

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT
D'ELECTRONIQUE

N° :.....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : MICROELECTRONIQUE

MÉMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE

Par :

ZIOUCHE Iman

CHAANBI Chams Alassile

Intitulé

*Conception et simulation avancées des capteurs a cristaux
photoniques pour la détection biologique*

Soutenu devant le jury composé de :

Dr	A. Harhouz	Université M'SILA	Présidente
Dr	F. Kebaili	Université M'SILA	Encadrant
Prof	A. Hocini	Université M'SILA	Co Encadrant
Dr	R. Chaabane	Université M'SILA	Examinatrice

Année universitaire : 2023. /2024.

إهداء

(وَكَانَ فَضْلُ اللَّهِ عَلَيْكَ عَظِيمًا) النساء: 113

أهدي ثمرة جهدي إلى أعز الناس عندي

• إلى من علمني الحب والعطاء بدون انتظار، إلى من أحمل اسمه بكل افتخار "والدي عزيزي"

مهما كتبتُ به شعراً فإنَّ أبي في.. القدرِ فوقَ الذي في الشعرِ قد كُتبا

• إلى من أعادت ترتيب ضعفي إلى قوة وجعلتني جيشاً من النساء إلى من علمتني أن أكون شامخة الرأس دون انحناء "أمي الحبيبة"

• إلى سندي الثابت إلى كتفي اليمين إلى أعز ما أنجبت لي الدنيا إلى إسماعيل ويوسف حفظكما الله ورعاكما

وما الاخ إلا نعمة تعجز الكلمات أن توفي حقها

• إلى آخر العنقود رؤيا لجين إلى من هي في القلب وتين

• إلى كل شخص من أقاربي كان يتمنى أن يراني أصعد قمة النجاح وإلى كل من تذكرني يوماً بدعائه

• إلى الذين جمعني بهم الحياة وتبادلت معهم أجمل الذكريات إلى من قاسمتني مشقة الطريق زميلتي شمس الأصيل وإلى كل أصدقائي وصديقاتي وإلى رفيقات الروح دمتن لي حبا.. إيمان، شيماء، بشرى، أسماء، نسرين، صابرين

• إلى كل من علمني حرفاً إلى كل أساتذتي الذين شاركوني رحلة العلم

• إلى كل من نسيتهم أقلامنا ولم تنسهم قلوبنا

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل المتواضع راجية من المولى عز وجل القبول والنجاح

زيوش إيمان

إهداء

(واخر دعواهم ان الحمد لله رب العالمين)

الحمد لله عند البدء وعند الختام فما تنهى درب ولا ختم جهد ولا تم سعي الا بفضلته

"من قال انا لها نالها"

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون.

لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق كان محفوفا بالتسهيلات لكني فعلتها ونلتها

اهدي وبكل حب بحث تخرجي

الى نفسي القوية التي تحملت كل العثرات واكملت رغم الصعوبات... الى سندي بعد الله الى من دعمني
بلا حدود واعطاني بلا مقابل "ابي"

الى من كان دعائها سر نجاحي الى التي كانت لي نورا في عتمتي "أمي"

أهديكم هذا الإنجاز الذي لولا تضحياتكم لما تحقق

الى اخوتي واخواتي (سهام خديجة بثينة) محبة ووفاء أنتم سندي وحزام ظهري وكياني. حفظكم الله لي
ورعاكم

الى الكتاكيت (تاج الدين سند طه بلسم عبد الودود ابرار قطوف المعتصم بالله معاذ والقادمون حفظكم
الله ووفقكم

الى رفيقه السنين الى من شاركتني الطريق دون كلل او ملل "ايمان" وفقك الله ورزقك السعادة

الى صديقه العمر الى اختي الصغيرة التي لم تنجبها امي "اماني" وفقك الله ورزقك المراتب العلى

شكرا لكل من علمني وكان عوننا وسندا في كل مشوار دراسي من أساتذة واصدقاء.

إلى كل من نسيتهم أقلامنا ولم تنسهم قلوبنا

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل المتواضع راجية من المولى عز وجل القبول والنجاح

شمس الاصيل

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude envers Dieu le Tout-Puissant pour la santé, la force et le courage qu'Il nous a accordés tout au long de notre parcours.

*Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements et notre reconnaissance envers notre encadrante, **Dr. Farida Kebaili**. Nous lui sommes reconnaissants pour ses conseils avisés, ses précieux commentaires qui nous ont aidés à surmonter les difficultés et à progresser dans cette étude. Et bien sûr, nous n'oublions pas notre Co encadreur, l'honorable Professeur **A. Hocini**, pour son aide et ses encouragements.*

Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance aux membres du jury d'avoir accepté de présider et d'examiner ce travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants tout au long de nos années d'études. Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé :

Dans cette étude, nous concevons un biocapteur photonique en utilisant le logiciel Rsoft. Pour détecter les cellules cancéreuses, constitué d'une cavité et deux guides d'ondes. Le mécanisme de détection de ce capteur repose sur la variation de l'indice de réfraction de l'analyte, entraînant un décalage dans le spectre de transmission. Dans cette recherche, le pic de défaut résonant se déplace de 1562 à 1599 nm lorsque l'indice de réfraction de la couche de cellules cancéreuses varie de 1,350 à 1,401. Ainsi, le biocapteur proposé présente une haute sensibilité ($S = 711.9$ nm/RIU) pour des indices de réfraction allant de 1,350 (absence de cellules cancéreuses) à 1,401 (cellules cancéreuses MCF-7). Le facteur de qualité (Q) élevé est donc amélioré, rendant le détecteur plus sensible aux légères variations de l'indice.

Mots clés : Sensibilité, Cristal photonique, Cellule cancéreuse, Mode de défaut.

Abstract:

In this study, we design a photonic biosensor using Rsoft software. To detect cancer cells, the sensor is composed of a cavity and two waveguides. The detection mechanism of this sensor is based on the variation in the refractive index of the analyte, causing a shift in the transmission spectrum. In this research, the resonant defect peak shifts from 1562 to 1599 nm as the refractive index of the cancer cell layer varies from 1.350 to 1.401. Thus, the proposed biosensor exhibits high sensitivity ($S = 711.9$ nm/RIU) for refractive indices ranging from 1.350 (no cancer cells) to 1.401 (MCF-7 cancer cells). The high quality factor (Q) is thereby enhanced, making the detector more sensitive to slight variations in the index.

Key words: Sensitivity, Photonic crystal, Cancer cell, Defect mode.

المخلص:

في هذه الدراسة، قمنا بتصميم جهاز استشعار حيوي ضوئي باستخدام برنامج Rsoft. للكشف عن الخلايا السرطانية، ويتكون من تجويف ومرشدين موجيين. تعتمد آلية الكشف لهذا المستشعر على الاختلاف في معامل انكسار المادة التحليلية، مما يؤدي إلى تحول في طيف الإرسال. في هذا البحث، تنتقل ذروة عيب الرنين من 1562 إلى 1599 نانومتر عندما يتراوح معامل انكسار طبقة الخلايا السرطانية من 1.350 إلى 1.401. وبالتالي، فإن جهاز الاستشعار البيولوجي المقترح يُظهر حساسية عالية (711.9 نانومتر/RIU) لمؤشرات الانكسار التي تتراوح من 1.350 (غياب الخلايا السرطانية) إلى 1.401 (الخلايا السرطانية MCF-7). وبالتالي تم تحسين عامل الجودة العالية (Q)، مما يجعل الكاشف أكثر حساسية للتغيرات الطفيفة في المؤشر.

الكلمات المفتاحية: الحساسية، البلورة الضوئية، الخلية السرطانية، وضع العيب.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	
Introduction générale :	1
CHAPITRE 1 : Les cristaux Photoniques	3
1. Introduction :	4
2. Historique de cristaux photonique :	4
3. Définition de cristaux photonique :	4
4. Les différents types des cristaux photonique :	5
4.1. Structure périodique unidimensionnelle 1D :	6
4.2. Structure périodique bidimensionnelle 2D :	6
4.2.1. Le réseau carré :	8
4.2.2. Réseau triangulaire :	8
4.2.3. Le réseau hexagonal :	9
4.3. Cristaux photoniques tridimensionnels 3D :	10
4.3.1. Yablonovitch :	11
4.3.2. Structure tas de bois :	11
5. Caractéristiques géométriques et physiques des cristaux photoniques :	12
5.1. Symétrie :	12
5.2. Paramètre du réseau :	12
5.3. Le facteur de remplissage f :	12
5.4. Le contraste d'indice Δn :	13
5.5. La période :	13
6. Bande interdite photonique :	13
6.1. Zone de Brillouin :	14
6.2. Diagramme de bandes :	14
7. Défaut dans un cristal photonique :	16
7.1. Les défauts ponctuels :	16
7.2. Les Défauts étendus :	17
7.2.1. Dimensions des motifs élémentaires :	17
7.2.2. Distance entre motifs élémentaires :	17
7.2.3. VALEUR DE LA PERMITTIVITE RELATIVE DES MOTIFS ELEMENTAIRES :	18
7.2.4. Défaut par vacuité :	18
7.3. Cavités :	19
7.4. Guides d'onde à cristaux photoniques :	20
8. Application des cristaux photoniques :	20
8.1. Diviseur de puissance :	20
8.2. Filtre et Multiplexeur :	21
8.3. Les fibres optiques :	22

8.4. Capteur :	23
9. Conclusion :	24
CHAPITRE2 : Généralité sur les capteurs	25
1.INTRODUCTION :	26
2. Généralité sur les capteurs :	26
2.1. Définition de capteur :	26
2.2. Principe de fonctionnement :	27
2.3. Les différents Types de grandeur physique	28
2.4. Chaîne de mesure :	28
2.5. Caractéristiques des capteurs :	29
2.5.1. Etalonnage :	29
2.5.2. Domaine de linéarité :	29
2.5.3. Sensibilité(s) :	30
2.5.4. Temps de réponse ou rapidité :	31
2.5.5. Précision :	31
2.5.6. Fidélité :	31
2.5.7. Répétabilité :	32
2.5.8. Sélectivité :	32
2.5.9. Le facteur de qualité (Q) :	32
2.6. Grandeurs d'influence :	33
2.7. Classification des capteurs :	34
2.7.1. Capteurs passifs :	34
2.7.2. Capteurs actifs :	35
2.8. Structure d'un capteur :	36
2.8.1. Le corps d'épreuve :	36
2.8.2. Transducteur (le capteur) :	37
2.8.3. Le boîtier :	37
3. Les biocapteurs :	37
3.1. Définition :	37
3.2. Caractéristiques des biocapteurs :	
3.2.1. Sélectivité :	
3.2.2. Sensibilité :	
3.2.3. Reproductibilité :	
3.2.4. Exactitude :	
3.2.5. Limite de détection :	38
3.3. Pluridisciplinarité du domaine des biocapteurs :	38
3.4. CLASSIFICATION DES BIOCAPTEURS	39
4. Biocapteurs optiques :	40
5. Capteurs à fibres optiques	41

6. Capteurs à cristaux photoniques :	42
7. Couplage guide –cavité	44
8. Conclusion :	45
<i>CHAPITRE3 CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA DETECTION DES CELLULES CANCERUSES</i>	46
1. Introduction :	47
2. Représentation du logiciel R SOFT CAD :	47
2.1. Environnement de CAD :	47
: 2.2. Le simulateur « BandSOLVE » :	47
2.3. Le simulateur « FULL WAVE » :	48
2.4. Fenêtre de programme de CAD :)	48
3. Générer la structure du réseau :	49
3.1. Structure initial :	49
3.2. Etude des bandes interdites :	52
3.3. Mécanisme de détection des cellules cancéreuses :	53
3.4. Structure proposée :	54
3.5. Etude de la réponse de structure proposée :	55
3.6. Détection du cancer :	55
4. l'Optimisation :	59
4.1. Structure finale :	63
4.2. Détection du cancer :	63
5. Conclusion :	66
<i>Conclusion Général</i>	67

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Cristaux photoniques naturels présentés par : a) des opales, b) des papillons Morpho	5
Figure I.2. Représentation schématique des cristaux photoniques unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D)	6
Figure I.3. Structures bidimensionnelle.....	6
Figure I.4. Structure périodique 2D connectée	7
Figure I.5. Structure périodique 2D déconnectée	7
Figure I.6. Le réseau carré	8
Figure I.7. Le réseau triangulaire.....	9
Figure I.8. Structure graphite.....	10
Figure I.9 Structure Nitrure de Bore.....	10
Figure I.10 Structure « La Yablonovitch »	11
Figure I.11. Structure « tas de bois »	12
Figure I.12 périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.....	13
Figure I.13 Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) triangulaire et (b) carré.....	14
Figure I.14 Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D.....	15
Figure I.15 Diagramme de bande d'un BIP 2D en polarisation TM et TE.....	16
Figure I.16 (a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions.....	17
Figure I.17 Défaut de dimension du motif élémentaire.....	17
Figure I.18 Défaut de distance entre motifs élémentaires.....	18
Figure I.19 Défaut sur la permittivité relative ϵ	18
Figure I.20 Défaut par vacuité (C'est le défaut le plus utilisé)	19
Figure I.21 Cavités sur membrane suspendue, (a)cavité triangulaire (b)cavité hexagonale, Entourées par un cristal photonique triangulaire.	19

Figure I.22. Différents composants à base de défauts linéaires, a) guide droit, b) virage à 120° et c) jonction Y	20
Figure I.23 Le diviseur à cristaux photoniques en Y (1x2) [18]	21
Figure I.24: Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde)	22
Figure I.25: Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent se coupler d'un guide à l'autre.....	22
Figure I.26: Exemple de fibre à cristal photonique.....	23
Figure II.01: Définition d'un capteur.....	27
Figure II.2 : constitution d'une chaîne de mesure classique.....	29
Figure II.3: Courbe d'étalonnage d'un capteur.....	29
Figure II.4: Réponse non linéaire d'un capteur à semi-conducteur.....	30
Figure II.5: Fidélité d'un capteur.....	32
Figure II.6: Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne d'un mode dans la cavité centrée à la fréquence ω_0	33
Figure II.7: Schéma général d'un biocapteur.....	37
Figure II.8: Pluridisciplinarité du domaine des biocapteurs.....	39
Figure II.9: Classification schématique des biocapteurs.....	40
Figure II.10: (a) Représentation schématique d'un interféromètre Mach-Zender (b) Représentation schématique d'un interféromètre de Young.....	41
Figure II.11: Analyse des cristaux photoniques en silicium destinés à la détection biologique.....	43
Figure II 12 : Dispositif associant guide et cavité d'un même cristal photonique Bidimensionnel.....	44
Figure III.1: La fenêtre de programme de R Soft CAD, montrant la barre de menus au-dessus, les barres des outils supérieurs et gauches, et la ligne d'état au fond.....	49
Figure III.2: (a) présentation du réseau. (b) Paramètres de création de la rangée XZ.....	50
Figure. III. 3 : (a) Arrangements Global, (b) Le tableau de l'éditeur des symboles.....	51

Figure. III.4: Diagramme de bande interdite photonique en (TE et TM) de La structure d'un cristal photonique 2D à réseau triangulaire.....	52
Figure III.5: La structure proposée.....	54
Figure III.6 la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D(n=1.35).....	55
Figure III.7 : Spectre de transmission obtenu pour différentes cellules saines et Cancéreuses (a)mode1,(b)mode2.....	56
Figure III.8: le décalage de la longueur d'onde résonnante en fonction de l'indice de réfraction.....	57
Figure III.9 : courbes des sensibilités SRI en fonction de RI.....	59
Figure.III.10 : structure final	63
Figure III.11: Spectre de transmission obtenu pour différentes cellules saines et Cancéreuses. (a)mod1,(b)mod2.....	64
Figure III.12 : courbes des sensibilités SRI en fonction de RI.....	65

Liste des Tableaux

Tableau II.1: Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs.....	35
Tableau II.2: Capteurs actifs : principes physiques de base.....	36
Tableau. III. 1 : Données d'indice de réfraction pour les cellules saines et cancéreuses	53
Tableau. III.2: la variation de la sensibilité et le facteur de qualité de structure proposée	58
Tableau. III.3 : la Sensibilités en fonction du changement de RC.	Error! Bookmark not defined.
Tableau. III.4 : Sensibilités en fonction du changement de R1.....	61
Tableau. III.5 : Sensibilités en fonction du changement de R2.....	62
Tableau. III.6: la variation de la sensibilité et le facteur de qualité de structure final pour les cellules cancéreuses.....	65

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction générale :

Le cancer représente un ensemble diversifié de maladies pouvant affecter différentes parties du corps humain. Il se caractérise par une multiplication rapide et anormale de cellules qui outrepassent leurs limites habituelles et peuvent envahir les organes voisins. En 2018, le cancer était la deuxième cause principale de mortalité à l'échelle mondiale, étant responsable d'environ 9,6 millions de décès [1]. Le développement d'un capteur de détection précis et rapide, exploitant les propriétés optiques uniques des cellules cancéreuses comparées aux cellules sanguines non infectées, peut contribuer à ralentir la propagation rapide du cancer.

Il est également bien connu que les individus développent des maladies pour deux motifs, soit en raison de virus, soit en raison d'un défaut organique, tel que le processus de division cellulaires, qui est responsable de la maladie liée au cancer.

Le diagnostic précis et rapide est nécessaire afin de simplifier les méthodes de traitement. Les approches de diagnostic les plus répandues sont des méthodes classiques, qui impliquent des analyses en laboratoire qui nécessitent du temps, ou des méthodes modernes comme les biocapteurs. La lumière interagit avec les cellules et fournit des données précieuses sur les modifications des propriétés optiques de ces cellules. L'indice de réfraction de la cellule cancéreuse est plus élevé que celui de la cellule normale en raison de la présence de protéines dans la cellule.

Dernièrement, une nouvelle catégorie de détecteurs biochimiques a été théoriquement et expérimentalement identifiée : il s'agit de biocapteurs à cristaux photoniques, qui utilisent la lumière et ses variations en fonction de la nature de la matière à analyser[2], il demeurent très populaire en raison de leurs performances exceptionnelles[3]

Les biocapteurs à cristaux photoniques sont un axe prometteur en tant que biocapteurs optiques en raison de leur micro-structuration périodique qui permet de retenir (ou de piéger) les photons et de déplacer les résonances optiques causées par la présence des molécules à détecter, de leur extrême miniaturisation et de leur grande sensibilité.

Introduction general

Le fonctionnement des biocapteurs optiques repose sur l'absorption de la lumière et la détection des variations d'indice de réfraction qui l'accompagne. La mesure du signal comprend l'intensité de la lumière, son spectre en longueur d'onde et sa polarisation.

Notre étude, vise à explorer la conception d'un nouveau biocapteur à cristaux photoniques, caractérisé par sa sensibilité, sa rapidité et sa capacité de détection sélective des faibles concentrations de molécules. Ce dispositif repose sur l'utilisation d'un guide d'onde couplé à un résonateur de Fano, spécifiquement conçu pour la détection des cellules cancéreuses. En combinant ces éléments, nous cherchons à élaborer un outil de détection hautement performant, capable de discriminer efficacement les cellules cancéreuses même à des concentrations très faibles.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous aborderons les bases des cristaux photoniques, en explorant leurs différentes catégories, leurs propriétés optiques distinctives et les caractéristiques spécifiques de chaque type.

Le deuxième chapitre sera entièrement dédié à la notion de capteurs. Effectivement, dans ce chapitre, nous allons présenter les divers types de capteurs disponibles. Ensuite, nous aborderons les capteurs et les biocapteurs à cristaux photoniques ; leur fonctionnement et leurs utilisations.

Au cours du troisième chapitre, nous allons tout d'abord présenter l'outil de simulation RSoft ainsi que ses modules Fullwave et BandSOLVE. Ensuite, nous exposerons les résultats de notre design et de notre conception. Nous nous concentrerons sur l'analyse et la création d'un capteur biomédical à indice de réfraction (RI) fonctionnant avec des cristaux photoniques. Notre objectif sera d'optimiser la sensibilité et le facteur de qualité d'une structure optimale basée sur le couplage guide-cavité, en examinant l'impact de différentes modifications apportées au capteur biomédical. Finalement, nous conclurons notre travail en établissant une conclusion générale.

CHAPITRE 1

Les cristaux

Photoniques

1.Introduction :

Les cristaux photoniques (CP), également appelés matériaux à Bande Interdite Photonique(BIP), se caractérisent par une variation continue du constant diélectrique à l'échelle de la longueur d'onde, que ce soit dans une seule direction ou dans plusieurs directions de l'espace (BIP 1D, 2D et 3D).

Le premier chapitre vise à présenter de manière synthétique les concepts fondamentaux des cristaux photoniques et des cavités à cristaux photoniques. Dans cette optique, nous commencerons par une vue d'ensemble des cristaux photoniques, en mettant en lumière la bande interdite photonique, les divers types de cristaux photoniques, ainsi que les différentes stratégies d'atténuation des défauts dans ces structures. De plus, nous examinerons quelques applications des cristaux photoniques dans les domaines de l'optique et des télécommunications.

2. Historique de cristaux photonique :

Dans le milieu des années 90, les avancées en nano- technologies ont rendu possible l'élaboration de matériaux artificiels dont le comportement vis-à-vis des ondes électromagnétiques est tout à fait surprenant et, pour cette raison, ils sont appelés parfois cristaux photoniques. Depuis lors, ces matériaux intéressent beaucoup la communauté scientifique, notamment dans le domaine de l'optique. La première proposition de « cristaux photoniques » remonte à 1987[4,5]. Le cristal photonique initial a été fabriqué en 1991[6].

3. Définition de cristaux photonique :

Les cristaux photoniques se distinguent par une variation périodique de l'indice de réfraction dans une deux ou trois dimensions, induisant ainsi la propagation de la lumière à travers le cristal. Ce phénomène périodique est analogue à l'effet du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal, phénomène connu sous le nom de photonique. Tout comme il existe des bandes d'énergie autorisées et des bandes interdites pour les électrons, il en va de même pour les photons, avec des bandes photoniques autorisées et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique représente un mode de propagation de la lumière à travers le cristal photonique, tandis qu'une bande photonique interdite correspond à un intervalle d'énergie où la lumière est empêchée de se propager dans certaines directions du cristal photonique. Les

cristaux photoniques permettent de contrôler la diffusion de la lumière, offrant ainsi un moyen de réguler sa propagation.

Ces cristaux photoniques se trouvent naturellement dans diverses structures, qu'elles soient minérales ou biologiques. Par exemple, les opales, constituées de sphères de silice hydratée, présentent une structure de cristal photonique responsable des incandescences colorées dues à la diffraction de la lumière. Les motifs périodiques en trois dimensions sont également responsables de la coloration observée chez de nombreuses espèces animales et végétales. Des exemples emblématiques incluent la couleur bleue des ailes de papillons morpho et des feuilles de certaines variétés de Sélaginelle [7]. De même, les plumes des paons arborent des teintes variées telles que le bleu, le vert, le jaune et le marron, résultant de la diffraction par des cristaux photoniques 2D présentant différents nombres et longueurs de mailles [8].



Figure I.1. Cristaux photoniques naturels présentés par : **a)** des opales, **b)** des papillons

Morpho

4. Les différents types des cristaux photoniques :

Le type de cristal photonique est déterminé par le nombre de directions de la périodicité de l'indice de réfraction (IR) présente une périodicité. Par conséquent, on distingue les trois types suivants [9].

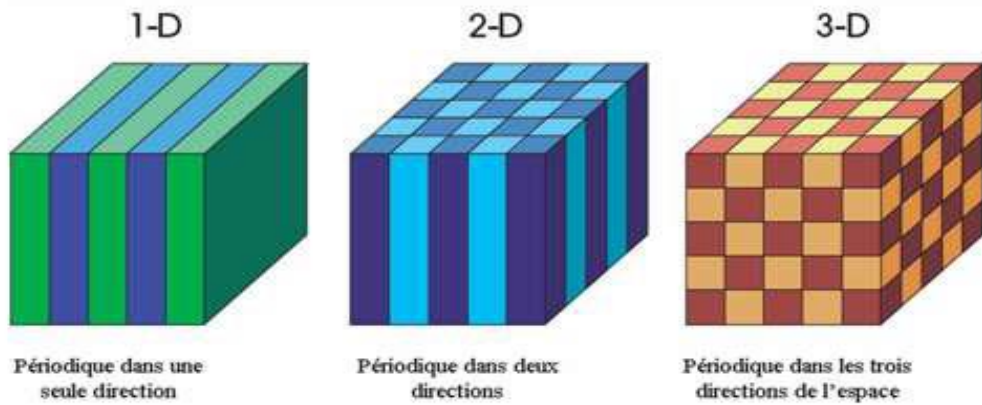


Figure I.2. Représentation schématique des cristaux photoniques unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D)

4.1. Structure périodique unidimensionnelle 1D :

On appelle généralement ces structures le réseau de Bragg [10]. En général, elles sont effectuées en empilant des couches ayant un indice de réfraction différent et une épaisseur optique de $\lambda/4$, λ étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau est orienté. Il est nécessaire d'empêcher la propagation des ondes électromagnétiques dans un environnement normal. De nombreuses applications ont démontré l'efficacité des réseaux de Bragg : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeur [11]

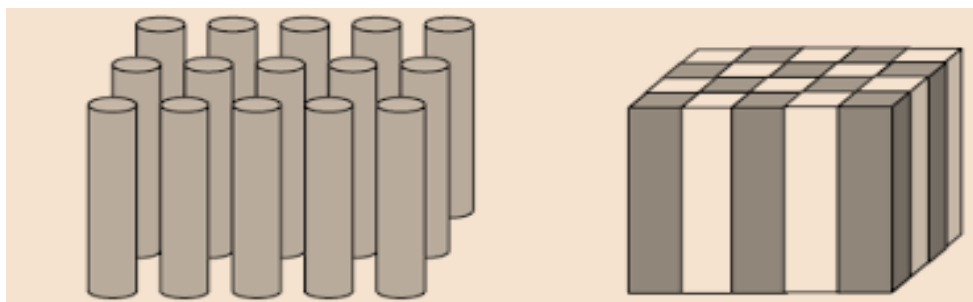


Figure I.3. Structures bidimensionnelles.

4.2. Structure périodique bidimensionnelle 2D :

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure dont la permittivité diélectrique est régulièrement modulée dans deux directions de l'espace et invariable dans la troisième. De nombreuses recherches ont été menées sur les structures bidimensionnelles, qui sont plus simples à construire et peuvent présenter des imperfections photoniques complètes sur un plan.

CHAPITRE 1: Les cristaux Photoniques

Les cristaux photoniques en deux dimensions présentent un intérêt considérable par rapport aux cristaux photoniques en une seule dimension en ce qui concerne le contrôle de la lumière. La bande interdite photonique des cristaux photoniques 2D peut être observée dans toutes les directions de propagation situées dans le plan de périodicité, ce qui semble permettre un contrôle spatial plus efficace des photons dans ce plan. Par conséquent, ces derniers permettent une plus grande flexibilité en ce qui concerne le confinement optique, il existe deux types de ces structures périodiques 2D :

- Les structures dites « connectées » « Figure I.4 » : les motifs élémentaires sont D'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique [12]

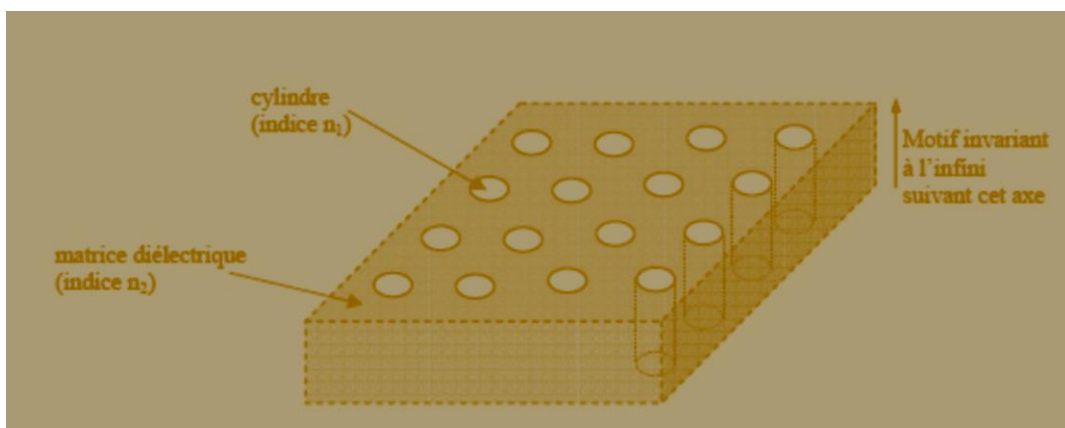


Figure I.4. Structure périodique 2D connectée [13]

Les structures dites « déconnectées » « Figure I.5 » : le motif élémentaire a un indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques alignées périodiquement dans l'air [12]

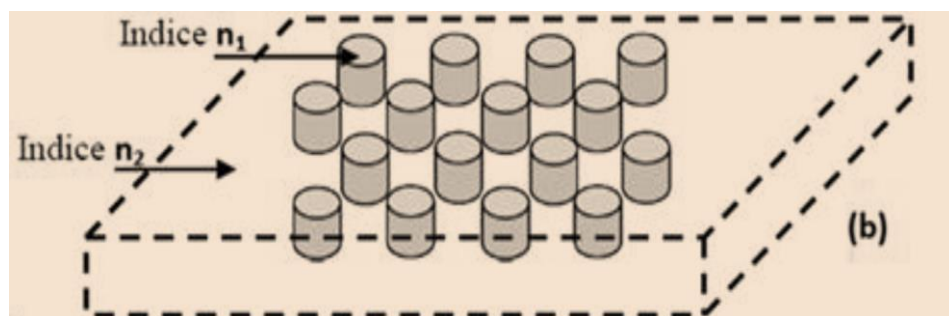


Figure I.5. Structure périodique 2D déconnectée [13]

La structure Périodique à deux dimensions se regroupe principalement suivant trois Familles.

4.2.1. Le réseau carré :

Les nœuds du réseau se trouvent sur un carré de côté « a » **Figure I.6** (Il a été démontré que ce genre de réseau est extrêmement sensible à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde électromagnétique) [14]. Il est donc ardu d'obtenir une bande interdite complète, c'est-à-dire une bande interdite totale ; Une bande interdite qui empêche la transmission, peu importe la polarisation.

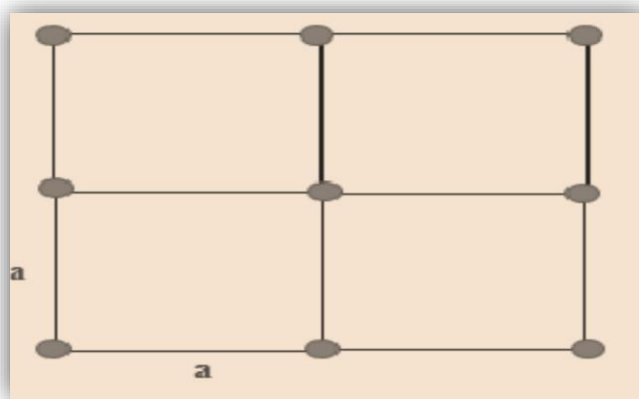


Figure I.6.Le réseau carré

4.2.2. Réseau triangulaire :

La symétrie du réseau triangulaire atteint son maximum lorsque chaque maille contient un unique "atome". La zone de Brillouin forme un hexagone. Chaque nœud du réseau est séparé de son voisin le plus proche par une distance égale, notée "a" **Figure I.7**. Cette structure présente une sensibilité moindre à l'angle d'incidence par rapport au réseau carré, mais obtenir une bande interdite complète reste difficile.

Des configurations où les parties diélectriques sont isolées les unes des autres peuvent être envisagées, tout comme des configurations où ces parties sont interconnectées. Cependant, du fait de sa géométrie, les trous dans le diélectrique sont intrinsèquement "connectés" entre eux.

Il existe une solution satisfaisante lorsque le diamètre des trous approche la période du réseau. Dans cette configuration, les parois des trous deviennent si minces que les parties diélectriques restantes sont quasiment disjointes. Une telle structure présente effectivement une bande

interdite "intégrale". Cette conclusion a été étayée par plusieurs expériences, d'abord dans l'infrarouge moyen, puis plus récemment dans les longueurs d'onde des télécommunications optiques.

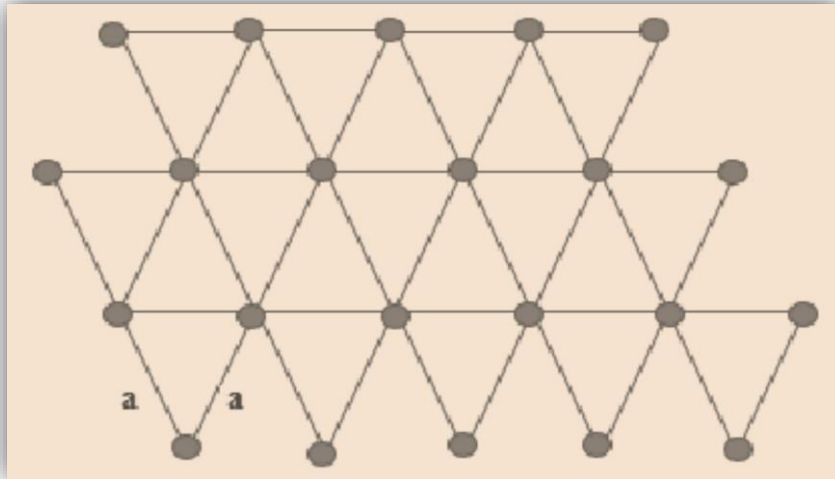


Figure I.7.Le réseau triangulaire [15]

4.2.3. Le réseau hexagonal :

4.2.3.1. La structure graphite :

Si tous les nœuds d'un réseau hexagonal sont identiques et séparés par une distance "a", cette structure est communément appelée "Graphene", en référence à sa ressemblance avec la structure cristalline du graphite **Figure I.8**. Contrairement au système triangulaire, il s'agit d'un système à deux atomes par maille. Le réseau réciproque présente également une configuration hexagonale, et la zone de Brillouin irréductible est similaire à celle du réseau triangulaire, avec les principales directions TM et TE. Pour la première fois, la possibilité d'une bande interdite complète dans le cadre d'un réseau de tiges diélectriques cylindriques avait été envisagée [16].

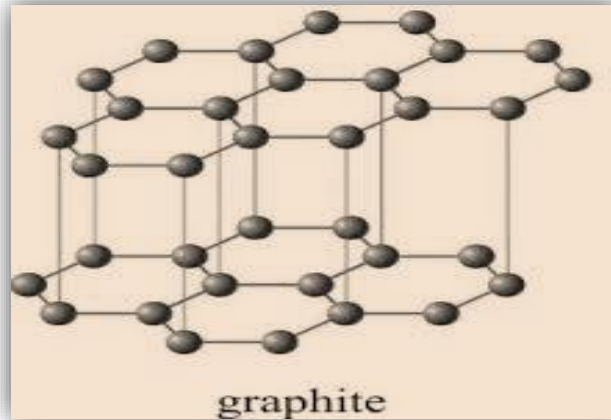


Figure I.8.Structure graphite

4.2.3.2. La structure nitrure de Bore :

En cas de variation de nature ou de dimension d'un nœud par rapport à son suivant, on obtient la structure cristalline du nitrure de bore (*Figure I.9*), ce qui permet d'obtenir de larges bandes interdites.

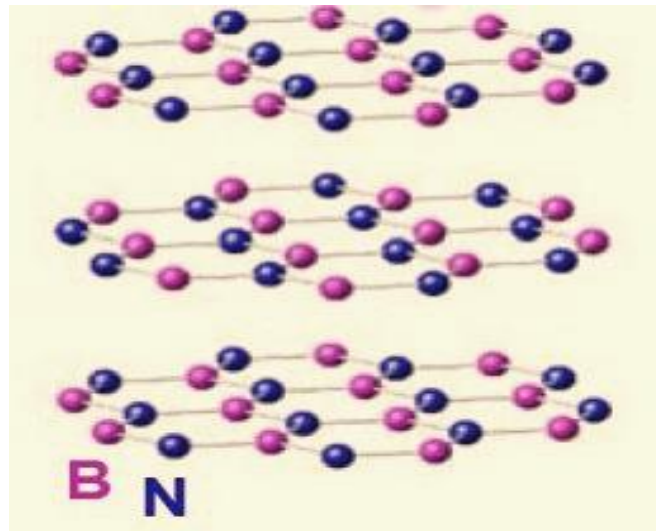


Figure I.9 Structure Nitrure de Bore

4.3. Cristaux photoniques tridimensionnels 3D :

La seule structure permettant d'obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions de l'espace est celle des cristaux photoniques 3D. Le cristal photonique tridimensionnel a été développé par K.M. Ho et ses collaborateurs [17]. On le composait de sphères de silicium

disposées sur une structure en forme de diamant. Cependant, la plupart du temps, l'histoire rappelle la célèbre Yablonovite, une structure 3D pour les micro-ondes développée en 1993 par E. Yablonovitch [17]. En perforant du plexiglas en suivant trois angles azimutaux distincts de 120° . Plusieurs techniques ont été suggérées pour produire des cristaux photoniques tridimensionnels. Les deux suivantes ont attiré le plus d'efforts de recherche :

4.3.1. Yablonovitch :

En 1993, E. Yablonovitch a créé les premiers cristaux photoniques tridimensionnels en perçant des trous dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux différents de 120° , ce qui a entraîné un angle de 35° par rapport à la normale **Figure I.10**. La forme est très similaire à celle d'un diamant [17].

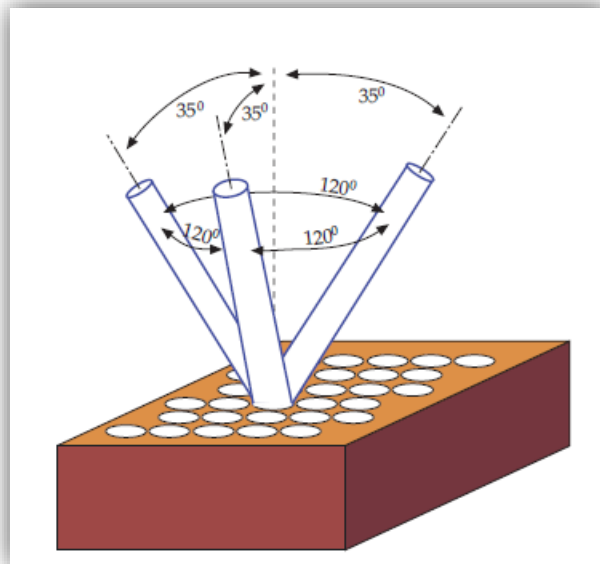


Figure I.10 Structure « La Yablonovitch »[18]

4.3.2. Structure tas de bois :

Il s'agit d'une structure complète à bande interdite facile à construire. Elle peut être élaborée dans une perspective. On obtient cela en appliquant des rubans de silicium poly cristallin en alternance, sans avoir à trancher la silice. Une fois que la structure est construite, la silice est sculptée afin d'obtenir un cristal photonique 3D de silicium dans l'atmosphère **Figure I.11**[17]

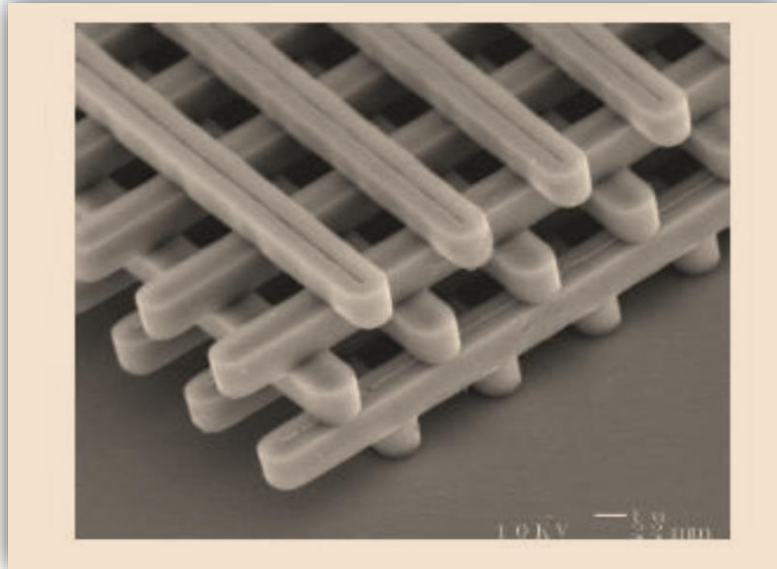


Figure I.11. Structure « tas de bois »

5. Caractéristiques géométriques et physiques des cristaux photoniques :

Les propriétés d'un cristal photonique comprennent la variété des matériaux qui le composent, leur arrangement dans le système cristallin et les volumes respectifs qu'ils occupent dans la cellule unitaire du cristal. Les paramètres qui décrivent ces caractéristiques sont les suivants :

5.1. Symétrie :

La symétrie du réseau est influencée par la position des briques d'un CPh. Par exemple, il est possible d'obtenir une symétrie cubique, hexagonale compacte (HE) ou cubique à face centrée (CFC) pour un CPh 3D de particules sphériques [9].

5.2. Paramètre du réseau :

Il s'agit de la distance fondamentale entre deux éléments constitutifs du cristal photonique. Cette distance définit la plage spectrale dans laquelle le cristal photonique interagit avec les ondes électromagnétiques [9].

5.3. Le facteur de remplissage f :

Par analogie avec le potentiel périodique résultant de l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur, le facteur de remplissage, f , peut être défini comme le rapport entre le volume occupé par le matériau dans la cellule unitaire du cristal et le volume total de cette cellule.

L'influence de ces paramètres sur le comportement d'une structure photonique peut être interprétée comme la largeur du potentiel périodique de la physique du solide [18]

5.4. Le contraste d'indice Δn :

La différence entre les indices de réfraction des deux matériaux est appelée contraste d'indice Δn [19], qui peut être comparée à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique du solide.

Il est donné par l'équation (I.1) :

$$\Delta n = n_h - n_l \dots\dots\dots (I.1)$$

Avec :

n_h : l'indice de réfraction du matériau de haut indice.

n_l : l'indice de réfraction du matériau de faible indice.

5.5. La période :

Ces paramètres géométriques sont sélectionnés en fonction du domaine de fréquence étudié. Les propriétés de la bande interdite photonique ouverte sont influencées par ces paramètres. Par exemple, pour un cristal photonique unidimensionnel, la période $a=(a_1+a_2)$ avec a_1 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2 .

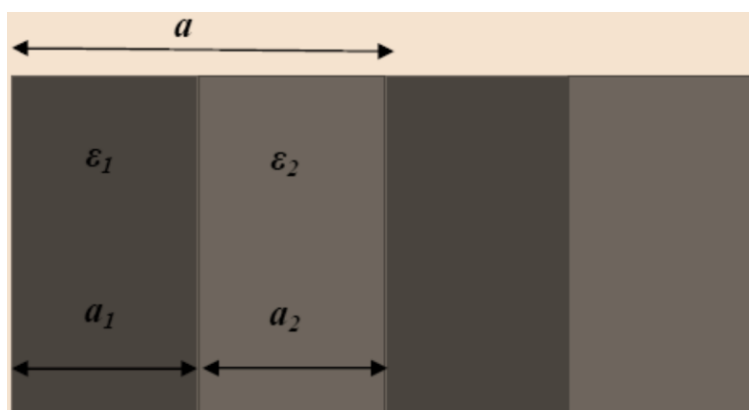


Figure I.12 périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

6. Bande interdite photonique :

Lorsque le potentiel d'interaction entre les électrons et les atomes varie régulièrement dans un semi-conducteur, les électrons ne peuvent accéder qu'à certains niveaux d'énergie, des bandes

d'énergie autorisées, séparées entre elles par des bandes d'énergie interdites. Un cristal possède une bande interdite photonique complète (ou totale) lorsque, dans le domaine de fréquences étudié, le cristal ne supporte aucune forme de propagation électromagnétique. En d'autres termes, une onde dont la fréquence se situe dans la bande interdite totale ne peut pas se propager dans le cristal, peu importe sa polarisation et sa direction de propagation [20].

6.1. Zone de Brillouin :

Afin de calculer les diagrammes de bandes, il est nécessaire de prendre en compte toutes les directions de propagation envisageables pour chaque cristal. Lorsqu'il s'agit de physique du solide [21], il est démontré que pour certaines symétries cristallines, il est possible de restreindre l'étude aux vecteurs d'ondes k situés à l'intérieur d'une zone limitée appelée zone de Brillouin. Le vecteur k évolue en fonction des directions des hautes symétries de cette zone qui fait partie du réseau réciproque.

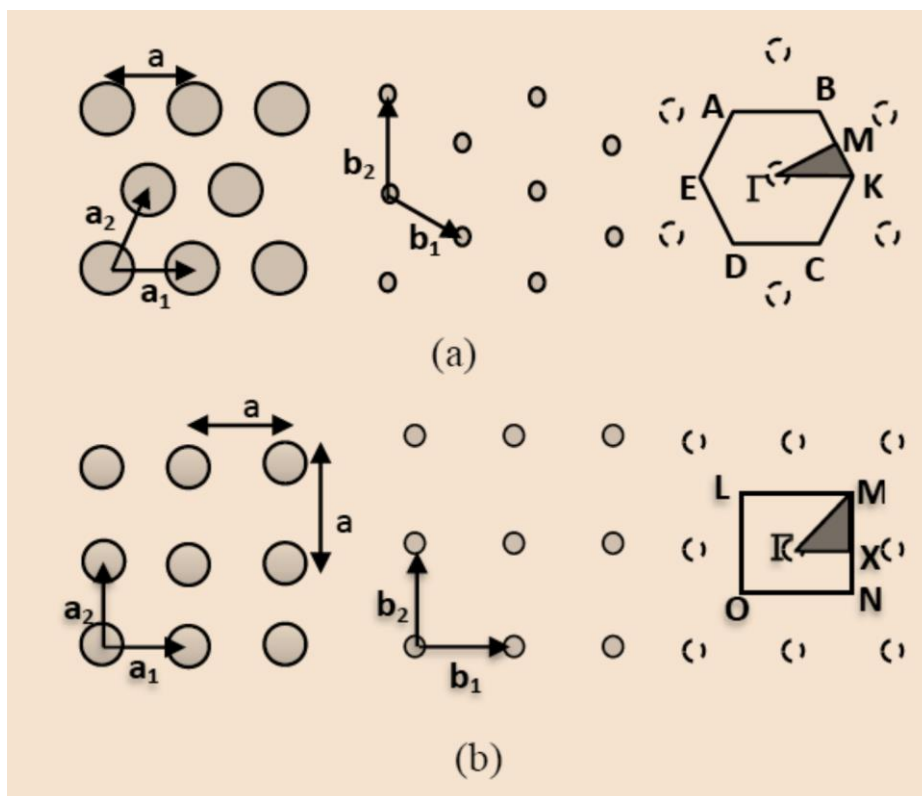


Figure I.13 Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) triangulaire et (b) carré.

6.2. Diagramme de bandes :

La permittivité diélectrique d'un cristal BIP bidimensionnel[22,23] est régulée de manière périodique dans deux dimensions et reste constante dans la troisième.

Par exemple, ces structures périodiques sont constituées de cylindres diélectriques en parallèle. Elles ont une géométrie relativement simple qui rend les modélisations théoriques et les études expérimentales plus faciles.

Deux polarisations sont envisageables pour étudier le comportement d'une onde électromagnétique incidente sur une structure de ce type :

Le phénomène de polarisation électrique TE se produit lorsque le champ électrique E est parallèle aux cylindres absolus. Tandis que celle magnétique TM est utilisée lorsque E est perpendiculaire à eux **Figure I.14**.

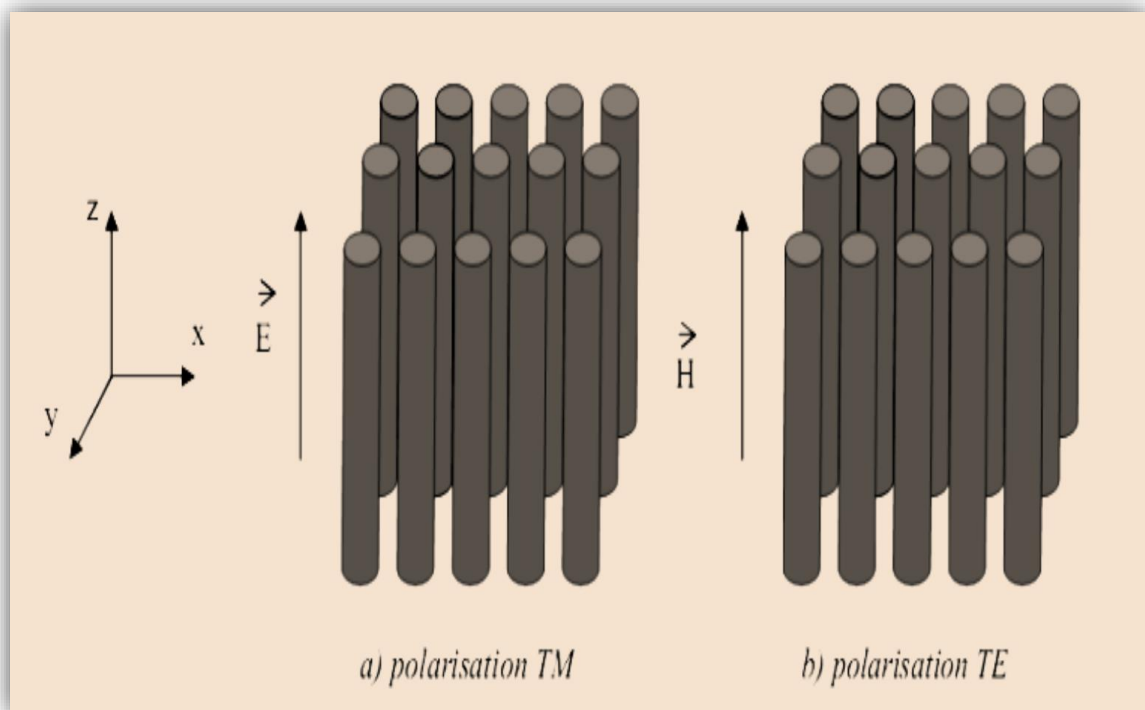


Figure I.14 Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D

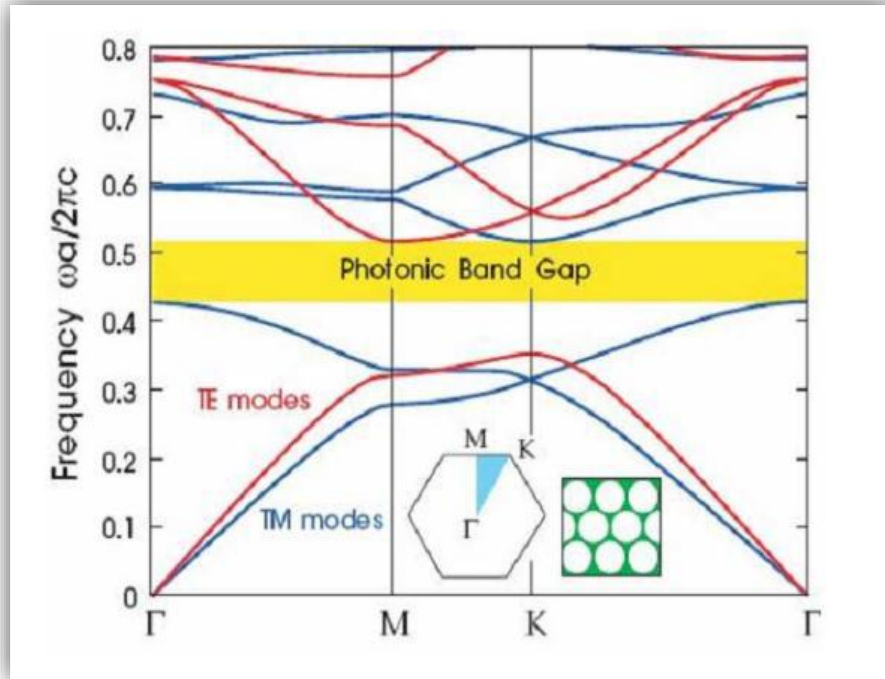


Figure I.15 Diagramme de bande d'un BIP 2D en polarisation TM et TE [24]

7. Défaut dans un cristal photonique :

Les imperfections des cristaux photoniques peuvent permettre de repérer des modes. Au sein des cristaux 1D, il est possible de retenir la lumière dans un plan défectueux. La lumière peut être détectée dans un défaut linéaire dans les cristaux en 2D. Enfin en 3D, il est possible de limiter la lumière à un défaut localisé, c'est-à-dire à un point spécifique du réseau. Lorsqu'il s'agit d'un réseau de trous, le problème peut être l'absence d'un ou de plusieurs trous. Deux catégories de défauts sont principalement présentes, les défauts ponctuels (cavités) et les défauts linéaires (guide d'ondes). Cependant, il est encore envisageable de varier les paramètres afin d'obtenir une grande diversité de défauts (variation de la taille des trous et de leurs formes par exemple) [25].

7.1. Les défauts ponctuels :

Les imperfections occasionnelles sont générées en altérant les propriétés d'une cellule du réseau. En utilisant les termes de la physique du cristal, il est possible de constater des défauts lacunaires ou de substitution (**Figure I.16**). La microcavité à l'intérieur du cristal photonique est représentée. Nous avons la possibilité d'influencer la géométrie des trous dans un matériau diélectrique, connu sous le nom de structure connectée, pour les cristaux photoniques [26].

On nomme modes de défaut les modes électromagnétiques introduits par le défaut. Plusieurs chercheurs ont examiné les caractéristiques de ces défauts. Joannopoulos et ses collègues ont examiné la transmission dans ces structures et ont démontré théoriquement que les caractéristiques des modes de défauts peuvent être ajustées en ajustant la taille et le type de défauts [27].

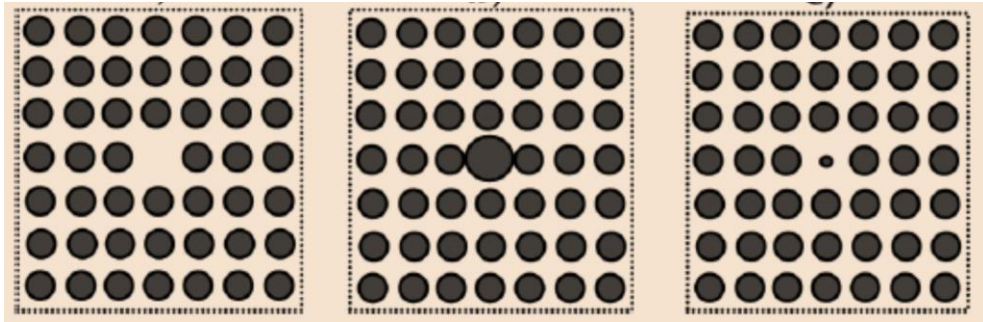


Figure I.16 (a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions

7.2. Les Défauts étendus :

7.2.1. Dimensions des motifs élémentaires : Afin de perturber la durée d'une structure BIP, il est possible de changer la taille du motif élémentaire qui forme le cristal photonique [28]

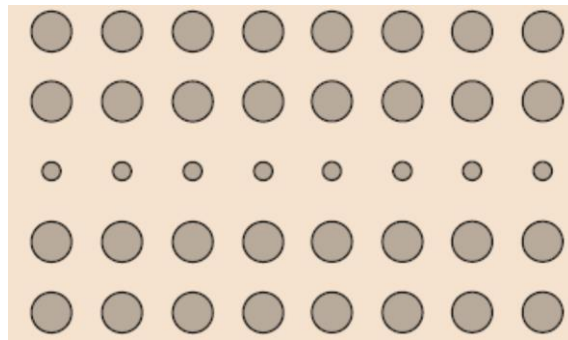


Figure I.17 Défaut de dimension du motif élémentaire.

7.2.2 Distance entre motifs élémentaires : Il est également possible de jouer sur l'espace entre les motifs élémentaires des réseaux cristallins [18].

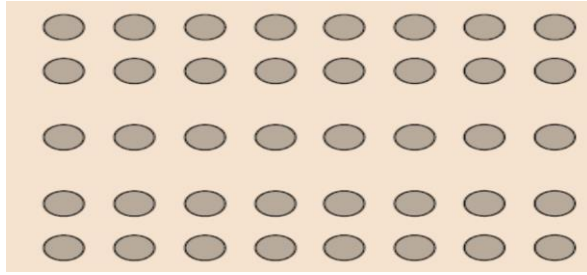


Figure I.18 Défaut de distance entre motifs élémentaires

Dans la (**Figure I.18**), on a augmenté l'écart entre la deuxième et la troisième rangée ainsi que l'écart entre la troisième et la quatrième rangée a été augmenté afin de créer le dilemme.

7.2.3. VALEUR DE LA PERMITTIVITE RELATIVE DES MOTIFS ELEMENTAIRES :

La nature du matériau peut être modifiée localement et plus concrètement en modifiant la valeur de la permittivité relative [18].

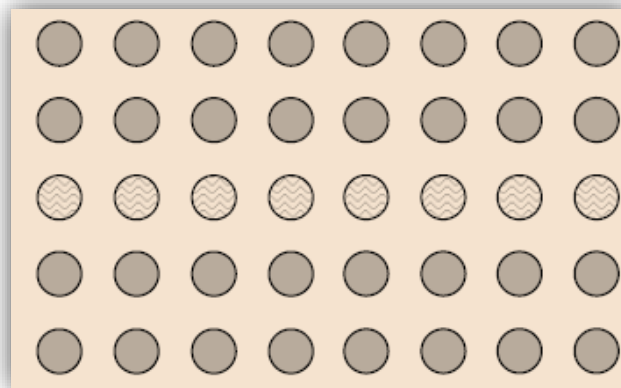


Figure I.19 Défaut sur la permittivité relative ϵ .

Sur cette figure, la permittivité des motifs élémentaires de la rangée du milieu a été changée

7.2.4. Défaut par vacuité :

Le défaut par vacuité se produit lorsque des motifs essentiels sont éliminés et remplacés par la permittivité du substrat [18].

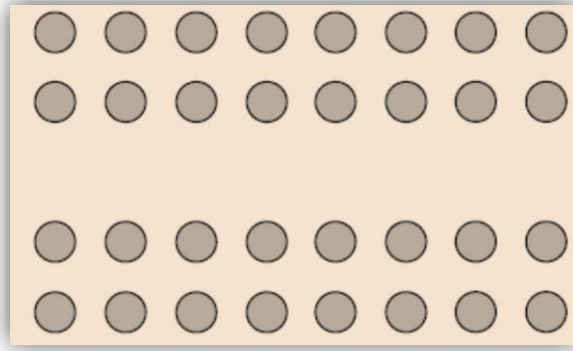


Figure I.20 Défaut par vacuité (C'est le défaut le plus utilisé).

- Les motifs élémentaires de la rangée du milieu ont été enlevés.
- On réalise ainsi aisément une très grande variété de défauts concevables donnant lieu à toutes sortes d'applications potentielles.

7.3. Cavités :

En 1996, les premières cavités utilisant des cristaux photoniques bidimensionnels ont été créées, avec l'ajout de mono défauts sur le réseau cristallin photonique. On peut observer que ces dispositifs ont un facteur de qualité élevé pour les modes résonants grâce à la réflexion exceptionnelle du cristal, ce qui est réalisé sur des cavités à grande dimension avec plusieurs modes.

La **Figure I.21** présente les cavités sur une membrane suspendue (entourée d'air) avec des dimensions très réduites. On peut observer une cavité triangulaire et une autre hexagonale plongées dans un cristal photonique triangulaire.

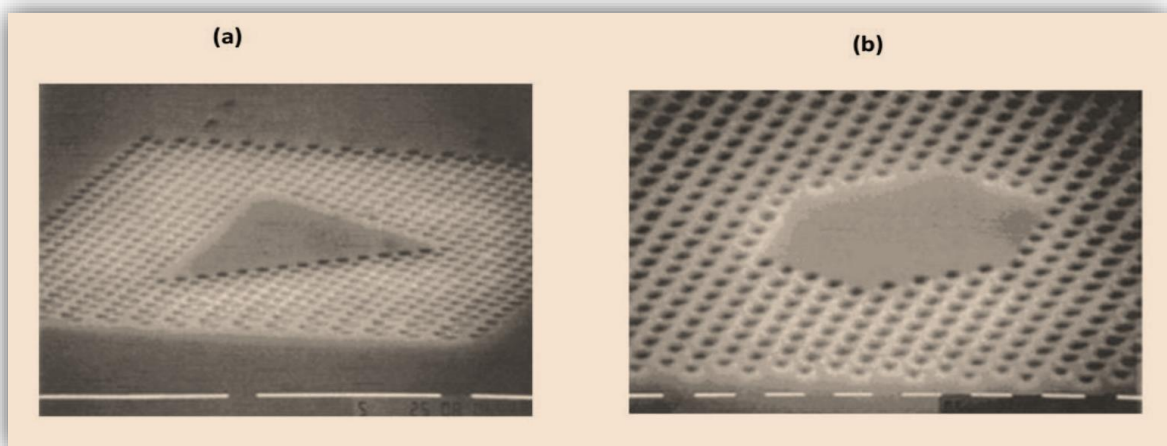


Figure I.21 Cavités sur membrane suspendue, (a)cavité triangulaire (b)cavité hexagonale, Entourées par un cristal photonique triangulaire.

7.4. Guides d'onde à cristaux photoniques :

Au moyen d'un défaut linéaire (absence d'une ou de plusieurs rangées de trous) dans le cristal photonique, la lumière peut être orientée dans une direction sélectionnée. Si son énergie se trouve à l'intérieur de la bande interdite, un photon restera dans le guide. Il est possible de créer différents composants en utilisant des défauts linéaires *Figure I.22*. Il est possible d'améliorer la transmission par ces dispositifs en ajustant la taille ou la forme des trous au niveau du virage ou de la jonction, de manière à réduire le couplage entre le mode guidé et les modes rayonnés au niveau des courbures [29].

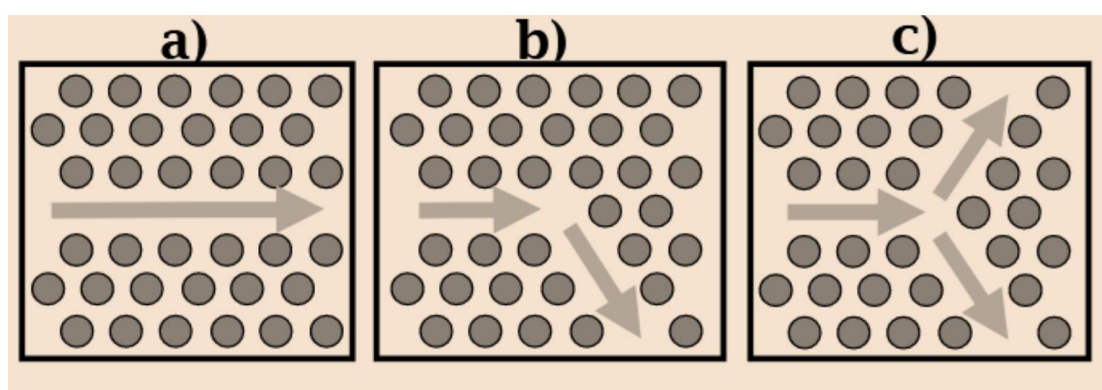


Figure I.22. Différents composants à base de défauts linéaires, a) guide droit, b) virage à 120° et c) jonction Y.

8. Application des cristaux photoniques :

La majorité des applications qui reposent sur la bande interdite photonique sont réalisées en introduisant des défauts dans la structure

8.1. Diviseur de puissance :

La lumière est séparée et distribuée en même temps dans les différentes parties du circuit optique grâce au diviseur à cristaux photoniques. Dans un premier temps, nous avons examiné le diviseur de type jonction Y qui comprend un guide d'entrée, une partie de la jonction Y et deux ou quatre guides de sortie. Le nombre de sorties que l'on souhaite est obtenu en les combinant.

Ce genre de composant a l'avantage de fournir une réponse spectrale uniforme pour une large plage de longueurs d'onde, et Fukazawa a réalisé une analyse théorique sur les paramètres de conception. Ainsi, cette partie peut diviser un signal provenant d'un seul guide d'onde vers plusieurs guides de sortie [18].

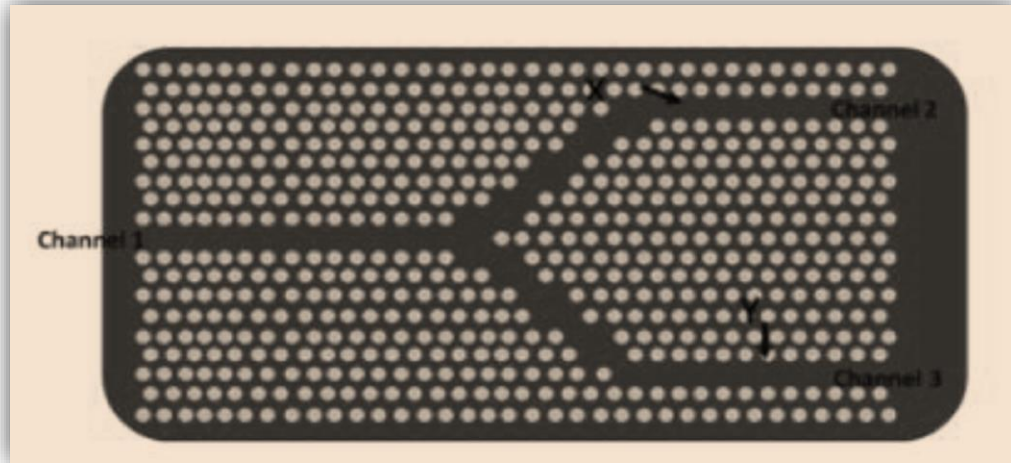


Figure I.23 Le diviseur à cristaux photoniques en Y (1x2) [18].

8.2. Filtre et Multiplexeur :

Le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM, Division Multiplexant Wavelength) joue un rôle crucial dans le domaine de l'optique intégrée. Le but est de faire entrer ou de retirer des longueurs d'onde spécifiques dans un flux de données. Grâce à l'utilisation de cristaux photoniques, cette fonction permet d'envoyer différentes longueurs d'ondes dans une même fibre optique (plusieurs informations simultanément). La sélectivité d'une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde permet de réaliser ce dispositif.

S. Fan et ses collègues ont proposé une première proposition théorique en 1998 [30]. Par la suite, Chuintant et ses collègues ont créé un filtre de type « Add-drop », dont le schéma est illustré dans la Figure I.24, Ce filtre offre la possibilité d'extraire et d'intégrer une longueur d'onde précise dans un guide (WDM monocanal). Dans cette situation, on a mesuré un facteur de qualité de 400 pour le mode résonnant, ce qui permet d'estimer une efficacité de couplage de 50 % entre la cavité et le guide. Ce genre d'appareil est connu sous le nom de filtre.

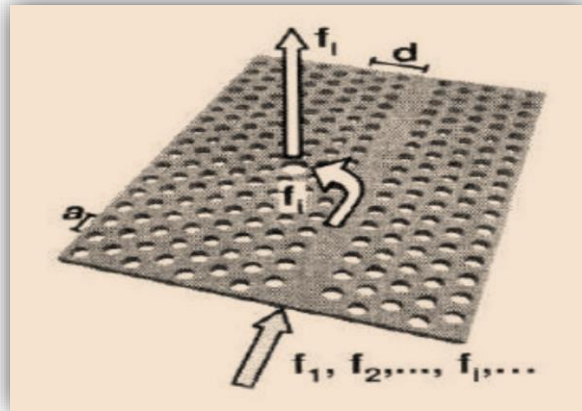


Figure I.24: Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde) [31].

Il est également possible de réaliser cette fonction dans le plan en utilisant la combinaison de deux guides, comme illustré dans la figure I.25. Dans cette situation, le processus de couplage reste cependant extrêmement complexe ; il est influencé par la symétrie et la détérioration des modes résonnants. En outre, il est essentiel de surveiller attentivement la taille du défaut (de la cavité résonnante) pour choisir les longueurs d'onde souhaitées.

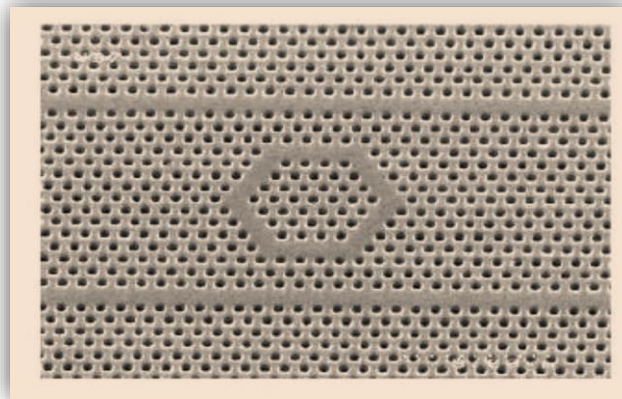


Figure I.25: Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent se coupler d'un guide à l'autre [32].

8.3. Les fibres optiques :

En 1996 est apparu un nouveau type de fibre, connu sous le nom de fibre à cristaux photoniques ou PCF (Photonic Crystal Fibre). Une équipe de l'université de Bath en Angleterre a

développé la première PCF à guidage par réflexion totale interne [33]. Cette machine est composée d'un cœur de silice pure entouré d'un système régulier de canaux d'air de taille microscopique disposés en parallèle à l'axe (Figure I.26).

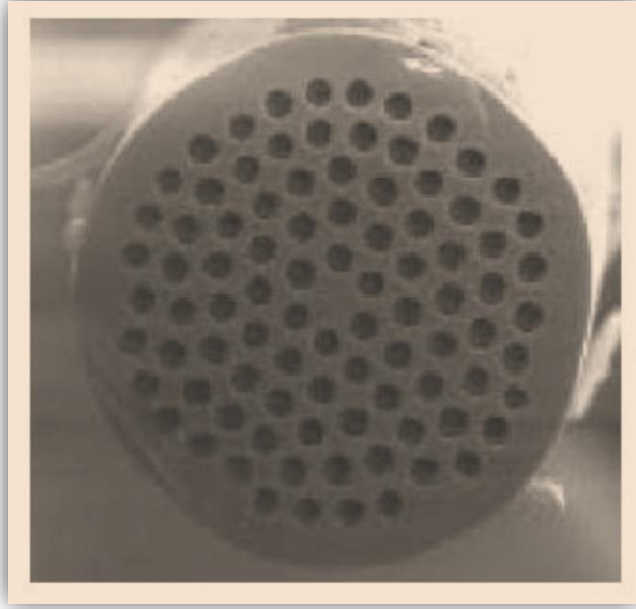


Figure I.26: Exemple de fibre à cristal photonique

Grâce à cette fibre à cristal photonique, il est possible de guider un mode essentiel sur une large plage spectrale. On étudie également des fibres monomodes qui ont un effet de bande interdite photonique grâce à une gaine optique périodique afin d'éliminer la dispersion chromatique du spectre. La longueur d'onde d'annulation de la dispersion chromatique peut être déplacée par ces fibres jusqu'à $0,85 \mu\text{m}$. Les fibres photoniques à cristaux sont extrêmement attrayantes pour les communications optiques à haut débit et à grande distance.

8.4. Capteur :

L'emploi de composants optiques a permis de se libérer des perturbations électromagnétiques de basse fréquence et de réduire les pertes optiques liées à la propagation. Grâce à cette limitation, il a été possible d'approfondir l'étude du comportement des dispositifs optiques face aux perturbations environnementales. De cette manière, il est possible de concevoir des capteurs optiques performants en se concentrant sur les divers mécanismes d'interactions physiques extérieures que l'on souhaite identifier. Différents capteurs optiques sont actuellement

disponibles, tels que les capteurs de pression, de température, de vitesse, de position, d'humidité, ainsi que biologiques [34].

9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit les bases des cristaux photoniques (CP), en explorant les différents types de CP ainsi que leurs propriétés optiques. Parmi ces propriétés, l'apparition de la bande interdite électromagnétique est particulièrement remarquable. La présence de cette bande interdite photonique ouvre de nouvelles perspectives d'utilisation et d'intégration des cristaux photoniques dans des systèmes de détection. Ces aspects seront examinés en détail dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2
Généralités sur
Les capteurs

Introduction :

Les cristaux photoniques (PC) ont récemment émergé comme l'une des méthodes les plus remarquables dans les circuits optiques intégrés, trouvant une large utilisation dans diverses applications. Constitués de multicouches de matériaux diélectriques avec des indices de réfraction variés, ils contrôlent la propagation de la lumière [35]. La région de bande interdite photonique (PBG) des cristaux photoniques, qui limite certaines fréquences de propagation, peut être ajustée en introduisant des défauts. Cela permet la fabrication de divers dispositifs optiques tels que des filtres, des commutateurs et des capteurs. Les cristaux photoniques sont également devenus des éléments de détection prisés en raison de leur confinement de la lumière et de leur structure de bande. Leur miniaturisation et leur haute sensibilité spectrale en font des candidats prometteurs pour une intégration dans des systèmes micro-électromécaniques (MEMS). Les applications des capteurs à cristaux photoniques se sont étendues, notamment dans les domaines automobile, agroalimentaire, environnemental et biomédical, en raison de leur prix abordable, de leur portabilité et de leurs multiples applications [36]. Dans ce cadre, nous présentons dans ce chapitre les principes généraux des capteurs, ainsi que leurs classifications et caractéristiques. Notre étude se concentre spécifiquement sur les biocapteurs Optiques basés sur les cristaux photoniques.

2. Généralité sur les capteurs :

2.1. Définition de capteur :

Un capteur est un appareil permettant de mesurer, définir, mesurer une grandeur physique et de la transformer en une grandeur accessible à l'utilisateur (souvent, il s'agit d'un signal électrique, optique ou acoustique). Il est possible de dire qu'un capteur est un dispositif. Appareil qui, sous l'influence d'une grandeur physique que l'on veut définir, On parle alors d'un transducteur en raison de sa grandeur physique exploitable (figure II.1). [37]

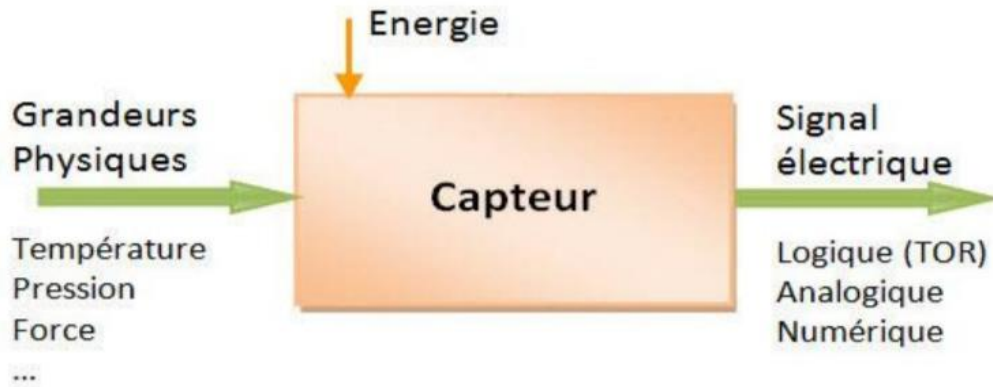


Figure II.01: Définition d'un capteur.

Les dimensions, Les facteurs d'influence sont des éléments externes qui, en fonction de leur nature et de leur importance, entraînent des dysfonctionnements du capteur. Parmi les principales dimensions d'impact : Température, pression, humidité, teneur chimique,

Un capteur a la capacité de collecter et de choisir une grandeur abstraite, connue sous le nom d'information, qui choisit un événement spécifique parmi un éventail d'événements possibles. Afin d'être traitée, cette information est transmise à travers un support tangible.

On le nomme donc un signal. En général, le capteur est constitué de trois composants. Principales caractéristiques : un élément sensible, un transducteur et une interface de contrôle entre le système de signal et le consommateur.[37]

2.2. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement est basé sur la mesure d'un indice de réfraction d'un élément sensible en fonction de la présence d'un analyte (substance à repérer).

Les capteurs à base de CPs peuvent être classés en fonction de leur mode de fonctionnement :

- Capteur à indice de réfraction (RI) à base de CPs.
- Capteur gazeux utilisant des CPs.
- Des capteurs opto-mécaniques utilisant des CP.
- Capteurs photoniques intégrés à cristaux qui utilisent un effet non linéaire.

- Capteurs utilisant des cristaux photoniques et des fibres optiques, et ainsi de suite.[38]

2.3. Les différents Types de grandeur physique

Les Grandeurs physiques peuvent être classées en 6 familles, chaque capteur s'associant à l'une d'entre elles :

- Mécanique : mouvement, puissance, poids, flux...
- Environnement thermique : énergie thermique, flux thermique...
- Electrical : voltage, charge, impédance, diélectrique...
- Le champ magnétique, la perméabilité, le moment magnétique...
- Radiation : éclairage visible, rayon X, micro-ondes...
- Chimique biologique : humidité, gaz, sucre, hormone... [39]

2.4. Chaîne de mesure :

Afin de représenter une grandeur physique, une chaîne de mesure est utilisée, ce qui peut impliquer plusieurs phénomènes. Par exemple, il est possible de mesurer un débit en plusieurs étapes :

- Convertir le débit en une force Différentielle
- La pression différentielle se transforme en déformation mécanique d'une structure membrane.
- Convertir la déformation mécanique en une mesure électrique (en utilisant un dispositif)

à l'aide d'un circuit électronique lié, comme illustré dans la (Figure II.2)

Toutes ces étapes forment la chaîne de mesure.[39]

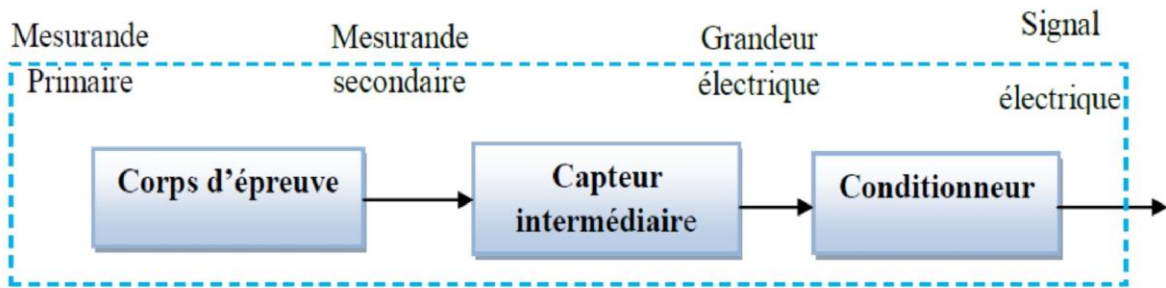


Figure II.2 : constitution d'une chaîne de mesure classique.

2.5. Caractéristiques des capteurs :

2.5.1. Etalonnage :

Grâce à l'étalonnage, il est possible d'ajuster et de représenter graphiquement la relation entre la résistance et la grandeur électrique de sortie. [36]

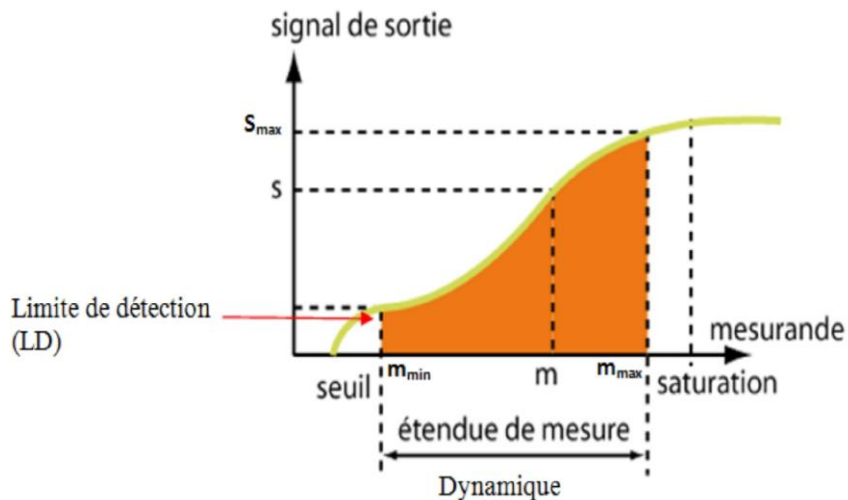


Figure II.3: Courbe d'étalonnage d'un capteur

2.5.2. Domaine de linéarité :

La variation de la grandeur de sortie est inversement proportionnelle à la variation du mesurage en linéarité. [36]

2.5.3. Sensibilité(s) :

Ce critère détermine la capacité du capteur à repérer la moindre variation de la grandeur à mesurer. Il s'agit d'une qualité essentielle pour l'utilisation et l'interprétation des mesures.

On la définit comme la différence entre le signal de sortie (Sout) et le signal de sortie (Sout).

La fluctuation de la mesure (m) (pente de la partie linéaire de la courbe d'étalonnage) et s'écrit :

$$S = \frac{\Delta S_{out}}{\Delta m} \dots\dots\dots(II.1)$$

Avec :

- S : représente la sensibilité.
- Sout : représente la variation du signal de sortie.
- Δ : représente la variation du mesurande

La sensibilité d'un capteur augmente afin que la mesure soit plus précise. Il s'agit d'une caractéristique essentielle pour l'utilisation et l'analyse des mesures. [36]

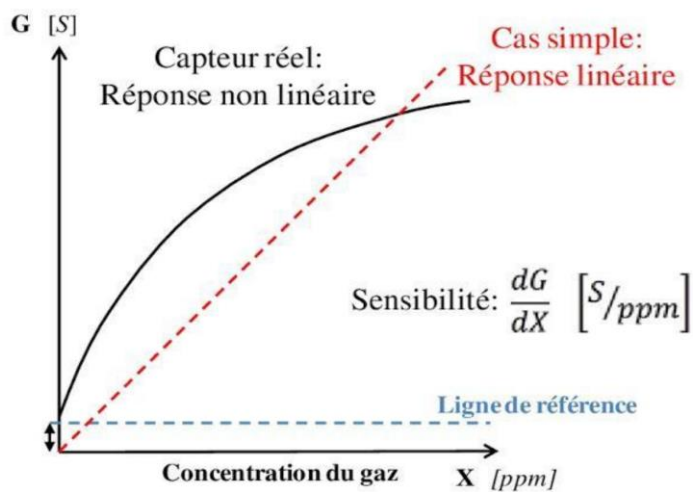


Figure II.4: Réponse non linéaire d'un capteur à semi-conducteur.

2.5.4. Temps de réponse ou rapidité :

Le temps nécessaire pour que le capteur réagisse à une variation brusque du mesurant est connu sous le nom de rapidité. Néanmoins, la valeur finale est généralement atteinte de manière asymptotique, ce qui correspond au temps requis pour que le capteur délivre une certaine valeur.

Fraction α de l'ampleur totale du signal. Le temps de réponse calculé t_α est égal à α .

En général, 90%.

Il est crucial de connaître le temps de réponse d'un capteur, Au moment de la effectuer des mesures. [36]

2.5.5. Précision :

Il s'agit du plus petit changement de la valeur mesurée qui puisse être mesuré de manière significative par le capteur. [36]

2.5.6. Fidélité :

Elle détermine si un capteur est capable de fournir des résultats aussi proches que possible lors d'analyses répétées sur une même grandeur physique m . La dispersion σ des résultats autour de la valeur moyenne $\langle m \rangle$ de n mesures réalisées sur m est connue sous le nom d'erreur de fidélité :

$$\langle m \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \langle m \rangle)^2}}{n-1} \dots\dots\dots (II.2)$$

m_i : est la valeur de m à la 2ème mesure. Parmi les écarts de fidélité on distingue

:la répétabilité. [36]

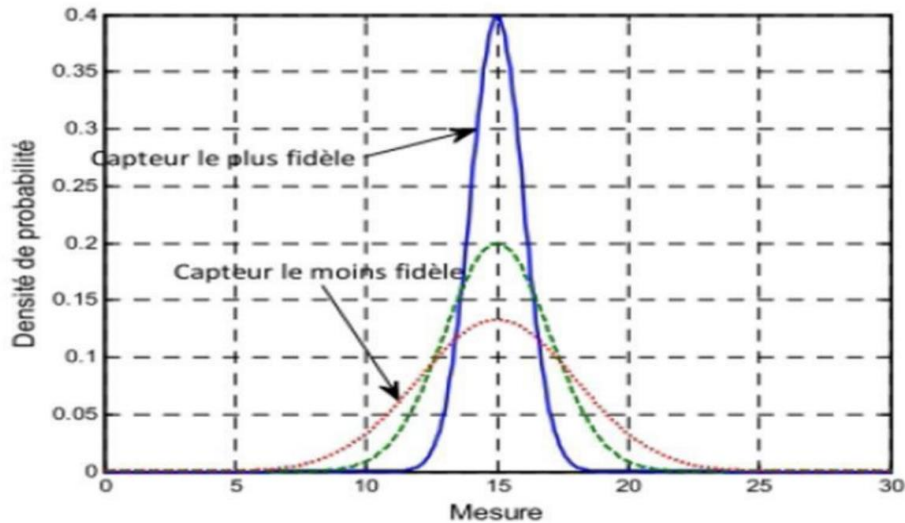


Figure II.5: Fidélité d'un capteur.

2.5.7. Répétabilité :

La variation aléatoire des résultats d'une série de mesures successives d'une grandeur physique m , réalisées dans les mêmes conditions de mesure pendant un court laps de temps, est appelée répétabilité. Ces critères sont connus sous le nom de critères de répétabilité et sont liés au même processus de mesure, au même observateur, au même équipement de mesure et au même lieu de mesure. [36]

2.5.8. Sélectivité :

On qualifie un capteur de sélectif lorsque la variation du signal de sortie est exclusivement liée à la seule grandeur (physique, chimique, biologique...) que l'on souhaite mesurer. Il s'agit de la faculté du capteur de mesurer une seule grandeur dans le milieu où il est employé ou dans d'autres environnements. Termes d'être le plus indifférent aux dimensions. D'influence, dimensions qui n'ont pas été abordées. Mesurant, mais ayant un impact sur la sortie du capteur. [36]

2.5.9. Le facteur de qualité (Q) :

Il est utilisé pour évaluer la capacité d'un résonateur à maintenir l'énergie. Le taux de perte de la cavité décide du confinement d'un mode à la fréquence ω_0 . Ainsi, on peut définir le facteur de qualité Q d'un mode résonant de fréquence ω_0 comme le rapport de l'énergie stockée dans le résonateur moyennée dans le temps à l'énergie dissipée par cycle, soit La qualité du facteur (Q) [40].

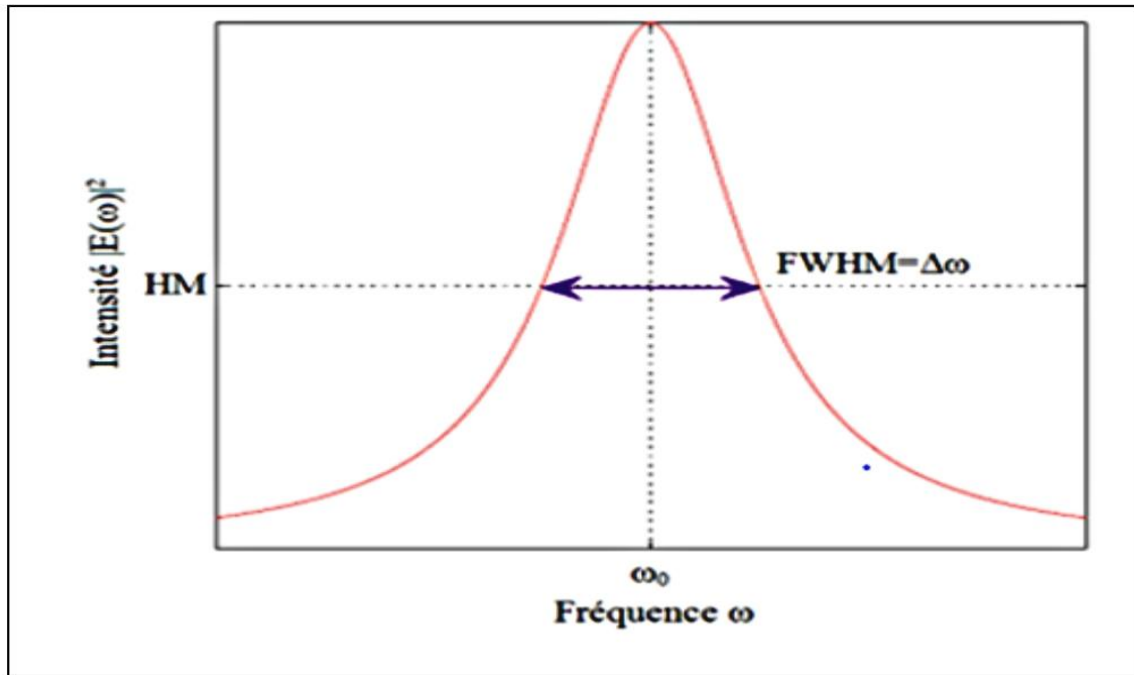


Figure II.6: Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne d'un mode dans la cavité centrée à la fréquence ω_0

2.6. Grandeurs d'influence :

En raison de ses conditions d'utilisation, le capteur peut être exposé non seulement au mesurant, mais aussi à d'autres grandeurs physiques dont les variations peuvent entraîner une modification de la grandeur électrique de sortie, ce qui n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurant. Les grandeurs d'influence sont des grandeurs physiques "parasites" auxquelles la réponse du capteur peut être sensible. Donc, par exemple :

- La température joue un rôle important dans un capteur optique, tout comme la résistance photoconductrice.
- De même, le champ magnétique a un impact sur un capteur. Une mesure thermométrique telle que la résistance du germanium.

Les principales grandeurs d'influence sont :

- la température, qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.

- la pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse.

- l'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement.

- la tension d'alimentation.

- amplitude et fréquence.

- lorsque, comme pour le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur. [36]

2.7. Classification des capteurs :

Les capteurs sont classés en deux grandes catégories selon la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette catégorisation a un impact sur le conditionnement qui lui est lié.

2.7.1. Capteurs passifs :

Ce sont des impédances dont l'un des facteurs déterminants est influencé par la mesure.

Il y a des mots liés dans l'expression littérale d'une impédance :

– d'un côté en raison de sa forme et de ses dimensions.

Par ailleurs, les caractéristiques électriques des matériaux incluent la résistivité, la perméabilité magnétique, constante diélectrique.

–Il est possible que la variation d'impédance soit causée par l'action du mesurant :

–que ce soit en termes de propriétés géométriques ou de dimensions.

–ce qui concerne les caractéristiques électriques des matériaux.

–soit moins fréquemment sur les deux en même temps.

Si le capteur contient soit un élément mobile, soit un élément déformable, les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent différer. Dans le premier cas, il y a une valeur de l'impédance correspondant à chaque position de l'élément mobile, et la mesure de celle-ci permet de déterminer sa position. Selon ce principe, il existe de nombreux capteurs de

position ou de déplacement tels que des potentiomètres, des inductances à noyau mobile et des condensateurs à armature mobile. [41]

<i>Grandeur mesurée</i>	<i>Caractéristique électrique</i>	<i>Type de matériau utilisé</i>
Température	Résistivité	Métaux :Platine,nickel,cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement Optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de nickel
	Perméabilité	
Position (aimant)	Résistivité	Matériau magnéto résistants : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau II.1: Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs.

2.7.2. Capteurs actifs :

Lorsque le phénomène physique utilisé pour déterminer le mesurant effectue directement la transformation en grandeur électrique, on parle de capteur actif.

La relation entre le mesurant et la grandeur électrique de sortie est établie par la loi physique elle-même. Un capteur actif est fréquemment utilisé en tant qu'électromoteur, et dans cette situation, la taille de La sortie représente une disparité de potentiel.

Il est clair que le nombre des lois physiques qui permettent une telle transformation est restreinte.

CHAPITRE2 : Généralités sur Les capteurs

Il est donc possible de faire une liste facile des capteurs actifs (dont le nombre est limité).

Cependant, les individus Les domaines d'utilisation sont très variés.[42]

<i>Mesurande</i>	<i>Effet utilisé</i>	<i>Grandeur de sortie</i>
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité Photoémission Effet photovoltaïque Effet photo électromagnétique	Charge Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position(aimant)	<i>Effet Hall</i>	Tension

Tableau II.2: Capteurs actifs : principes physiques de base.

2.8. Structure d'un capteur :

La structure générale d'un capteur est-ce représenté en (Figure II.2) Dans cette structure on trouve. [36]

2.8.1. Le corps d'épreuve :

Le corps d'épreuve est un élément sensible qui réagit à la grandeur à mesurer. Il a pour rôle de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable. [36]

2.8.2. Transducteur (le capteur) :

Le corps d'épreuve est étroitement lié au transducteur, Les réactions du corps d'épreuve sont traduites en une grandeur électrique qui forme le signal de sortie. [36]

2.8.3. Le boîtier :

Le boîtier est un élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur. [36]

3. Les biocapteurs :

3.1. Définition :

Les biocapteurs sont constitués de récepteurs biologiques naturels ou artificiels associés à un transducteur classique afin d'obtenir un signal physique susceptible d'être exploité. Le stimulus biologique est produit lorsque l'analyte cible reconnaît et s'attache au récepteur. L'identification de la cible et du récepteur biologique est particulière et sensible : la connexion se produit même à une concentration faible. Étant donné que les Organismes Génétiquement Modifiés ne sont pas autorisés pour les biocapteurs de terrain, on utilise des molécules de synthèse biomimétiques (polymères à empreinte moléculaire), ce qui offre un avantage spécifique qui n'est pas normalement présent . [36]

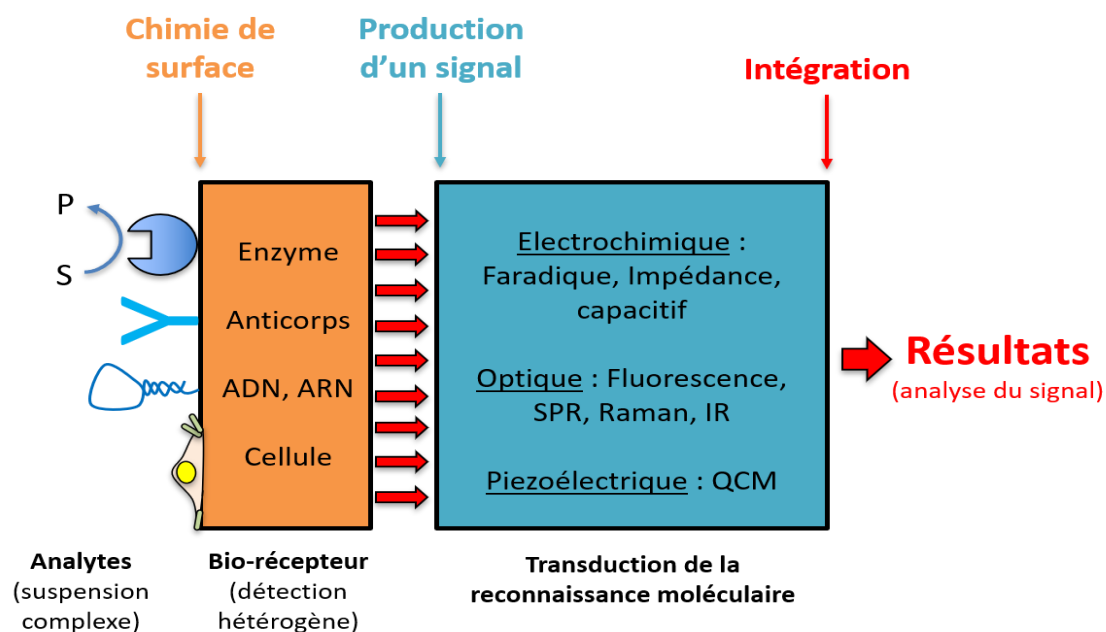


Figure II.7: Schéma général d'un biocapteur

3.2. Caractéristiques des biocapteurs :

Il s'agit ici des caractéristiques qui servent à évaluer un capteur et ses qualités

Analytiques. Les caractéristiques les plus utilisées sont les suivantes :

3.2.1. Sélectivité : c'est la capacité du biocapteur à distinguer entre les mesurandes et ne Fournir d'information exploitable que sur celle voulue. C'est un paramètre qui dépend Principalement du composant biologique, bien que parfois le choix du transducteur Puisse contribuer à la sélectivité.

3.2.2. Sensibilité : Ce paramètre correspond au rapport entre l'accroissement de la réponse du capteur et la variation correspondante de la grandeur à mesurer.

3.2.3. Reproductibilité : c'est parmi les paramètres les plus importants. Il indique la Capacité du biocapteur à donner des réponses tr`es voisines pour des mesures répétées de la même quantité de la grandeur à mesurer.

3.2.4. Exactitude : C'est l'accord entre le résultat de la mesure et la valeur vraie de la Grandeur mesurée et l'écart est appelé erreur absolue.

3.2.5. Limite de détection : C'est la plus petite valeur de la grandeur à mesurer pouvant être LD=R/S

Détectée par le biocapteur d'une façon significativement différente du bruit de fond [43].

3.3. Pluridisciplinarité du domaine des biocapteurs :

L'utilisation de dispositifs de détection peut être essentielle : la biologie micro-électronique et les capteurs offrent un immense potentiel dans le domaine du diagnostic, de l'industrie pharmaceutique et de nombreux autres secteurs. Il est également essentiel de détecter les polluants et les contaminants de la sécurité au sol, ainsi que de détecter immédiatement les contaminants utilisés comme armes chimiques. Il est également possible d'utiliser des capteurs utilisés dans l'industrie alimentaire afin de surveiller et prévenir les risques. [43]

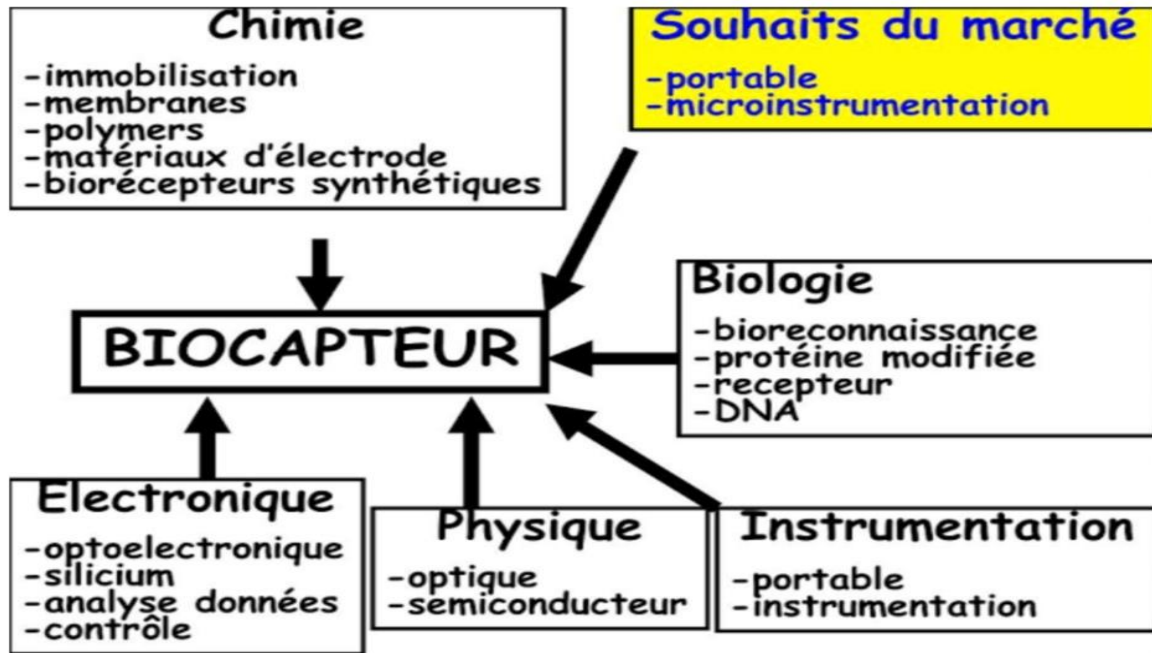


Figure II.8: Pluridisciplinarité du domaine des biocapteurs.

3.4. CLASSIFICATION DES BIOCAPTEURS

Les biocapteurs peuvent être classés suivant différents critères :

- Selon le type de couche biologique sensible : biocapteurs biomimétique, enzyme, ADN, anticorps.
- Selon le type de transducteur : biocapteurs optiques, magnétique thermiques, électrochimiques, mécanique.

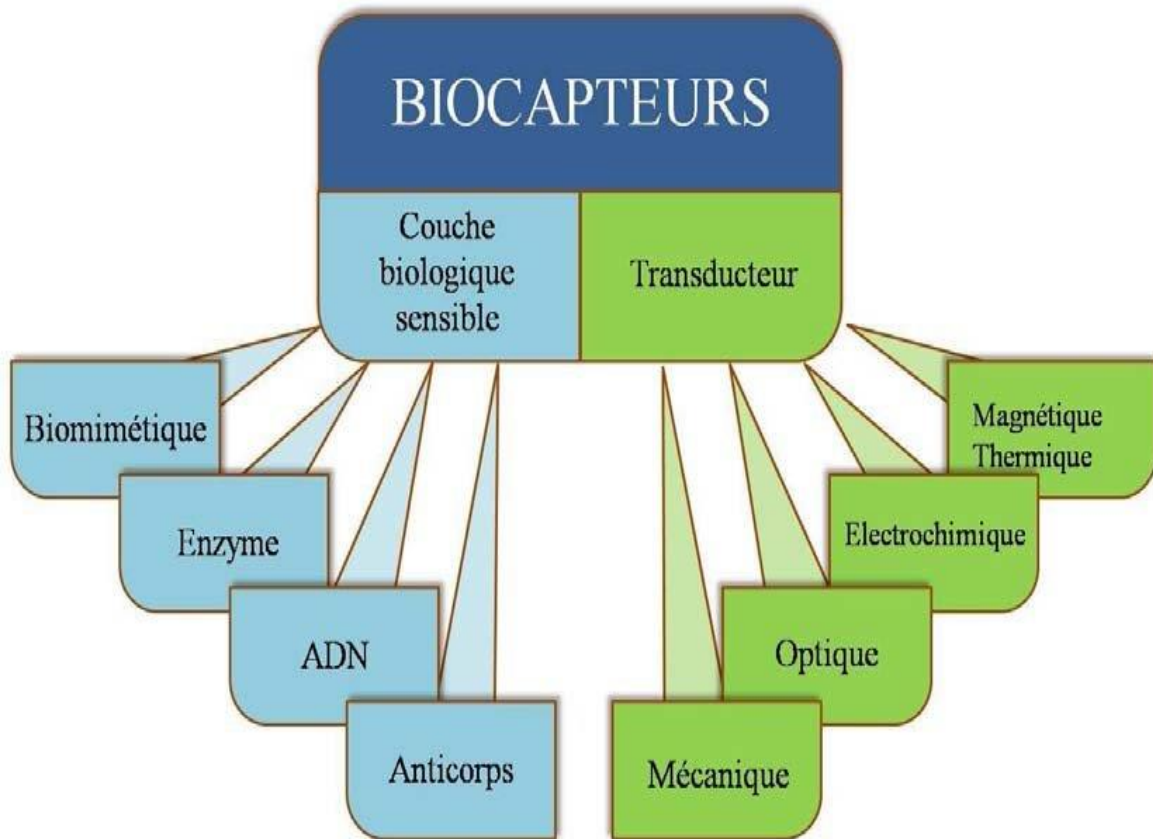


Figure II.9: Classification schématique des biocapteurs

4. Biocapteurs optiques :

Depuis quelques années, les avancées rapides des technologies photoniques ont grandement amélioré les capacités de détection, en particulier dans les domaines de l'interaction entre la lumière et l'analyse et de la miniaturisation du dispositif. Cela a entraîné des progrès significatifs en ce qui concerne la sensibilité et la limite de détection (LD) du capteur, la capacité de traitement fluide élevée et le temps de détection rapide.

On préfère utiliser des capteurs optiques tels que des fibres optiques, des plasmons de surface, des guides d'ondes plans ou des cristaux photoniques pour leur analyse hautement sensible et non destructive. Les biocapteurs optiques reposent généralement sur l'adsorption de l'analyte et l'identification des variations d'indice de réfraction qui se produisent lors de cette adsorption.

Le principe de base de la détection optique repose sur le changement d'une des caractéristiques de la lumière lorsqu'elle entre en contact avec l'objet d'intérêt. Il existe différentes méthodes de

détection, telles que celles qui utilisent des effets. On utilise différents types de cristaux photoniques comme capteurs en raison de leur grande sensibilité aux fluctuations des indices de réfraction, comme par exemple :

→Le phénomène optique majeur de la technologie SPR (Surface Plasmon Résonance) est l'excitation résonnante des ondes plasmon ou électromagnétiques liée à des oscillations collectives d'électrons libres en métal sur une interface métal/diélectrique. L'instrument de mesure en temps réel de toutes les interactions biologiques est donc devenu le SPR.

→ Interférométrie des captures Ils sont basés sur la mesure du changement de phase de la lumière provoqué par la présence des molécules. Ce concept peut être mis en œuvre, notamment, sur des interféromètres Mach-Zender (IMZ). [44]

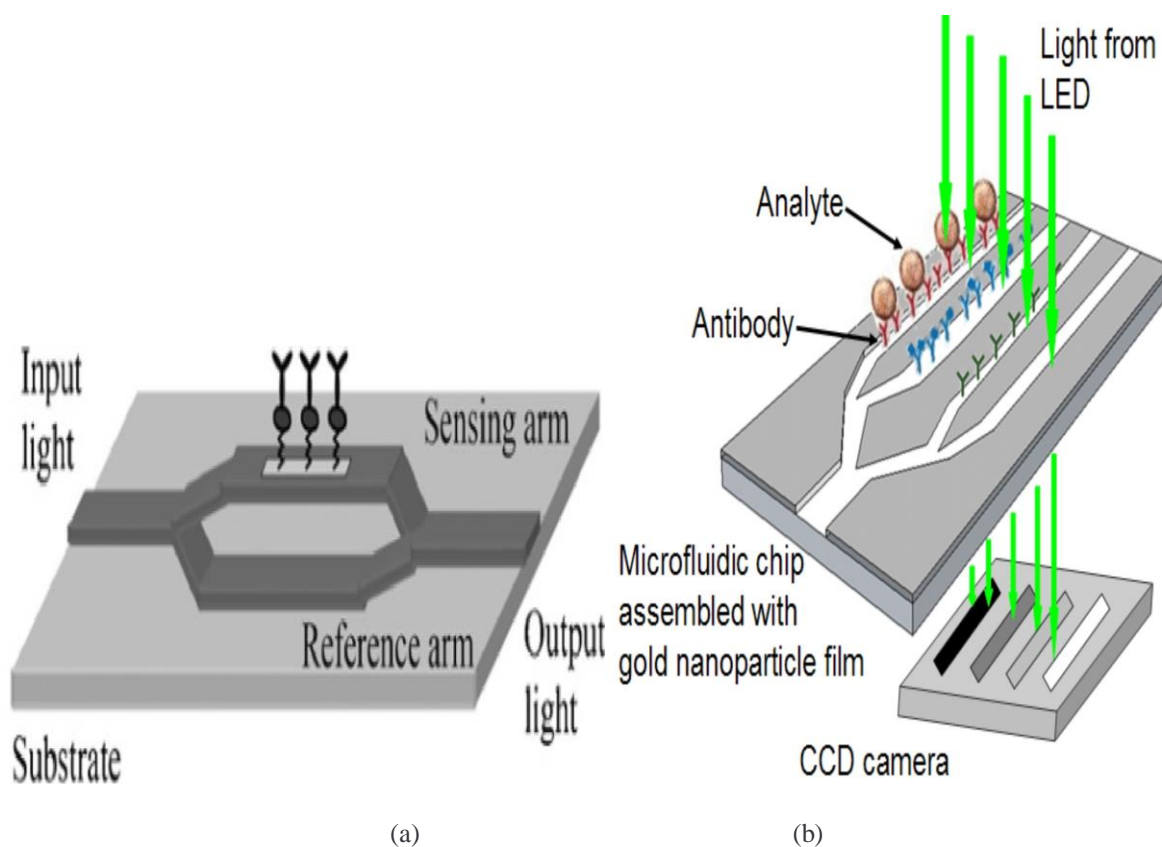


Figure II.10: (a) Représentation schématique d'un interféromètre Mach-Zender (b) Représentation schématique d'un interféromètre de Young.

5. Capteurs à fibres optiques

Les capteurs utilisant des fibres optiques [45-46] sont le fruit de la fusion de deux technologies : les fibres optiques utilisées dans le domaine des télécommunications et l'optoélectronique.

Ces deux dernières décennies, l'une et l'autre ont connu une évolution remarquable, avec une amélioration des performances, une réduction des coûts et une miniaturisation. Cela a favorisé l'apparition de ces capteurs dont l'utilisation dépasse complètement celle des capteurs classiques.

Un capteur à fibre optique est un appareil qui génère des informations dans un chemin optique en réagissant à la lumière et à la grandeur à mesurer, puis les transmet vers le récepteur optique par le biais d'une ou plusieurs fibres optiques. Les ensembles comprenant un capteur traditionnel et un système de transmission par fibres optiques ne sont pas inclus dans cette définition. En revanche, le transducteur, un élément optique sensible à la mesure, peut être ou non une fibre optique. Il est possible de prendre des mesures de manière ponctuelle ou répartie. Les mesures ponctuelles ne permettent de détecter ou de mesurer le phénomène qu'en un seul point. En revanche, il est possible de déterminer la grandeur physique sur toute la longueur de la fibre, ce qui permet une détection précise et une résolution spatiale élevée. Les capteurs actifs sont également différenciés des capteurs passifs. Dans le premier cas, la lumière est produite par une source optique. La propagation de l'onde lumineuse dans la fibre est influencée de manière directe ou indirecte par le phénomène physique dont on parle. Dans le premier cas, la lumière est produite par une source optique. Le phénomène physique qui est mesuré affecte directement ou indirectement l'onde lumineuse qui se propage dans la fibre. Dans le deuxième cas, la lumière est produite par le phénomène physique lui-même. [47]

6. Capteurs à cristaux photoniques :

La plasmonique de surface a été largement utilisée dans le domaine de la détection biologique. Ces dernières années, l'utilisation de ces cristaux photoniques a suscité un intérêt pour évaluer le changement d'indice de réfraction. [48]

Effectivement, l'utilisation régulière de micro-structuration du matériau permet de capter les photons et de générer des résonances optiques extrêmement sensibles à la présence des molécules à repérer. Plus récemment, de nombreux projets de recherche ont été lancés en utilisant les cristaux photoniques comme élément de détection en raison de leur structure de bande et de leur capacité à contenir la lumière. En raison de leur grande sensibilité aux variations d'indices de réfraction, plusieurs types de cristaux photoniques sont employés comme capteurs.

Par exemple : La technologie SPR utilise les variations de phase des plasmons, qui correspondent aux variations d'épaisseur des analyses biologiques d'un cristal photonique. Des lasers fabriqués à partir de cristaux photoniques ont été employés comme biocapteurs. [49]

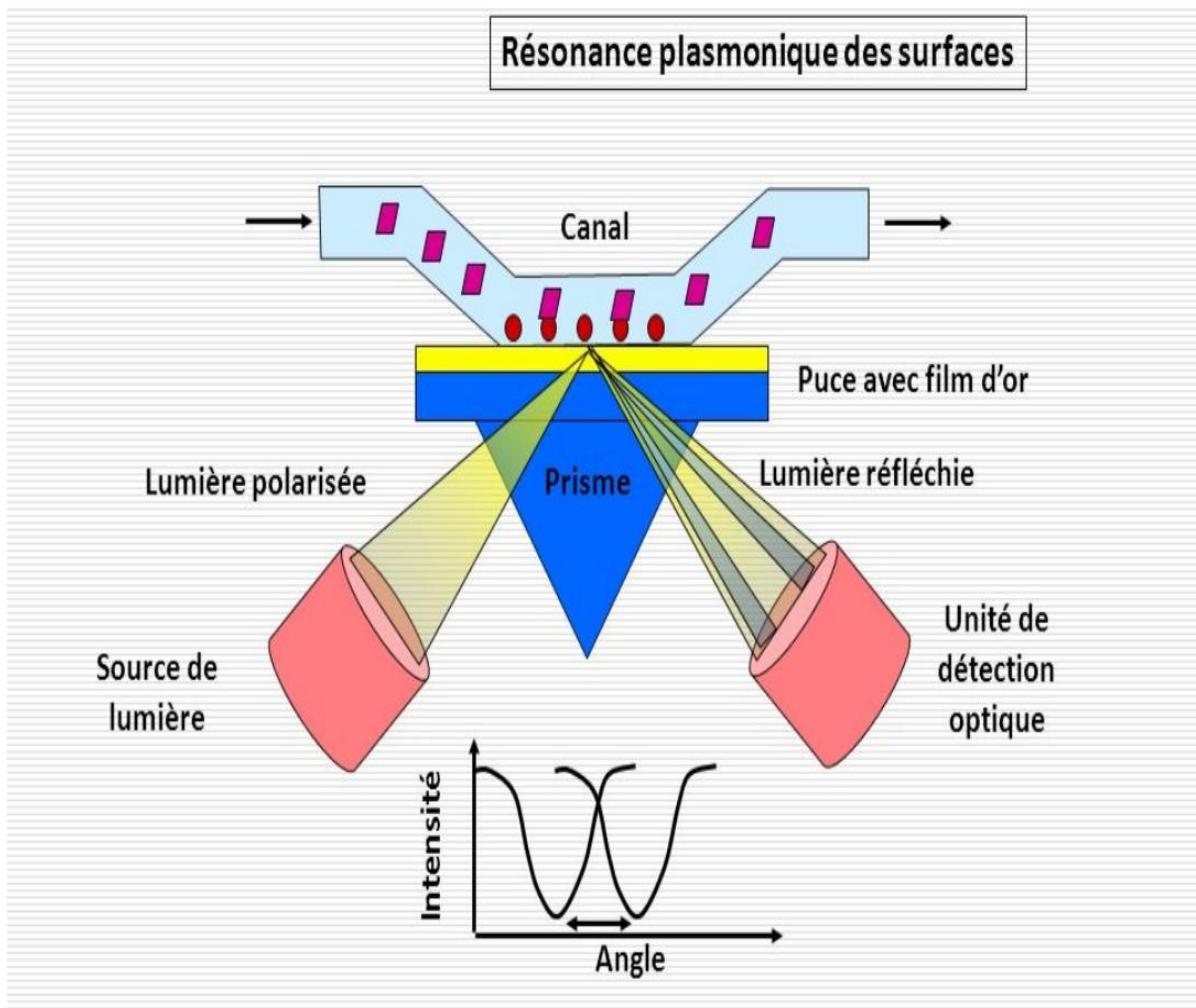


Figure II.11: Analyse des cristaux photoniques en silicium destinés à la détection biologique

7. Couplage guide –cavité

Les guides à cavités couplées sont appelés aussi guides CROW (Coupled Resonator Optical Waveguide). Ils sont composés d'une chaîne de cavités fortement couplées séparées par un ou plusieurs trous [50-51]. Les cavités sont dessinées de façon à ce que leurs fréquences propres se situent dans le gap photonique du CP 2D. Bien que les modes de cavité soient fortement confinés à l'intérieur des cavités, le recouvrement évanescent entre deux modes des cavités voisines est suffisant pour permettre le passage par saut d'un photon d'une cavité à l'autre (figure IV.13) [52] Les guides à cavités couplées sont donc intéressants pour la réalisation des fonctions optiques tels que : les capteurs [53], les fibres [54], les multiplexeurs [55], les filtres [56], et les ports logiques [57]. On peut aussi utiliser les cavités couplées pour la Fabrication de livrages aigus à fort taux de transmission ou de fonctions de démultiplexage.

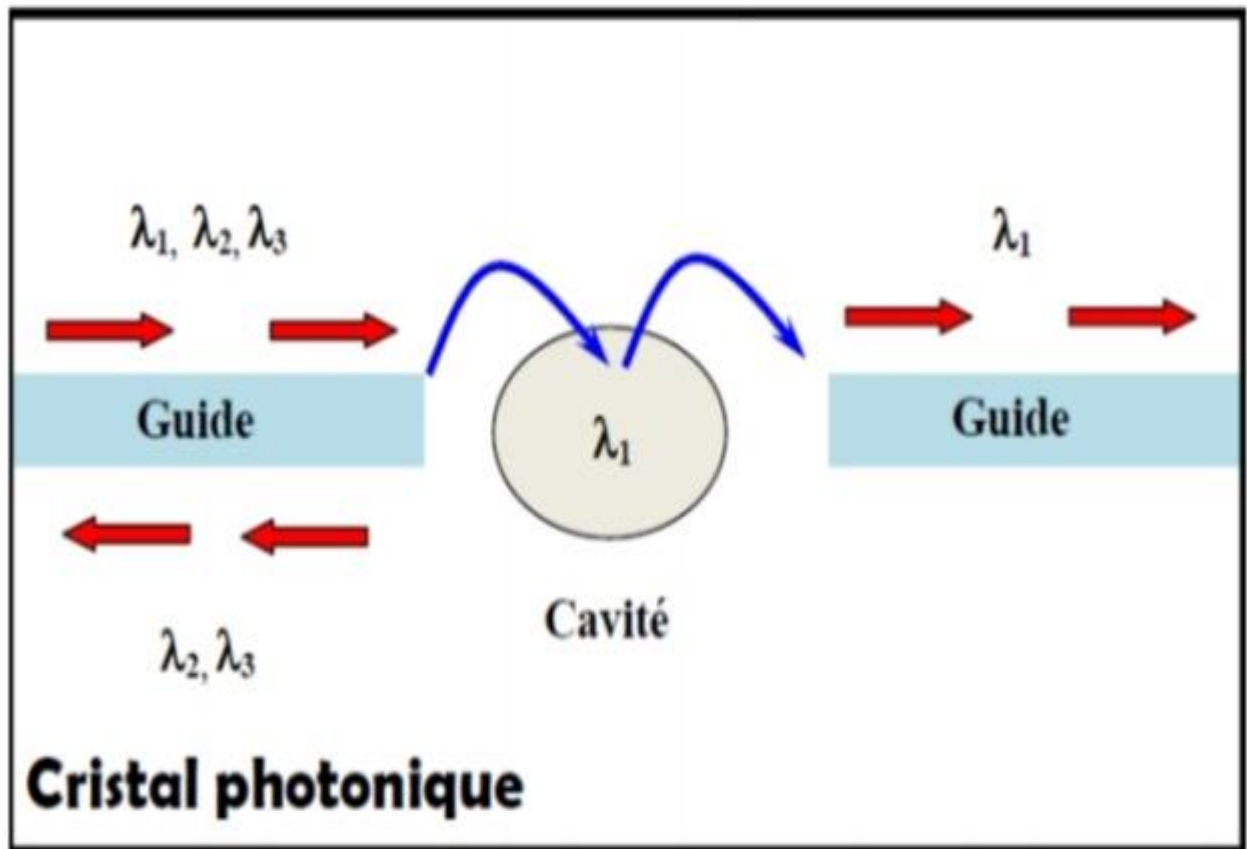


Figure II 12 : Dispositif associant guide et cavité d'un même cristal photonique Bidimensionnel.

8.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé les capteurs optiques et plus spécifiquement ceux employés dans le domaine de la bio détection. Nous avons également exposé les technologies de détection les plus en vogue. Nous nous sommes concentrés sur les capteurs à cristaux photoniques en raison de leurs caractéristiques optiques essentielles telles que le confinement élevé de la lumière dans des volumes restreints. Les études expérimentales systématiques sont coûteuses tant sur le plan du temps que financier en raison de cette difficulté. Ainsi, il a été essentiel de posséder une modélisation théorique et numérique performante et rapide pour économiser du temps et réduire les coûts des expériences. En conséquence, le prochain chapitre sera entièrement consacré à la présentation globale de la conception et la simulation d'un biocapteur à cristaux photoniques pour la détection de différentes cellules cancéreuses en utilisant le logiciel Rsoft.

CHAPITRE 3

***CONCEPTION ET SIMULATION
D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES
CANCERUSES***

1. Introduction :

Au cours des dernières années, les cristaux photoniques (CPs) ont suscité une grande curiosité en raison de leurs propriétés cruciales de régulation et de manipulation de la lumière à travers le cristal. En se basant sur cette caractéristique, de nombreux chercheurs décident de concevoir et d'utiliser différents dispositifs optiques, tels que les décodeurs optiques, les portes logiques, les capteurs, etc. Parmi les dispositifs divers à CPs on trouve les biocapteurs.

Les cristaux photoniques à double dimension (2D) ont démontré leur capacité à détecter des microcavités optiques avec un facteur de qualité Q élevé [81, 82, 83]. Ce fait les rend très intéressants pour la création de capteurs à haute sensibilité. Dans cette étude, on propose un biocapteur RI à CP-2D. Cette dernière est à base d'un couplage guide-cavité.

Dans la section 1, nous proposerons une architecture pour un biocapteur, Comme pour la section 2, nous modifions les paramètres structurels en fonction des caractéristiques de la cavité et des trous défectueux.

2. Représentation du logiciel R SOFT CAD :

2.1. Environnement de CAD :

Le RSoft CAD est un programme de base de R Soft photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des dispositifs de guide d'onde, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Dans le Rsoft, il existe plusieurs modules intégrés, chaque module assure une fonction bien précise, parmi ces modules se trouve :

2.2. Le simulateur « BandSOLVE » :

Le logiciel que nous avons exploité pour modéliser les structures par la méthode des ondes planes s'appelle « BandSOLVE » développé par Rsoft. BandSOLVE est un logiciel de simulation des structures de bande photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour produire des diagrammes de bande des structures à bandes interdites photoniques classiques tels que 2D et 3D et les guides à cristaux photoniques en utilisant une méthode super cellule type onde plane. A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différentes : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux

CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA DETECTION DES CELLULES CANCERUSES

polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas.

En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation. BandSOLVE est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques. BandSOLVE est destiné pour fonctionner avec les autres modules de simulation de Rsoft tels que BeamPROP et FullWAVE, il partage le même outil de CAD avec ces modules. En particulier, le BandSOLVE est spécialement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques.

2.3. Le simulateur « FULL WAVE » :

L'objectif de FullWAVE est de fournir un ensemble de simulations pour calculer la propagation de la lumière dans les guides d'ondes de géométries arbitraires. La simulation est basée sur la technique de la FDTD (Finité Différence Time Domain). La FDTD est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel ; elle utilise l'outil numérique des différences finies. On peut obtenir les réponses en champs TE et TM simultanément.

2.4. Fenêtre de programme de CAD :

La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état (voir figure. III.1).

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**

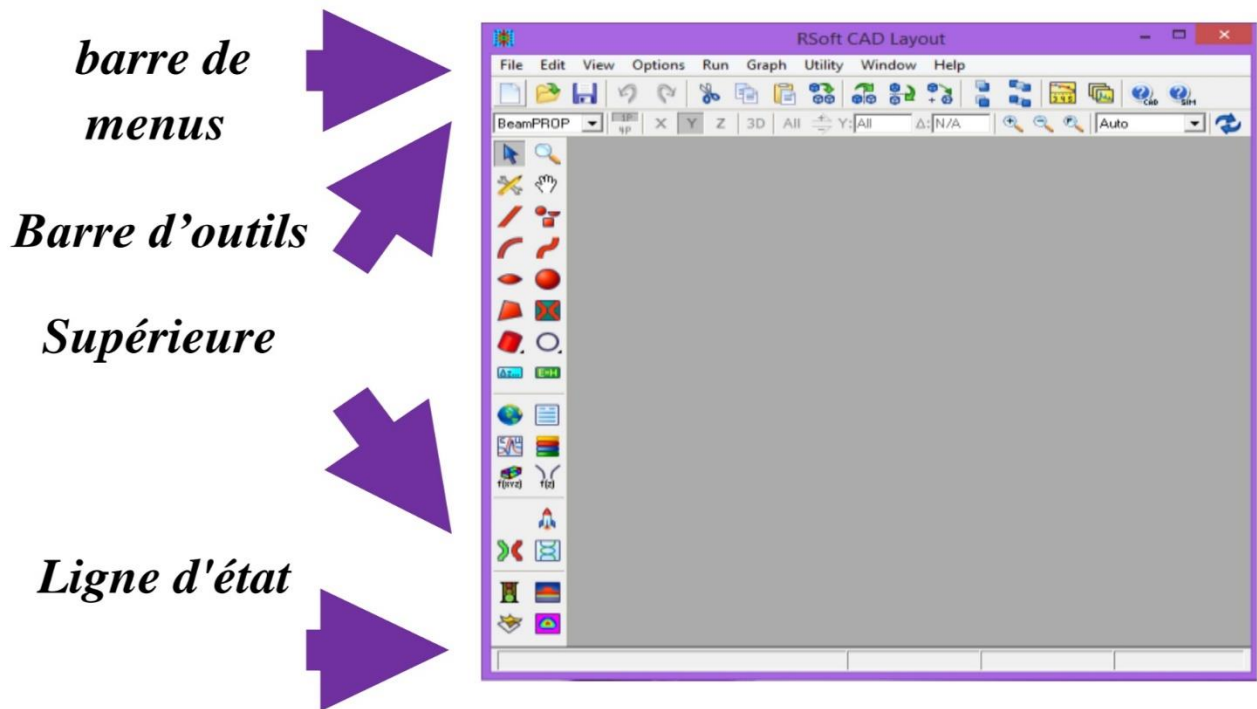


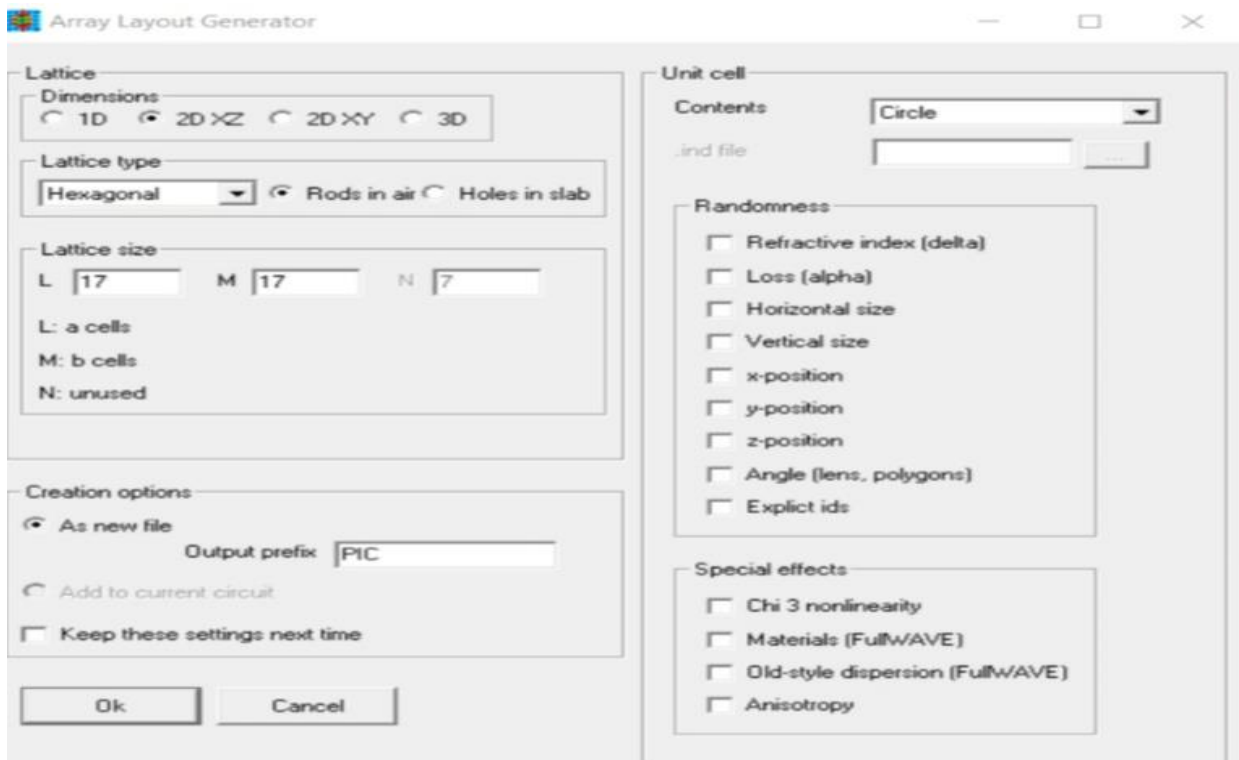
Figure III.1: La fenêtre de programme de R Soft CAD, montrant la barre de menus au dessus, les barres des outils supérieurs et gauches, et la ligne d'état au fond.

3. Générer la structure du réseau :

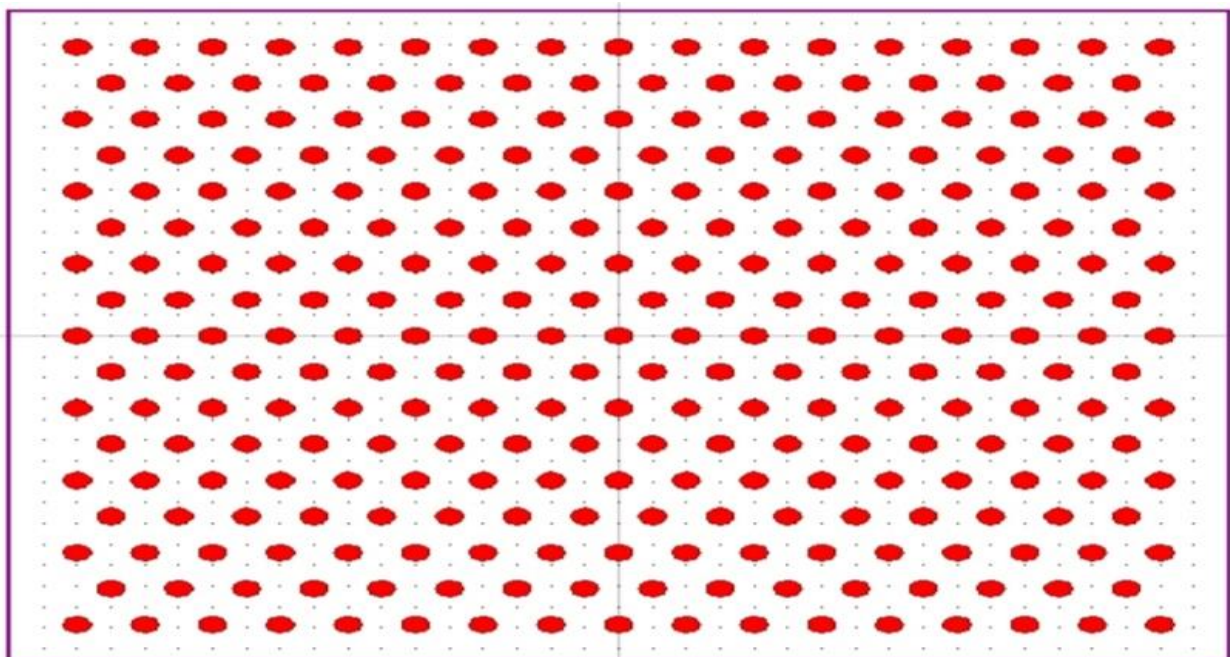
3.1. Structure initial :

Une fois que les différentes informations ont été fournies (type de réseau, forme de motif, nombre de rangés et nom du circuit), il suffit de cliquer sur le bouton OK pour obtenir la structure du cristal photonique qui est présentée dans la (figure III.2(a)). Dans cette section, nous allons présenter la méthode de création d'un réseau de cristaux photoniques dans l'interface de CAD. En général, il y a différentes façons de concevoir une structure de réseau dans l'interface de CAD. Mais le moyen le plus simple est d'utiliser l'une des nombreuses fonctions de disposition qui sont fournies avec Full WAVE pour expédier la création de ce réseau en utilisant le système de disposition Array (figure III.2(b)).

**CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**



(a)



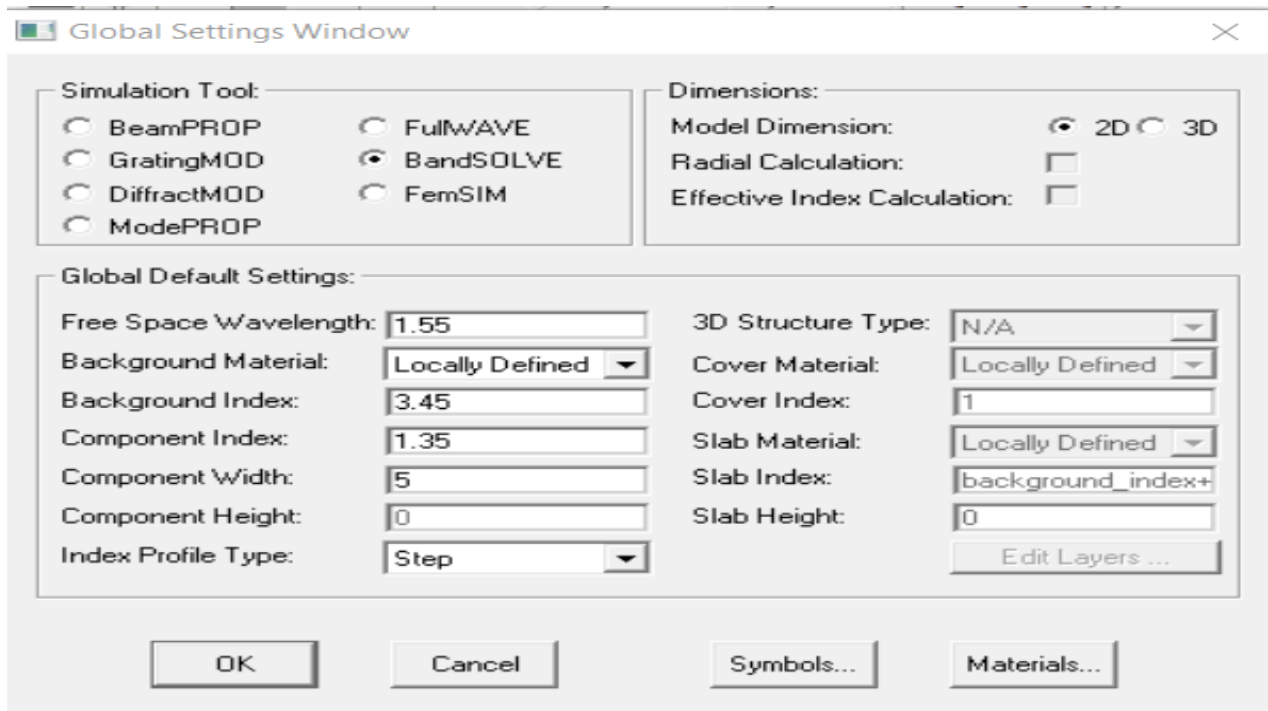
(b)

Figure III.2: (a) présentation du réseau. (b) Paramètres de création de la rangée XZ.

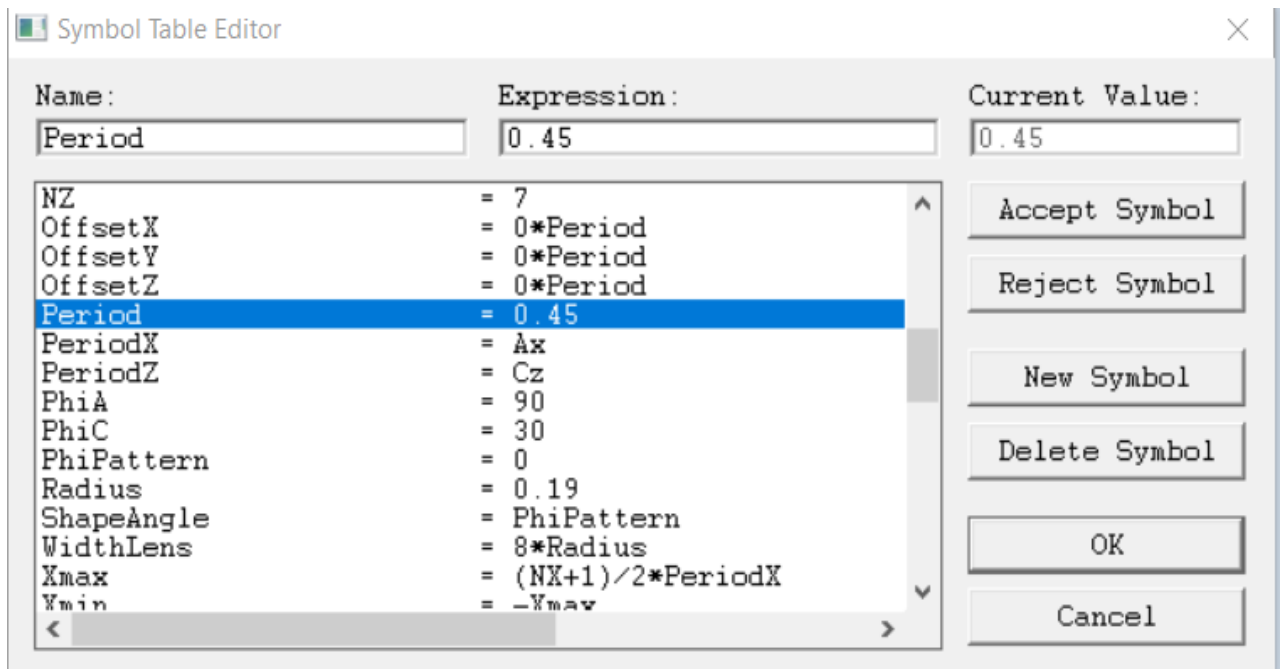
Le cristal photonique est un réseau à maille hexagonale. Les paramètres du réseau donné comme suite : $r = 190\text{nm}$, $a = 450\text{nm}$. L'indice de réfraction (n) des trous diélectriques est fixé à

**CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**

3.45 (c'est l'indice de réfraction du silicium). La structure photonique est composée de 17×17 trous diélectriques dans le plan (xz). Dans la conception et la simulation, nous avons utilisé FDTD pour la simulation numérique (BandSOLVE et FullWAVE).



(a)



(b)

Figure. III. 3 : (a) Arrangements Global, (b) Le tableau de l'éditeur des symboles

3.2. Etude des bandes interdites :

Le diagramme de bande interdite de cette structure est représenté en (figure III.3) De cette figure on constate l'existence de bandes interdite optique pour le mode de propagation TM (Transverse magnétique). La bande interdite le plus large est celle correspondante au mode TM, de ce fait c'est elle entre autres qui seront exploité. La bande s'étend entre les fréquences normalisées 0.25692 et 0.36095 ce qui correspond une BIP dans la gamme de longueur d'onde de 1.2467 μm et 1.7623 μm pour la lumière polarisée TM comme le montre La figure. III.4.

Le calcul des bandes interdite est réalisé par le module Band Solve de l'environnement R Soft.

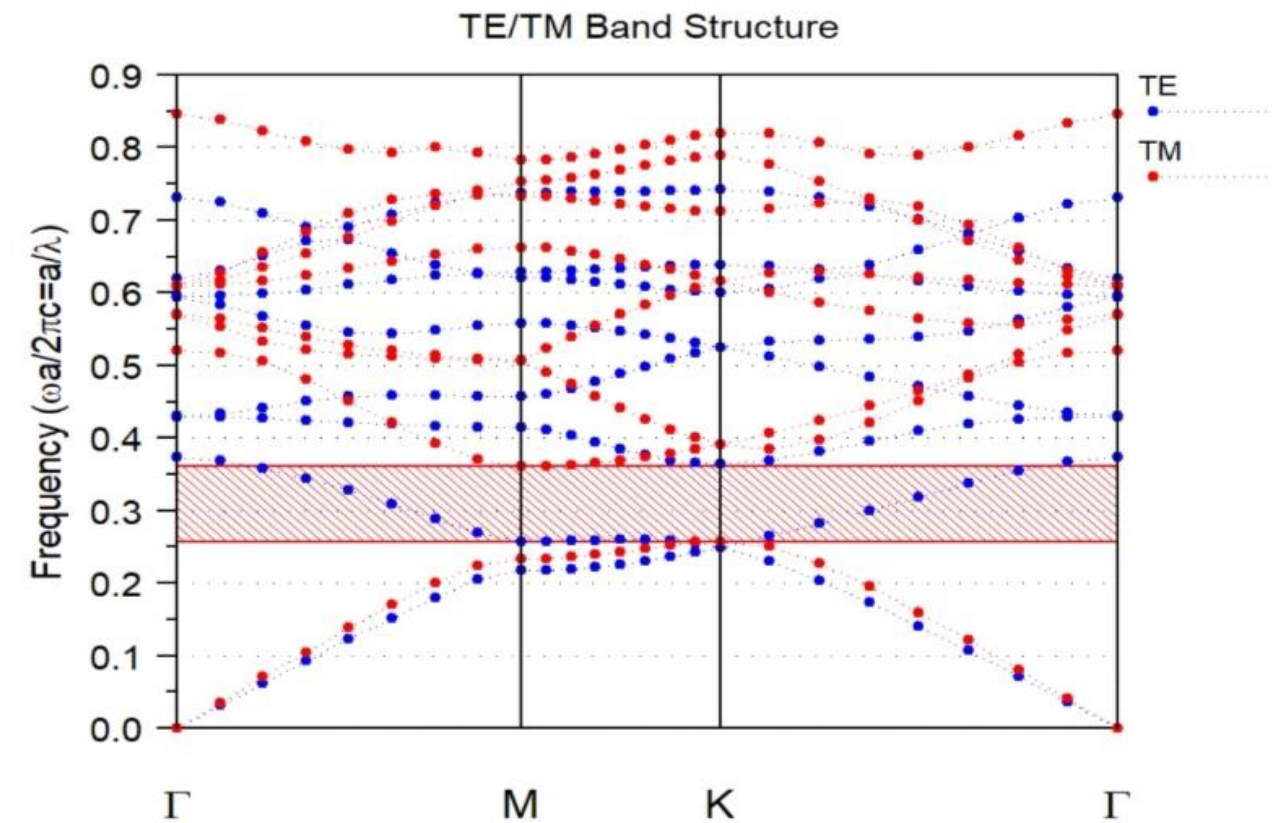


Figure. III.4: Diagramme de bande interdite photonique en (TE et TM) de La structure d'un cristal photonique 2D à réseau triangulaire

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**

3.3. Mécanisme de détection des cellules cancéreuses :

La principale innovation de notre travail repose sur la proposition et la création d'un nouveau biocapteur à cristaux photonique miniature, à la fois économique et très sensible, qui utilise un guide d'onde couplé à un résonateur de Fano. Grâce à ce biocapteur, il est possible de repérer les cellules cancéreuses (cell-Jurkat-HeLa-PC12-MDA-MB-231-MCF-7) dans une solution biologique qui est déposée surface du résonateur.

Cell	RI
Zero cancer cell	1.350
Jurkat	1.390
HeLa.	1.392
PC12.	1.395
MDA-MB-231	1.399
MCF-7	1.401

Tableau. III. 1 : Données d'indice de réfraction pour les cellules saines et cancéreuses [1]

La détection de ce biocapteur est basée sur les modifications de la localisation spectrale de la longueur d'onde de résonance causées par les variations d'indice de réfraction. Ce changement d'indice est causé par la présence de cellules à la surface du micro résonateur. La mesure de l'intensité lumineuse à la sortie du biocapteur révèle une différence entre la longueur d'onde de résonance et l'intensité lumineuse en présence de cellules saines et cancéreuses.

3.4. Structure proposée :

La forme hexagonale 2D du biocapteur est constituée de deux guides d'ondes en ligne horizontale et d'une cavité résonante entre eux. La (figure III.4) illustre cette nouvelle structure. Les quasi-guides d'ondes en ligne sont obtenus en retirant quatre trous de silicium pour les deux côtés, ce qui constitue l'entrée et la sortie.

On a des rayons de certaines trous internes, comme le trou centrale (**bleue**) ($R_C=300\text{nm}$), huit trous (**gris**) ($r_1=150\text{nm}$) et quatorze trous (**vertes**) ($r_2=200\text{nm}$), est responsable de la formation de la cavité résonante. Le moniteur situé à la sortie du capteur permet d'observer la longueur d'onde de résonance.

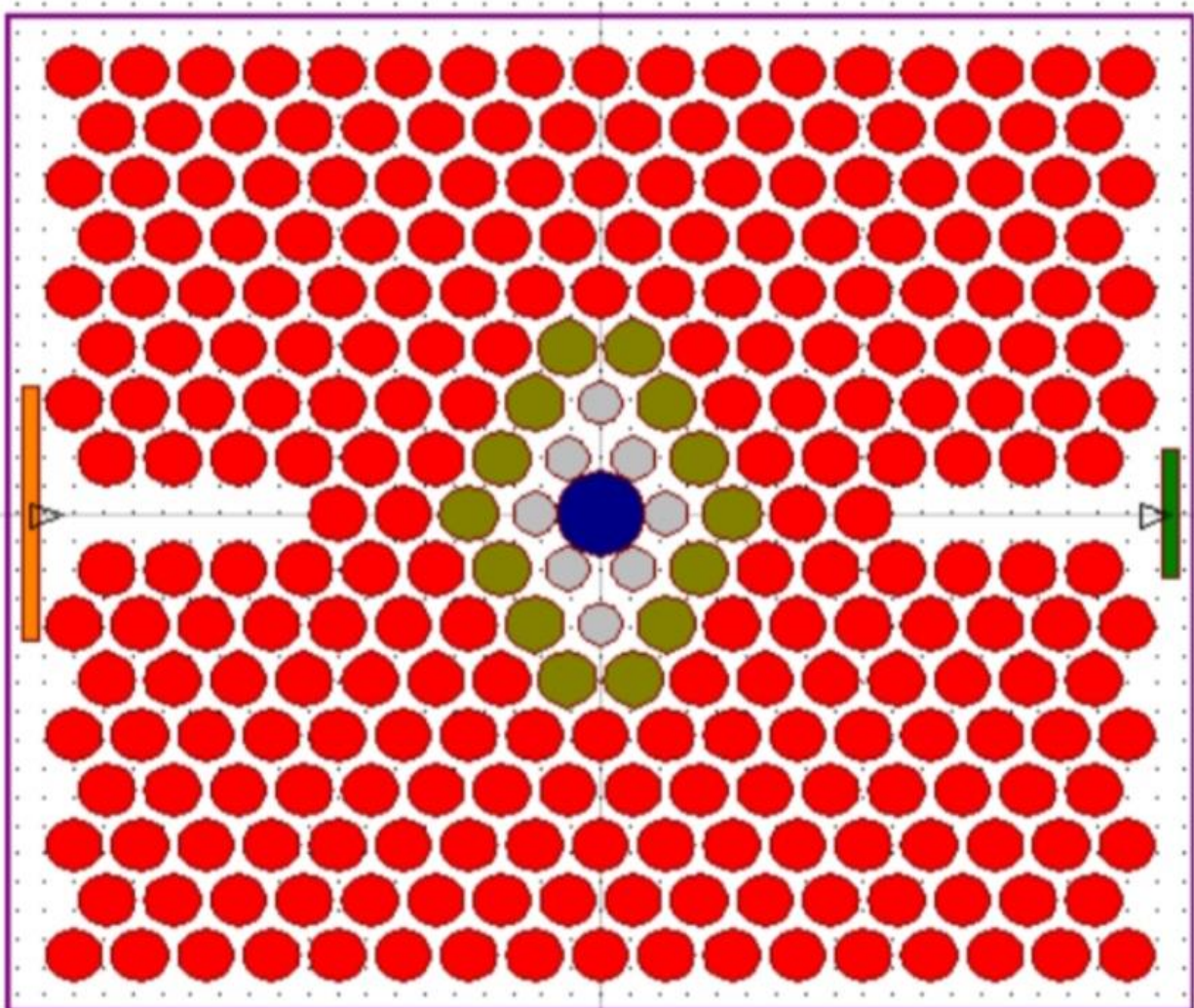


Figure III.5: La structure proposée.

3.5. Etude de la réponse de structure proposée :

Tout d'abord ; sur la base de la cellule d'une personne en bonne santé, nous essayons de vérifier la réponse de notre structure, Nous avons remarqué qu'il y a deux modes distincts qui se manifestent dans la structure. Voir figure III.6.

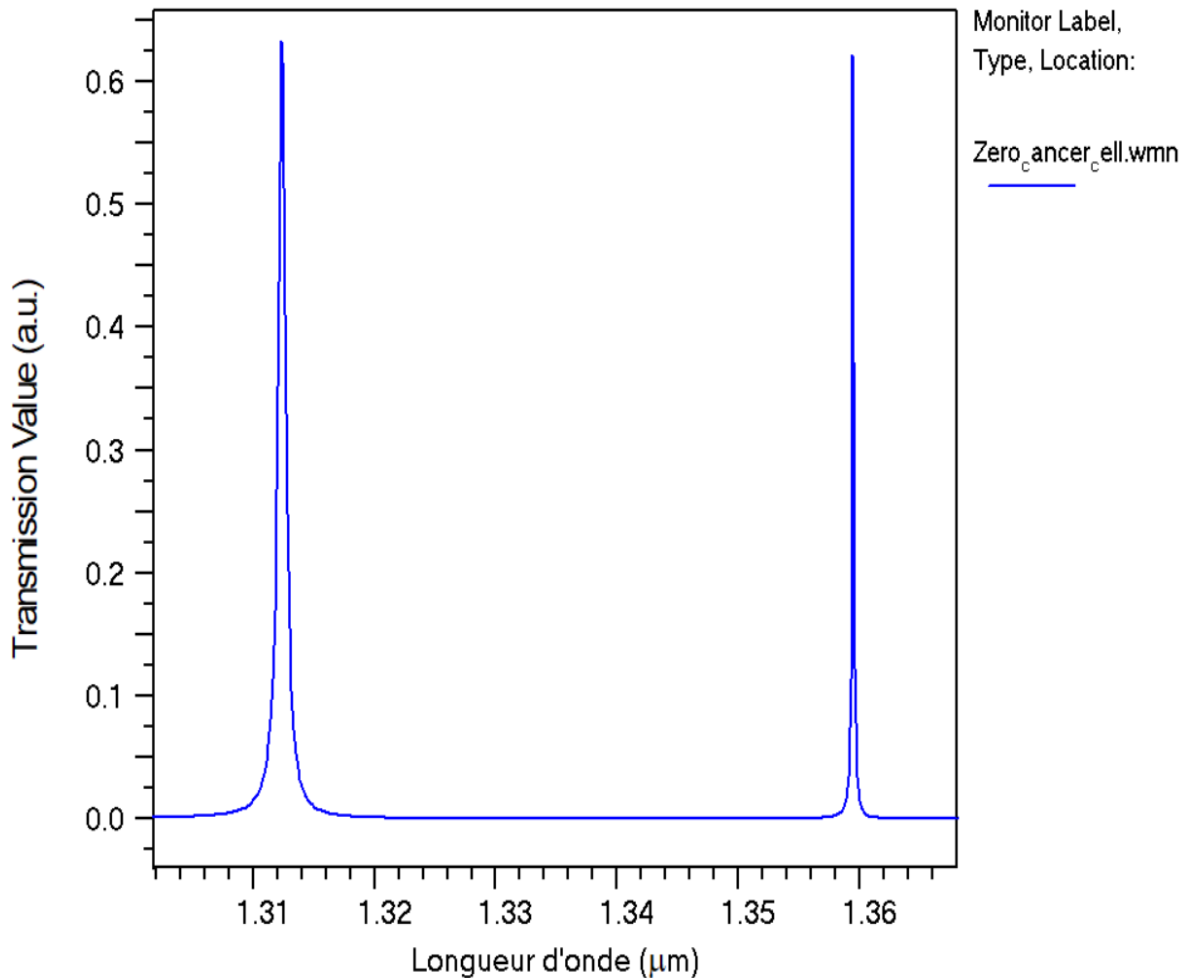


Figure III.6 la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD- 2D(n=1.35)

3.6. Détection du cancer :

Après avoir détecté les différentes cellules cancéreuses, nous avons observé un décalage des longueurs d'onde dans les deux modes, mode 1 et mode 2, comme illustré dans la figure III.7.

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCEREUSES**

Ce décalage des longueurs d'onde peut être expliqué par les interactions spécifiques entre la lumière et les cellules cancéreuses. Lorsque les cellules cancéreuses interagissent avec la structure du cristal photonique, elles modifient l'indice de réfraction local. Cette modification entraîne un changement dans le chemin optique de la lumière, ce qui se traduit par un décalage des longueurs d'onde. Le phénomène est détecté dans les deux modes, indiquant que la structure est sensible aux variations induites par la présence des cellules cancéreuses, permettant ainsi une détection précise et différenciée.

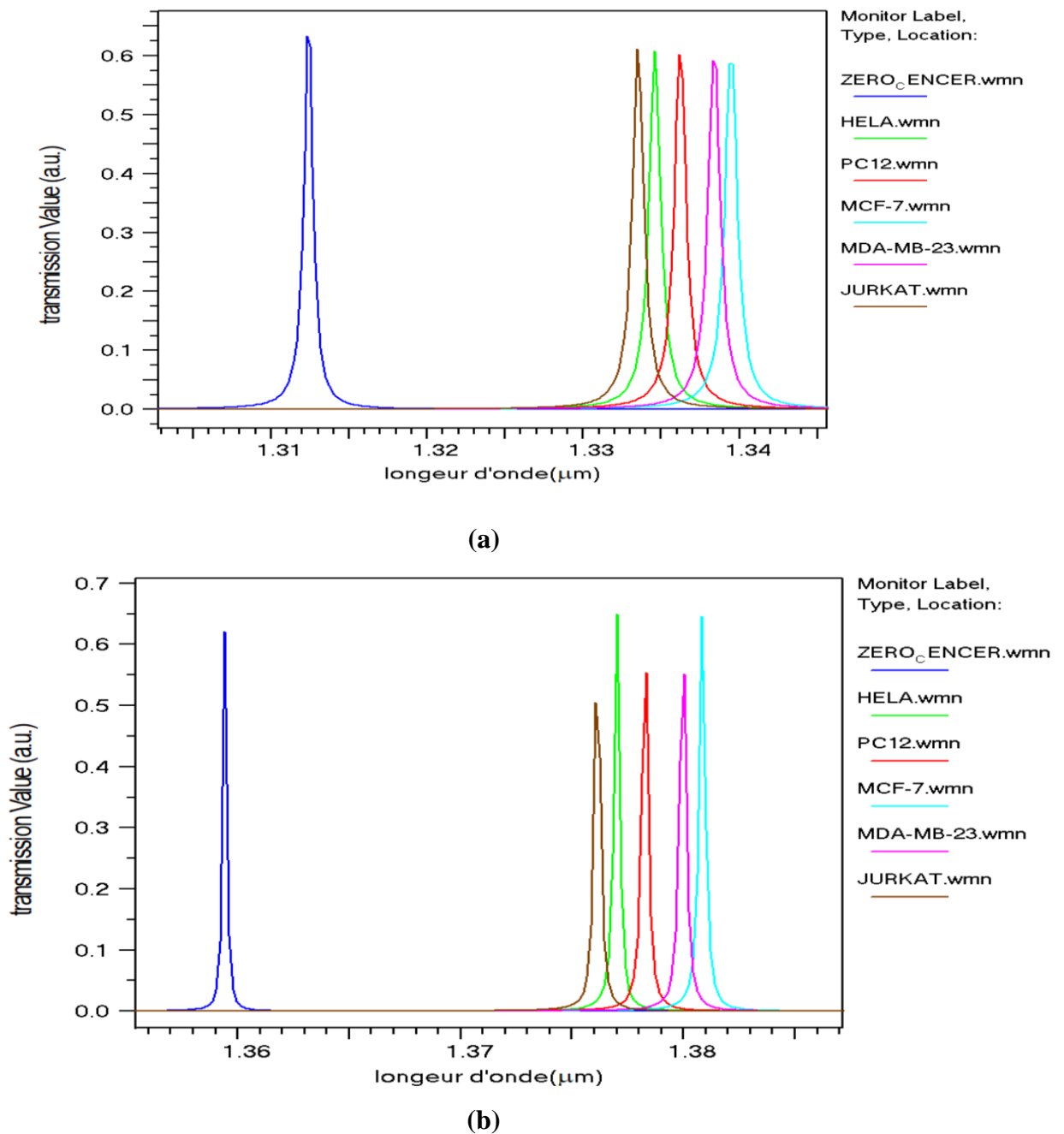


Figure III.7 : Spectre de transmission obtenu pour différentes cellules saines et Cancéreuses (a)mode1,(b)mode2

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**

D'après la figure III.8 représentant la variation de la longueur d'onde en fonction de l'indice de réfraction, nous remarquons une relation linéaire entre ces deux paramètres. Cela indique que, à mesure que l'indice de réfraction augmente, la longueur d'onde se décale proportionnellement.

Cette relation linéaire s'explique par l'interaction entre les cellules cancéreuses et le cristal photonique. Lorsque des cellules cancéreuses sont présentes, elles modifient l'indice de réfraction local de l'environnement optique du cristal. Cette modification entraîne un changement linéaire de la longueur d'onde de la lumière transmise par le cristal photonique. En d'autres termes, les variations de l'indice de réfraction dues à la présence des cellules cancéreuses provoquent des décalages prévisibles et proportionnels des longueurs d'onde, ce qui permet une détection précise et fiable des cellules cancéreuses à partir des mesures optiques.

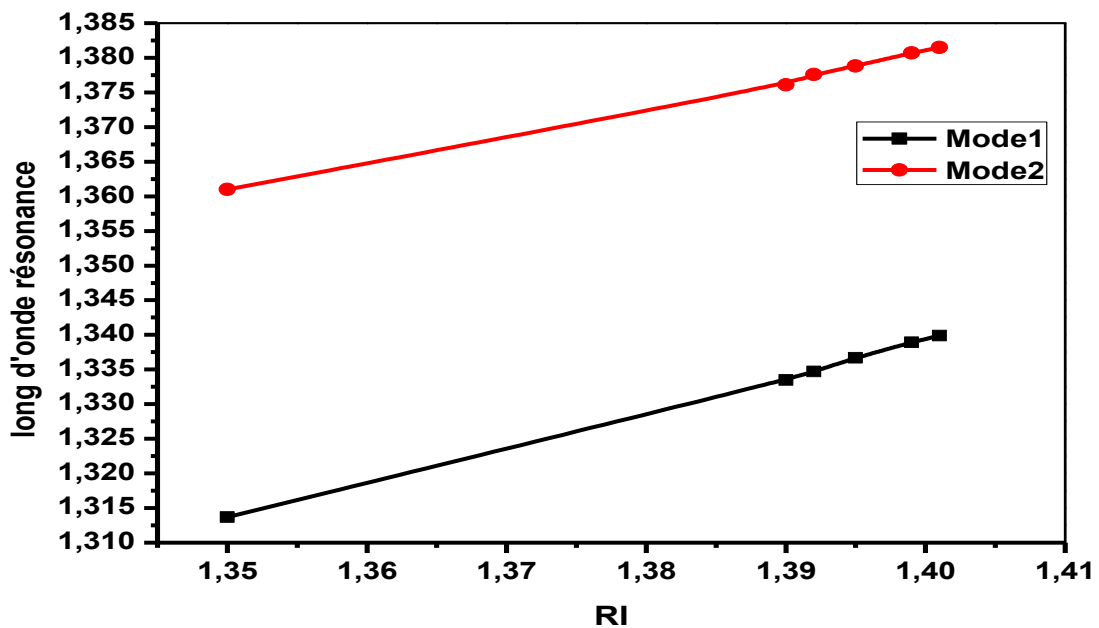


Figure III.8: le décalage de la longueur d'onde résonnante en fonction de l'indice de réfraction.

D'après le tableau III.2, nous observons une variation de la sensibilité et du facteur de qualité en fonction de la longueur d'onde. De plus, il est évident que la structure proposée atteint une sensibilité maximale de 514,28 nm/RIU dans le mode 1 et de 402,04 nm/RIU dans le mode 2.

**CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCEREUSES**

Tableau. III.2: la variation de la sensibilité et le facteur de qualité de structure proposée pour les cellules cancéreuses.

RI	Mode 1	Mode 2	S1	S2	Q1	Q2
1.35	1.3137	1.361			3268	7665
1.39	1.3335	1.3761	500	395	2232	5303
1.392	1.3347	1.3776	511.11	395.55	2680	5308
1.395	1.3367	1.3788	514.28	402.04	2655	5201
1.399	1.3389	1.3807	513.72	401.96	2687	5324
1.401	1.3399	1.3815	495	377.5	2241	3197

D'après les résultats mentionnés dans le tableau III.2, et schématisées dans la figure III.9, on remarque que la sensibilité augmente avec l'augmentation de l'indice de réfraction jusqu'à une valeur de 1,395 pour les deux modes, puis diminue par la suite.

Cette variation peut être expliquée par la manière dont les cristaux photoniques interagissent avec la lumière. À des indices de réfraction inférieurs, l'augmentation de l'indice de réfraction améliore la résonance optique, ce qui entraîne une augmentation de la sensibilité. Cependant, au-delà de l'indice de 1,395, la structure optique du cristal photonique atteint un point de saturation où les changements supplémentaires de l'indice de réfraction n'entraînent plus des variations significatives de la résonance. Cela conduit à une diminution de la sensibilité, car les effets des modifications de l'indice de réfraction deviennent moins prononcés.

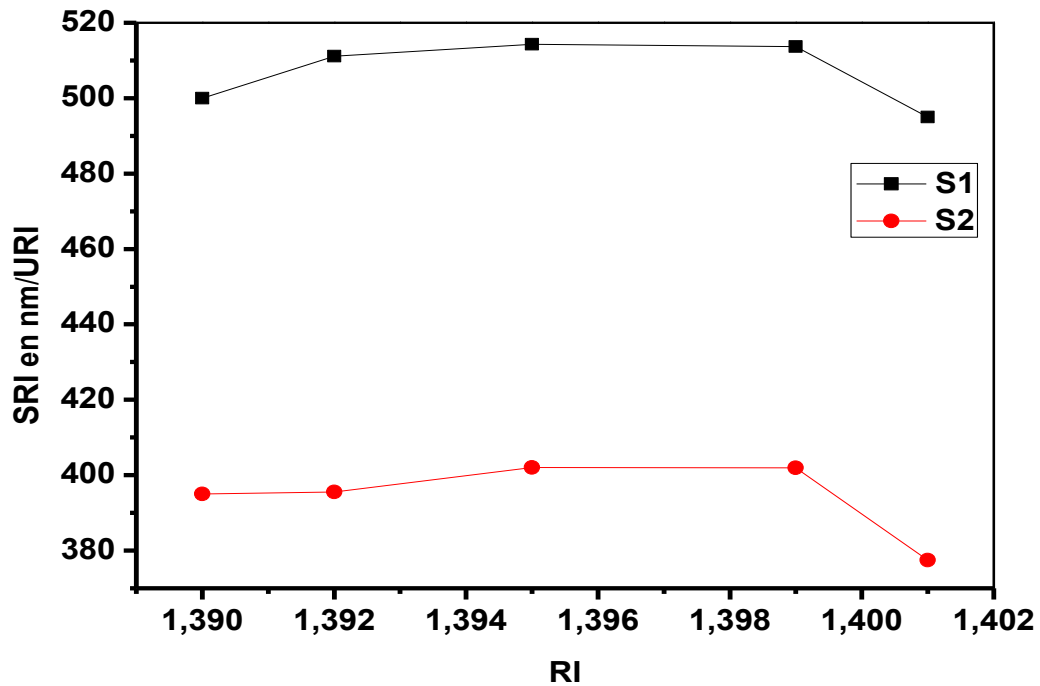


Figure III.9 : courbes des sensibilités SRI en fonction de RI

4. l'Optimisation :

Nous allons essayer d'améliorer cette structure en y apportant quelques modifications pour obtenir une meilleure sensibilité.

Les modifications que nous avons apportées étaient les suivantes :

Nous avons progressivement ajusté la valeur de RC tout en définissant les valeurs de R1 et R2 aux deux premiers paramètres.

Ensuite, nous avons ajusté la valeur de R1 tout en maintenant RC à la valeur qui a produit la sensibilité maximale, tout en laissant R2 inchangé.

Lorsque nous avons ajusté la valeur de R2, nous avons maintenu RC et R1 aux deux valeurs qui ont produit les meilleurs résultats.

Les trois tableaux suivants détaillent précisément notre travail :

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**

Tableau. III.3 : la Sensibilités en fonction du changement de RC.

RC	RI	MODE1	MODE2	S1	S2
0.29	1.350	1.3142	1.3661		
	1.390	1.3353	1.3822	527.5	402.5
	1.392	1.3363	1.3831	526	404.7
	1.395	1.338	1.3843	528.9	404
	1.399	1.3404	1.386	534.7	406
	1.401	1.3412	1.3867	529.4	403
0.28	1.350	1.3187	1.371		
	1.390	1.3397	1.3869	525	397.5
	1.392	1.3408	1.3877	526.1	397.6
	1.395	1.3424	1.3889	526.5	388
	1.399	1.3447	1.3906	530	400
	1.401	1.3459	1.3914	533	400.2

Après avoir analysé les résultats du tableau III.3, on constate que lorsque RC =0.29 nm la sensibilité atteint sa valeur maximale. Par conséquent, cette valeur sera adoptée dans l'étude suivante.

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**

Tableau. III.4 : Sensibilités en fonction du changement de R1.

R1	RI	MOD1	MOD2	S1	S2
0.16	1.350	1.3072	1.533		
	1.390	1.3266	1.5591	485	652.5
	1.392	1.331	1.5649	484	654.7
	1.395	1.3275	1.5605	486	648
	1.399	1.3291	1.5622	485.7	651
	1.401	1.3321	1.5661	488	649
0.14	1.350	1.3589	1.4233		
	1.390	1.3772	1.437	457.5	342.5
	1.392	1.3781	1.438	457	350
	1.395	1.3795	1.4388	457.7	344
	1.399	1.3812	1.4401	455.1	342.8
	1.401	1.3823	1.4409	458.8	345

Après avoir analysé les résultats du tableau III.4, on constate que lorsque RC =0.16 nm la sensibilité atteint sa valeur maximale. Par conséquent, cette valeur sera adoptée dans l'étude suivante.

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**

Tableau. III.5 : Sensibilités en fonction du changement de R2.

R2	RI	MODE1	MODE2	S1	S2
0.18	1.350	1.3522	1.574		
	1.390	1.3715	1.6005	482.5	662.5
	1.392	1.3723	1.6018	478.5	661.9
	1.395	1.3738	1.6038	480	662
	1.399	1.3757	1.6064	479.5	661
	1.401	1.3766	1.6077	478	660
0.16	1.350	1.3191	1.5627		
	1.390	1.3392	1.5911	502.5	710
	1.392	1.3403	1.5926	504.7	711.9
	1.395	1.3417	1.5946	502	708.8
	1.399	1.3439	1.5974	506.1	708
	1.401	1.345	1.599	507.8	711.7

Après avoir analysé les résultats du tableau III.5, on constate que lorsque $R2 = 0,16$ nm la sensibilité atteint sa valeur maximale. Par conséquent, ces valeurs seront adoptées dans l'étude suivante.

4.1. Structure finale :

Sur la base de ce qui précède, la structure finale sera la suivante :

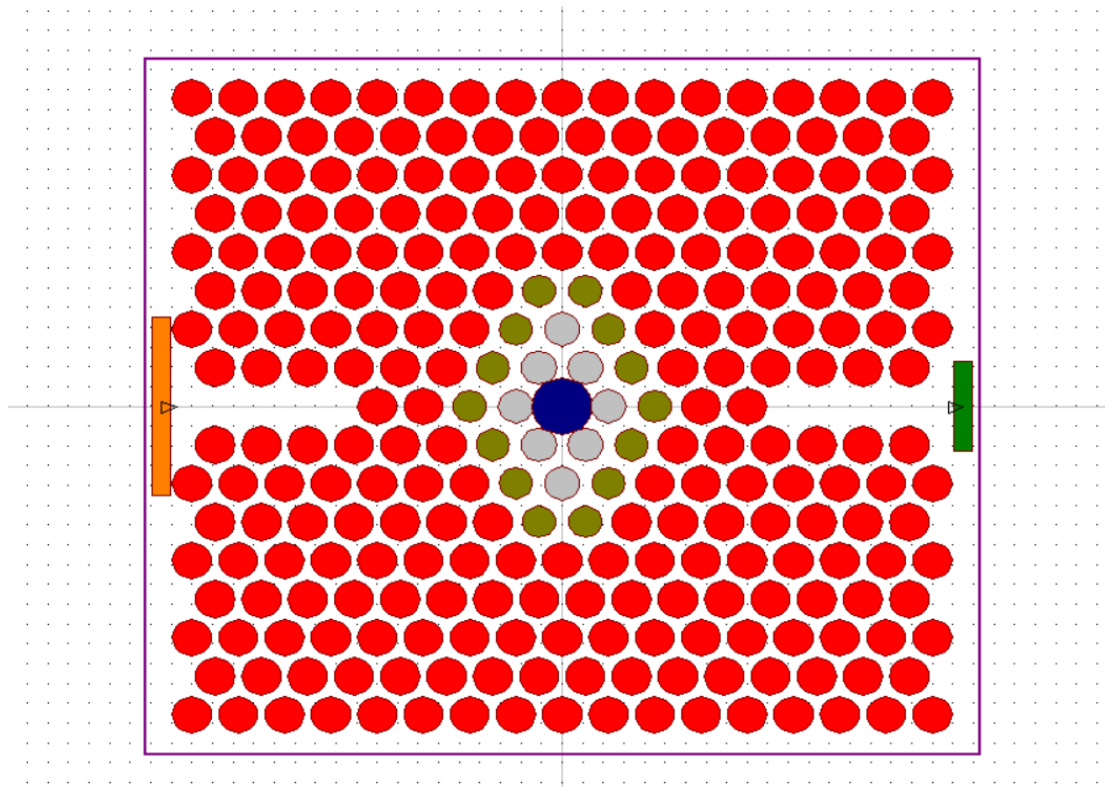
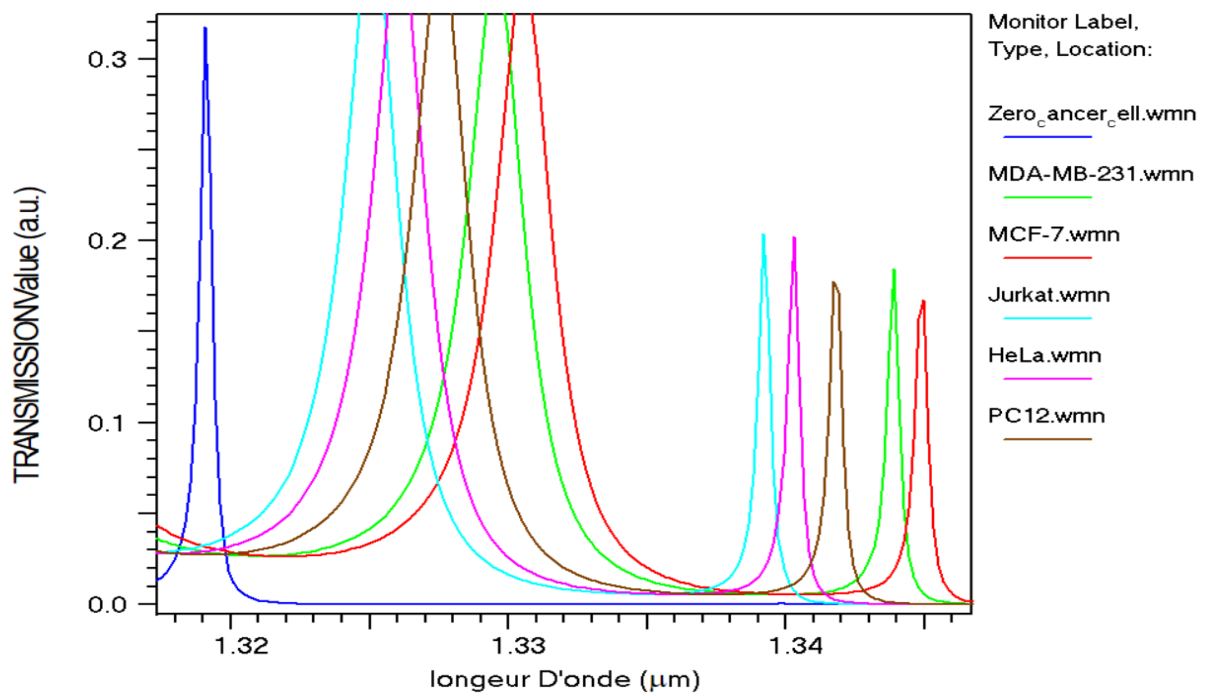


Figure.III.10 : structure final

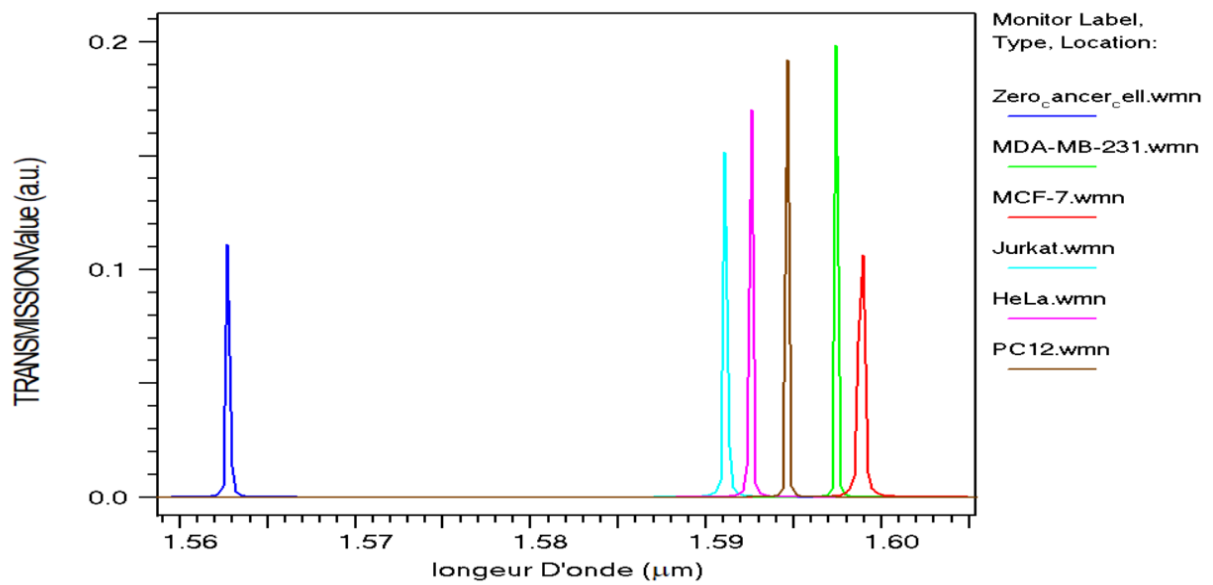
4.2. Détection du cancer :

Après les simulations de la structure optimisée, nous obtenons les courbes de transmission correspondant à différentes valeurs de l'indice de réfraction des cellules cancéreuses. Voir figure III.12.

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCERUSES**



(a)



(b)

Figure III.11: Spectre de transmission obtenu pour différentes cellules saines et Cancéreuses. (a)mod1,(b)mod2

**CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN BIOCAPTEURS POUR LA
DETECTION DES CELLULES CANCEREUSES**

Tableau. III.6: la variation de la sensibilité et le facteur de qualité de structure final pour les cellules cancéreuses.

RI	Mode 1	Mode 2	S1	S2	Q1	Q2
1.35	1.3191	1.5627			3268	7665
1.39	1.3392	1.5911	504.7	711.9	2232	5303
1.392	1.3403	1.5926	502	708.8	2680	5308
1.395	1.3417	1.5946	506.1	708	2655	5201
1.399	1.3439	1.5974	507.8	711.7	2687	5324
1.401	1.345	1.599	502.5	710	2241	3197

Sur la base des résultats du tableau précédent, nous pouvons dire que nous avons amélioré les sensibilités, puisque le mode2 a donné les meilleures valeurs qui ont atteint un maximum de 711.9 nm/RIU

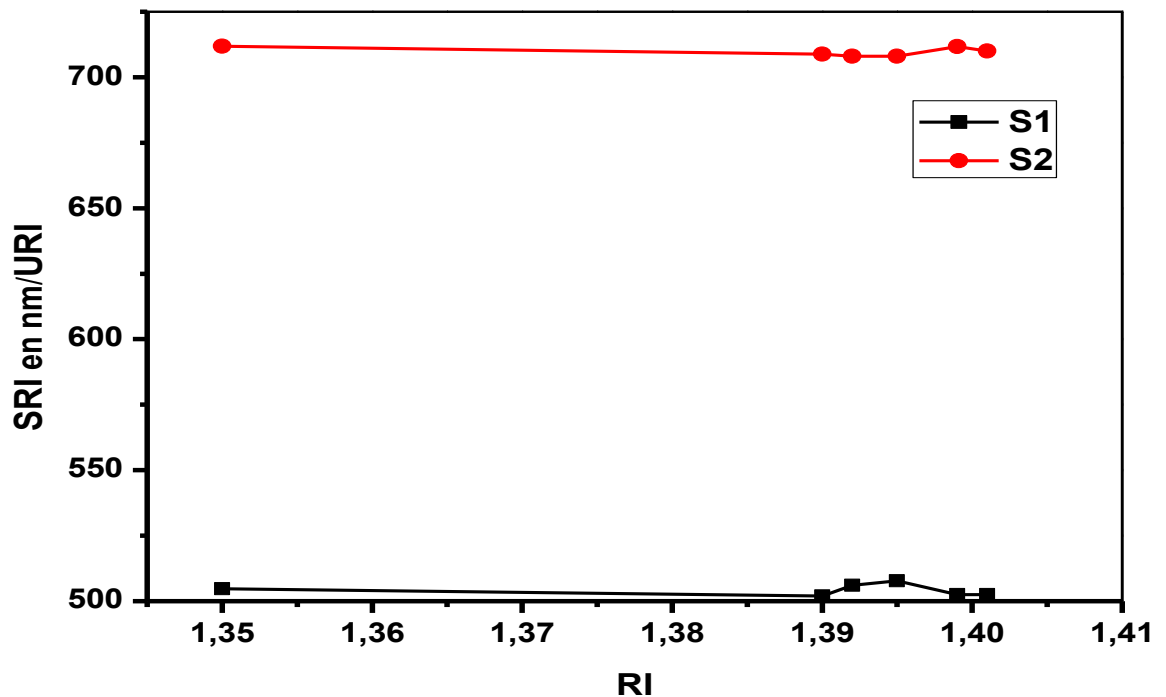


Figure III.12 : courbes des sensibilités SRI en fonction de RI

5. Conclusion :

Dans le domaine de la biomédecine, des biocapteurs à base de CP sont utilisés pour créer des tests de diagnostic de nouvelle technologie. Dans ce contexte, nous avons

Suggéré la conception d'un biocapteur à CP pour détecter les cellules cancéreuses en utilisant la variation de l'indice de réfraction. Qui sera amélioré par la suite en jouant sur ces paramètres technologiques.

Les résultats des simulations montrent une corrélation significative entre l'indice de réfraction des cellules cancéreuses et les courbes de transmission dans la structure étudiée. Cette corrélation suggère que les variations de l'indice de réfraction des cellules cancéreuses peuvent être détectées efficacement à travers l'analyse des courbes de transmission. Cette observation ouvre la voie à des applications potentielles dans le diagnostic précoce et la surveillance des cellules cancéreuses en utilisant des techniques optiques basées sur les cristaux photoniques. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour valider ces résultats et explorer davantage les implications cliniques de cette approche.

nous avons obtenu une sensibilité maximale de 711.9nm/RIU.

Conclusion
Général

Conclusion général :

Les cristaux photoniques représentent une avancée technologique significative avec un potentiel énorme dans diverses applications. Ils ouvrent la voie à une nouvelle ère dans le contrôle et la manipulation de la lumière, avec des implications révolutionnaires dans les technologies de l'information, les communications, la détection biologique notamment pour les maladies telles que le cancer.

Le cancer occupe la deuxième place en termes de mortalité à travers le globe. Elle permet d'augmenter considérablement les chances de succès du traitement en l'identifiant à une phase précoce de son développement. C'est dans ce cadre que se situe cette tâche de mémoire, la reconnaissance des cellules cancéreuses à l'aide d'un biocapteur à cristaux photonique. L'objectif de ce travail est consacré à l'étude et à la Conception d'un capteur à Cristaux photoniques bidimensionnels pour la détection du cancer, à l'aide du Logiciel Rsoft-CAD

Dans la première partie du mémoire, nous avons présenté les principes de base des cristaux photoniques, leurs définitions, leurs différents types et leurs principes de Fonctionnement. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les notions de base sur les capteurs et dans ce cadre nous avons abordé leurs principales caractéristiques et leurs différents types. Et à la fin de ce chapitre nous avons présenté une description des Biocapteurs plus particulièrement les capteurs qui détecte le cancer.

Le chapitre final se concentre sur la présentation de la conception et la simulation d'un biocapteur à cristaux photoniques et les résultats obtenus lors de cette étude. En ajustant l'architecture et la géométrie de la conception proposée, on peut accroître la sensibilité du biocapteur en infiltrant les échantillons.

Le déplacement de la longueur d'onde de résonance est influencé par les éléments biologiques présents dans les trous.

Notre proposition consiste à utiliser des biocapteurs à CPs 2D pour détecter le cancer en se basant sur la variation de l'indice de réfraction. Il est important de noter que les cellules cancéreuses présentent des indices de réfraction plus élevés que les cellules normales, en raison de la présence d'une quantité plus importante de protéines dans leur noyau plus gros, ce qui entraîne une division cellulaire rapide.

Nous avons employé deux modules de simulation RSOFT pour réaliser la simulation, le BandSolve qui repose sur la méthode des ondes planes (PWE) et le Fullwave qui repose sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (FDTD-2D).

Conclusion générale

Selon les résultats obtenus à l'aide de la méthode FDTD, il est observé que même pour de légères variations dans la réflectivité des échantillons d'entrée, il y a une variation significative de la longueur d'onde de résonance, ce qui indique que le biocapteur développé est extrêmement sensible, même aux fluctuations minimales de RI. Notre biocapteur a démontré une sensibilité satisfaisante de 711.9 nm/RIU dans divers échantillons de cellules cancéreuses. Grâce à notre biocapteur optique optimisé, il est possible de repérer la présence du cancer, sa sensibilité, élevée est compétitive par rapport aux autres biocapteurs actuels.

REFERENCES

- [1] Arafa H. Aly, Zaky A. Zaky « Ultra-sensitive photonic crystal cancer cells sensor with a high-quality factor » , Contents lists available at ScienceDirect , Cryogenics 104 (2019)
- [2] Mohamed, M.S., Hameed, M.F.O., Areed, N.F., El-Okr, M.M., Obayya, S.S.A.: Analysis of Highly Sensitive Photonic Crystal Biosensor for Glucose Monitoring. Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 31, (2016).
- [3] Shiramin, L.A., Kheradmand, R., Abbasi, A.: High-Sensitive Double-Hole Defect Refractive Index Sensor Based on 2-D Photonic Crystal. IEEE Sensors Journal. 13, 1483–1486 (2013).
- [4] E. Yablonovitch, « Physical Review Letters »58(20), 20592062 (1987).
- [5] S. John, « Physical Review Letters » 58, 2059 (1987).
- [6] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, and K.M. Leung. «Physical Review Letters» 67(17), 2
- [7] P. Vukusic, and J.R. Sambles, « *Photonic structures in biology*», **424**(6950): p. 852-855, Nature, 2003295–2298
- [8] Zi, J., et al., « *Coloration strategies in peacock feathers* ». **100**(22): p. 12576-12578, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003.
- [9] **A. Belhassos , S. Metref** , « Etude et simulation des cristaux photoniques » Université Kasdi Merbah OUARGLA, 20-Jun-2017
- [10] F. Bougriou ,«Etude Des Guides D’ondes A Cristaux Photoniques Bidimensionnels », Mémoire De Magister, Université De Mentouri Constantine, 2008
- [11] A. Kahlouche, « Etude Des Potentialités De Couches Minces Sol-Gel Dopées Par Des Nanoparticules Magnétiques Pour La Conception Des Cristaux Magnéto-Photoniques » Thèse De Doctorat Université De M’silla
- [12] **R. Moukhtari**, Contribution à L’étude et La Conception Des Cavités à Cristaux Magneto Photoniques, Université Mohamed Boudiaf - M’silla, 14/05/2018

Conclusion générale

[13] **W. Barbara**, « étude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques Bidimensionnels et de leur accordabilité », pour l'obtention du grade de docteur et sciences , école polytechnique fédérale de Lausanne ,13 juillet 2006

[14] Y. MERLE, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques Diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat n° 47-2, Université de Limoges, Novembre 2003

[15] Y. MERLE, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques Diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat n° 47-2, Université de Limoges, Novembre 2003.

[16] M. LOURTIOZ, D. MAYSTRE, H. BENISTY, V. BERGER, J. M. GERARD, A. TCHELNOKOV, « Les cristaux photoniques ou la lumière en cage », GET et Lavoisier, Paris, 2003

[17] **A. Benmerkhi**, « thème influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux Photoniques bidimensionnels »

[18] **F. Kiheli, K. Djebrit**, « Conception des diviseurs de puissance optique 1x2, 1x3 et 1x4 à Base des cristaux photoniques », Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, Université Kasdi Merbah OUARGLA, 23/10/2020

[19] B. Lombardet, « Étude et réalisation des cristaux photoniques pour l'optique Intégrées », Thèse de doctorat n°3254, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.

[20] **A. Dekhira**, « Etude théorique et simulation des cristaux photoniques et leurs Applications en chimie et biochimie », 10/01/2011.

[21] [http:// www.sst.ph.ic.ac.uk/photonics](http://www.sst.ph.ic.ac.uk/photonics).

[22] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, R.D. Meade, A.M. Rappe, K. D. Brommer, and J. Joannopoulos. « Donor and acceptor modes in photonic band structure », Phys. Rev. Lett., Vol 67, N° 24, pp 3380–3383, 1991.

[23] 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 of the optical society of America p. 513 (1995).

[24] J. Pendry, « Photonic band structures. Journal of modern optics », P209, (1994).

[25] B. BACITA, « Etude D'une Antenne Micro-ruban Triangulaire A Bande Interdite Photonique (BIP) 2D ». Mémoire de master, Université de M'silla, 2014

[26] S. MASSAOUDI, « Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes Interdites photoniques bidimensionnels (BIP 2D) en Micro-Ondes : Application à L'ultra réfraction ». Université Paris XI, 2005.

[27] J. LOURTIOZ, « Cristaux photoniques et « gaps » de photons -Propriétés et Applications », Techniques de l'Ingénieur, AF 3 711, 07/2004.

[28] **S. Saoucha, M. BENDJOUDI** « Cristaux photoniques pour la réalisation de capteur

Conclusion générale

De basse pression », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA, 2017/2018

[29] N. Delphine, « Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques Sur SOI », thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, Novembre 2006.

[30] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos et H. A. Haus, « Channel drop filters in photonic crystals», *Optics Express*, Vol. 3, p. 4, 1998.

[31] A. Chutinan, M. Masamitsu, M. Imada et S. Noda, « Surface-emitting Channel drop filters using single defects in two-dimensional photonic crystal slabs», *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, p.2690, 2001.

[32] T. Charvolin, et al., « Realization of two-dimensional optical devices using photonic band gap structures on silicon-on-insulator», *Microelectronic Engineering* 61, p. 545, 2002.

[33] J. C. Knight, et al., « Large mode area photonic crystal fiber», *Elec. Lett.*, Vol. 34, pp. 1347– 1348, 1998.

[34] **KH. Bendemagh**, « Etude de dimensionnement d'un coupleur à base de cristaux Photoniques destiné aux systèmes de communications », thèse pour l'obtention du diplôme De doctorat, université Ferhat Abbas – Sétif 1, 03/10/2019.

[35] **Arafa H Alya,* □, D. Mohameda, Z. A. Zakya, Z. S. Matarb, N. S. Abd El-Gawaadc, A. S. Shalabyd, Fatima Tayeboune, M. Mohaseba,b** «**Novel Biosensor Detection of Tuberculosis Based on Photonic Band Gap Material**»*Materials Research*. 2021; 24(3): e20200483.

[36]F . Bougriou , « Etude theorique des materiaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels applications dans le domaine du guidage optique et la detection,»Thèse dedoctorat ,Université constantine 1, 2013

[37]S. Arafa, «Étude des composants à base de cristaux photoniques : Application dans le domaine du démultiplexage et de la détection»,Université frères mentouri ,constantine , 2018.

[38]C. Mosbah, Étude théorique d'un capteur à base d'une structure originale en cristaux photoniques, université frères mentouri, constantine 1, 10/12 /2020.

[39] N. Jaffrezic-R.C. Martelet. P. Clechet. « Capteurs chimiques et biochimiques ». In *Techniques de l'Ingénieur*, Vol. R 420. Paris : Techniques de l'Ingénieur, Pp R 420-14, 2001.

[40]K. Boudiaf, SAFER Hadjer « Thème Etude et conception des capteurs à cristaux Photoniques pour des applications biomédicales »17/06/2018.

[41]Lycées E. Pérochon et J. Desfontaines, section Sciences de l'Ingénieur. «capteurs_ cr»p1, 2.

Conclusion générale

[42] Georges Asch, Bernard poussery « les Capteurs en instrumentation industriels édition », DUNOD 2017.

[43] M. MARRAKCHI, « Développement et optimisation de biocapteurs à base de biomolécules et de micro-organismes sur micro électrodes interdigitées », THESE Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006

[44] M. Skorobogatiya and Andrei V. Kabashin, « Photon crystal wave guide-based surface plasma resonance biosensor », Received 20 June 2006; accepted 26 August 2006; published online 6 October 2006

[45] S. Sumida, S. Okazaki, S. Asakura, H. Nakagawa, H. Murayama et T. Hasegawa, « Distributed hydrogen determination with fiber-optic sensor », Sens. Act. B, 108 ; pp 508–514, 2005

[46] O. S. Wolfbeis, « Fiber-Optic Chemical Sensors and Biosensors », Anal. Chem., 76 ; 3269–3284, 2004

[47] N. Moll, « Étude et réalisation d'un système immunocapteurs à ondes de Love : application à la détection de toxines, de virus ou de bactéries », these du doctorat, l'université bordeaux 1, 29 juin 2007

[48] C. Lei, H. Yi-Dong, M. Xiao-Yu, and P. Jiang-De, Fluid Sensor Based on Transmission Dip Caused by Mini Stop-Band in Photonic Crystal Slab, Chin. Phys. Lett. 25, (2008).

[49] M. Loncar, A. Scherer, and Y. Qiu, “Photonic crystal laser sources for chemical detection,” Applied Physics Letters 82, (2003) pp. 4648-4650.

[50] A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee et A. Scherer, « Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis », Optics Letters, vol. 24, n° 11, pp. 711-713, 1999. 0

[51] N. Stefanou et A. Modinos, « Impurity bands in photonic insulators », Phys. Rev. B, vol. 57, n° 19, pp. 12127–12133, 1998.

[52] M. Bayindir, B. Temelkuran et E. Ozbay, « Propagation of photons by hopping: A waveguiding mechanism through localized coupled cavities in threedimensional photonic crystals », Phys. Rev. B, vol. 61, n° 18, pp. 11855–11858, 2000.

[53] A. Hocini, A. Harhouz, Modeling and analysis of the temperature sensitivity in twodimensional photonic crystal microcavity, J. Nanophotonics, vol. 10, pp. 16007–16017, 2016.

[54] P. S. J. Russell, Photonic crystal fibers, J. Lightwave Technology, vol. 24, pp. 4729–4749, 2006

[55] L. Weng, An introduction to photonic crystals, Optics and Photonics, Spring, 2012.

[56] Y. Akahane, T. Asano, H. Takano, B.S. Song, Y. Takana, S. Noda, Two dimensional photonic crystal slab channel drop filter with flat top response, J. Optics Express, vol. 13, pp. 2512–2530, 2005.

Conclusion générale

[57]L.Weijia, Y. Daquan, S. Guansheng , T.Huiping, J. Yuefeng, Design of ultra compact alloptical XOR, XNOR, NAND and OR gates using photonic crystal multi-mode interference waveguides.