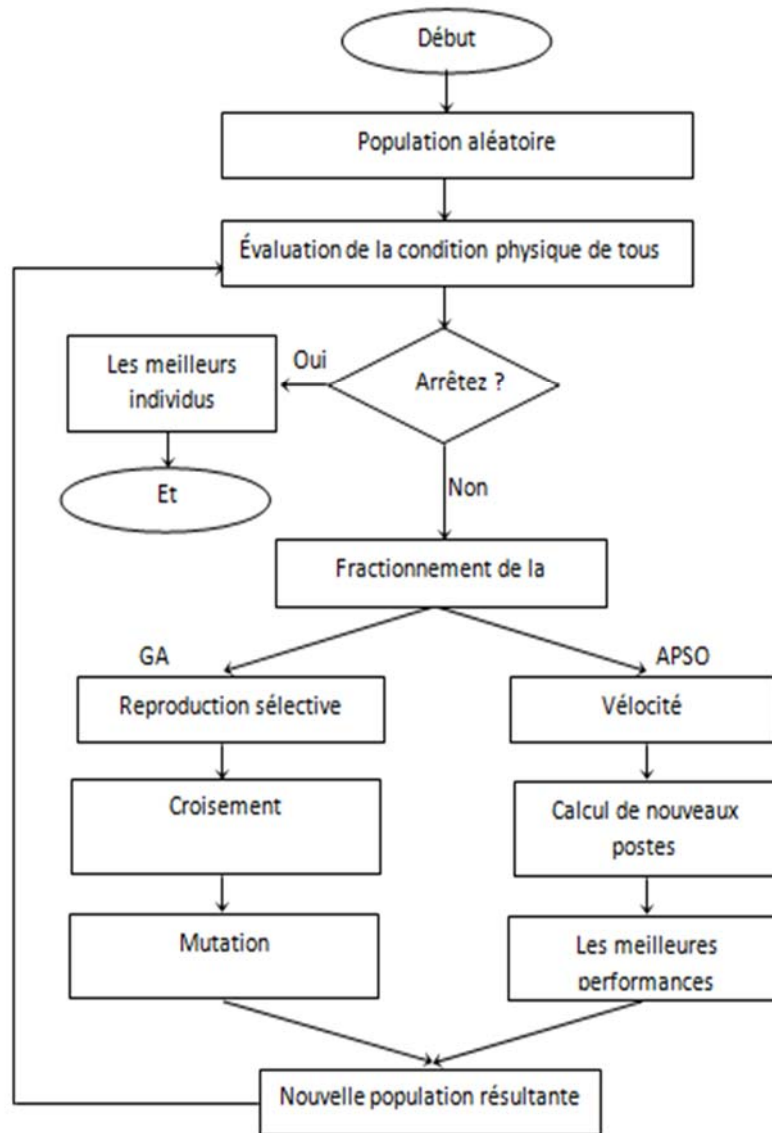
Le processus d'optimisation évalue les paramètres synthétisés des différents éléments du cristal afin de répondre aux contraintes de transmission désiré (faire approcher la fonction synthétisée à celle désirée). Il permet d'approcher au mieux la fonction de désirée par l'évaluation adéquate des épaisseurs des différents couches du réseau. La méthode de synthèse adoptée est une technique itérative de résolution des équations non-linéaires avec un critère d'optimisation donné.

Sur la figure suivante nous schématisons l'algorithme de la « PSO » standards [Réf 26] :



**Figure II.4 :** Organigramme de la PSO standard

L'algorithme de la méthode d'hybride entre la « PSO » et l'AG est schématisé sur la figure suivant :



**Figure II.5 :** Organigramme de la méthode hybride entre la « PSO » et l'AG.

Le modèle hybride se compose fondamentalement d'une collaboration robuste des deux algorithmes évolutifs APSO et GA, puisqu'il préserve l'intégration des deux méthodes pour la procédure d'exécution complète. Dans chaque génération, la population est répartie de façon aléatoire en deux sous-génération selon la Coefficient d'hybridation, et ils progressent avec les deux approches respectivement. Par conséquent, ils sont incorporés dans la population renouvelée qui est à sa tour divisée en deux parties dans la prochaine génération pour une autre série d'engins de particules adaptables ou d'opérateurs génétiques. Dans notre cas, le coefficient d'hybridation est fixé à 0,5. Cela traduit que le pourcentage de la population évolué avec l'algorithme APSO est égal à 50%, tandis que le reste avec la technique GA.



## II.4 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à la présentation des outils d'analyse et de synthèse respectivement. Nous avons commencé en premier lieu par l'exposition de la méthode de transfert qui sert à présenter les performances du cristal en terme de transmission. Afin de synthétiser le filtre sélectif, une méthode hybride a été aussi présentée.

Le chapitre suivant, sera consacré à la présentation des résultats de simulation.

## Chapitre III

# Résultats de filtrage en longueur d'ondes des CPs-1D

### III.1 Introduction

Cette partie décrit les résultats d'optimisation des filtres sélectifs à base des CPs -1D. En employant une approche hybride, des CPs-1D en agissant sur les largeurs des couches constituant la structure en question. Cette famille de cristaux photoniques sera plus particulièrement étudiée. Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats issus de l'optimisation par une méthode mentionnée précédemment pour la conception d'un filtre à base d'un CP-1D en longueur d'onde pour une longueur d'onde donnée.

Nous proposons dans ce chapitre d'exploiter une méthode d'optimisation plus complexe basée sur un modèle hybride avec les algorithmes génétiques dit essaim de particules avec l'élevage et sous populations.

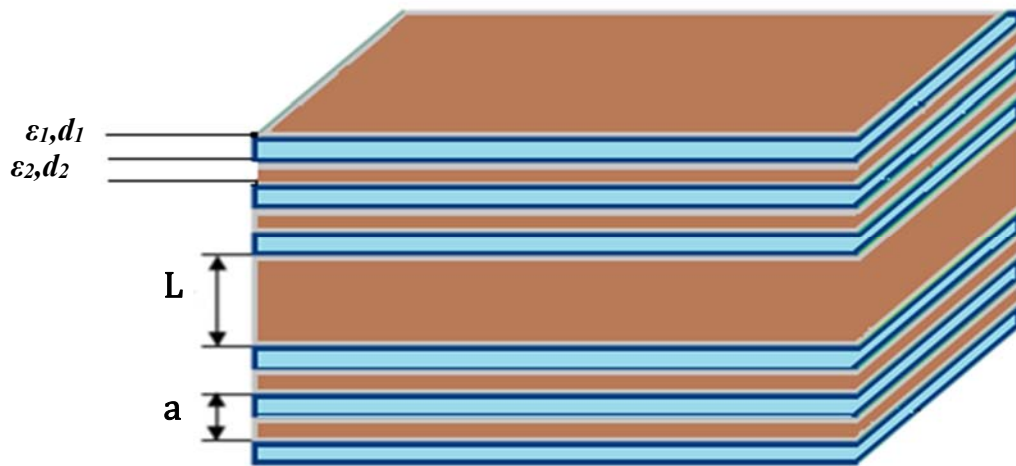
L'objectif consiste à rechercher l'épaisseur optique optimale de chaque couche du filtre pour que la transmission synthétisée soit aussi rassemblée d'une transmission désirée tout en éliminant les transmissions parasites intervenant à des longueurs d'ondes voisines.

### III.2 Défaut dans les cristaux photoniques unidimensionnels CPs-1D

Pour contrôler précisément et efficacement la propagation de la lumière, l'introduction de défauts dans la périodicité de ces objets peut être un atout équivalent à celui apporté par le dopage des semi-conducteurs pour contrôler les propriétés de conduction des semi-conducteurs.

Parmi les défauts possibles dans les CPs, une distinction peut être faite entre les défauts ponctuels de dimension 0D correspondant à une brisure locale de la périodicité, et les défauts étendus de dimension 1D, 2D ou 3D. Ces derniers ne peuvent bien entendu exister que dans des CPs ayant une dimensionnalité supérieure ou égale [27].

Un défaut 0D dans un CP 1D correspond à la modification de l'épaisseur ou de la constante diélectrique d'une couche. La Figure III.1 est une représentation schématique d'une de ces structures.  $L$  est la longueur du défaut et  $a$  la période du CP 1D.



**Figure III.1** : Représentation schématique d'un CP 1D ayant un défaut.

Un cristal photonique 1D parfait est périodique dans une seule direction et infiniment long dans la direction perpendiculaire à la direction de périodicité. Ce système n'existe pas dans la réalité. Ce dernier permet une Bande Interdite Photonique (BIP) unidirectionnelle dans la direction normale du miroir de Bragg. Cette BIP est sensible à l'angle d'incidence de l'onde c'est-à-dire que les CPs-1D réfléchissent la lumière seulement à une incidence normale ou près de la normale.

Pour compenser l'absence de bande interdite dans la direction perpendiculaire au plan de périodicité des cristaux 1D, la lumière peut être confinée dans une hétéro-structure d'indice. Ces guides d'ondes planaires sont couramment utilisés en optique intégrée et sont facilement fabriqués par des techniques habituelles d'épitaxie

### III.3 Optimisation des filtres sélectifs à base des CPs-1D

Ce paragraphe illustre l'apparition de bandes permises photoniques dans les cristaux photoniques CP-1D (miroir de Bragg).

En effet, pour aborder la simulation d'un filtre sélectif, nous étudions le cas simple d'un milieu dont la constante diélectrique est périodique suivant une seule dimension.

Ce milieu peut être constitué d'une alternance de couches de diélectriques de permittivités différentes  $\epsilon_1=12.25$  et d'indice de réfraction  $n=3,5$  (Silicium),  $\epsilon_2=1$  (l'air). Il s'agit des matériaux à fort contraste d'indice, capable de créer un gap photonique large.

La figure III.2 illustre une description schématique sur le filtre sélectif qui sera traité dans les sections suivantes. Il est de taille finie  $L=N.a$  ( $N$  est le nombre de couche et  $a$  la période).

Dans nos simulations, nous avons pris comme choix arbitraire  $N=9$ .

Pour l'étude de notre filtre, nous avons choisis d'exploiter une plage en longueur d'onde couramment employée en télécommunications optique comprise entre  $1 \mu\text{m}$  et  $2 \mu\text{m}$ . Il suffira alors de lancer l'opération de simulation à l'aide du logiciel de calcul MATLAB et de balayer la plage des longueurs d'ondes.

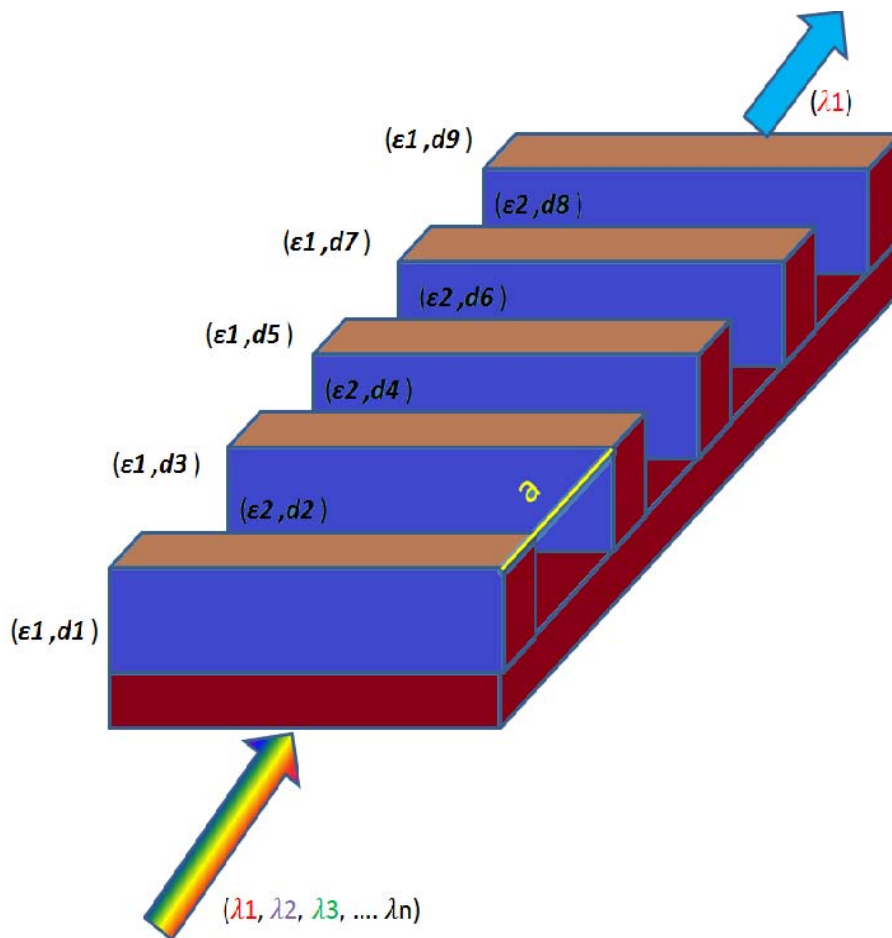
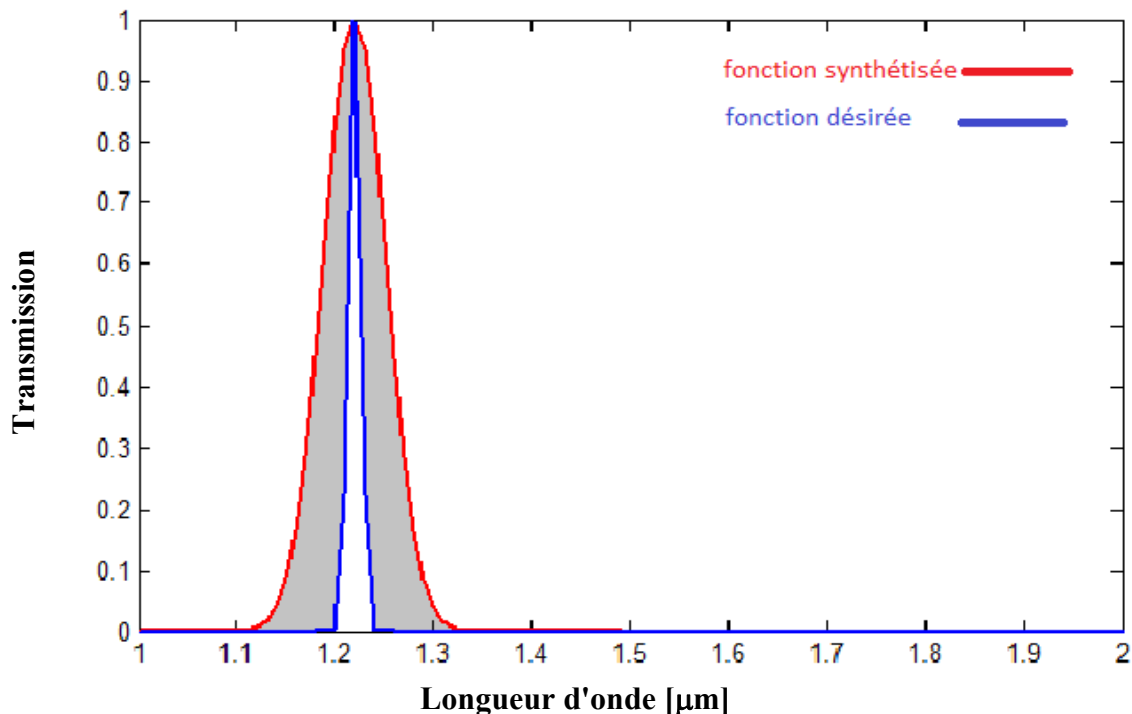


Figure III.2 : Structure d'un filtre à base des CP-1D

A ce stade, le filtre passe bande en question ne peut pas encore filtrer. On doit passer par l'étape de l'optimisation, qui va appliquer des changements au niveau de l'épaisseur de chaque couche afin de laisser passer une longueur d'onde.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats issus de l'optimisation par une méthode hybride entre la « PSO » et l'algorithme génétique pour la conception d'un filtre sélectif en longueur d'onde pour une longueur d'onde donnée à base d'un CP-1D. L'idée consiste à rechercher l'épaisseur optique optimale de chaque couche du filtre pour que la transmission synthétisée soit aussi proche d'une transmission désirée tout en éliminant les transmissions parasites intervenant à des longueurs d'onde voisines.



**Figure III. 3.** Spécification des fonctions désirée et synthétisée.

Le problème de synthèse consiste à approcher le spectre de transmission synthétisé du filtre à CP 1D ( $F_s(\lambda)$ ) à une fonction Gaussienne désirée ( $F_d(\lambda_i)$ ) représentée par l'équation (III. 1) imposé préalablement par l'utilisateur, comme montrée selon la figure III.3. Nous avons choisi cette fonction afin de rendre notre filtre plus sélectifs :

$$F_d(\lambda_i) = -80e^{-(\lambda_i - \lambda_0)^2} \quad (\text{III. 1})$$

L'erreur commise entre les les deux fonctions s'écrit :

$$\delta(\lambda, d, N) = |F_s(\lambda, d, N) - F_d(\lambda, d, N)| \quad (\text{III.2})$$

Le problème d'optimisation consiste ensuite à minimiser l'erreur quadratique  $G(\lambda, N)$  :

$$G(\lambda) = \sum_{\lambda} \delta^2(\lambda, d, N) \quad (\text{III.3})$$

Les méthodes de synthèse utilisées sont l'algorithme génétique et la « PSO ». L'hybridation entre ces deux méthodes a été parus efficaces et très adaptées à une telle problématique qui consiste bien entendu à la conception des filtres sélectifs.

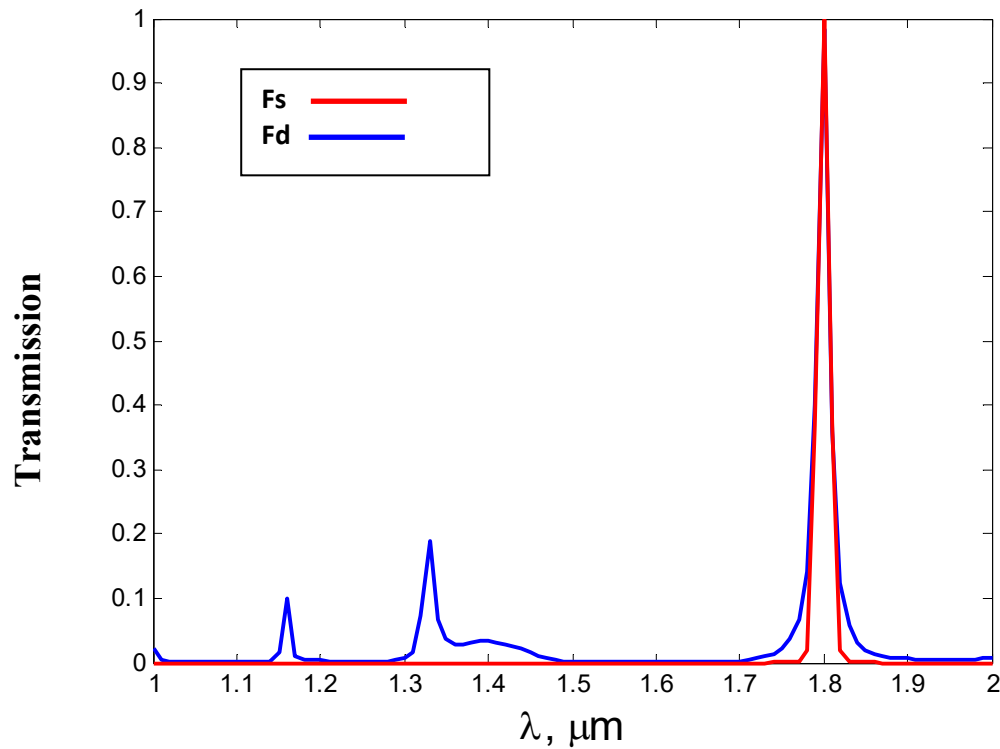
### III.4 Présentation des résultats de simulation

Pour l'étude de notre filtre, nous avons choisis d'exploiter une plage en longueur d'onde très utilisée en télécommunications optique comprise entre  $1\mu\text{m}$  et  $2\mu\text{m}$ . Il suffira alors de lancer l'opération de simulation à l'aide du logiciel de calcul MATLAB et de balayer la plage des fréquences en intervenant directement sur les programmes des algorithmes. Afin de valider notre modèle hybride, nous avons comparé nos résultats à ceux trouvés par [Réf 27], et qui justifie l'efficacité de notre technique de synthèse.

#### III.4.1 Filtre sélectif à longueur d'onde $1.8\mu\text{m}$

En premier temps, on commence notre optimisation d'un filtre passe bande autour de la longueur d'ondes  $\lambda_0 = 1.8 \mu\text{m}$  permettant ainsi de transmettre une gamme s'étalant sur l'intervalle  $[1.7-1.9 \mu\text{m}]$ .

Sur la figure III.4 on présente les résultats de simulation du coefficient de transmission après optimisation dans la bande  $[1-2\mu\text{m}]$ .

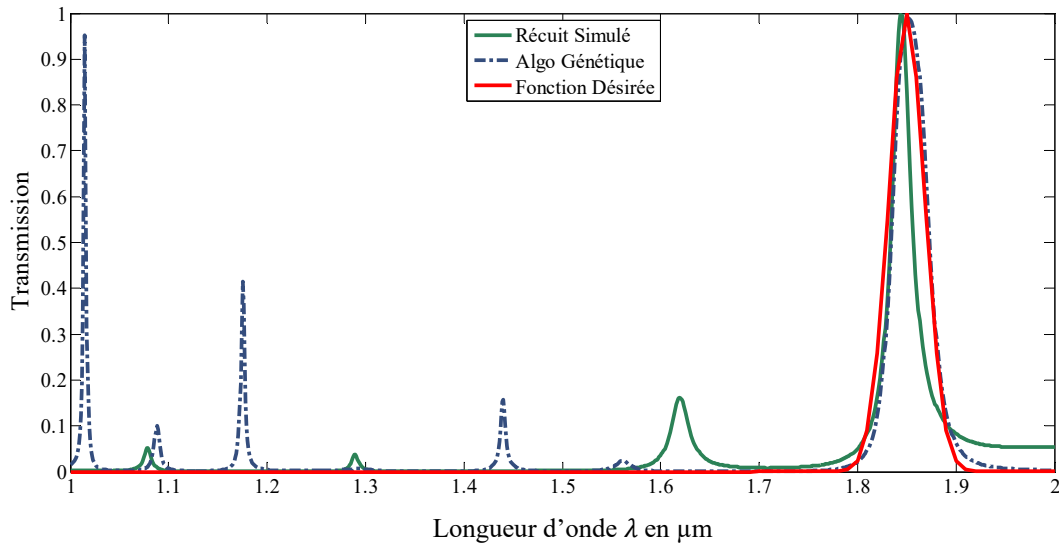


**Figure III. 4** : Réponse de transmission désirée (Fd) et synthétisée (Fs) en fonction de la longueur d'onde.

Pour cette longueur d'onde, notre méthode hybride nous offre en réponse une solution qui peut être considérée comme parfaite, car le graphique est superposé avec celui de la fonction désirée sur toute la gamme de longueur d'onde à part quelques harmoniques qui ne dépassent pas les 20%. On peut le considérer comme un excellent résultat.

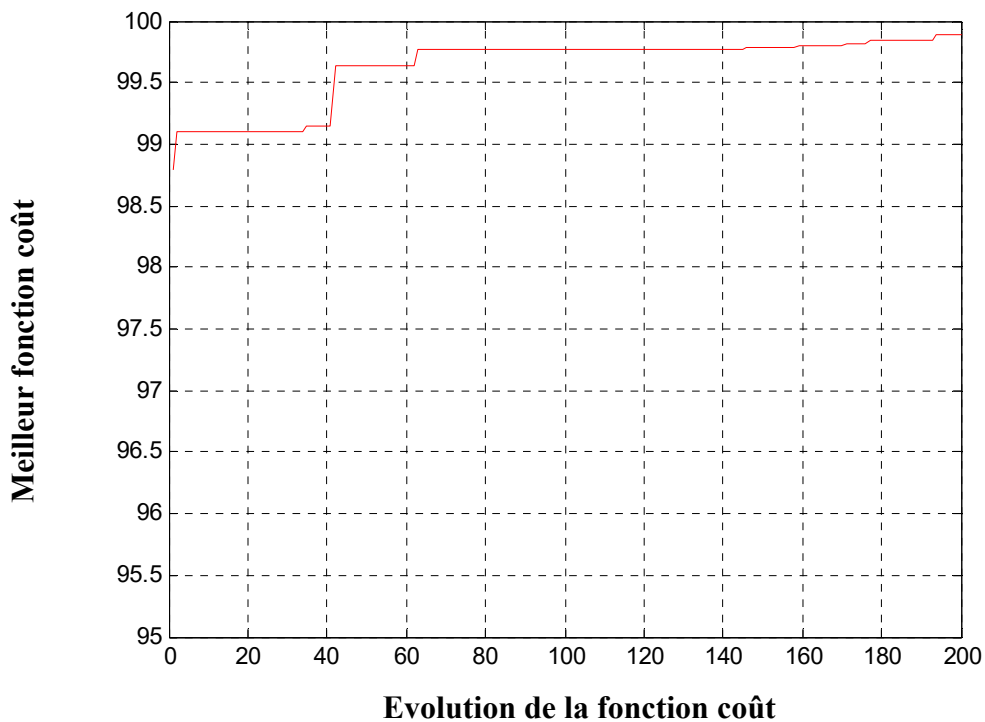
En comparaison avec les résultats obtenus par [Réf27] pour la conception d'un filtre autour de la longueur d'ondes 1.85 présenté sur la figure III. 5, on observe clairement que notre méthode appliquée donne de bonnes performance du filtre en comparions avec ceux de [27], étant donné que nous avons obtenu juste deux harmoniques, alors que trois harmoniques qui dépassent le 30% jusqu'à ou bout de 40%, sont donné respectivement par recuit simulé et l'algorithme génétique.





**Figure III. 5 :** La transmission en fonction de la longueur d'onde [27].

Afin de minimiser l'erreur entre la fonction désirée et celle obtenue par la techniques de modèle hybride, nous allons analyser l'évolution de la fitness au cours de itération pour la convergence sur la figure III.6.



**Figure III.6 :** Evolution de la fonction coût associée.

D'après la figure III 6, nous observons que la convergence de la méthode s'obtient après 200 itérations permettant ainsi à la fonction synthétisée de s'approcher à celle désirée, un résultat très satisfaisant a été obtenu dans ce cas.

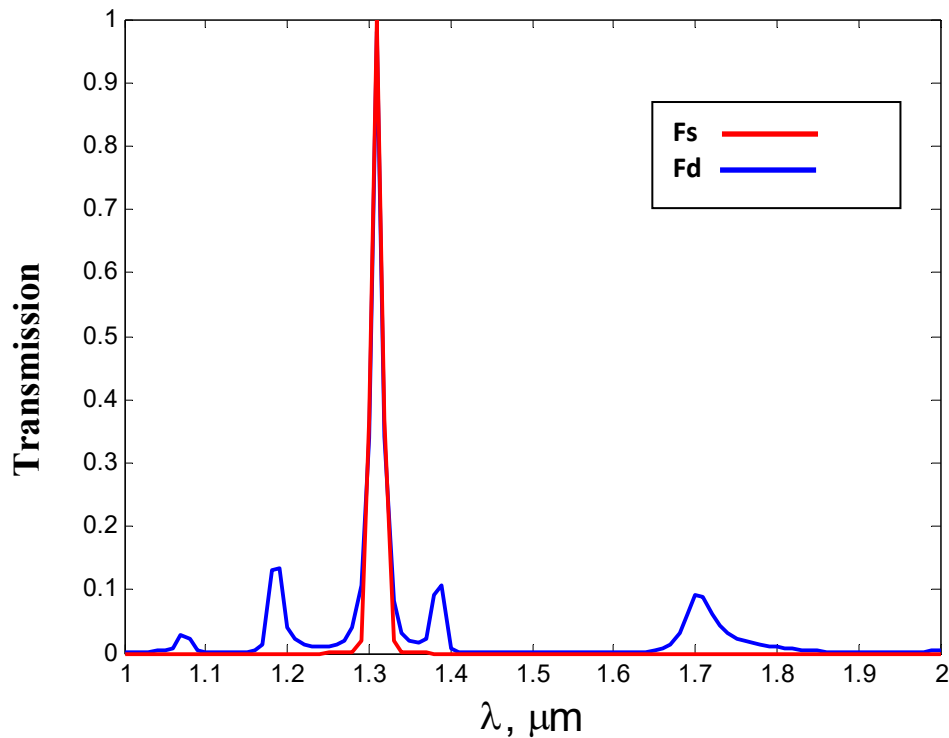
Pour la longueur d'onde  $\lambda=1.8\mu\text{m}$ , les épaisseurs des différentes couches du filtre sont représentées dans le tableau III. 1.

Épaisseurs de différentes couches $d_i$ [ $\mu\text{m}$ ]			
	RS [27]	GA [27]	GAPSO
$d_1$	0,44166905	0,18039216	0.4050
$d_2$	0,16561041	0,90980392	0.3565
$d_3$	0,75871674	0,9254902	0.8293
$d_4$	0,93763872	0,19215686	0.2260
$d_5$	0,07738966	0,14117647	0.0620
$d_6$	0,35768119	0,30588235	0.2844
$d_7$	0,06548569	0,83529412	0.3762
$d_8$	0,2734179	0,24313725	0.4298
$d_9$	0,33440596	0,10588235	0.5074

Tableau III. 1 Épaisseurs optimales [ $\mu\text{m}$ ] des couches du filtre sélectif pour  $\lambda=1.8\mu\text{m}$ .

#### III.4.2 Filtre sélectif à la longueur d'onde $1.31\mu\text{m}$

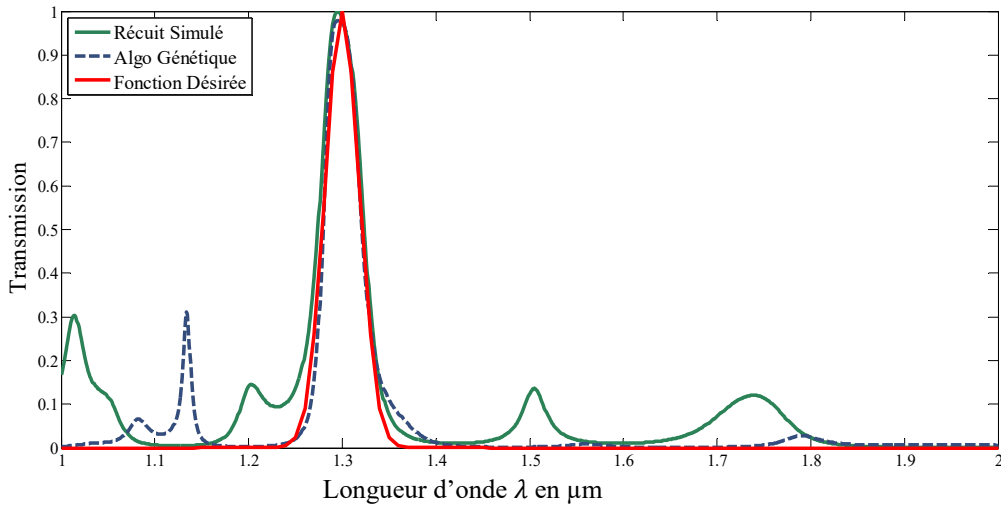
Toujours dans l'optimisation des filtres sélectifs en longueur d'onde, et avec l'application d'une méthode d'optimisation plus complexe basé sur le modèle hybride, cette fois-ci nous cherchons à optimiser le filtre de telle sorte qu'il résonne à la longueur d'onde  $1.31\mu\text{m}$ . Nous présentons les résultats de synthèse obtenus par notre méthode hybride.



**Figure III.7 :** La transmission en fonction de la longueur d'onde.

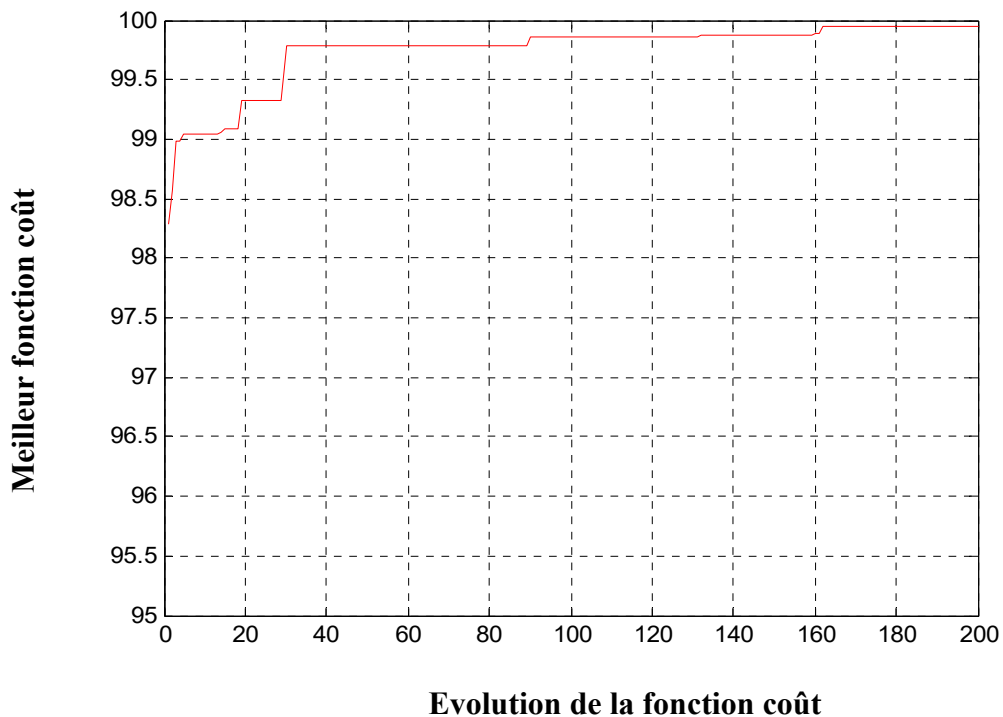
Après l'optimisation et d'après la figure III.7. Nous observons une bonne réponse qui peut être considérée comme parfaite, et avec l'application de la méthode d'optimisation qui basé sur le modèle hybride nous obtenus le graphe qui est superposé avec celui de la fonction désirée sur toute la gamme de longueur d'onde. On peut le considérer comme un excellent résultat.

En comparaison avec les résultats obtenus par [27] pour la conception d'un filtre autour de la longueur d'ondes 1.31 présenté sur la figure III. 8, on remarque clairement que l'application de la méthode d'optimisation qui est basée sur le modèle hybride donne de bonnes performance du filtre en comparions avec ceux de [27], telle que la fonction synthétisée de chacun des deux algorithmes offrent une réponse en sortie avec des interférences et des harmoniques sont dépassant les 25% de la puissance de transmission à la longueur d'onde désirée. Nous présentons les résultats de synthèse obtenus par les deux méthodes présentes par [27] sur le graphe ci-dessous :



**Figure III.8 :** La transmission en fonction de la longueur d'onde pour 1.31  $\mu\text{m}$ .

Aussi, il est préférable de compléter la réponse de notre filtre par un tracé qui peut être révéler un très bon moyen pour la bonne compréhension de la phase d'optimisation. Il s'agit donc de l'évolution de la fonction fitness est esquissée sur la figure III.7 avec une convergence toujours fixé au bout de 200 itérations.



**Figure III.9:** Evolution de la fonction coût associée

Pour la longueur d'onde  $\lambda=1.31\mu\text{m}$ , les épaisseurs des différentes couches du filtre sont représentées dans le tableau III. 2.

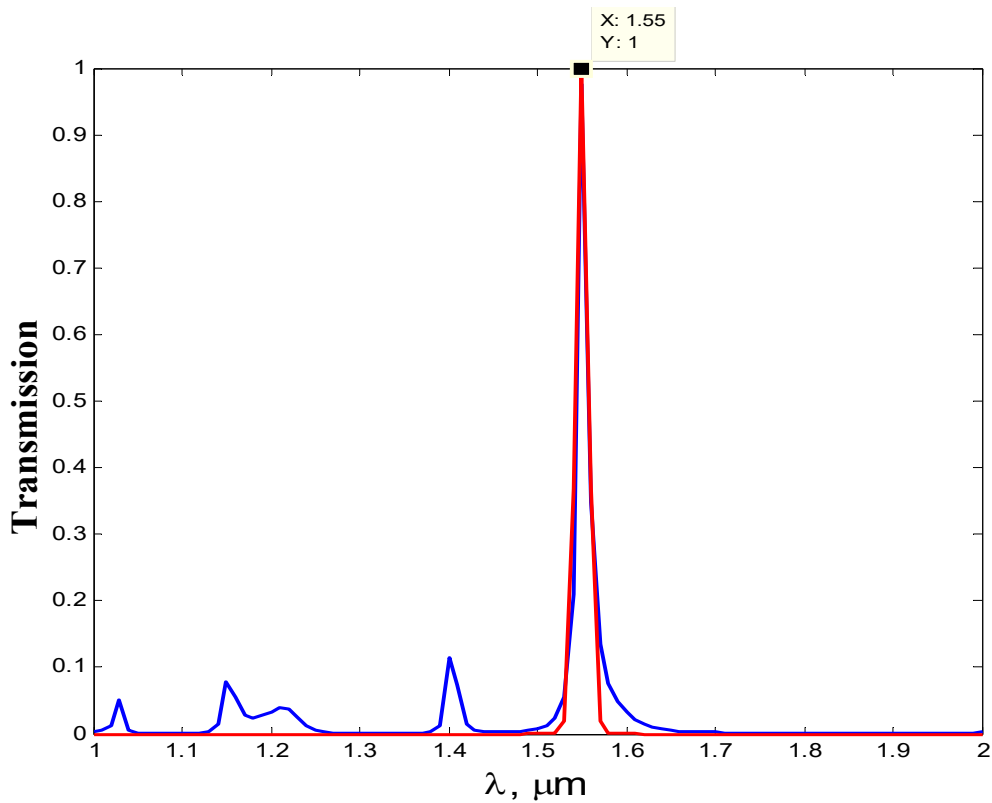
Épaisseurs de différentes couches $d_i$ [ $\mu\text{m}$ ]			
	RS [27]	GA [27]	GAPSO
$d_1$	0,16254269	0,93333333	0.7342
$d_2$	0,00598436	0,84313725	0.3921
$d_3$	0,55082264	0,1372549	0.3357
$d_4$	0,69331417	0,52941176	0.2942
$d_5$	0,1530192	0,05098039	0.3912
$d_6$	0,60272694	0,70980392	0.2942
$d_7$	0,0892785	0,05098039	0.7519
$d_8$	0,37296869	0,37647059	0.4338
$d_9$	0,740711	0,58039216	0.5074

Tableau III. 2. : Épaisseurs en  $\mu\text{m}$  des couches du filtre CP 1D pour  $1.31\mu\text{m}$ .

### III.4.3 Filtre sélectif à la longueur d'onde $1.55\mu\text{m}$

#### a. Première optimisation

Dans cette section, et toujours dans l'optimisation des filtres sélectifs en longueur d'onde nous dirigeons vers une autre plage de longueur d'onde telle que  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , Nous présentons les résultats de synthèse obtenus par le modèle hybride.



**Figure III.10 :** La transmission en fonction de la longueur d'onde pour  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .

Pour cette longueur d'onde, l'algorithme du modèle hybride nous offre en réponse une solution qui peut être considérée comme assez bonne, car le graphique est superposé avec celui de la fonction désirée sur toute la gamme de longueur d'onde. On peut le considérer comme un bon résultat. La méthode de modèle hybride donne un résultat un bon mais reste dans les normes.

Selon la figure III.11, on rapporte l'évolution de la fonction fitness au cours des itérations. On constate que l'algorithme de modèle hybride nécessite 200 itérations pour trouver la solution du problème.

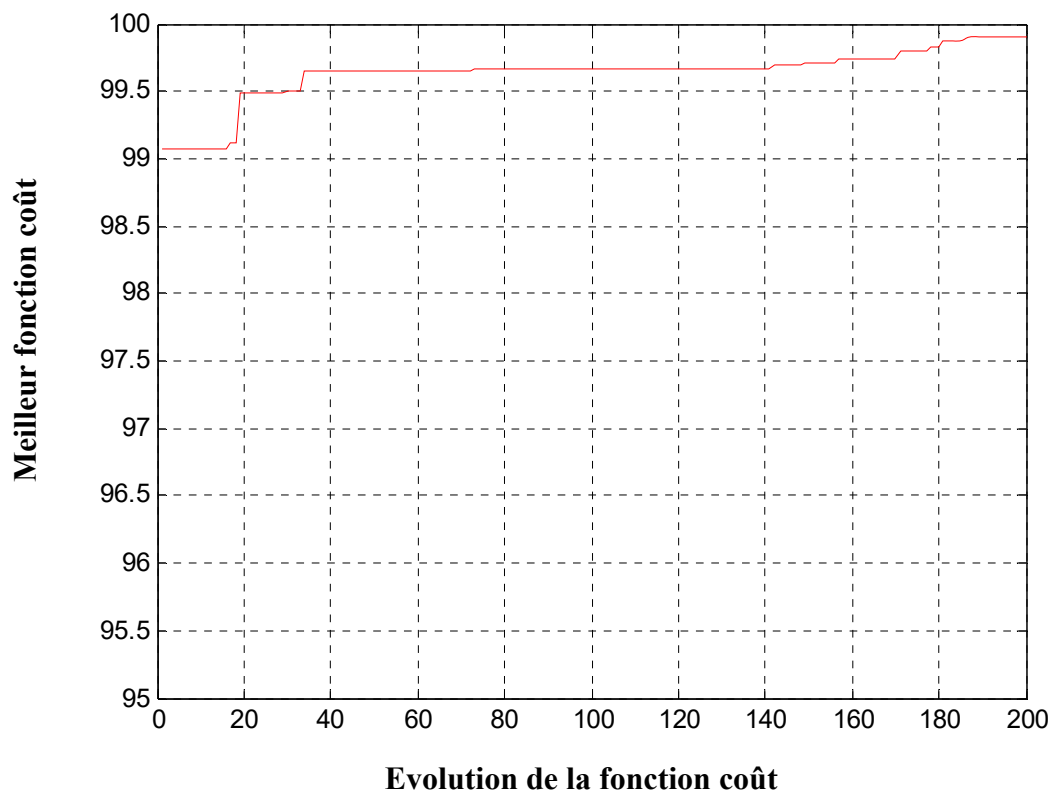


Figure III.11 : Evolution de la fonction coût associée.

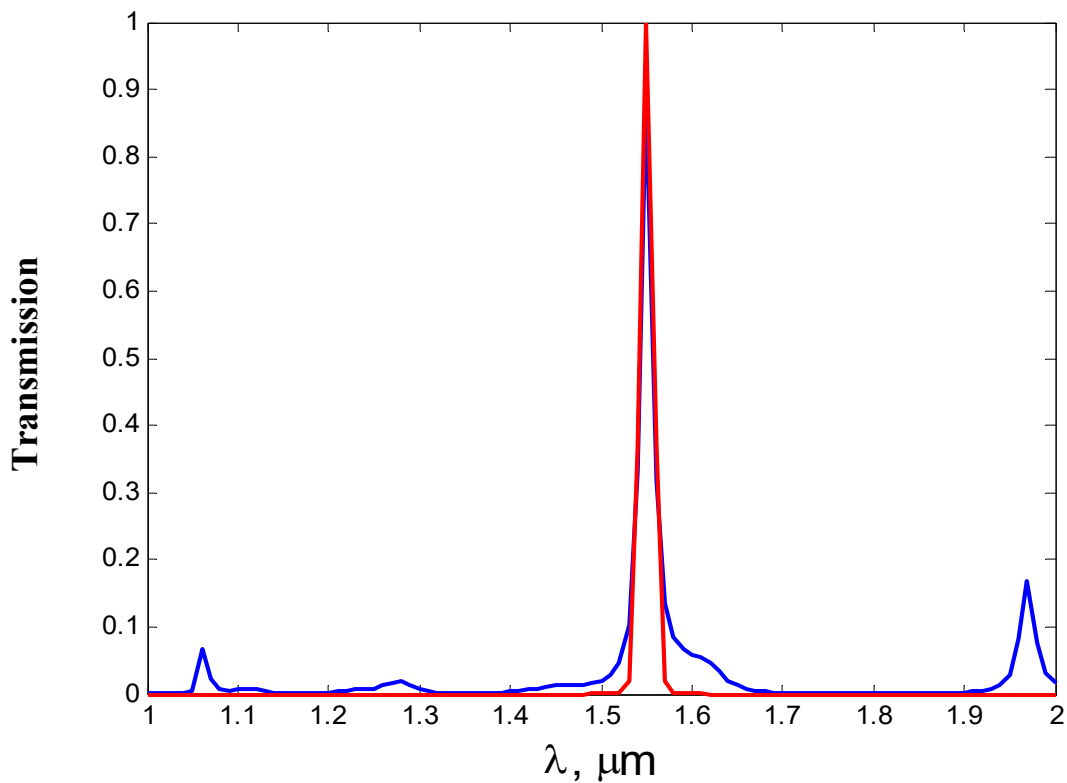
Les épaisseurs des couches qui forment notre filtre sélectif sont présentées dans le tableau suivant :

Épaisseurs de différentes couches $d_i$ [ $\mu\text{m}$ ]			
	RS [27]	GA [27]	GAPSO
$d_1$	0,57887826	0,69019608	0.6874
$d_2$	0,64262642	0,27843137	0.3400
$d_3$	0,40907413	0,2627451	0.3236
$d_4$	0,33863656	0,96470588	0.4017
$d_5$	0,12154845	0,36862745	0.2168
$d_6$	0,85964388	0,56470588	0.2733
$d_7$	0,62503995	0,64705882	0.4231
$d_8$	0,71272738	0,28235294	0.4108
$d_9$	0,82194557	0,19215686	0.6874

Tableau III. 3. Épaisseurs en  $\mu\text{m}$  des couches du filtre CP 1D pour  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .

**b. Deuxième optimisation**

Pour finir, nous poursuivons notre étude avec la dernière optimisation des filtres sélectifs en longueur d'onde, qui concernera à la même structure vue précédemment c'est-à-dire qui présente les mêmes paramètres de la fonction désirée. Cette fois-ci nous passons à la deuxième longueur d'onde  $1.55\mu\text{m}$ . Nous présentons les résultats de synthèse obtenus par le modèle hybride.

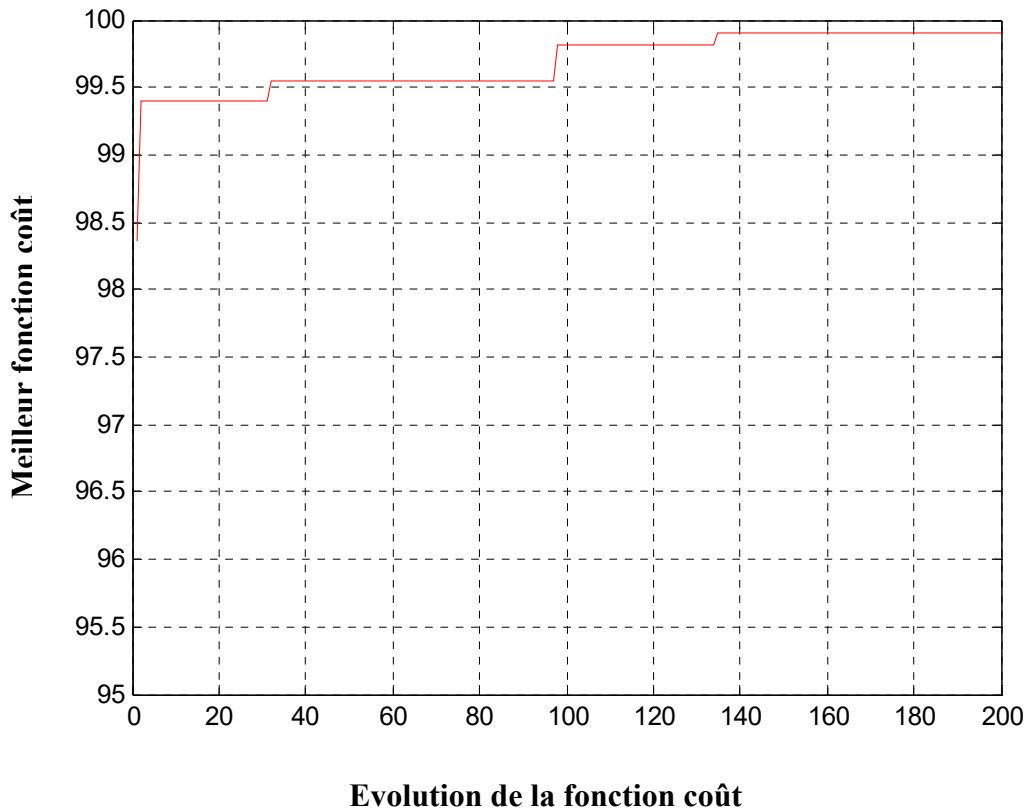


**Figure III.12 :** La transmission en fonction de la longueur d'onde

A cette longueur d'onde, les résultats obtenus par l'algorithme de modèle hybride fournissent une bonne réponse par rapport à la fonction désirée. Les harmoniques ne dépassant pas les 15% de la puissance de transmission à la longueur d'onde désirée.

Evidemment, l'étape suivante est nécessaire pour mieux comprendre l'efficacité de notre filtre sélectif, qui présente l'évolution de la fonction coût associée en fonction des différentes itérations illustré sur la figure III.13.





**Figure III.13** : Evolution de la fonction coût associée.

Les épaisseurs des couches qui forment notre filtre de type sélectif sont présentées dans le tableau suivant :

Épaisseurs de différentes couches $d_i$ [ $\mu\text{m}$ ]			
	RS [27]	GA [27]	GAPSO
$d_1$	0,57887826	0,69019608	0.3474
$d_2$	0,64262642	0,27843137	0.4031
$d_3$	0,40907413	0,2627451	0.9042
$d_4$	0,33863656	0,96470588	0.2242
$d_5$	0,12154845	0,36862745	0.0874
$d_6$	0,85964388	0,56470588	0.2625
$d_7$	0,62503995	0,64705882	0.2205
$d_8$	0,71272738	0,28235294	0.5560
$d_9$	0,82194557	0,19215686	0.4202

**Tableau III. 4** : Épaisseurs en  $\mu\text{m}$  des couches du filtre CP 1D pour une deuxième optimisation  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudiés l'optimisation des filtres sélectifs à base de cristaux photoniques unidimensionnels, déduits par l'introduction des défauts de périodicité causés par la rupture des épaisseurs optiques de chaque couche constituant notre filtre en question. En particulier, ceci engendre l'ouverture des bandes autorisées dans laquelle on peut transmettre une ou plusieurs longueurs d'onde.

Donc, grâce à la technique du modèle hybride, nous avons pu synthétiser notre filtre selon nos besoins. Les résultats des simulations ont été présentés et discutés.



## Conclusion Générale



## Conclusion générale

Ce travail de mémoire a pour objectif l'étude des paramètres géométriques à savoir la largeur de chaque couche du cristal photonique unidimensionnel sur le filtrage considérée comme étant une des fonctions clé qui a reçu une grande importance pour la conception des dispositifs pour l'optique intégrée. Sous le logiciel de calcul MATLAB nous avons simulé un filtre sélectif en longueur d'onde à base de CP à une dimension 1D.

L'étape cruciale concernera à l'optimisation de ce filtre et donc ces réponses spectrales en termes de transmission tout en utilisant un algorithme très employé dans plusieurs domaines. , il s'agit de l'algorithme génétique et la « PSO », et l'idée de la combinaison des deux méthodes à ce filtre sélectifs donne un meilleur optimum. Nous avons présentés durant le second chapitre de ce mémoire les méthodes de synthèse des filtres à base des CP-1D. Leurs principes de fonctionnement ont été également schématisés.

Le filtre étudié dans ce mémoire se composait d'une succession de deux couches diélectriques ayant deux permittivités différentes  $\epsilon_1=12,25$ , et  $\epsilon_2=1$ . Notre étude s'est donc orientée vers l'influence que peuvent avoir les dimensions des différentes couches qui forment ce filtre sur la réponse en sortie. Nous avons implémentés sur MATLAB, les deux méthodes qui nous ont montré que pour une fréquence  $f_a$  de travail exigée en sortie (une fonction désirée  $F_d(x)$ ) l'épaisseur des N couches qui forment le filtre sélectif en longueurs d'onde à base de CP 1D diffèrent pour une autre fréquence  $f_b$ .

Pour montrer la similitude des résultats, nous avons donc tracé pour une longueur d'onde donnée, et dans le même graphique les courbes fournies par les deux méthode et nous les avons comparés à la fonction désirée. Le résultat était presque à chaque fois fidèle à la fonction désirée  $F_d(x)$ . Nous avons aussi présenté l'évolution de la fonction coût associée entre la fonction désirée et celle obtenue par la technique l'AG et la « PSO ».

Ce travail nous a permis d'observer le comportement de mieux comprendre comment se comportent les cristaux photoniques unidimensionnel, à différentes fréquences et comment exploiter ces propriétés géométriques afin de concevoir des dispositifs de hautes performances et de très petite taille à l'échelle de la longueur d'onde.



# Bibliographie

- [1] E. Yablonovitch, « Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics », *Physical Review Letters*, vol. 58, no 20, 1987, p. 2059–2062.
- [2] S. John, « Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices », *Physical Review Letters*, vol. 58, no 23, 1987, p. 2486–2489.
- [3] László P. Biró, Zsolt Bálint, Zsófia Vértesy, Krisztián Kertész, Géza I. Márk, Virginie Lousse et Jean-Pol Vigneron, « Living Photonic Crystals: Nanostructure of the Scales of Cyanophrys Remus Butterfly », *PNanopages*, vol. 1, no 2, 2006, p. 195-208.
- [4] ABRI née BADAOUI Hadjira, « Etude et Conception des Micro-composants à Base des Cristaux Photoniques Bidimensionnels », Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Décembre 2012.
- [5] Soumia MASSAOUDI, « Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photonique bidimensionnels en micro-onde : application à l'ultraréfraction », Thèse de Doctorat, Université de Paris UFR scientifique d'Orsay. Le 25 Février 2005.
- [6] J. B. Pendry, Photonic band structures. *Journal of modern optics* 41, p. 209 (1994).
- [7] M. Grillet, cristaux photoniques et intégration photonique. Thèse de doctorat de l'université de Lyon (2003).
- [8] C.J.M. Smith et al, Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal. *Applied physics letters* (2001).
- [9] C. Kittel, "Physique de L'état Solide", 7eme edn. (Dunod), Paris, (2005).
- [10] Yannick MERLE, « Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat de l'université de LIMOGES. le 20 novembre 2003.
- [11] <http://www.elec.gla.ac.uk/areynolds/SoftwareMain.htm>.
- [12] BENAÏSSA Fatima, « Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques », mémoire de Magister en Physique. Université de Tlemcen. Juin 2012.
- [13] D. Maystre, Étude électromagnétique des écarts de bandes photoniques, Article de *Journal de la société optique d'Amérique (Optique pure et appliquée)* p 975 (1994).
- [14] M. Nevière, E. Popov et R. Reinisch, Electromagnetic resonances in linear and nonlinear optics: Phenomenological study of grating behavior through the poles and zeros of the scattering operator. *Journal de la société optique d'Amérique*, A 12 p 513 (1995).
- [15] C. CHEYPE « Etude et utilisation des propriétés des matériaux BIP à défaut pour la conception d'antennes » Thèse de doctorat n°34-2001, Université de Limoges, 25 septembre 2001.

- [16] Jean-Jacques BONNEFOIS « MODELISATION D'EFFETS NON LINEAIRES DANS LES CRISTAUX PHOTONIQUES, APPLICATION A LA LIMITATION OPTIQUE ».Thèse de doctorat de l'université de Paris ,Nantre.le 30 novembre 2006.
- [17] Benoît LOMBARDET, «Étude et réalisation des cristaux photoniques pour l'optique intégrées», Thèse de doctorat n°3254, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [18] Yassine Benachour «< Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire>> Université de Paris Sud 11, avril 2008.
- [19] J.M.LOURTIOZ, D.MAYSTER, H.BENISTY, V.BERGER, J.M.GRERARD,A. TECHELNKOV «les cristaux photonique ou la lumière en cage», GET et lavoisier, Paris,2003.
- [20] M. Qiu, M. Mulot, M. Swillo, S. Anand, B. Jaskorzynska, A. Karlsson, M. Kamp, and A. Forchel, "Photonic crystal optical filter based on contra-directional waveguide coupling," Appl. Phys. Lett., vol. 83, pp. 5121-5123, 2003
- [21] S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch, C. J. Smith, T. F. Krauss, and R. Houdré, "Coupled-mode theory and propagation losses in photonic crystal waveguides," Optics Express, vol. 11, pp. 1490-1496, 2003.
- [22] Frédéric LACOUR, «PROPAGATION DE LA LUMIÈRE DANS LES NANOSTRUCTURES ET CRISTAUX PHOTONIQUES PLANAIRES ASSOCIÉS AUX GUIDES D'ONDE :FABRICATION ET CARACTÉRISATION», Thèse de doctorat, Université de L'U.F.R. DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ, 22 Février 2005.
- [23] J.H.Holland "Adaptation in natural and artificial system" University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [24] HAJJI Omessad,«Contribution au développement de méthode d'optimisation stochastique, application a la conception des dispositifs électrotechniques ». Thèse de doctorat de l'université de Lille,le 03 Décembre 2003.
- [25] Z. Michalewicz"Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs" Springer-Verlag, 1994
- [26] Hicham CHAKER, " Conception et Optimisation de Réseaux D'antennes Imprimées à Faisceaux multiples Application des réseaux de Neurones ".Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Mars 2012.

- [27] BENDIABDELAH Mohammed Yousef. « Optimisation des filtres sélectifs en longueur d'onde à base des cristaux photonique unidimensionnel » Master en télécommunication, Université de Tlemcen, Juin 2013.



## Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace, Ce travail de mémoire constitue une contribution sur les cristaux photoniques planaires unidimensionnels. Nous avons étudié le phénomène d'ouverture de bandes interdites et les différents types de cristaux photoniques. Nous nous sommes essayé de définir les différents types de cristaux photoniques et plus précisément les cristaux unidimensionnels.

En effet, notre travail a présenté un intérêt très particulier sur la capacité de filtrage des cristaux photoniques unidimensionnels planaires d'une longueur finie en intervenant sur la géométrie des couches des semi-conducteurs qui les composent afin que le filtre sélectif à base de CP-1D puisse résonner à une fréquence exigée par un cahier des charges. Pour se faire, nous avons utilisé un modèle hybride qui combine la « PSO », ainsi que « l'algorithme génétique » implémentés sous le logiciel de calcul MATLAB, pour pouvoir intervenir sur les dimensions des différentes couches qui forment le filtre sélectif. Grâce à ce modèle, nous avons appris que changer l'épaisseur des couches qui composent le filtre induisait à changer la fréquence de résonance de ce dernier, mais aussi que pour une fréquence donnée, les résultats obtenus montrent la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de modèle hybride.

**Mots clés:** Cristaux photoniques unidimensionnels, algorithme génétique, PSO, filtres sélectifs en longueur d'ondes, optimisation.

## Abstract

Photonic crystals are structures whose dielectric index varies periodically in one or more directions of space. This memory work constitutes a contribution on the one-dimensional planar photonic crystals. We will study the phenomenon of the opening of forbidden bands and the different types of photonic crystals. We tried to define the photonic crystals with different type and more precisely the unidimensional crystals. Indeed, our work has shown a very particular interest in the filtering capacity of planar one-dimensional photonic crystals of finite length by intervening on the geometry of the layers of the semiconductors that compose them so that the selective filter based on CP- 1D can resonate at a frequency required by a specification. In order to do this, we used a hybrid model that combines the particle swarm with the concept of particle genetic algorithms with breeding and subpopulations, namely the "PSO" and the "genetic algorithm" implemented Under the computer software MATLAB, to be able to intervene on the dimensions of the various layers which form the selective filter. In this model, we learned that changing the thickness of the layers composing the filter induces to change the resonant frequency of the filter, but also that for a given frequency, the results obtained show the feasibility and the efficiency of the filter, Use hybrid model.

**Keywords:** one-dimensional photonic crystals, genetic algorithm, PSO, selective wavelength filters, optimization.

## ملخص

البلورات الضوئية هي هياكل الذين عازلة المؤشر يتغير دوريا في واحدة أو أكثر الاتجاهات المكانية، هذه الذاكرة العاملة هي مساهمة في البلورات الضوئية ذات بعد واحد مستو. وسوف ندرس هذه الظاهرة افتتاح الشريط المحظورة وأنواع مختلفة من البلورات الضوئية. حاولنا تحديد البلورات الضوئية مع نوع مختلف وبلورات أكثر الأبعاد بدق في الواقع، قدمت عملنا مصلحة خاصة جدا في القدرة تصفية من البلورات الضوئية ذات بعد واحد من طول محدود مستو من خلال العمل يمكن أن يتردد صداها على تردد المطلوبة من D مرشح الانتقائي القائم CP- 1 على هندسة طبقات من أشباه الموصلات تتكون منها بحيث قبل المواصفات. لهذا، استخدمنا النموذج الهجين الذي يجمع بين سرب الجسيمات مع مفهوم الخوارزميات الجينية مع الماشية البرمجيات حساب من أجل التدخل على أبعاد مختلف الطبقات التي MATLAB و "الخوارزمية الجينية" تنفذ "PSO" والقطعان، وهي تشكل مرشح انتقائية. مع هذا النموذج تعلمنا أن تغيير سماكة الطبقات التي تشكل مرشح يسببها لتغييره تردد صدئ، ولكن أيضا أن لتردد معين، وأظهرت النتائج جدوى وفعالية باستخدام نموذج هجين.