

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA**

FACULTE : DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : Electronique

N° :



**DOMAINE : SCIENCES
TECHNOLOGIE**

FILIERE : Electronique

OPTION : Instrumentation

*Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master
Académique*

Par :

- **LAARADJI aya**
- **BAKHTI rabab**

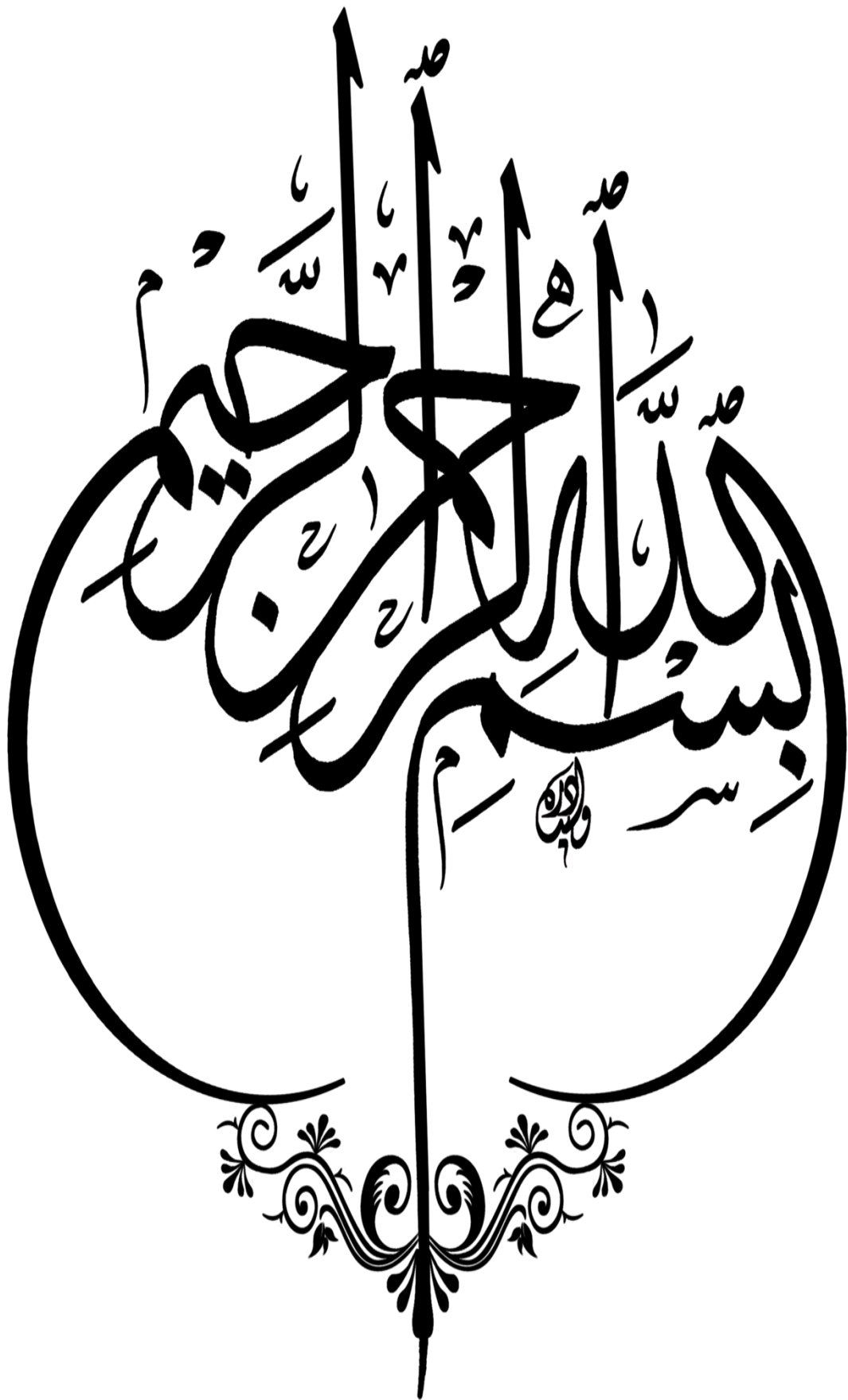
Intitulé

**Etude et simulation d'un capteur à
cristaux photonique**

Soutenu devant le jury composé de :

| | | |
|-------------------|-----------------------------------|--------------|
| Khadrouche Djamel | Université Mohamed Boudiaf M'sila | Président |
| Kebaili Farida | Université Mohamed Boudiaf M'sila | Encadrant |
| Hocini Abdesselam | Université Mohamed Boudiaf M'sila | Co-encadrant |
| Chaabane Rayane | Université Mohamed Boudiaf M'sila | Examineur |

Année universitaire : 2023 /2024



REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout ALLAH, le Tout-Puissant, pour la volonté, la santé et la patience qu'Il nous a données durant toutes ces longues années d'études.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Dr Farida Kebaili, ainsi qu'à Pr. Hocini Abdesselam, pour leur collaboration et leur aide constante.

Nous adressons également un merci particulier aux membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail.

Un grand merci aux enseignants du département d'électronique de l'université de M'sila pour leur aide et leurs encouragements.

Enfin, nous tenons à adresser nos sincères remerciements à nos familles et nos amis pour leur soutien, particulièrement durant cette période.

AYA ET RABAB

الاهداء

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا على البدء والختام

{واخر دعواهم ان الحمد لله رب العالمين}

ارى مرحلتي الدراسية قد شارفت على الانتهاء بالفعل، بعد تعب ومشقة دامت سنين في سبيل العلم والعلم حملت في طياتها امنيات الليالي، وأصبح عنائي اليوم للعين قررة، ها انا اليوم اقف على عتبة تخرجي اقطف ثمار تعبتي وارفع قبعتي بكل فخر، فאלلهم لك الحمد قبل ان ترضى ولك الحمد اذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا، لأنك وفقنتني على اتمام هذا النجاح وتحقيق حلمي.

وبكل حب اهدي ثمرة نجاحي وتخرجي

الى الذي زين اسمي بأجمل الالقاب، من دعمني بلا حدود واعطاني بلا مقابل الى من علمني ان الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة، داعمي الاول في مسيرتي وسندي وقوتي وملاذي بعد الله فخري واعتزازي **والدي**.

الى من جعل الله الجنة تحت قدميها، واحتضني قلبها قبل يديها وسهلت لي الشدائد بدعائها **والدتي**.

الى من بهم أكبر وعليهم اعتمد ومن بوجودهم اكتسب قوة ومحبة لا حدود لها والى من عرفت معهم معنى

الحياة اخوتي وأخي **(محمد الأمين، ايمان، ابتسام، اماني، اخلاص)**

الى جدي وجدتي اطل الله في عمرهما.

الى من ارادوا بنا الكسر فجعلهم الله جسرا نعبر به للأفضل.

الى كل من كان عوننا وسندا في هذا الطريق للأصدقاء الاوفياء ورفقاء السنين لأصحاب الشدائد والازمات الى

من فاضني بمشاعره ونصائحه المخلصة

واخيرا من قال انا لها "نالها" وانا لها ان أبت رغما عنها أتيت بها، ماكنت لأفعل دون توفيق من الله، هاهو

اليوم العظيم هنا اليوم الذي اجريت سنوات دراستي الشاقة حاملة بها حتى تواليت بمنه

وكرمه لفرحة التمام، فالحمد لله الذي ما تيقنت به خيرا وأملا الا وأغرقتني سرورا

وفرحا ينسيني مشقتي.

آية

2

الاهداء

الحمد لله وكفى والصلاة
على الحبيب المصطفى
واهله ومن وفى

الحمد لله الذي وفقنا
لتثمين هذه الخطوة في
مسيرتنا الدراسية
بمذكرتنا هذه ثمرة
الجهد والنجاح والفضل

الى من كان لي سندا
وعونا عند الشدائد طوال
عمري الى الرجل الأبرز
في حياتي **ابي العزيز**

الى القلب المعطاء
والصدر الحاني **امي**



Résumé

Cette étude approfondie a pour objectif de concevoir un capteur avancé en exploitant les propriétés des cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) dans le domaine de l'optique intégrée. Ce capteur est constitué, de deux guides d'ondes couplés à une cavité, ce qui offre des avantages significatifs, notamment une sensibilité accrue. De plus, nous nous sommes efforcés d'améliorer la sensibilité de ce capteur en manipulant divers paramètres physiques.

Pour réaliser cette étude, des simulations détaillées ont été réalisées à l'aide de Rsoft CAD. Ces simulations ont permis de mettre en évidence l'effet des variations de l'indice de réfraction des trous d'air sur les performances du capteur. En ajustant ces paramètres, il est possible d'améliorer la plage de mesure du capteur tout en augmentant sa sensibilité. On a abouti à une sensibilité de 840nm/RIU.

Mots-Clés : cristaux photoniques Bidimensionnels, l'optique intégrée, capteurs, Rsoft CAD, guides d'ondes, cavité.

Abstract:

This comprehensive study aims to design an advanced sensor by exploiting the properties of two-dimensional photonic crystals (2D-PCs) in the field of integrated optics. This sensor consists of two waveguides coupled to a cavity, offering significant advantages, notably increased sensitivity. Furthermore, we have made efforts to enhance the sensitivity of this sensor by manipulating various physical parameters.

To conduct this study, detailed simulations were carried out using Rsoft CAD. These simulations highlighted the effect of variations in the refractive index of air holes on the sensor's performance. By adjusting these parameters, it is possible to improve the sensor's measurement range while increasing its sensitivity. We achieved a sensitivity of 840 nm/RIU.

Keywords: Two-dimensional photonic crystals, integrated optics, sensors, Rsoft CAD, waveguides, cavity.

الملخص

الهدف من هذه الدراسة المتعمقة هو تصميم جهاز استشعار متقدم من خلال استغلال خصائص البلورات الضوئية في مجال البصريات المتكاملة. ويتكون هذا المستشعر من دليلين موجيين مقترنين (CP-2D) ثنائية الأبعاد بتجويف، مما يوفر مزايا كبيرة، بما في ذلك زيادة الحساسية. وقد سعينا أيضاً إلى تحسين حساسية هذا المستشعر من خلال التلاعب بمعايير فيزيائية مختلفة.

لإجراء هذه الدراسة، تم إجراء عمليات محاكاة مفصلة باستخدام Rsoft CAD. أبرزت هذه المحاكاة تأثير الاختلافات في معامل انكسار فتحات الهواء على أداء المستشعر. من خلال تعديل هذه المعلمات، يمكن تحسين نطاق قياس المستشعر مع زيادة حساسيته في الوقت نفسه. والنتيجة هي حساسية تبلغ 840 نانومتر/وحدة قياس انكسار.

الكلمات المفتاحية: البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد، البصريات المتكاملة، أجهزة الاستشعار، RSOFT CAD، الأدلة الموجية، التجويف

Table des matières

| | |
|--|----|
| Remerciements | |
| Dédicace | |
| Résumé..... | |
| Liste des tableaux | |
| Liste des figures..... | |
| Liste d'abréviation..... | |
| Liste des symboles | |
| | |
| Introduction générale | I |
| Chapitre I : Généralités sur les Cristaux Photoniques | |
| I.1. Introduction : | 2 |
| I.2. Historique de cristaux photonique :..... | 2 |
| I.3. Les Cristaux photoniques : | 3 |
| I.3.1. Définitions : | 3 |
| I.3.2. Les différents Types de Cristaux photoniques : | 3 |
| I.3.2.1. Les Cristaux photoniques Unidimensionnels (1D) :..... | 4 |
| I.3.2.2. Cristaux photoniques bidimensionnels (2D) :..... | 5 |
| a) La structure connectée : | 5 |
| b) La structure déconnectée :..... | 6 |
| I.3.2.3. Les Cristaux photoniques tridimensionnels (3D) :..... | 8 |
| a) Yablonovitch :..... | 8 |
| b)Structure tas de bois :..... | 9 |
| I.4. Les Caractéristiques géométriques et physiques :..... | 9 |
| I.4.1. Paramètre du réseau :..... | 10 |
| I.4.2. Symétrie : | 10 |
| I.4.3. Facteur de remplissage : | 10 |
| I.4.4. Contraste d'indice de réfraction :..... | 10 |
| I.4.5. La Période :..... | 10 |

| | |
|---|-----------|
| I.5.La bande interdite photonique : | 11 |
| I.5.1. La Zone de Brillouin | 11 |
| I.5.2. Diagramme de bandes : | 12 |
| I.6. Les Défauts dans un cristal photonique : | 13 |
| I.6.1. Défauts ponctuels : | 14 |
| I.6.2. Défauts étendus : | 15 |
| I.7.Les applications des cristaux photoniques : | 16 |
| I.7.1. Guides d'onde à cristaux photoniques : | 16 |
| I.7.2. Cavités : | 16 |
| I.7.3. Filtres et multiplexeurs : | 17 |
| I.7.4. Fibres optiques : | 19 |
| I.7.5. Capteur : | 20 |
| I.8. Méthodes numériques de modélisation et simulation : | 20 |
| I.8.1. La méthode des ondes planes : | 20 |
| I.8.2. La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) : | 21 |
| I.9.Conclusion : | 21 |

Chapitre II: Généralités sur les Capteurs à cristaux photonique

| | |
|--|-----------|
| II.1. Introduction : | 23 |
| II.2. Généralités sur les capteurs : | 23 |
| II.2.1. Définition : | 23 |
| II.2.2. Principe de fonctionnement | 24 |
| II.2.3. Structure d'un capteur : | 24 |
| II.2.3.1. Le corps d'épreuve : | 25 |
| II.2.3.2. Transducteur : | 25 |
| II.2.3.3. Le boîtier : | 25 |
| II.2.4. Classifications des capteurs : | 25 |
| II.2.4.1. Capteurs passifs : | 25 |
| II.2.4.2. Capteur actif : | 26 |
| II.2.5. Caractéristiques des capteurs : | 27 |
| II.2.5.1. Etalonnage : | 27 |

| | |
|--|-----------|
| II.2.5.2. Sensibilité (S) : | 27 |
| II.2.5.3. Fiabilité : | 28 |
| II.2.5.4. Réversibilité : | 28 |
| II.2.5.5. Sélectivité..... | 28 |
| II.2.5.6. Limite de détection : | 28 |
| II.2.5.7. Exactitude : | 28 |
| II.2.5.8. Réponse du capteur ou dynamique : | 29 |
| II.3. Capteurs à cristaux photoniques : | 29 |
| II.3.1. Les caractéristiques des capteurs à cristaux photoniques : | 29 |
| II.3.1.1. Sensibilité (S): | 29 |
| II.3.1.2. Sélectivité (Sel): | 29 |
| II.3.1.3. Spécificité (Spe): | 29 |
| II.3.1.4. Linéarité (Lin): | 29 |
| II.3.1.5. Temps de réponse (τ): | 30 |
| II.3.1.6. Robustesse (R): | 30 |
| II.3.1.7. Gamme dynamique (DR): | 30 |
| II.3.1.8. Le facteur de qualité Q : | 30 |
| II.4. Capteurs à CPs basés RI (indice de réfraction) | 31 |
| II.5. Conception et fabrication des capteurs à cristaux photoniques | 32 |
| II.5.1. Lithographie avancée : | 33 |
| II.5.2. Méthodes de fabrication tridimensionnelles : | 33 |
| II.6. Applications des capteurs à cristaux photoniques..... | 33 |
| II.6.1. Détection de gaz et de liquides | 33 |
| II.6.1.1. Détection de gaz dans l'infrarouge moyen : | 33 |
| II.6.1.2. Détection de liquides biochimiques : | 34 |
| II.6.2. Biocapteurs et applications médicales | 34 |
| II.6.3. Surveillance environnementale et industrielle | 34 |
| II.6.3.1. Surveillance environnementale : | 34 |
| II.6.3.2. Surveillance industrielle : | 35 |
| II .7. Conclusion | 35 |

Chapitre III: Résultats et interprétations

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction :..... | 37 |
| III.2. Présentation de l'interface graphique du logiciel Rsoft : | 37 |
| III.2.1. Le simulateur BandSolve : | 38 |
| III.2.2. Le simulateur FullWave : | 38 |
| III.3. Présentation de la structure de base : | 39 |
| III.3.1. Description de la structure : | 40 |
| III.3.2. La création de la structure étudiée : | 40 |
| III.3.3. Personnalisation du réseau : | 41 |
| III.3.4. Créer Des Variables : | 42 |
| III.3.5. Résultats de simulation obtenus par le Band Solve : | 43 |
| a) Profil d'indice : | 43 |
| b) Diagramme des bandes interdites photoniques : | 43 |
| III.4. Présentation de la structure avec défaut : | 44 |
| III.4.1. Création d'un guide d'onde : | 44 |
| III.4.2. Couplage cavité / guide dans un cristal photonique 2D : | 45 |
| III.5. L'étude de la structure : | 48 |
| III.5.1. La sensibilité : | 49 |
| III.5.3. La Détection Limite : | 53 |
| III.6. L'optimisation : | 55 |
| III.6.1. L'effet de rayon de de RC : | 55 |
| III.7. Conclusion : | 57 |
| Conclusion générale : | 59 |

Liste des figures

CHAPITRE I

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| Figure I.1 | <i>Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), Bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).</i> | 04 |
| Figure I.2 | <i>Représentation nanostructure d'un cristal photonique à une dimension</i> | 04 |
| Figure I.3 | <i>Miroir de Bragg</i> | 05 |
| Figure I.4 | <i>Structure connectée</i> | 06 |
| Figure I.5 | <i>Structure déconnectée</i> | 06 |
| Figure I.6 | <i>Le réseau carré</i> | 07 |
| Figure I.7 | <i>Structure triangulaire</i> | 07 |
| Figure I.8 | <i>Le réseau hexagonal (Structure graphite)</i> | 08 |
| Figure I.9 | <i>Structure « La Yablonovitch »</i> | 09 |
| Figure I.10 | <i>Structure « tas de bois »</i> | 09 |
| Figure I.11 | <i>Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel</i> | 11 |
| Figure I.12 | <i>Représentation a) d'un réseau carré b) de son réseau réciproque et c) de sa zone de Brillouin</i> | 11 |
| Figure I.13 | <i>Représentation a) d'un réseau triangulaire b) de son réseau réciproque et c) de sa zone de Brillouin.</i> | 12 |
| Figure I.14 | <i>Représentation a) d'un réseau hexagonal b) de son réseau réciproque et c) de sa zone De Brillouin</i> | 12 |
| Figure I.15 | <i>Polarisations possibles dans une structure à bande interdite photonique : TM et TE.</i> | 13 |
| Figure I.16 | <i>Diagramme de bandes d'un cristal photonique (réseau triangulaire gravé dans un milieu diélectrique de l'indice de réfraction $\varepsilon_{\text{substrat}} = 11.4$ avec un facteur de remplissage de $f = 0.30$: (a) Polarisation TE ; (b)</i> | 13 |

Polarisation TM

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| Figure I.17 | (a) Défaut lacunaire ; (b) Défaut de substitution | 14 |
| Figure I.18 | Exemple de défaut lacunaire (a) ; défauts de substitutions (b) et (c). | 14 |
| Figure I.19 | Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant | 15 |
| Figure I.20 | Différents composants à base de défauts linéaires, a) guide droit, b) virage à 120° et c) jonction Y. | 16 |
| Figure I.21 | Signatures spectrales de cavités hexagonales obtenues par photoluminescence. | 17 |
| Figure I.22 | (a) Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire un paramètre de maille 600nm (b) Spectre de photoluminescence d'une cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air (Paramètre de maille $a = 600\text{nm}$, rayon $r = 200\text{nm}$) plongé dans une matrice diélectrique ($\epsilon = 8.12$). | 17 |
| Figure I.23 | Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (Insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde). | 18 |
| Figure I.24 | Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre | 18 |
| Figure I.25 | Un principe parmi d'autres de filtre add-drop utilisant les CPs. | 19 |
| Figure I.26 | Image par microscopie électronique d'un prototype de fibre optique conçu sur la base d'un cristal photonique. | 19 |

CHAPITRE II

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| Figure II.1 | Principe d'un capteur | 23 |
| Figure II.2 | Structure d'un capteur | 24 |
| Figure II.3 | Courbe d'étalonnage d'un capteur | 26 |
| Figure II.4 | Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne D'un mode dans la cavité centré à la fréquence ω_0 | 31 |

CHAPITRE III

| | | |
|----------------------|---|-----------|
| Figure III.1 | <i>Interface graphique du logiciel Rsoft</i> | 37 |
| Figure III.2 | <i>Fenêtre du module BandSOLVE</i> | 38 |
| Figure III.3 | <i>Fenêtre du simulateur FullWAVE.</i> | 39 |
| Figure III.4 | <i>Paramètres de création de la rangée XZ.</i> | 41 |
| Figure III.5 | <i>Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 31×29.</i> | 41 |
| Figure III.6 | <i>Arrangements Global</i> | 42 |
| Figure III.7 | <i>Paramètres de la structure de base dans l'éditeur des symboles.</i> | 42 |
| Figure III.8 | <i>La Vérification du profil d'index.</i> | 43 |
| Figure III.9 | <i>Diagramme de bandes d'un cristal photonique 2D du réseau Hexagonal.</i> | 44 |
| Figure III.10 | <i>Guide d'onde.</i> | 45 |
| Figure III.11 | <i>Structure d'un couplage cavité et guide.</i> | 46 |
| Figure III.12 | <i>La fenêtre de paramètre de la simulation.</i> | 47 |
| Figure III.13 | <i>La distribution de champ électrique de la cavité CP.</i> | 48 |
| Figure III.14 | <i>Le Spectre de transmission de la cavité CP.</i> | 49 |
| Figure III.15 | <i>Variations de la sensibilité S et la longueur d'onde avec l'indice de réfraction.</i> | 50 |
| Figure III.16 | <i>Les spectres de résonance de la cavité CP pour different valeurs de RI.</i> | 51 |
| Figure III.17 | <i>Variations du facteur de qualité avec l'indice de réfraction.</i> | 53 |
| Figure III.18 | <i>Variations de la limite détection avec l'indice de réfraction.</i> | 55 |
| Figure III.19 | <i>la structure optimisée.</i> | 56 |
| Figure III.20 | <i>Les spectres de résonance de la cavité CP optimisée.</i> | 57 |

Liste des tableaux

CHAPITRE II

Tableau II.1 *Exemples de capteurs passifs* **25**

Tableau II.2 *Exemples de capteurs actifs* **25**

CHAPITRE III

Tableau. III.1 *Présentation des paramètres de simulation et les caractéristiques* **40**

Tableau. III.2 *La longueur d'onde et la sensibilité obtenu pour les différentes valeur n.* **50**

Tableau. III.3 *La variation du facteur de qualité avec le différent de fonction de l'indice de Réfraction. n 54* **52**

Tableau. III.4 *La variation de La limite détection avec la différent de fonction d'indice de réfraction* **55**

Tableau. III.5 *Les différentes caractéristiques du capteur optimisé* **56**

Liste des abréviations

| | |
|--------------|--------------------------------------|
| BIP | Bande interdite photonique |
| CFC | Cubique à Face Centrée |
| CPs | Cristaux Photoniques |
| DBR | Distributed Bragg Reflector |
| FDTD | Finite Difference in the Time Domain |
| FWHM | Full width half maximum |
| Hn | Hexagonale |
| LD | Limite de la détection. |
| Ln | Linéaire |
| n, IR | Indice de refraction |
| PBG | Photonique band gap |
| PWE | Plane Wave Expansion |
| R | Rayon de tige |
| Rm | Résolution instrumentale. |
| Si | Silicium |
| TE | Transverse Electrique |
| TM | Transverse Magnétique |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing |

Liste des symboles

| | |
|--------------|----------------------------------|
| Λ | Longueur d'onde |
| ϵ_r | Permittivités |
| δ | Contraste d'indice de réfraction |
| A | Periode |
| ω_0 | Fréquence de resonance |
| Q | Facteur de qualité |
| S | Sensibilité |

Introduction générale

Introduction générale:

Les structures de cristaux photoniques (PhC) sont particulièrement favorables pour le traitement des signaux optiques [1, 2]. Les technologies récentes, telles que les structures de PhC, se distinguent par une consommation d'énergie moindre, un débit binaire plus élevé et une occupation d'espace réduite comparativement à d'autres applications (par exemple, amplificateur optique à semi-conducteur, guides d'ondes en silicium non linéaires, points quantiques et systèmes de communication par lumière visible) [3-4]. Divers dispositifs utilisent les PhC, comme les résonateurs, les coupleurs directionnels, les filtres, les commutateurs, les modulateurs optiques, les oscillateurs et les capteurs.

Les capteurs reposant sur les PhC sont considérés comme une technologie de choix dans les techniques de détection. Ces capteurs à base de PhC ont gagné en reconnaissance dans divers domaines, notamment la surveillance des températures et des pressions élevées, la détection de gaz, les applications biomédicales, la mesure de déplacement, l'analyse des forces et des déformations, et la détection de liquides. Dans le domaine de la détection, plusieurs techniques ont été introduites pour améliorer les paramètres d'évaluation tels que le facteur de qualité, et la sensibilité.

Le domaine de la recherche sur l'utilisation des cristaux photoniques en tant que capteurs (senseurs) semble très prometteur en raison de leur extrême miniaturisation (0.1 mm² de surface de détection), de leur grande sensibilité spectrale et de la possibilité de les intégrer aux MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systemes) [5].

Notre travail se repose sur l'étude et la simulation d'un capteur utilisant des cristaux photoniques par le logiciel RSOFT. La détection a pour objectif de repérer le décalage de fréquence de résonance, qui résulte du changement de l'indice de réfraction (IR) des trous remplis de la matière à analyser. Afin d'accomplir cette tâche avec succès, nous avons commencé à simuler une structure bidimensionnelle de trous d'air percés dans une matrice de Silicium. Les caractéristiques de la structure proposée sont analysées et simulées en utilisant la méthode d'expansion d'onde plane (PWE) et la méthode du domaine temporel de différence finie (FDTD).[6]

Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

En effet, **dans un premier chapitre** on va étudier les différents types et caractéristiques, ainsi qu'un aperçu des principes relatifs aux défauts qui peuvent se manifester au sein de ces cristaux. Enfin, nous concluons ce chapitre en exposant deux



Introduction générale

méthodes de simulation particulièrement utiles pour concevoir des structures basées sur les cristaux photoniques.

Le deuxième chapitre expose la classification, les caractéristiques générales, la construction, le principe de fonctionnement et les types de cavités de ces capteurs.

Dans **le dernier chapitre**, nous exposerons la configuration du capteur développé en utilisant le logiciel de simulation Rsoft. Après avoir présenté le logiciel Rsoft CAD, nous entamons la présentation de la structure proposée. Ensuite, nous décrivons les différentes étapes à suivre pour concevoir le capteur (RI) à base de cristal photonique 2D. Ensuite, nous exposons les résultats de la simulation obtenues. Enfin, nous terminerons **notre travail par une conclusion générale**.



Chapitre I

Généralités sur les

Cristaux Photoniques

I.1. Introduction :

Ces dernières années, un grand nombre d'études ont porté sur le développement de dispositifs optiques précis et sophistiqués exploitant les propriétés des cristaux photoniques, qui influent de manière unique sur la diffusion de la lumière [7]. Ces cristaux, à la fois inspirés par la nature et fabriqués de manière artificielle, offrent un contrôle sans précédent sur la manipulation de la lumière.

Ce chapitre a pour objectif de définir les cristaux photoniques, puis de présenter leurs différents types et caractéristiques, ainsi qu'un aperçu des principes relatifs aux défauts qui peuvent se manifester au sein de ces cristaux. Enfin, nous concluons ce chapitre en exposant deux méthodes de simulation particulièrement utiles pour concevoir des structures basées sur les cristaux photoniques.

I.2. Historique de cristaux photonique :

En 1987, Eli Yablonovitch et Sajeev John, dans leur quête de réduction de l'émission spontanée de lumière dans les lasers et les semi-conducteurs, ont présenté une nouvelle méthode pour la fabrication d'un miroir de Bragg, s'inspirant du concept proposé par W. L. Bragg à la fin du XIXe siècle. Leur approche s'est démarquée en proposant une structure à plusieurs dimensions, consistant à créer une structure périodique en trois dimensions en agençant régulièrement des sphères, des cylindres et/ou des poutres [8].

En 1991, Yablonovitch a mis en œuvre une première réalisation opérationnelle aux longueurs d'onde centimétriques. Cette réalisation, baptisée "Yablonovite", se compose d'un bloc de plexiglas usiné dans trois directions distinctes, séparées de 120° , afin de reproduire la structure cristalline des diamants. Le matériau ainsi obtenu, appelé BIP, constitue une modification tridimensionnelle des miroirs de Bragg dans le domaine des fréquences micro-ondes.

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Contrairement aux miroirs de Bragg classiques, qui se basent sur l'empilement périodique de couches diélectriques pour contrôler la lumière dans une seule direction de l'espace, les matériaux BIP tridimensionnels ont la capacité de créer une bande interdite complète dans toutes les directions de propagation et pour toutes les polarisations possibles de l'onde [9]. Cette innovation a valu à Yablonovitch une reconnaissance particulière [10].

I.3. Les Cristaux photoniques :

I.3.1. Définitions :

Les cristaux photoniques (CPs) sont des matériaux nano structurés diélectriques dont l'indice de réfraction change périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une ou plusieurs directions de l'espace [11]. Ils génèrent une zone de fréquence spécifique où les ondes électromagnétiques ne peuvent pas se propager, ce qu'on désigne sous le nom de bande interdite photonique (BIP) (en anglais photonique band gap PBG). Les cristaux photoniques ont la possibilité de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques sans les absorber, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour la manipulation de la lumière [12].

I.3.2. Les différents Types de Cristaux photoniques :

Il existe une variété de cristaux photoniques, classés selon leurs dimensions, pouvant prendre différentes formes, telles que :

- Cristaux photoniques unidimensionnels : comprenant des empilements de couches minces ou des réseaux de Bragg.
- Cristaux photoniques bidimensionnels : impliquant des réseaux de trous disposés sur une surface.
- Cristaux photoniques tridimensionnels : caractérisés par des empilements de couches formées de billes de silice auto-assemblées.

La structure des cristaux photoniques illustrée dans la figure (1.1) présente une variation périodique du constant diélectrique (ϵ) dans une, deux ou trois directions de l'espace.

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

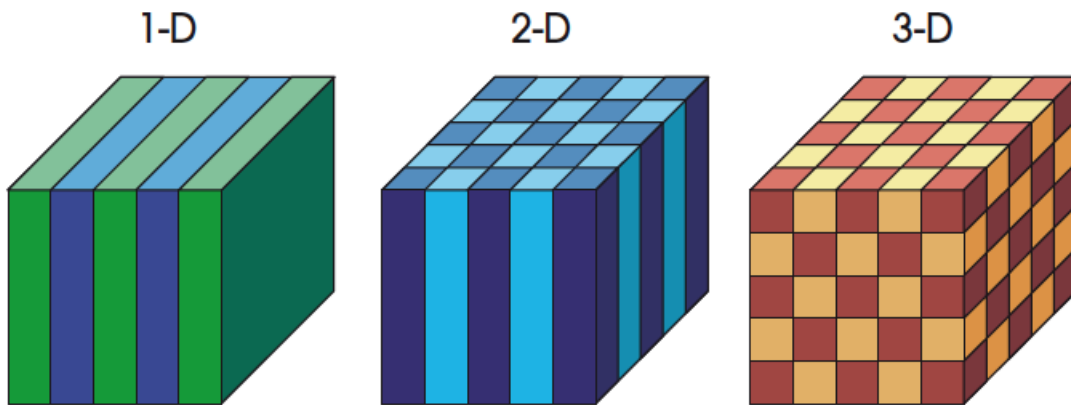


Figure I.1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

I.3.2.1. Les Cristaux photoniques Unidimensionnels (1D) :

Le cristal photonique le plus élémentaire est une structure dont la permittivité diélectrique varie périodiquement le long d'une seule dimension. Il est constitué d'un agencement alternatif de couches diélectriques présentant des permittivités distinctes, notées ϵ_1 et ϵ_2 , comme illustré dans la figure (I.2). Cette structure est couramment désignée sous le nom de miroir de Bragg [13].

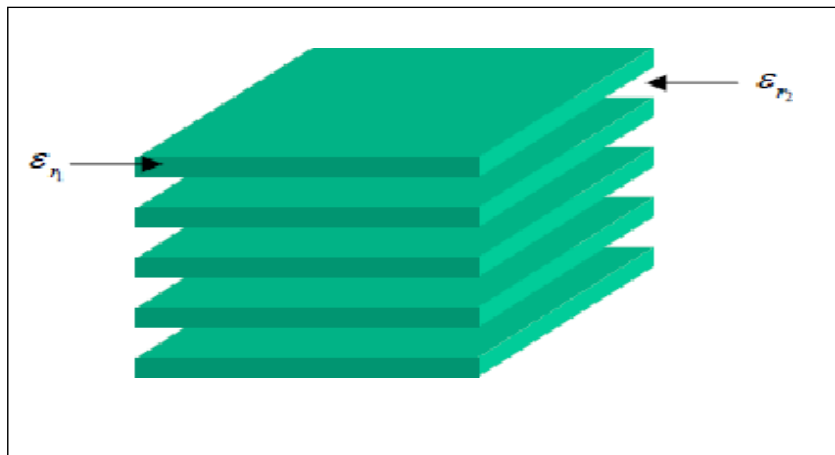


Figure I.2: Représentation nanostructure d'un cristal photonique à une dimension [14].

Le DBR (Distributed Bragg Réflecteur) est un type de miroir de Bragg constitué d'une alternance de couches composées de deux matériaux ayant des indices de réfraction n_1 et n_2 . En répétant cette paire (n_1, n_2) N fois, toutes les couches ont des épaisseurs physiques égales, respectivement :

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

$$\text{Indice } n_1 = \lambda_{\text{Bragg}}/4n_1 \dots \dots \dots (I.1)$$

$$\text{Indice } n_2 = \lambda_{\text{Bragg}}/4n_2 \dots \dots \dots (I.2)$$

Avec :

λ_{Bragg} : la longueur d'onde de Bragg pour laquelle le maximum de réflectivité est obtenu [15].

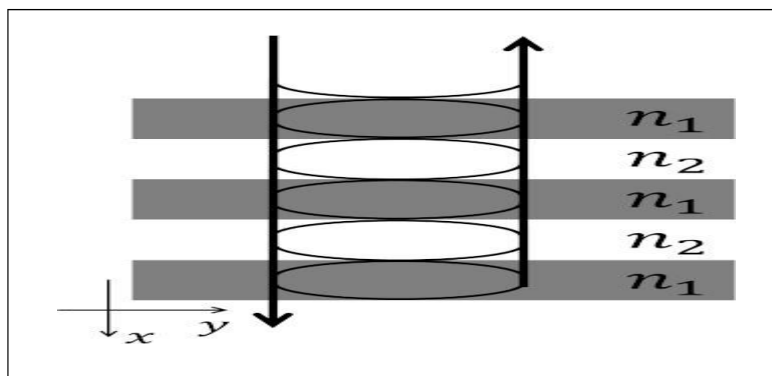


Figure I.3: Miroir de Bragg.

I.3.2.2. Cristaux photoniques bidimensionnels (2D) :

Les cristaux photoniques bidimensionnels se caractérisent par des structures périodiques dans deux directions de l'espace et infinies dans la troisième, ce qui signifie que l'indice optique est modulé en deux domaines (x,y). On peut classer les cristaux photoniques à deux dimensions en deux catégories principales : les structures appelées connectées et les structures appelées déconnectées.

a) La structure connectée :

La structure connectée est illustrée dans la figure I.4. Dans ce motif élémentaire, l'indice n_1 est inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique [16].

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

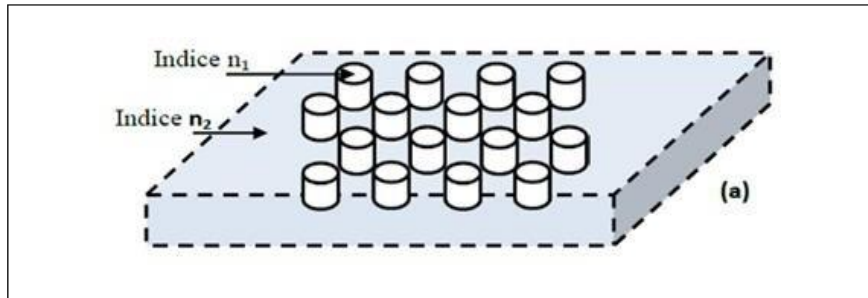


Figure I.4 : Structure connectée [17].

b) La structure déconnectée :

La structure déconnectée est représentée dans la Figure I.5. Dans ce motif élémentaire, l'indice n_1 est supérieur à l'indice n_2 de l'espace entre les motifs. Ces structures sont composées de tiges diélectriques alignées de manière périodique dans l'air [16].

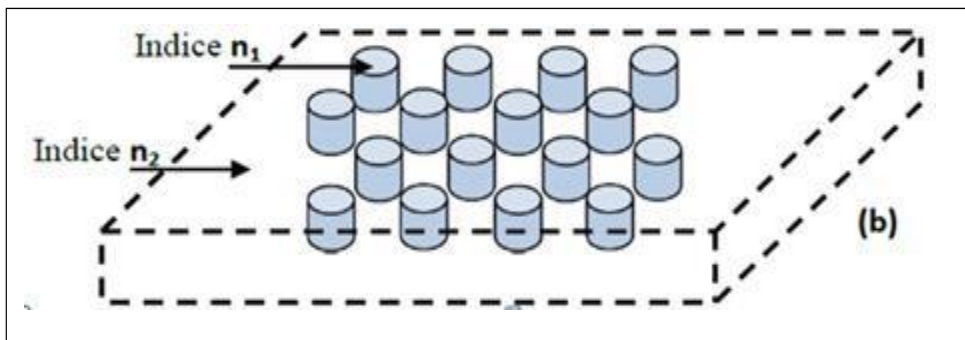


Figure I.5 : Structure déconnectée [17].

Plusieurs théoriciens ont tenté d'améliorer les dimensions des structures afin d'obtenir des bandes interdites complètes, même si elles sont peu utilisées. Il existe trois catégories principales de matériaux à BIP bidimensionnelle en fonction de la configuration du réseau [18].

➤ Réseau carré :

On trouve les nœuds du réseau sur un carré de côté « a » (Figure I.6). Selon des études, ce genre de réseau présente une grande sensibilité à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde électromagnétique [19]. Il est par conséquent compliqué d'obtenir

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

une bande interdite complète, c'est-à-dire une bande interdite qui empêche la propagation, peu importe la polarité.

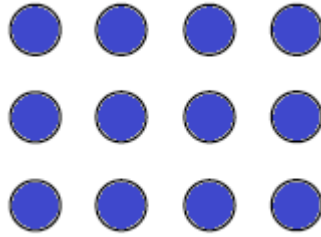


Figure I.6 : Le réseau carré [19].

➤ Réseau triangulaire :

Le réseau triangulaire est le réseau en deux dimensions avec la symétrie la plus élevée, car il se restreint à un seul "atome" par maille. La région de Brillouin forme un triangle. La distance entre chaque nœud du réseau et son proche voisin est égale à « a » (figure I.7). Cette structure présente une sensibilité moins grande à l'angle d'incidence que le réseau carré, mais il est encore difficile d'obtenir une bande interdite complète [17].

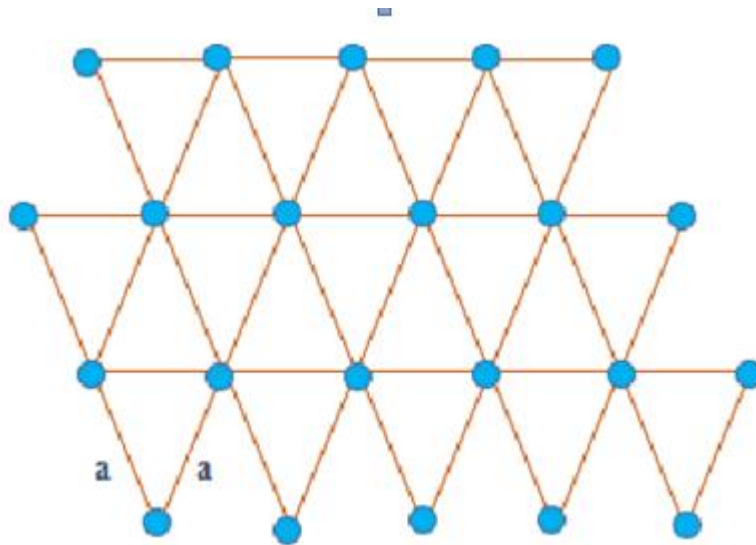


Figure I.7 : Structure triangulaire [18].

➤ Réseau hexagonal :

Lorsque tous les nœuds d'un réseau hexagonal sont identiques et espacés de « a », on désigne cette structure comme étant similaire à la structure cristalline du graphite (Figure I.8). Contrairement au réseau triangulaire, il est constitué de deux "atomes" par maille. Pour la première fois, on avait anticipé la possibilité d'une bande interdite complète dans le cadre d'un réseau de tiges diélectriques cylindriques [20].

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

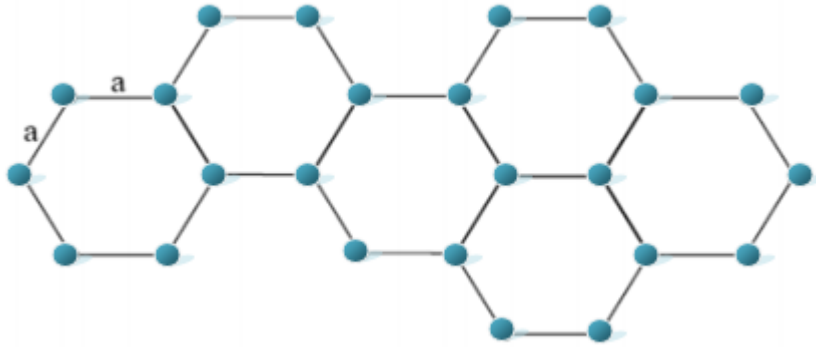


Figure I.8 : Le réseau hexagonal (Structure graphite) [20].

I.3.2.3. Les Cristaux photoniques tridimensionnels (3D) :

La seule structure capable de générer une bande d'énergie interdite dans toutes les directions de l'espace est le cristal photonique tridimensionnel. K.M. Ho et ses collaborateurs ont réalisé le premier cristal photonique tridimensionnel en disposant des sphères de silicium sur une structure en forme de diamant [21]. Cependant, la Yablonovite, une structure tridimensionnelle pour les micro-ondes, créée en 1993 par E. Yablonovitch, est souvent citée [21]. Cette structure a été obtenue en perforant du plexiglas selon trois angles azimutaux distincts de 120° . Plusieurs techniques ont été suggérées pour la fabrication de cristaux photoniques tridimensionnels, mais deux études en particulier ont suscité un intérêt particulier pour la recherche :

a) Yablonovitch :

En 1993, E. Yablonovitch a créé les premiers cristaux photoniques tridimensionnels en perçant des trous dans un bloc de plexiglas à trois angles azimutaux différents de 120° , ce qui a donné un angle de 35° par rapport à la normale (figure I.9). La structure est très similaire à celle d'un diamant [21].

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

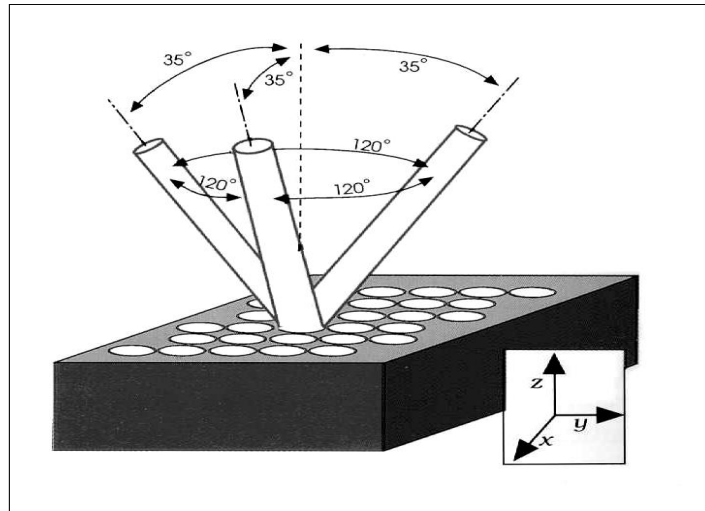


Figure I.9 : Structure « La Yablonovitch »
[14].

b) Structure tas de bois :

C'est une structure complète présentant une bande interdite, qui peut être facilement réalisée. Elle peut être construite selon une approche qui consiste à déposer des rubans de silicium polycristallin par couches successives, sans recourir à des tranchées de silice. Une fois que la structure est assemblée, la silice est sculptée pour former un cristal photonique 3D en silicium dans l'air (voir figure I.10) [21].

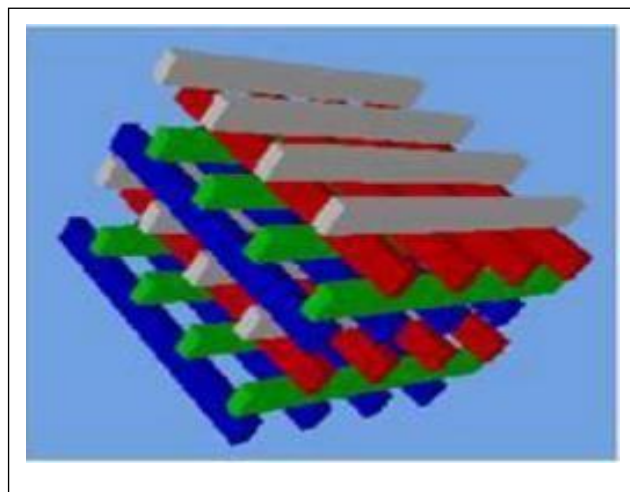


Figure I.10: Structure « tas de bois » [22].

I.4. Les Caractéristiques géométriques et physiques :

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Les différents matériaux constitutifs, ainsi que leur organisation selon un système cristallin spécifique et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire d'un cristal photonique, les distinguent [16]. En détail :

I.4.1. Paramètre du réseau :

C'est la distance fondamentale entre deux briques constitutives. Il détermine la région spectrale où le CPh interagit avec l'onde électromagnétique [22].

I.4.2. Symétrie :

La position des briques d'un CP détermine la symétrie du réseau. Par exemple, pour un CP 3D de particules sphériques une symétrie cubique, hexagonale compacte (HC) ou cubique à face centrée (CFC) peut être obtenue.[22].

I.4.3. Facteur de remplissage :

Le facteur de remplissage dans l'air, noté f , représente le rapport entre la surface occupée par le motif et la surface totale de la cellule élémentaire du réseau, dans le cas d'un cristal photonique bidimensionnel composé de trous d'air percés dans une matrice diélectrique [23].

I.4.4. Contraste d'indice de réfraction :

Il s'agit du rapport entre les indices de réfraction des unités constitutives et de la matrice. Ce contraste fournit une indication générale de la différence de diffusion entre les deux matériaux composant le cristal photonique. Pour une structure unidimensionnelle, le contraste d'indice de réfraction est donné par :

$$\delta = n_H / n_L \dots\dots\dots (I.1).$$

Avec :

n_H : L'indice de réfraction de la couche diélectrique de haut indice.

n_L : L'indice de réfraction de la couche diélectrique de bas indice.

Pour une structure bidimensionnelle, le contraste d'indice est la différence entre les indices du milieu et des motifs [22].

I.4.5. La Période :

Ce paramètre géométrique, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influe sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. 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 .

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

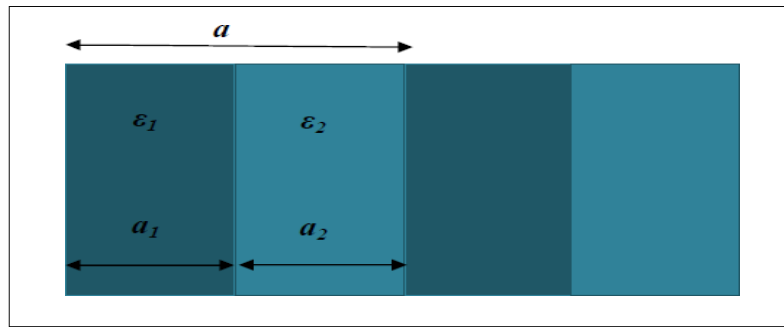


Figure I.11: Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

I.5. La bande interdite photonique :

I.5.1. La Zone de Brillouin

Afin de calculer les diagrammes de bandes, il est nécessaire de prendre en compte toutes les directions de propagation possibles pour chaque cristal. Comme dans le domaine de la physique du solide [24], il est démontré que pour certaines symétries du cristal, il est possible de restreindre l'étude aux vecteurs d'ondes k situés à l'intérieur d'une zone limitée appelée zone de Brillouin indéniée. Le vecteur k évolue le long des directions des symétries élevées de cette zone qui fait partie du réseau de réciproité

➤ Le réseau carré :

La maille primitive est un carré de côté « a ». Ce réseau est très sensible à l'angle d'incidence des ondes électromagnétiques. Sa zone de Brillouin est un triangle isocèle [25].

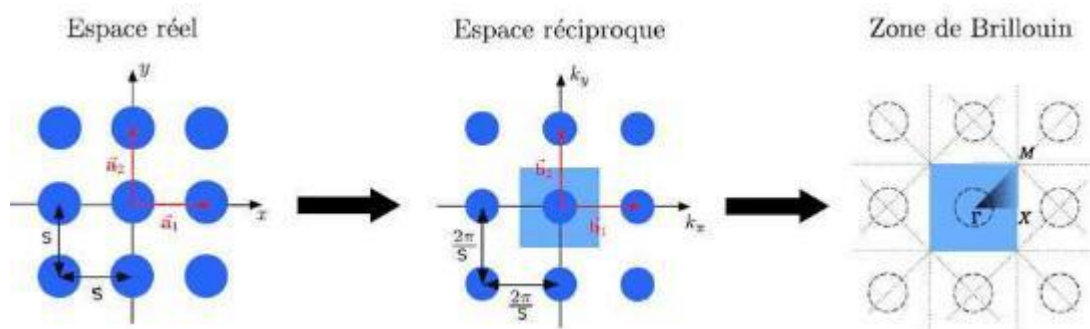


Figure I.12: Représentation a) d'un réseau carré b) de son réseau réciproque et c) de sa zone de Brillouin.

➤ **Le réseau triangulaire :** La maille primitive est un triangle équilatéral de côté « a » et la zone de Brillouin est un Hexagone [25].

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

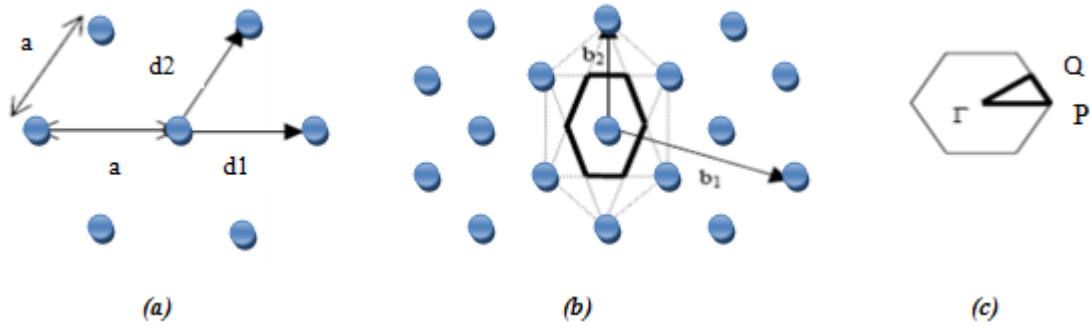


Figure I.13 : Représentation a) d'un réseau triangulaire b) de son réseau réciproque et c) de sa zone de Brillouin.

- **Le réseau hexagonal :** En ôtant quelques motifs au réseau précédent, un réseau hexagonal peut être obtenu, compromis entre les contraintes technologiques et les propriétés des réseaux triangulaires [25].

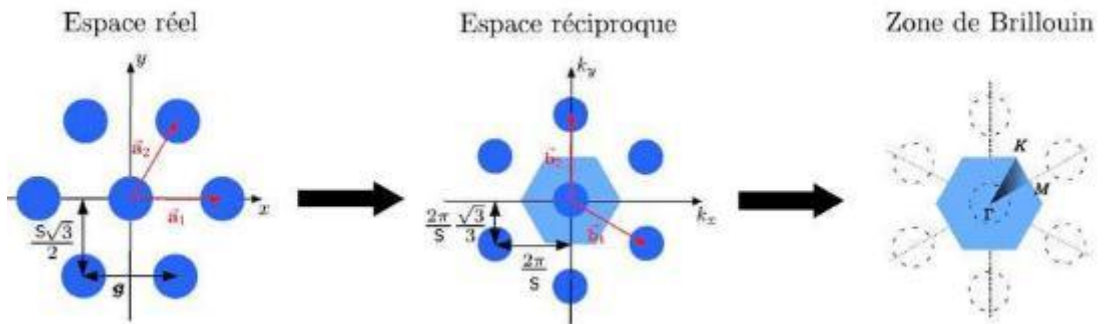


Figure I.14: Représentation a) d'un réseau hexagonal b) de son réseau réciproque et c) de sa zone De Brillouin.

I.5.2. Diagramme de bandes :

Prenons l'exemple d'un cristal photonique à deux dimensions en utilisant des tiges. Le calcul du diagramme de bande de ce cristal nous donne des informations sur les caractéristiques (la position et la largeur) des bandes interdites photoniques pour chaque polarisation. Lorsque le champ magnétique (\vec{H}) est parallèle à l'axe des tiges, on parle de polarisation TE. Lorsque le champ électrique (\vec{E}) est parallèle à l'axe des tiges, on parle de polarisation TM.

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

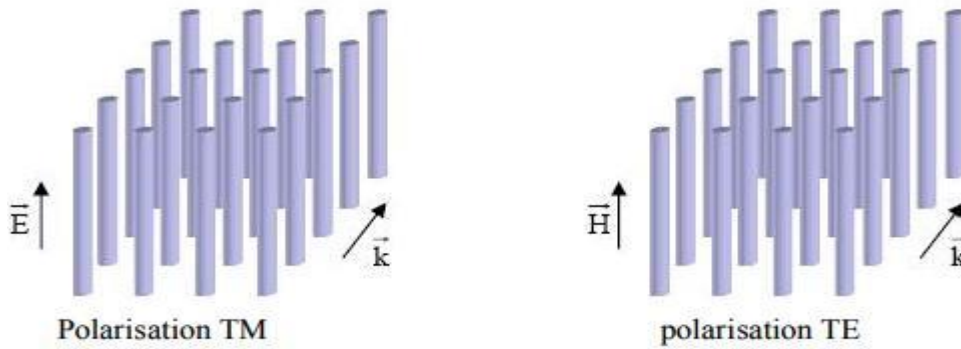


Figure I.15: Polarisations possible dans une structure à bande interdite photonique : TM et TE.

Un cristal photonique est caractérisé par sa structure en bandes, exploitée pour le calcul de diagrammes par la méthode de décomposition en ondes planes. Dans ce contexte, le facteur de remplissage $f=0.30$ et le réseau du cristal photonique adopte une configuration triangulaire. Lors de l'observation de la polarisation TE, une bande interdite est identifiée entre $u=a/\lambda=0.21-0.27$ (voir figure I.16 (a)). En revanche, pour la polarisation TM, aucune bande interdite n'est présente, comme illustré dans la figure I.16 (b). En effet, l'ouverture de bandes interdites photoniques TE est plus avantageuse lorsqu'on relie des zones avec un fort indice de réfraction. À l'inverse, la connexion de zones de faibles indices de réfraction, telles que des piliers diélectriques dans l'air, favorise l'émergence d'une bande interdite en polarisation TM. [26]

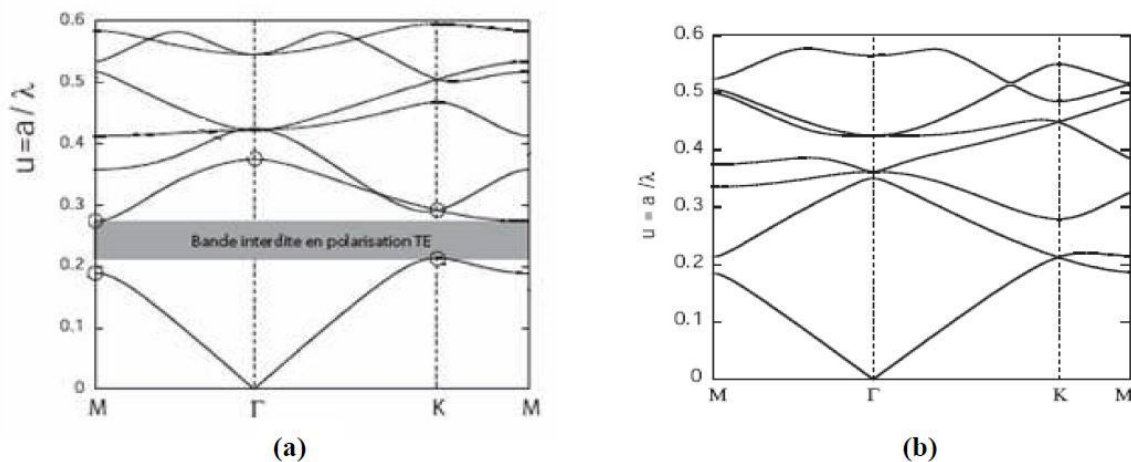


Figure I.16 : Diagramme de bandes d'un cristal photonique (réseau triangulaire) gravé dans un milieu diélectrique de l'indice de réfraction $\epsilon_{\text{substrat}}=11.4$ avec un facteur de remplissage de $f = 0.30$: (a) Polarisation TE ; (b) Polarisation TM [27].

I.6. Les Défauts dans un cristal photonique :

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Il existe deux principaux types de défauts : les défauts ponctuels et les défauts étendus. Les premiers, associés à une rupture locale de périodicité, se traduisent par la présence de modes électromagnétiques à des fréquences discrètes, analogues aux défauts électroniques.

Les seconds, que l'on peut considérer comme analogues aux dislocations, peuvent donner lieu à des bandes permises de propagation, là où se trouve une bande interdite dans le cristal idéal [23].

I.6.1. Défauts ponctuels :

Les défauts occasionnels sont engendrés en altérant les propriétés d'une cellule du réseau. Il y a différentes façons de générer des imperfections temporaires dans les cristaux photoniques. Il est possible de retirer, d'ajouter ou de modifier un ou plusieurs motifs du cristal. Les défauts lacunaires ou de substitution sont illustrés dans les (figures I.17) et (figure I.18). Quoiqu'il en soit, des cavités optiques sont formées où les modes de résonance se positionnent en énergie dans les bandes interdites du cristal [23].



Figure I.17 : (a) Défaut lacunaire ; (b) Défaut de substitution.

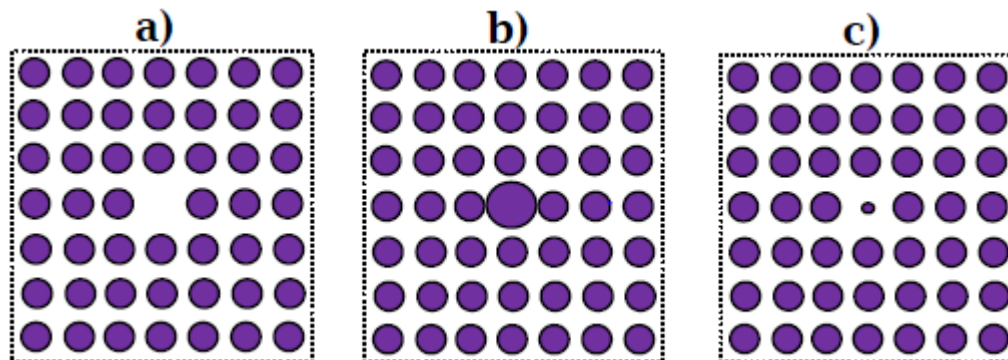


Figure 1.18 : Exemple de défaut lacunaire (a) ; défauts de substitutions (b) et (c).

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

I.6.2. Défauts étendus :

Les défauts 1D (W1) sont des défauts étendus de dimension 1,2 ou 3, comme illustré dans la figure I.23. Le guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique 2D est l'exemple de base. Il est possible de concevoir un tel guide en évitant une ou plusieurs lignes de trous [19].

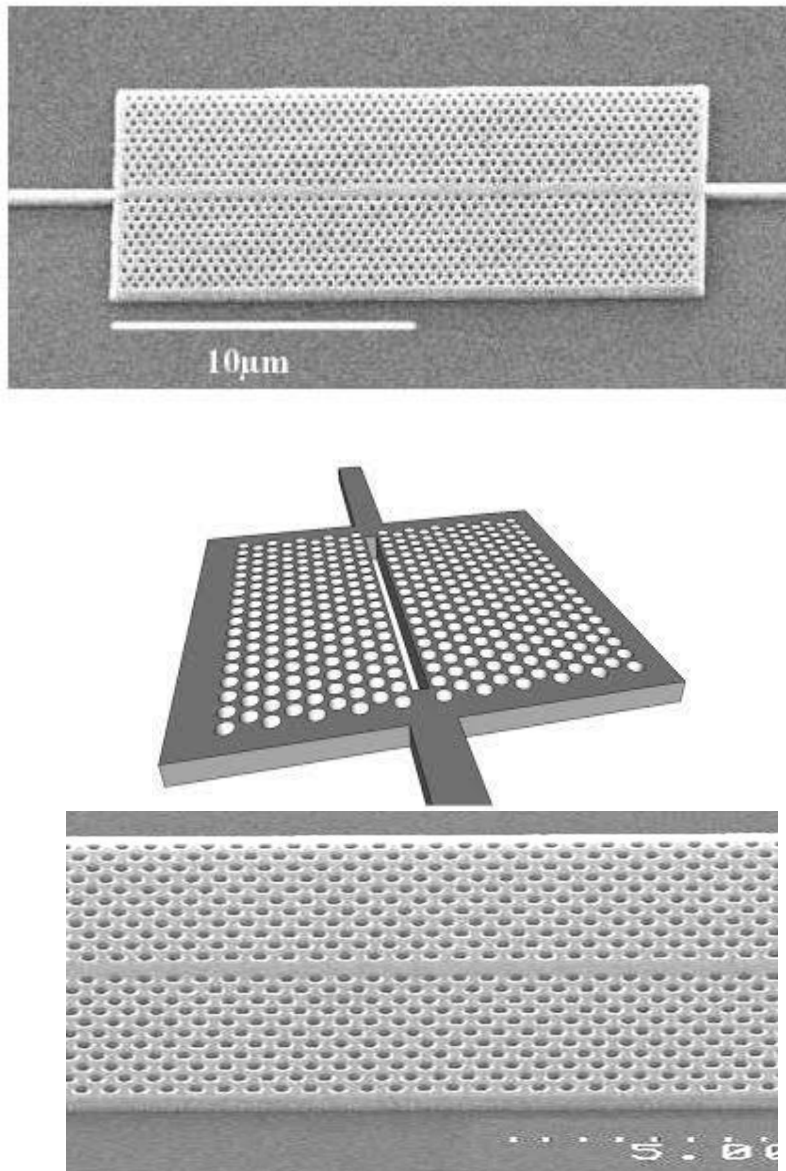


Figure I.19 : Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [28].

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

I.7. Les applications des cristaux photoniques :

I.7.1. Guides d'onde à cristaux photoniques :

En ajoutant un défaut linéaire (l'absence d'une ou plusieurs rangées de trous) au cristal photonique, il est envisageable de diriger la lumière dans une direction sélectionnée. Si son énergie est à l'intérieur de la bande interdite, un photon sera restreint dans le guide. Il est possible de créer différents éléments à partir de défauts linéaires (voir figure I.20). Il est possible d'améliorer la transmission à travers ces dispositifs en ajustant la taille ou la forme des trous au niveau du virage ou de la jonction, afin de réduire au minimum le raccordement entre le mode guidé et les modes rayonnés au niveau de la courbure [17].

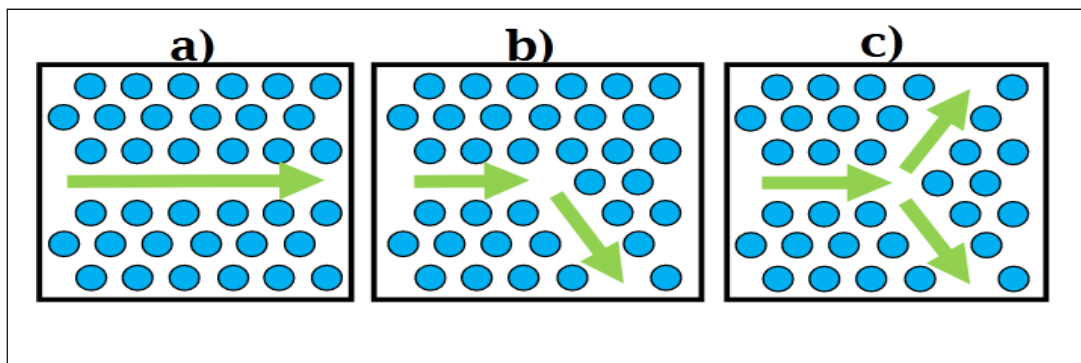


Figure I.20 : Différents composants à base de défauts linéaires,

a) guide droit, b) virage à 120° et c) jonction Y.

I.7.2. Cavités :

En 1996, les premières cavités exploitant des cristaux photoniques bidimensionnels ont été développées, impliquant l'introduction d'une perturbation dans la structure cristalline photonique. Il a été démontré que ces dispositifs présentent un facteur de qualité élevé pour les modes de résonance en raison de la réflexion exceptionnelle induite par le cristal. Cette propriété est particulièrement notable dans les cavités de grande dimension capables de supporter plusieurs modes. Les performances sont particulièrement remarquables pour les cavités suspendues en membrane (isolées dans l'air) de dimensions très réduites, comme illustré dans les figures I.21 et I.22. Dans ces configurations, une cavité de forme triangulaire et une autre de forme hexagonale sont immergées dans un cristal photonique de structure triangulaire.[17]

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

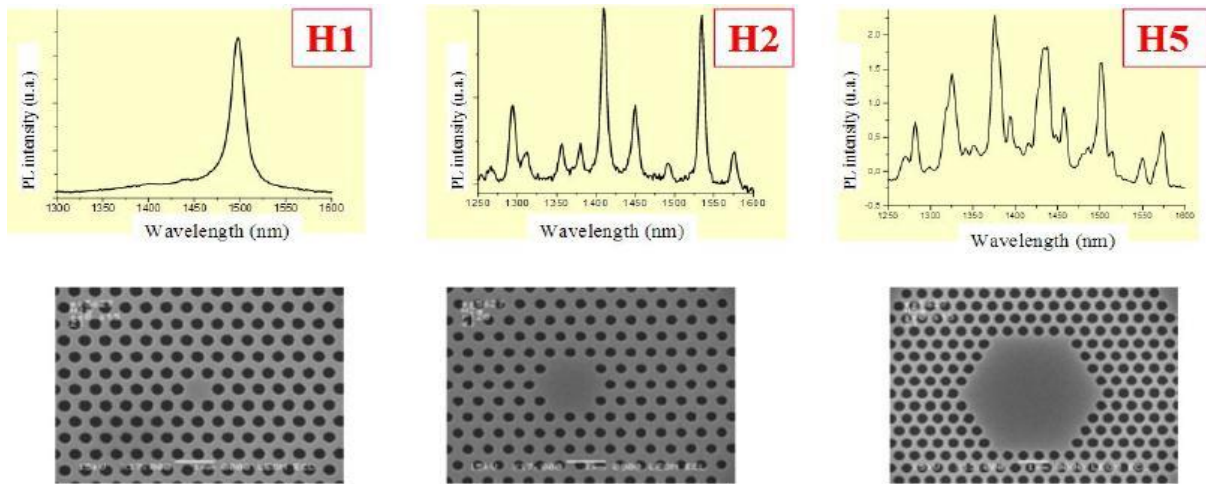


Figure I.21 : Signatures spectrales de cavités hexagonales obtenues par photoluminescence [29].

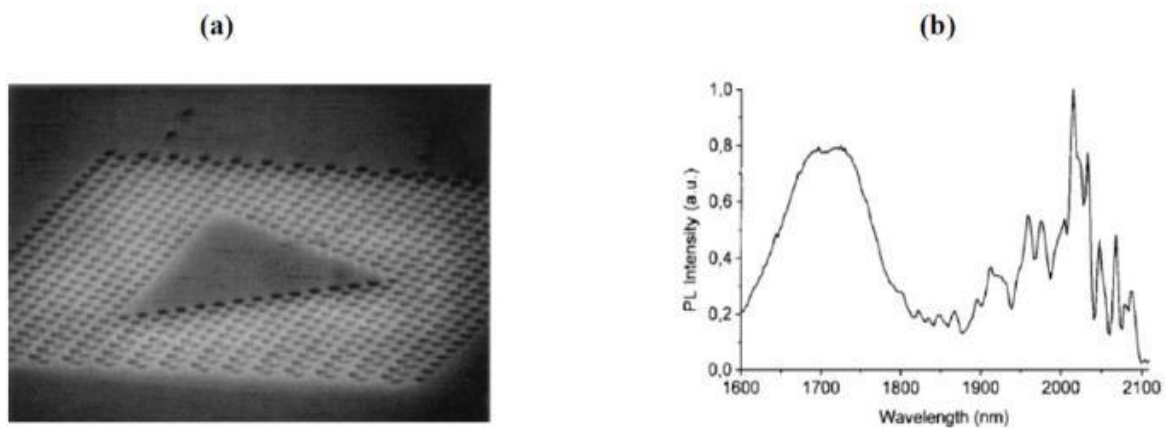


Figure I.22 : (a) Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm (b) Spectre de photoluminescence d'une cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air (Paramètre de maille $a = 600\text{nm}$, rayon $r = 200\text{nm}$) plongé dans une matrice diélectrique ($\epsilon = 8.12$) [30].

I.7.3. Filtres et multiplexeurs :

Les cristaux photoniques pourraient être utilisés pour effectuer une fonction d'optique intégrée cruciale : le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing). L'objectif consiste à intégrer ou à extraire des longueurs d'onde spécifiques dans un flux de données. On peut concevoir ce dispositif en utilisant l'efficacité d'une cavité résonante associée à des guides d'ondes (voir figure I.23) [31].

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

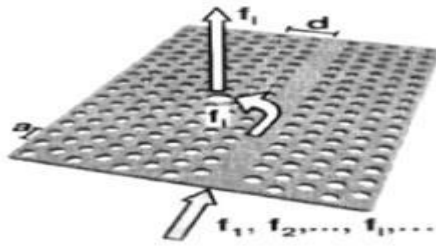


Figure I.23: Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (Insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde).

Il est également possible de réaliser cette fonction dans le plan en utilisant deux guides, comme le montre la Figure I.24. Dans cette situation, il est possible que les longueurs d'onde qui résonnent dans l'anneau central se rapprochent d'un guide à l'autre. Cependant, le processus de couplage est extrêmement complexe et repose sur la symétrie et la dégradation des modes résonnants. En outre, il est essentiel de contrôler étroitement la taille du défaut (de la cavité résonnante) pour choisir les longueurs d'onde souhaitées [32].

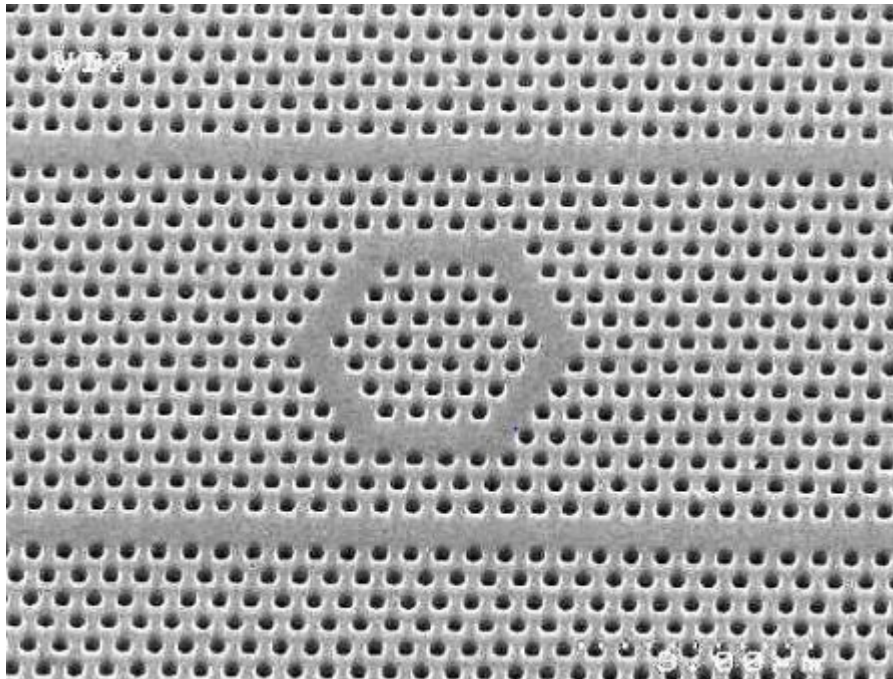


Figure I.24 : Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre.

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

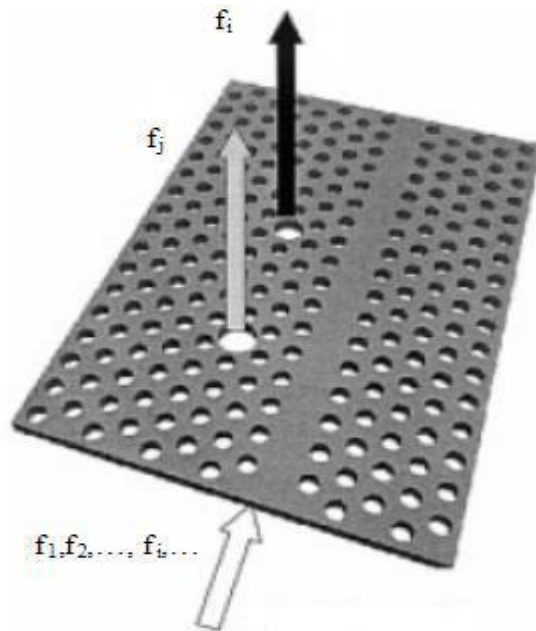


Figure I.25 : Un principe parmi d'autres de filtre add-drop utilisant les CPs.

I.7.4. Fibres optiques :

Les fibres optiques à cristaux photoniques ont été introduites en 1996 [33]. Elles ne se composent plus d'un cœur et d'une gaine, ni d'une structure à gradient d'indice, mais d'un cristal photonique avec un défaut qui permet de diriger la propagation lumineuse (voir figure I.30).

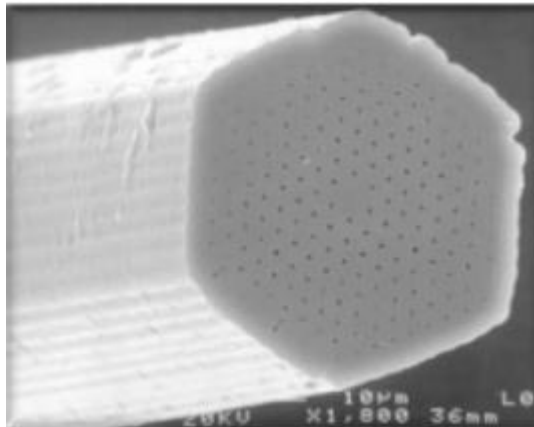


Figure I.26: Image par microscopie électronique d'un prototype de fibre optique conçu sur la base d'un cristal photonique [33].

Les fibres photoniques à cristal ont une conception totalement différente. On les qualifie également fréquemment de « fibres à trous » ou de « fibres microstructures ». La conception diffère principalement en ce qui concerne l'élaboration. En empilant

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

méticuleusement des tubes de silice, on obtient des fibres qui se transforment en une "préforme" avec la structure souhaitée : on peut placer des tubes pleins, creux, omettre des tubes... en fonction du motif final recherché. On effectue l'assemblage à une échelle macroscopique, en utilisant des tubes de diamètre d'environ un millimètre, facilement manipulables à la main. Ensuite, l'ensemble est exposé à une température élevée (environ 1800°C) afin que les tubes de silice se ramollissent et qu'un étirement soit effectué pour obtenir une version miniaturisée dans l'ensemble initial. Il est donc possible de produire une grande diversité de fibres avec des motifs personnalisés [34].

I.7.5. 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. Plusieurs capteurs optiques sont actuellement disponibles, tels que les capteurs de pression, de température, de vitesse, de position, d'humidité, ainsi que biologiques [40].

I.8. Méthodes numériques de modélisation et simulation :

Dans cette section, nous exposerons les différentes méthodes de simulation pratiques pour la conception des structures à cristaux photoniques. Il existe de nombreuses méthodes, mais nous aborderons deux méthodes principales : la méthode des ondes planes pour le calcul des diagrammes de bande et la méthode FDTD, qui est la plus couramment utilisée pour calculer la réponse spectrale d'un dispositif.

I.8.1. La méthode des ondes planes :

La méthode de décomposition en ondes planes PWE (Plane Wave Expansion) est devenue l'un des outils de modélisation les plus utilisés pour les cristaux photoniques [35-36] et est également l'un des premiers formalismes à avoir été utilisés pour mettre en évidence théoriquement l'existence de bandes autorisées photoniques. Il s'agit d'une approche pour résoudre les équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel. La décomposition en ondes planes du problème électromagnétique est la base de son fonctionnement. On utilise principalement cette méthode pour étudier les

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

caractéristiques dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques et pour évaluer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la répartition du champ pour les modes d'une structure photonique [37].

I.8.2. La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) :

En 1966, K. S. Yee a initialement proposé la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) [38]. Il s'agit d'une approche électronique générale qui permet de résoudre les équations de Maxwell sur une structure de profil d'indice donné. La particularité de ce système réside dans sa capacité à résoudre directement le système d'équation dans le domaine temporel plutôt que dans le domaine fréquentiel, ce qui permet de visualiser la propagation d'une onde électromagnétique vers les cristaux photoniques. Cette approche présente un intérêt particulier pour étudier la réponse spectrale d'un système et pour évaluer les distributions de champ dans des structures de dimensions limitées [39].

Le désavantage majeur de la FDTD, qui semble néanmoins diminuer avec l'évolution des capacités informatiques, réside dans sa lenteur et sa nécessité de ressources informatiques considérables car les champs sont calculés à tous les niveaux de la structure et pour tous les cycles de temps. En outre, le calcul peut prendre une durée T élevée pour des structures résonnantes, et le résultat peut éventuellement varier en fonction de la source et du milieu utilisés.

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit de manière générale les concepts liés aux cristaux photoniques, qui sont des matériaux caractérisés par une variation périodique de l'indice diélectrique à l'échelle des longueurs d'onde, dans une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique engendre l'apparition de bandes de fréquences où la propagation de la lumière est interdite, appelées bandes interdites. Nous avons examiné en détail les différents types de cristaux photoniques ainsi que leurs propriétés optiques particulières, tout en explorant les diverses méthodes numériques utilisées pour leur modélisation. Dans le chapitre suivant, nous aborderons les capteurs à cristaux photoniques, en mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs principes de fonctionnement.

Chapitre **II**

Généralités sur les Capteurs à
cristaux photonique

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

II.1. Introduction :

L'utilisation des cristaux photoniques comme capteurs représente un domaine de recherche prometteur grâce à leur structure périodique qui permet de capturer les photons et de générer des résonances optiques sensibles à la présence de molécules à détecter [41]. Ces capteurs offrent une large gamme de détection, les rendant polyvalents pour diverses mesures. Les critères clés tels que la sensibilité, la sélectivité, la spécificité et la durabilité sont primordiaux dans leur conception. La miniaturisation et l'autonomie sont des avancées significatives élargissant leur application. La collaboration entre chimistes, physiciens, informaticiens et biologistes est cruciale pour concevoir et développer ces capteurs et biocapteurs. Ce chapitre expose la classification, les caractéristiques générales, la construction, le principe de fonctionnement et les types de cavités de ces capteurs.

II.2. Généralités sur les capteurs :

II.2.1. Définition :

Par définition, un capteur est un dispositif électronique capable de transformer une grandeur physique, chimique, biologique... (Mesurande) en une grandeur électrique exploitable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité ou la déviation d'une aiguille (figure II.1) [42].

Les capteurs peuvent échantillonner et sélectionner une quantité abstraite appelée information. Pour être traitée, cette information est transportée par un support physique appelé signal. En général, les capteurs se composent de trois éléments principaux : un élément sensible, un transducteur et une interface de contrôle entre le signal et l'utilisateur [43].

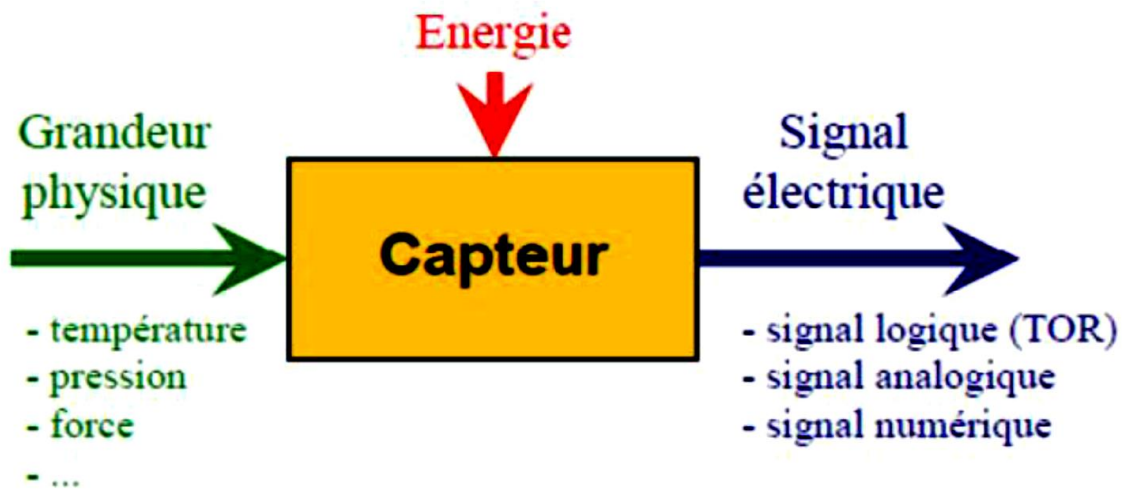


Figure II.1: Principe d'un capteur.

II.2.2. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement est basé sur la mesure d'une variation de l'indice de réfraction d'un élément sensible en fonction de la présence d'un analyte (substance analysée). Plusieurs types de capteurs à base de CPs peuvent être distingués en fonction de leur mode de fonctionnement [22] :

- Capteur de réfraction à indice (RI) à partir de CPs
- Capteur gazeux utilisant des CPs.
- Des capteurs opto-mécaniques utilisant des CPs.
- Capteurs photoniques intégrés à cristaux qui utilisent un effet non linéaire.
- Capteurs à cristaux photoniques à fibres optiques, et ainsi de suite.

II.2.3. Structure d'un capteur :

Les différentes parties constitutives d'un capteur sont décrites ci-dessous (figure II.2)

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

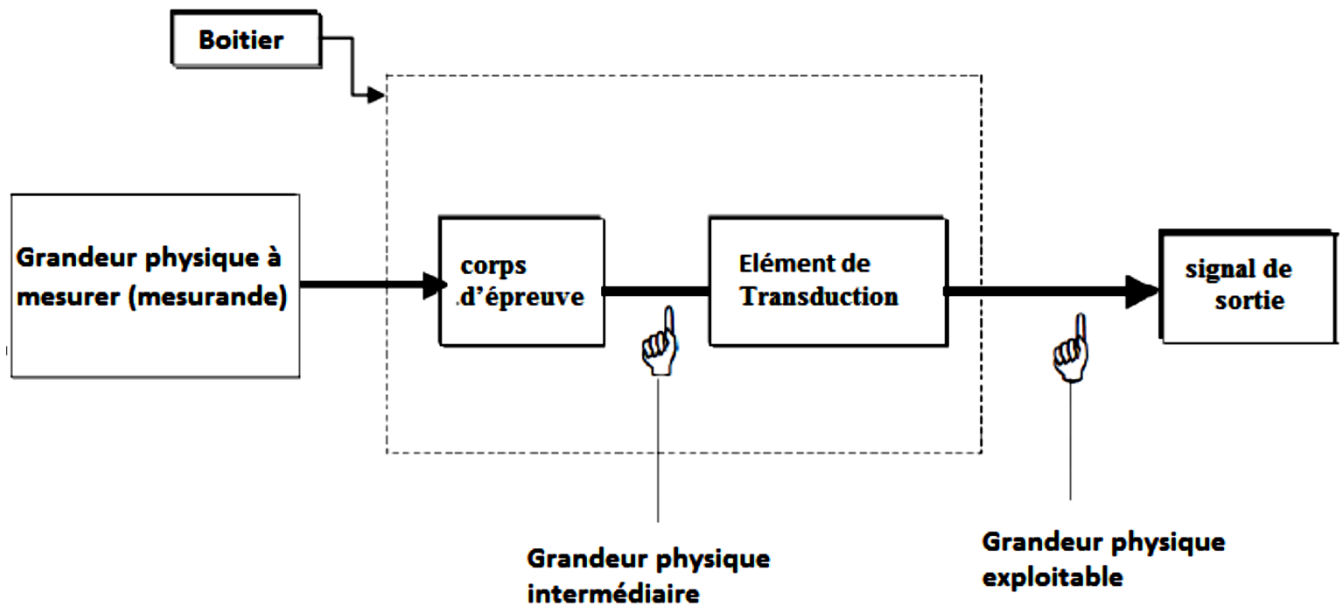


Figure II.2: Structure d'un capteur

II.2.3.1. Le corps d'épreuve :

L'objet d'essai est un élément sensible qui réagit à la grandeur mesurée. Son rôle est de convertir la grandeur mesurée en une autre grandeur physique dite mesurable.

II.2.3.2. Transducteur :

Les transducteurs sont des éléments sensibles couplés à l'échantillon testé. Il convertit la réponse de l'objet testé en une quantité électrique qui constitue le signal de sortie

II.2.3.3. Le boîtier :

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

II.2.4. Classifications des capteurs :

Les transducteurs sont classés en deux grandes familles en fonction des caractéristiques électriques de la variable de sortie. Cette classification est basée sur le conditionneur correspondant :

II.2.4.1. Capteurs passifs :

Les capteurs passifs utilisent un élément intermédiaire qui réagit au phénomène physique et une alimentation électrique extérieure pour obtenir un signal électrique qui peut être résistif, capacitif ou inductif. Ils sont largement utilisés dans diverses applications de détection en raison de leur simplicité et de leur efficacité. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

ces capteurs passifs [18]. Ces capteurs sont essentiels dans de nombreux domaines technologiques et industriels, offrant des solutions fiables et précises pour la mesure de divers paramètres physiques.

Tableau II.1 : différentes caractéristiques des capteurs passifs.

| Mesurande | Grandeur de sortie | Matériaux |
|--------------|-------------------------|--------------------------|
| Température | Résistivité | Platine, nickel, cuivre |
| Très basse | Constante | Semi-conducteur |
| Température | Diélectrique | Verre |
| Flux optique | Résistivité | Semi-conducteur |
| Déformation | Résistivité | Alliages nickel |
| | Perméabilité magnétique | Alliages ferromagnétique |
| Position | Résistivité | Magnétorésistances |
| Humidité | Résistivité | Chlorure de lithium |

II.2.4.2. Capteur actif :

Les capteurs actifs transforment directement la grandeur physique en grandeur électrique. Il existe des types de capteurs actifs basés sur le courant, la tension et la charge. Les principes physiques impliqués sont décrits ci-dessous [18] :

Capteurs de courant : Ces capteurs génèrent un courant proportionnel à la grandeur physique mesurée. Ils sont souvent utilisés dans des applications telles que la mesure de l'intensité lumineuse (photodiodes) ou de la radiation.

Capteurs de tension : Ces capteurs produisent une tension proportionnelle à la grandeur physique. Par exemple, les thermocouples génèrent une tension dépendant de la température, permettant ainsi une mesure précise de la température.

Capteurs de charge : Ces capteurs produisent une charge électrique en réponse à une grandeur physique. Les capteurs piézoélectriques en sont un exemple, où une déformation mécanique génère une charge électrique proportionnelle, utile dans la mesure des vibrations ou des forces. Le tableau ci-dessous résume les différentes caractéristiques physiques des capteurs actifs :

Tableau II.2 : les différentes caractéristiques des capteurs actifs.

| Mesurande | Grandeur de sortie |
|-------------|--------------------|
| Température | Tension |

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

| | |
|-------------------------------|---------|
| Flux optique | Courant |
| Force, Pression, accélération | Charge |
| Position | Tension |
| Vitesse | Tension |

II.2.5. Caractéristiques des capteurs :

Les propriétés métrologiques d'un capteur constituent le lien effectif entre le capteur et la quantité qu'il mesure et sont évaluées en déterminant la résolution, la sensibilité et la sélectivité du détecteur :

II.2.5.1. Etalonnage :

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer graphiquement la relation entre l'objet mesuré et la variable de sortie électrique (figure II.3).

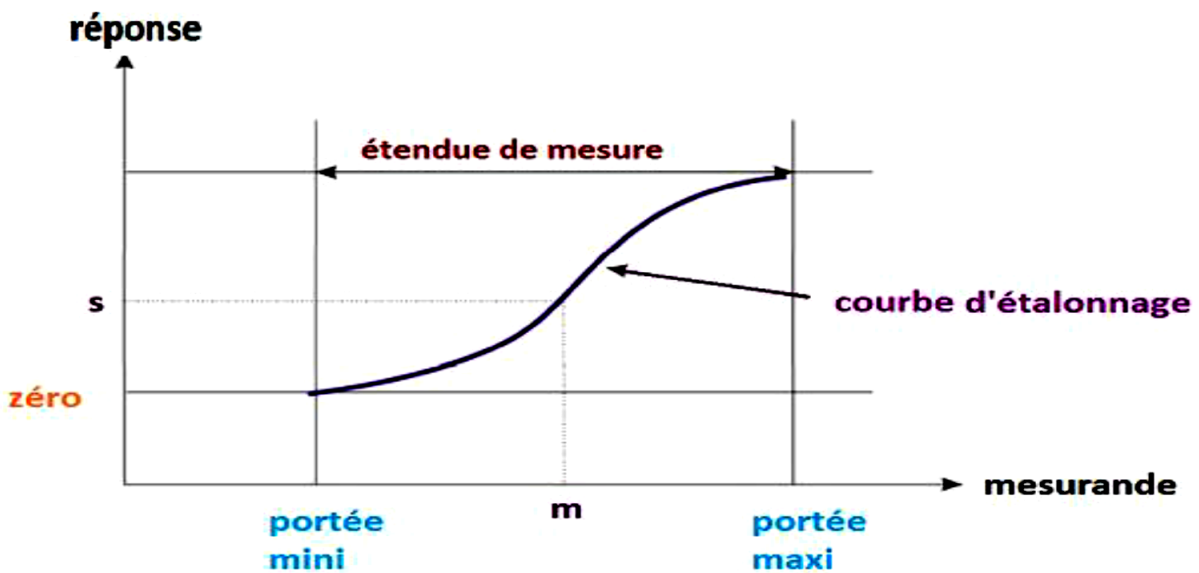


Figure II.3 : Courbe d'étalonnage d'un capteur

II.2.5.2. Sensibilité (S) :

Ce paramètre caractérise la capacité du capteur à détecter des variations minimales de la quantité mesurée. Il s'agit d'une caractéristique importante pour l'évaluation et l'interprétation des valeurs mesurées. Il est défini comme la variation du signal de sortie (Sout) par rapport à la

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

variation de la quantité mesurée(m) (pente de la partie linéaire de la courbe d'étalonnage) et s'exprime comme suit [18].

$$S = \frac{\Delta \text{sout}}{\Delta m} \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

Avec :

S : représente la sensibilité.

Sout : représente la variation du signal de sortie.

Δm : représente la variation du mesurande.

II.2.5.3. Fiabilité :

La fiabilité est définie comme la capacité d'un capteur à fonctionner correctement, c'est -à- dire à fournir des données avec une précision définie.

II.2.5.4. Réversibilité :

Elle définit la capacité du matériau à revenir à son état initial lorsque l'excitation est supprimée.

II.2.5.5. Sélectivité

Équivaut à la capacité de détecter une substance parmi d'autres dépend de la partie sensible du capteur [44].

II.2.5.6. Limite de détection :

La limite de détection pour un capteur à cristaux photoniques est un paramètre crucial qui mesure la plus petite variation de la grandeur à mesurer que le capteur peut détecter. Cette limite est généralement exprimée en RIU (Réfractive Index Unit) et dépend de la sensibilité et du facteur de qualité de la résonance du capteur. Les capteurs à cristaux photoniques sont connus pour offrir des limites de détection très basses, de l'ordre de 10^{-6} RIU, grâce à leur forte interaction lumière-matière et leur capacité à confiner la lumière sur de petits volumes [45].

$$LD = \frac{\lambda}{S*Q*10} \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

LD : représente la limite de la détection.

λ : Longueur d'onde

Q : Facteur de qualité

S : représente la sensibilité

II.2.5.7. Exactitude :

Il s'agit de la concordance entre le résultat de la mesure et la valeur réelle de la grandeur mesurée, la différence est appelée erreur absolue.

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

II.2.5.8. Réponse du capteur ou dynamique :

La réponse du capteur est définie par une courbe d'étalonnage. Cette zone représente la plage de réponse du capteur avant saturation. En dehors de cette zone, il existe deux valeurs spécifiques : la limite de détection (LD) et la saturation. Le phénomène de saturation est fréquemment rencontré en physique. La limite de détection ou seuil correspond à la valeur minimale d'une grandeur de mesure qui peut être détectée avec une incertitude acceptable [45].

II.3. Capteurs à cristaux photoniques :

L'application des cristaux photoniques en tant que capteurs est un domaine de recherche très prometteur, car leur microstructure périodique piège les photons et crée des résonances optiques très sensibles en présence des molécules détectées. Grâce à leur large plage de détection, les cristaux photoniques peuvent être appliqués à un large éventail de mesures, de l'air aux fluides très visqueux. [46].

II.3.1. Les caractéristiques des capteurs à cristaux photoniques :

II.3.1.1. Sensibilité (S):

La sensibilité d'un capteur à cristaux photoniques est généralement définie comme le changement relatif de la résonance en réponse à un changement de l'indice de réfraction environnant (Δn). Elle peut être exprimée comme :

$$S = \Delta\lambda / \Delta n \dots\dots\dots (II.3)$$

Où $\Delta\lambda$ est le changement de longueur d'onde de la résonance et Δn est le changement de l'indice de réfraction.

II.3.1.2. Sélectivité (Sel):

La sélectivité mesure la capacité du capteur à discriminer entre différentes substances en fonction de leur indice de réfraction. Elle peut être représentée comme le rapport entre la sensibilité et la largeur spectrale de la résonance.

II.3.1.3. Spécificité (Spe):

La spécificité est la capacité à identifier spécifiquement la substance cible parmi d'autres, même en présence de composés similaires. Elle peut être définie en termes de sensibilité et de seuil de détection spécifique à la substance cible.

II.3.1.4. Linéarité (Lin):

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

La linéarité se réfère à la relation linéaire entre la réponse du capteur et les changements dans l'indice de réfraction. Elle peut être évaluée en examinant le comportement du capteur sur une plage de valeurs d'indice de réfraction.

II.3.1.5. Temps de réponse (τ):

Le temps de réponse est le temps nécessaire pour que le capteur détecte et réponde aux changements de l'indice de réfraction. Il peut être mesuré comme le temps nécessaire pour que la réponse du capteur atteigne un certain pourcentage de sa valeur finale en réponse à un changement d'indice de réfraction.

II.3.1.6. Robustesse (R):

La robustesse mesure la capacité du capteur à maintenir ses performances face aux interférences externes et aux perturbations. Elle peut être évaluée en exposant le capteur à diverses conditions environnementales et en examinant son comportement.

II.3.1.7. Gamme dynamique (DR):

La gamme dynamique représente la plage d'indices de réfraction sur laquelle le capteur peut fonctionner de manière efficace sans saturation ni perte de sensibilité. Elle peut être déterminée en examinant la réponse du capteur sur une large plage d'indices de réfraction.

II.3.1.8. Le facteur de qualité Q :

Le facteur de qualité (Q) d'un capteur à cristaux photoniques est une mesure de son efficacité dans le stockage et le confinement de la lumière. Il est défini comme le rapport de l'énergie stockée dans le capteur à l'énergie perdue par cycle dans le système. Le facteur de qualité peut être exprimé mathématiquement comme suit :

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega \dots\dots\dots (II.4)$$

Où : ω_0 est la fréquence de résonance du système, et $\Delta\omega$ est la largeur spectrale à mi-hauteur de la résonance.

Un facteur de qualité élevé indique une résonance étroite et donc une faible perte d'énergie par cycle, ce qui se traduit par une plus grande sensibilité du capteur. Plus précisément, un facteur de qualité élevé signifie que le capteur peut maintenir une résonance pendant une longue période de temps avant que l'énergie stockée ne soit dissipée. Ainsi, le facteur de qualité est un indicateur crucial de la performance d'un capteur à cristaux photoniques, car il affecte directement sa sensibilité, sa sélectivité et d'autres caractéristiques de performance. En général, les capteurs avec un facteur de qualité plus élevé sont préférés dans de nombreuses applications

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

en raison de leur sensibilité accrue et de leur capacité à détecter de faibles variations dans l'indice de réfraction.

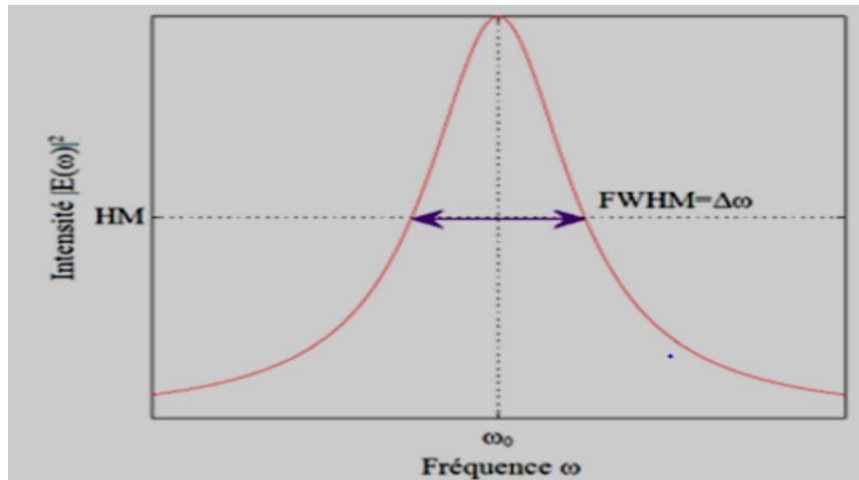


Figure II.4 : Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne d'un mode dans la cavité centré à la fréquence ω_0 [16].

II.4. Capteurs à CPs basés RI (indice de réfraction)

Les capteurs à cristaux photoniques (CP) basés sur l'indice de réfraction (RI) représentent la classe la plus répandue de capteurs basés sur les CP [41]. Ils sont conçus pour détecter les différences dans l'indice de réfraction effectif du guide d'onde, ce qui entraîne des changements lents dans la longueur d'onde du système lumineux. Ces capteurs offrent des performances de détection améliorées grâce à une interaction améliorée avec la substance photoactive. Ils présentent de nombreux avantages tels qu'une préparation minimale des échantillons sans marquage fluorescent, une détection en temps réel et une sensibilité élevée.

Il existe plusieurs types de capteurs RI à base de CPs selon le mode de fonctionnement.

- Capteurs à base d'une cavité à modulation locale de la largeur d'un défaut linéique
- Capteurs à base de guides d'ondes couplés à des cavités (CCWG)
- Capteurs à base de deux guides d'ondes WI couplés à un défaut en forme d'anneau

En résumé, les capteurs RI à base de CPs sont très performants grâce à leur grande sensibilité, leur haute sélectivité et leur miniaturisation. Ils trouvent de nombreuses applications en détection de gaz, de biomolécules, de substances chimiques, etc

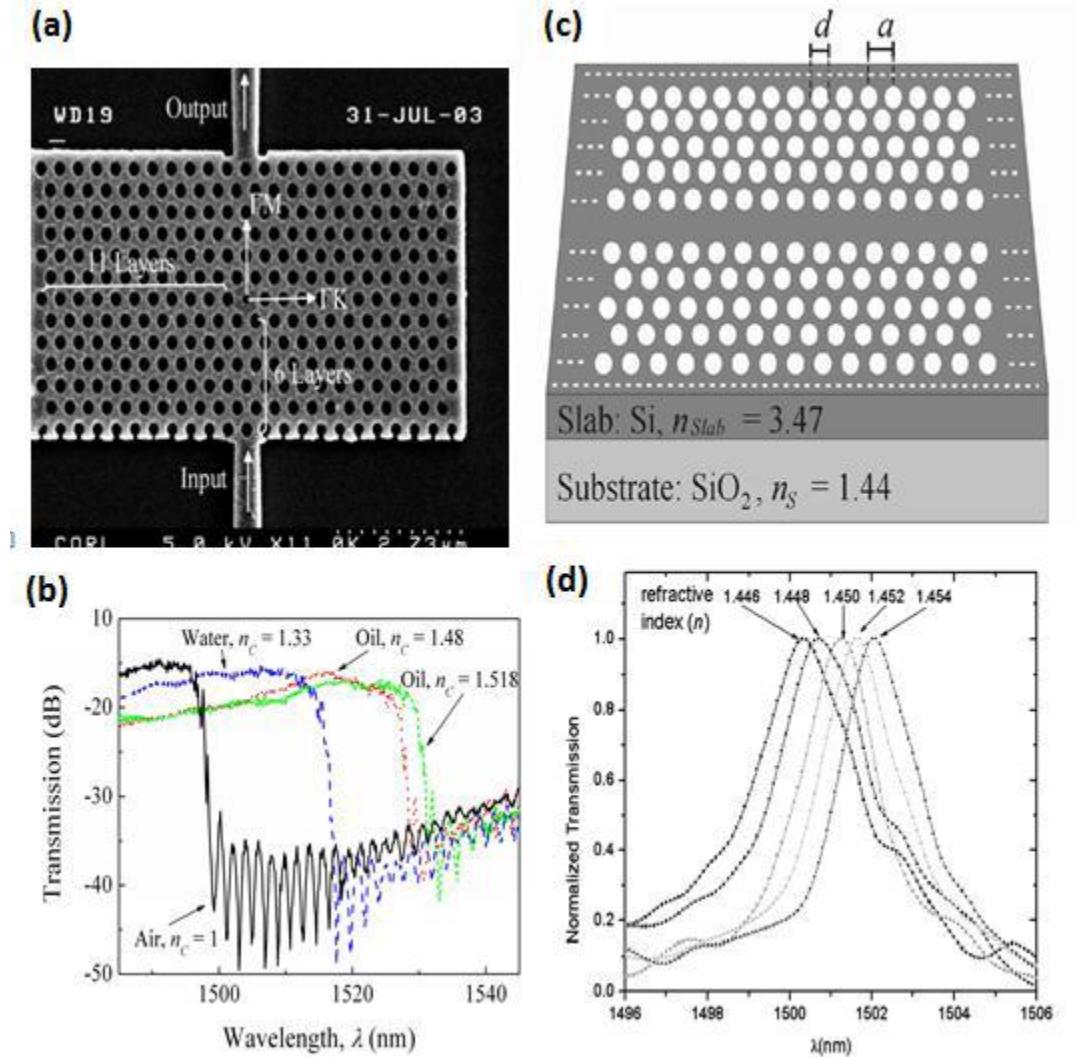


Figure II.5 : (a) vue au microscope électronique à balayage d'une microcavité à cristal photonique intégrée avec deux guides d'ondes ruban, (b) spectres de transmission normalisés de la microcavité montrée en (a) avec cinq différents indices de réfraction allant de $n = 1,446$ jusqu'à $n = 1,454$ [47]. (c) vue au microscope électronique à balayage de guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI, (d) spectres de transmission mesurés pour quatre solutions d'indices différents [46].

II.5. Conception et fabrication des capteurs à cristaux photoniques

La fabrication des capteurs à cristaux photoniques implique des processus complexes exploitant les propriétés optiques de ces cristaux pour détecter les changements environnementaux. Les techniques de fabrication varient en fonction des objectifs spécifiques

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

et des performances requises. Cette section offre un aperçu des principales technologies de fabrication évoquées dans les sources fournies

II.5.1. Lithographie avancée :

La fabrication de cristaux photoniques fait appel à des techniques lithographiques avancées pour former des structures périodiques à l'échelle nanométrique. Cette méthode de fabrication de haute précision est essentielle pour la production de cristaux photoniques capables de contrôler et de manipuler efficacement la lumière [48].

II.5.2. Méthodes de fabrication tridimensionnelles :

Certaines méthodes de fabrication tridimensionnelles ont été proposées pour la production de cristaux photoniques. Ces approches offrent des possibilités pour concevoir des structures photoniques complexes et optimisées pour des applications spécifiques de capteurs [41]

II.6. Applications des capteurs à cristaux photoniques

Les cristaux photoniques ont trouvé de nombreuses applications dans divers domaines grâce à leur capacité à contrôler la lumière, Les principales applications des capteurs à cristaux photoniques sont les suivantes :

II.6.1. Détection de gaz et de liquides

Les capteurs à cristaux photoniques sont largement utilisés pour détecter les gaz et les liquides en raison de leur grande sensibilité aux variations de l'indice de réfraction de l'analyte. Ces capteurs utilisent les modes localisés présents dans le spectre de transmission à travers le cristal photonique.

II.6.1.1. Détection de gaz dans l'infrarouge moyen :

Les capteurs à cristaux photoniques ont été proposés pour la détection de gaz comme le CO₂, CH₄ et CO, qui présentent des raies d'absorption dans la région de l'infrarouge moyen [49] .

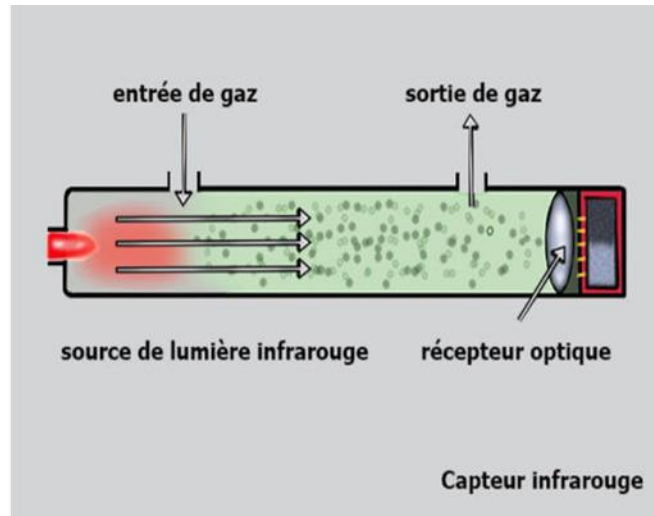


Figure II.6 : capteur l'infrarouge moyen.

II.6.1.2. Détection de liquides biochimiques :

Les cristaux photoniques présentent un grand potentiel pour la détection des liquides biochimiques en combinant les propriétés des cristaux photoniques et phononiques. Les cristaux photoniques ont une sensibilité accrue en raison de la nature des défauts présents dans leur structure périodique [50] [51].

II.6.2. Biocapteurs et applications médicales

En exploitant les caractéristiques combinées des cristaux photoniques et phononiques, les cristaux photoniques se révèlent être des candidats de choix pour la détection des liquides biochimiques, principalement en raison de leur sensibilité accrue facilitée par les défauts présents dans leur structure périodique. Cette sensibilité élevée les positionne comme des outils prometteurs dans le domaine du diagnostic médical, notamment pour la détection précoce du cancer. Par exemple, les capteurs à cristaux photoniques permettent de détecter les variations subtiles d'indice de réfraction liées aux altérations cellulaires, offrant ainsi la possibilité de dépister efficacement le cancer du col de l'utérus et d'autres affections similaires. Cette technologie offre ainsi des perspectives prometteuses pour améliorer les techniques de diagnostic et permettre une intervention médicale précoce et ciblée.

II.6.3. Surveillance environnementale et industrielle

Les capteurs à cristaux photoniques ont plusieurs applications dans la surveillance environnementale et industrielle [52] [53] :

II.6.3.1. Surveillance environnementale :

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

- Ces capteurs peuvent être utilisés pour mesurer et surveiller des paramètres environnementaux tels que la qualité de l'air, la température, l'humidité, la pression, la lumière et le son.
- Grâce à leur grande sensibilité et à leur mesure en temps réel, ces capteurs permettent une surveillance continue et précise de l'environnement.
- Ils contribuent ainsi à la détection précoce des risques environnementaux et à la protection des écosystèmes.

II.6.3.2. Surveillance industrielle :

- Dans les applications industrielles, les capteurs à cristaux photoniques sont utilisés pour contrôler et optimiser les processus de production.
- Leur grande sensibilité et leur capacité à mesurer des paramètres critiques en temps réel les rendent indispensables pour assurer la qualité et l'efficacité des opérations industrielles.
- Ils peuvent également être intégrés dans des systèmes de surveillance afin de détecter rapidement de légères fluctuations et d'assurer une production fiable et conforme aux normes.

II .7. Conclusion

L'utilisation des cristaux photoniques comme capteurs représente notamment un domaine de recherche en plein essor. Les avancées significatives récentes dans le domaine de la photonique ont été largement soutenues par les progrès des technologies basées sur le silicium. Nous abordons ici les capteurs de manière générale, en examinant leurs caractéristiques, leurs divers types et leurs principes de fonctionnement, tout en explorant les concepts fondamentaux liés aux capteurs en général, et en mettant l'accent sur les capteurs à cristaux photoniques. Les résultats des simulations seront également présentés, et feront l'objet d'une analyse approfondie dans le prochain chapitre.

Chapitre III

Résultats et interprétations

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats obtenus de simulation d'un capteur à cristaux photoniques (RI) en utilisant les simulateurs BandSolve et FullWave disponibles dans le logiciel Rsoft. Ces simulateurs reposent sur des méthodes de calcul avancées telles que la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) et La méthode de décomposition en ondes planes PWE (Plane Wave Expansion), nous fournirons par la suite des interprétations détaillées de ces résultats. Ce qui aidera à une meilleure compréhension des propriétés photoniques de ces structures.

III.2. Présentation de l'interface graphique du logiciel Rsoft :

Le logiciel Rsoft CAD offre la possibilité de concevoir et de simuler divers appareils optiques, tels que les coupleurs, les commutateurs, les multiplexeurs optiques et les cristaux photoniques [6]. Plusieurs modules sont inclus, tels que BeamPROP, Diffract Mod, Fullwave, Band Solve et Grating mod. Le module FullWave et le module Band Solve sont les deux modules qui permettent de simuler les cristaux photoniques. La fenêtre de l'interface graphique pour le logiciel Rsoft est illustrée dans la figure (III.1).

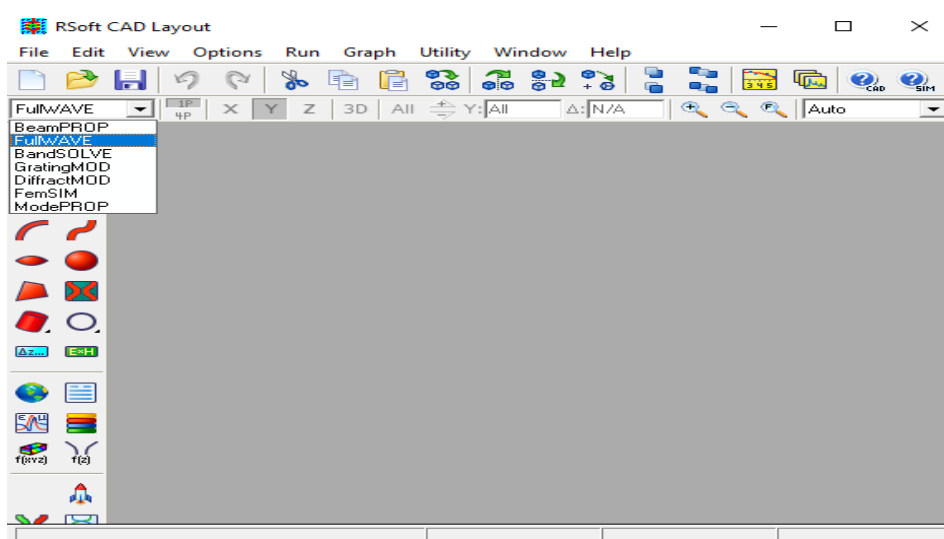


Figure III.1: Interface graphique du logiciel Rsoft

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.2.1. Le simulateur BandSolve :

Le logiciel RSoft propose un module appelé BandSolve, qui permet de calculer le diagramme des bandes (BIP) pour les cristaux photoniques. Cette méthode repose sur la méthode des ondes planes (PWE) [6]. La fenêtre affichée lors de l'exécution du module BandSolve est illustrée dans la figure (III.2).

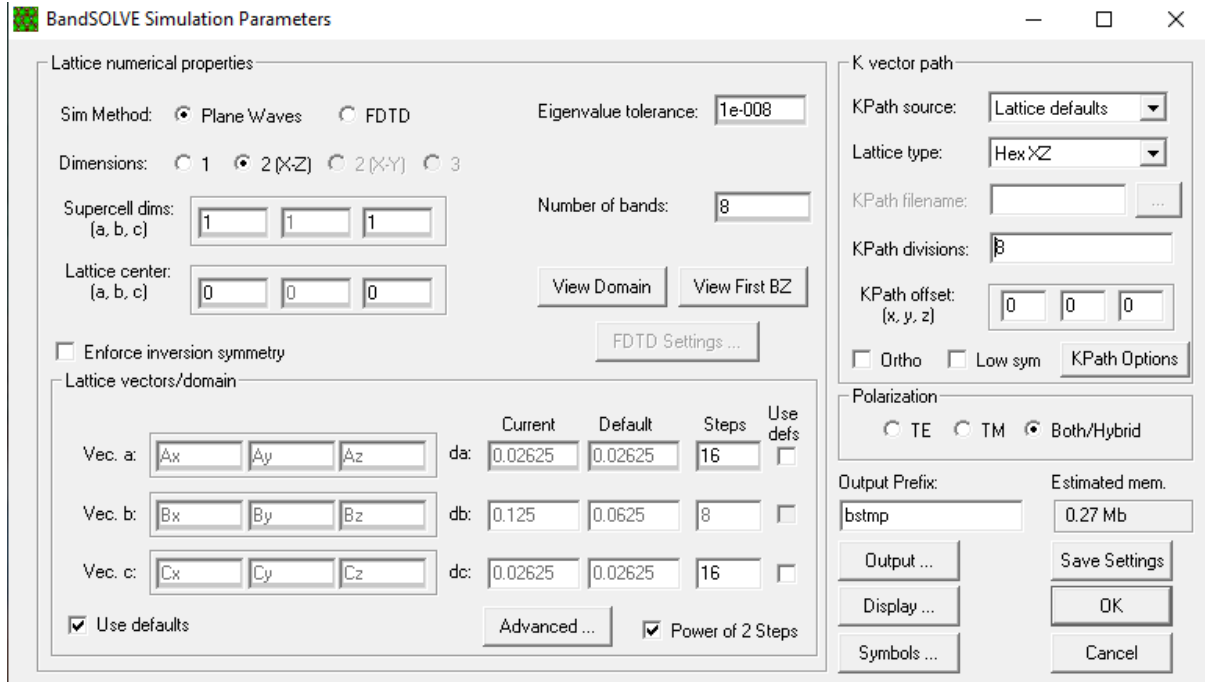


Figure III.2 : Fenêtre du module BandSOLVE.

Grâce à cette fenêtre, il est possible d'afficher la zone de Brillouin en fonction du type de réseau utilisé, ainsi que de visualiser les bandes interdites photoniques pour la structure du cristal photonique simulé, soit avec les modes TE ou TM.

III.2.2. Le simulateur FullWave :

L'intégration de ce module dans le logiciel Rsoft repose sur la méthode FDTD. La fenêtre qui se présente lors de l'exécution du module FullWave est illustrée dans la figure (III.3). [6]

Chapitre III : Résultats et interprétations

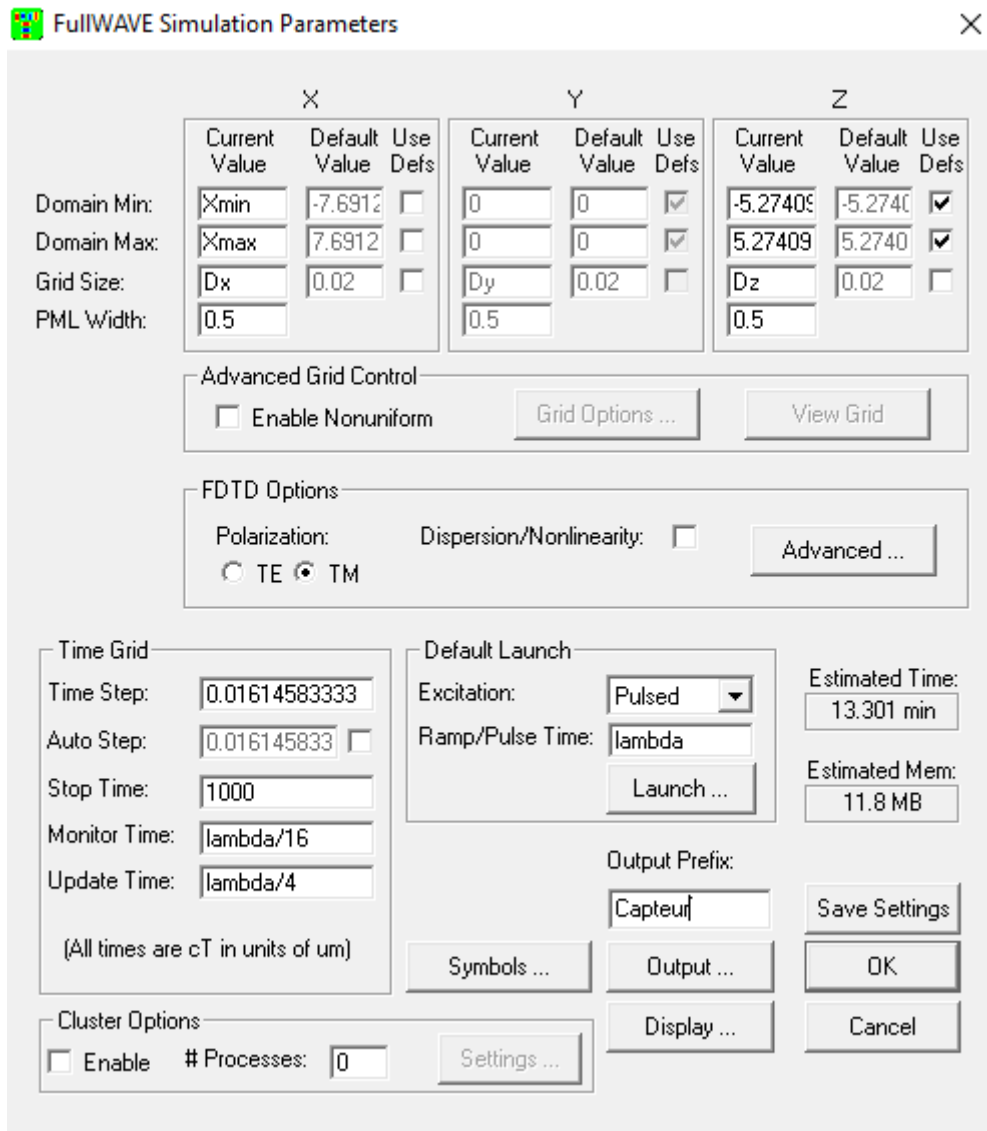


Figure III.3 : Fenêtre du simulateur FullWAVE.

III.3. Présentation de la structure de base :

Avant de procéder à la conception du capteur à cristaux photoniques (RI), il est indispensable de réaliser une analyse de la structure de base afin d'établir le schéma des bandes interdites photoniques. Cette étude repose sur l'utilisation de cristaux membranaires bidimensionnels comportant un réseau de trous d'air dans un diélectrique à fort indice, formant ainsi un réseau à maille hexagonale.

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.3.1. Description de la structure :

Voici les caractéristiques et les paramètres de simulation de la structure de base du capteur à cristal photonique que nous proposons :

Tableau. III.1 : Présentation des paramètres de simulation et les caractéristiques.

| Les paramètres de simulation | Les valeurs |
|---|------------------------------|
| Dimensions | 31*29 |
| Période= constante du réseau=a | 0.42μm |
| Rayon des trou d'air | 0.19μm |
| Nhole = (indice de réfraction de l'air) | 1 |
| Nslab= (Indice de réfraction du silicium) | 3.45 |
| Delta= la différence d'indice ($\Delta n = N_{hole} - N_{slab}$). | 2.45 |
| la longueur d'onde (Free Space Wavelength) = wavelength | 1.55μm |

III.3.2. La création de la structure étudiée :

La création du réseau complet de dimensions 31 x 29 débute en sélectionnant l'option "Utilitaire" puis "Disposition de l'Array XZ". La fenêtre d'exécution (boîte de dialogue) qui apparaît est illustrée dans la figure (III.4), tandis que le réseau complet est représenté dans la figure (III.5).

Chapitre III : Résultats et interprétations

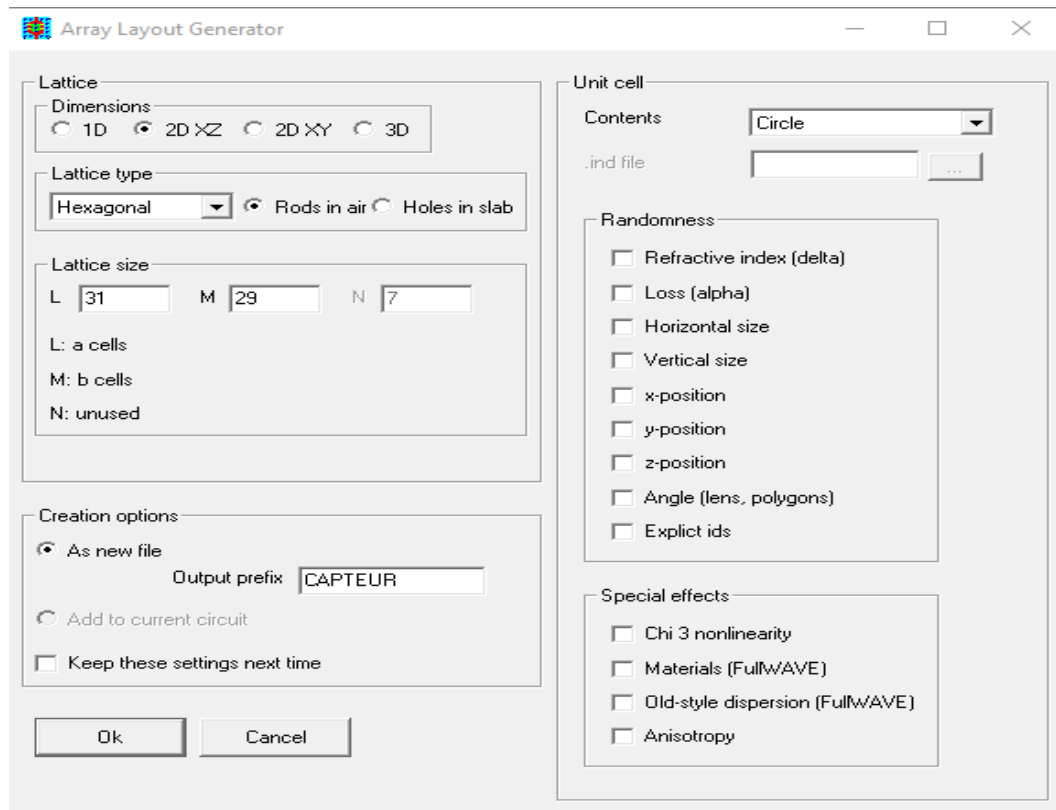


Figure III.4: Paramètres de création de la rangée XZ.

Après avoir créé les paramètres on clique sur OK.

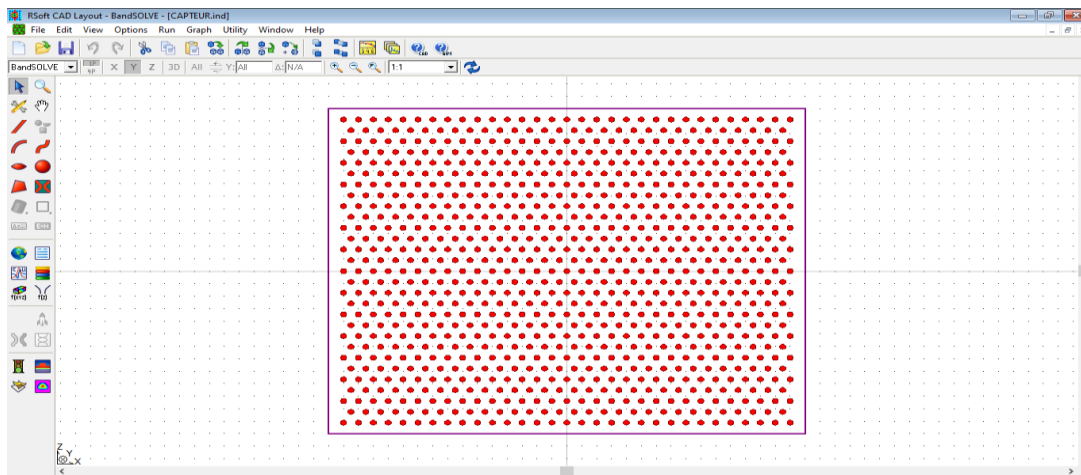



Figure III.5 : Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 31×29.

III.3.3. Personnalisation du réseau :

Les propriétés du réseau peuvent être configurées en utilisant le bouton global d'édition des

dispositions . Dans ce cas, nous allons créer des trous d'air circulaires (n=1) en les

Chapitre III : Résultats et interprétations

incorporant dans un diélectrique avec une longueur d'onde de 3.45, tandis que l'espace libre a une longueur d'onde de $1.55\mu\text{m}$ (voir Figure III.6) [18].

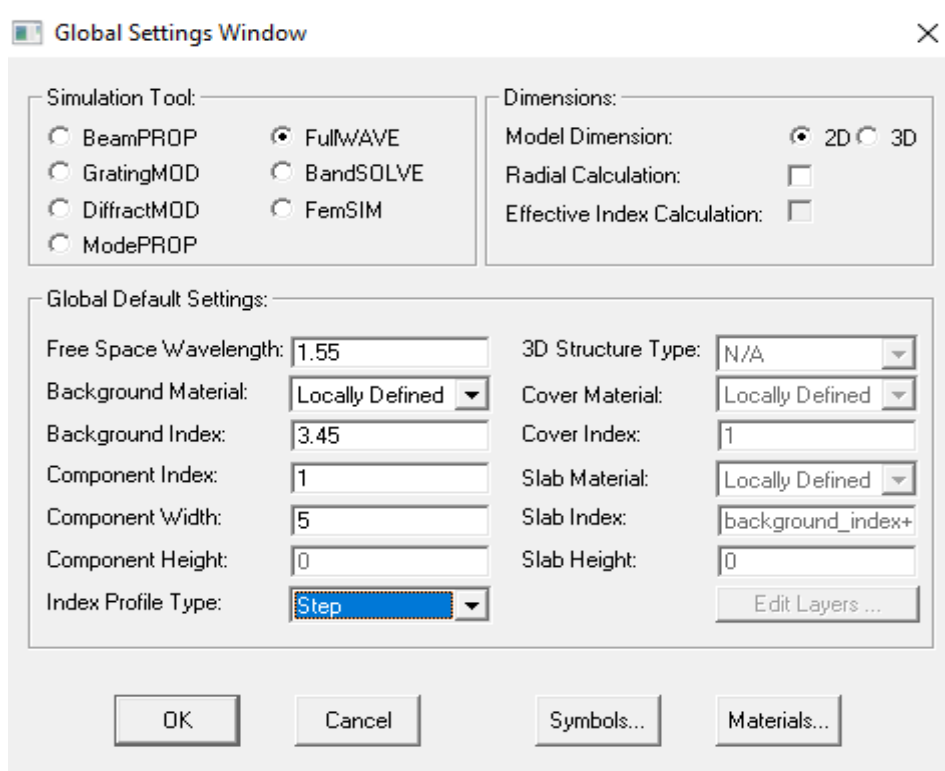



Figure III.6 : Arrangements Global.

III.3.4. Créer Des Variables :

À l'aide de l'icône  « Symbol table editor », une boîte de dialogue s'ouvre (figure III.7) pour faire entrer les paramètres de la structure de base. On y saisit les variables suivantes : $\text{Radius}=0.19\mu\text{m}$, $a=\text{Period}=0.42\mu\text{m}$, $N_{\text{hole}}=1$, $N_{\text{slab}}=3.45$, $\text{Background-index}=N_{\text{slab}}$, $\text{delta}=N_{\text{hole}}-N_{\text{slab}}$.

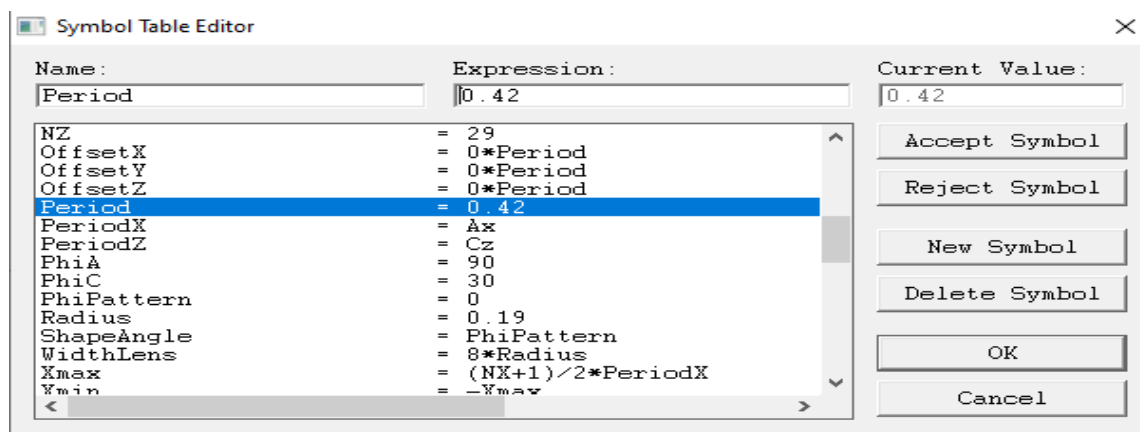



Figure III.7 : Paramètres de la structure de base dans l'éditeur des symboles.

III.3.5. Résultats de simulation obtenus par le Band Solve :

a) Profil d'indice :

Afin de vérifier la répartition des indices de la structure que nous avons créée. Il suffit de cliquer sur le bouton de profil d'Indices . Le résultat est présenté dans la figure III.8 (b).

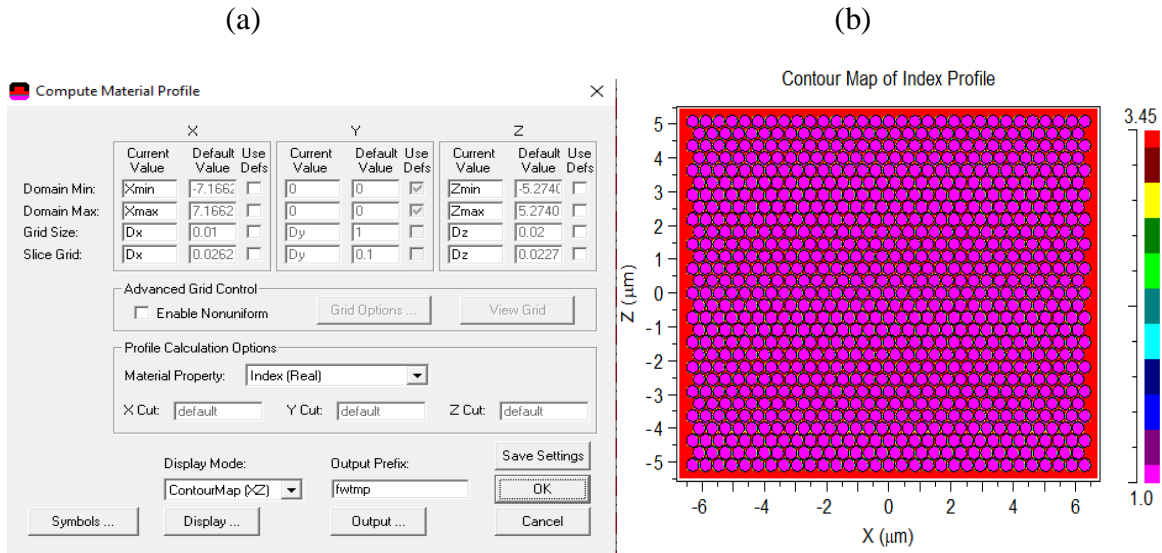


Figure III.8: la Vérification du profil d'index.

b) Diagramme des bandes interdites photoniques :

Le diagramme de bande, calculé à l'aide de la méthode des ondes planes (PWE) avec le simulateur Bandsolve pour un réseau hexagonal 2D (possédant la bande interdite la plus étendue parmi les réseaux hexagonaux), est illustré dans la figure III.9.

Les bandes interdites optiques (BIP) pour la polarisation TM sont représentées en rouge, tandis que les zones ombrées en bleu indiquent la polarisation TE. Il existe deux bandes interdites photoniques pour le mode TM et deux bandes pour le mode TE. Nous avons choisi de travailler dans la bande interdite la plus large car elle offre une plus grande gamme de longueurs d'onde exploitables, en particulier la première bande TM.

Pour calculer la longueur d'onde correspondante, nous avons procédé comme suit : Les fréquences sont données en unités normalisées.

$$\lambda = a/v = 0.42/0.3014 = 1.39 \mu\text{m}.$$

$$\lambda = a/v = 0.42/0.4938 = 0.85 \mu\text{m}.$$

avec : v est la fréquence et a la période.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Cela représente une plage de longueurs d'onde allant de 1390nm à 850nm environ. Il est à noter que cette plage couvre l'ensemble des longueurs d'onde utilisées dans le domaine de la télécommunication.

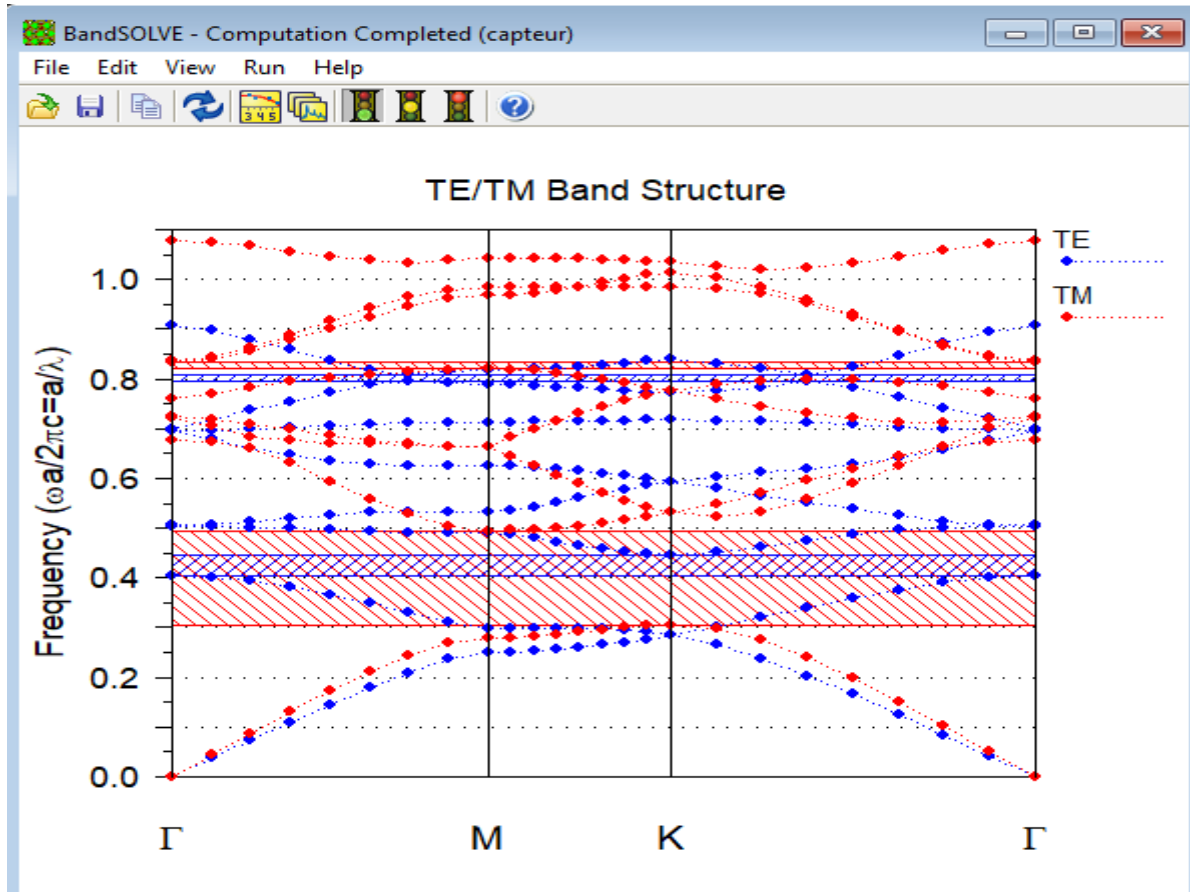


Figure III.9 : Diagramme de bandes d'un cristal photonique 2D du réseau Hexagonal.

III.4. Présentation de la structure avec défaut :

Pour l'application de cette structure en détection, on doit introduire des défauts. Il existe deux types de défauts, ceux des guides d'ondes et ceux de cavité.

III.4.1. Création d'un guide d'onde :

Un défaut de ligne a été introduit en retirant une série de trous dans la direction ΓK du réseau hexagonal, comme illustré dans la figure III.10.

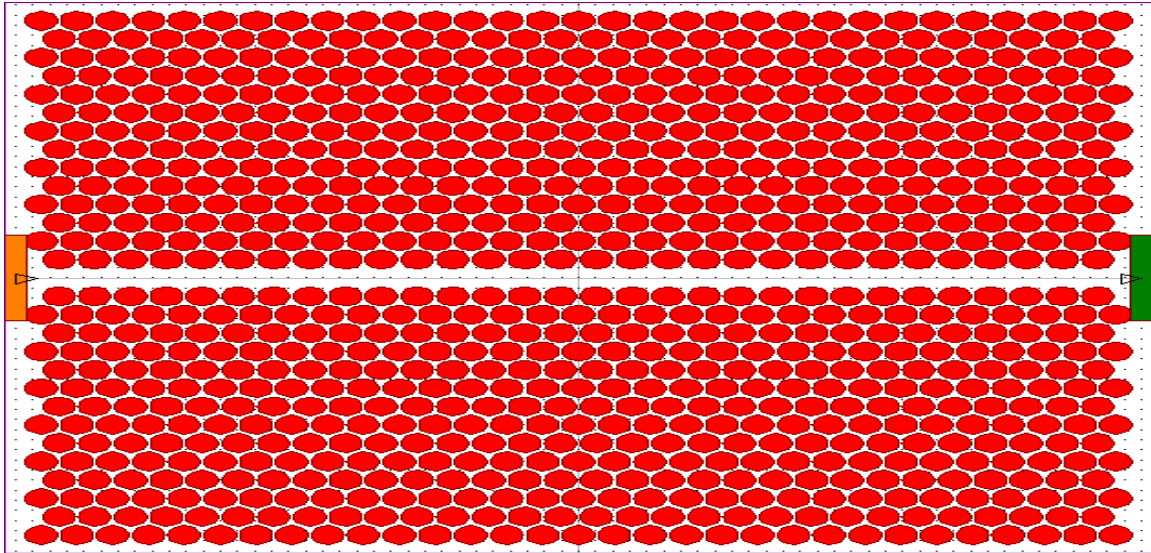


Figure III.10: Guide d'onde.

III.4.2. Couplage cavité / guide dans un cristal photonique 2D :

Le couplage entre une cavité et un guide d'onde dans un cristal photonique 2D est un processus crucial pour la conception de dispositifs optiques avancés. Dans un cristal photonique 2D, les guides d'ondes et les cavités résonantes sont des éléments clés qui permettent de guider et de piéger la lumière contrôlée

Pour former la cavité, on utilise un trou central r_c (en jaune) avec un diamètre de $r_c = 0,17\mu\text{m}$. Autour de ce trou central se trouvent six trous d'air successifs r_1 (en noir) dont le diamètre est plus grand, soit $r_1 = 0,20\mu\text{m}$. Ces six trous sont ensuite entourés de 18 autres trous (en vert) ayant un diamètre de $r_2 = 0,22\mu\text{m}$. Un trou d'air est placé à droite du guide d'ondes et un autre à sa gauche. Cette configuration forme une structure en losange. Voir (figure III.11).

Chapitre III : Résultats et interprétations

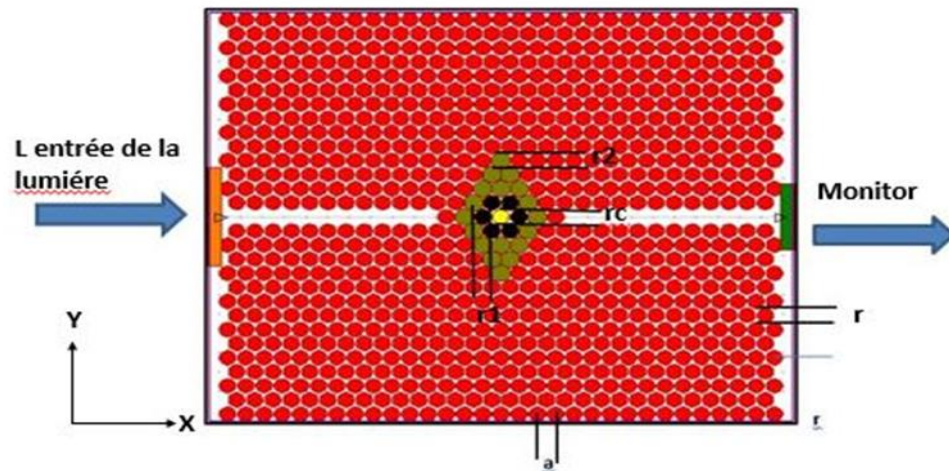




Figure III.11 : structure d'un couplage cavité et guide.

Une fois que la structure est clairement définie, il est nécessaire de réaliser la simulation en utilisant l'outil de simulation Full Wave afin de calculer la transmission à la sortie du guide. Avant de simuler, il est nécessaire de définir le champ en sélectionnant l'icône **Edit Launch Field** (Éditer Le Champ De Lancement)  où l'utilisateur peut fournir le champ initial pour une simulation. Ensuite, il est possible de cliquer sur l'option pour ajouter le moniteur à la fin du guide d'onde et de cliquer sur l'icône **Perform Simulation**  (Effectuer La Simulation) où l'utilisateur peut fournir des paramètres de simulation avant de l'effectuer (voir figure III.14).[18]

Chapitre III : Résultats et interprétations

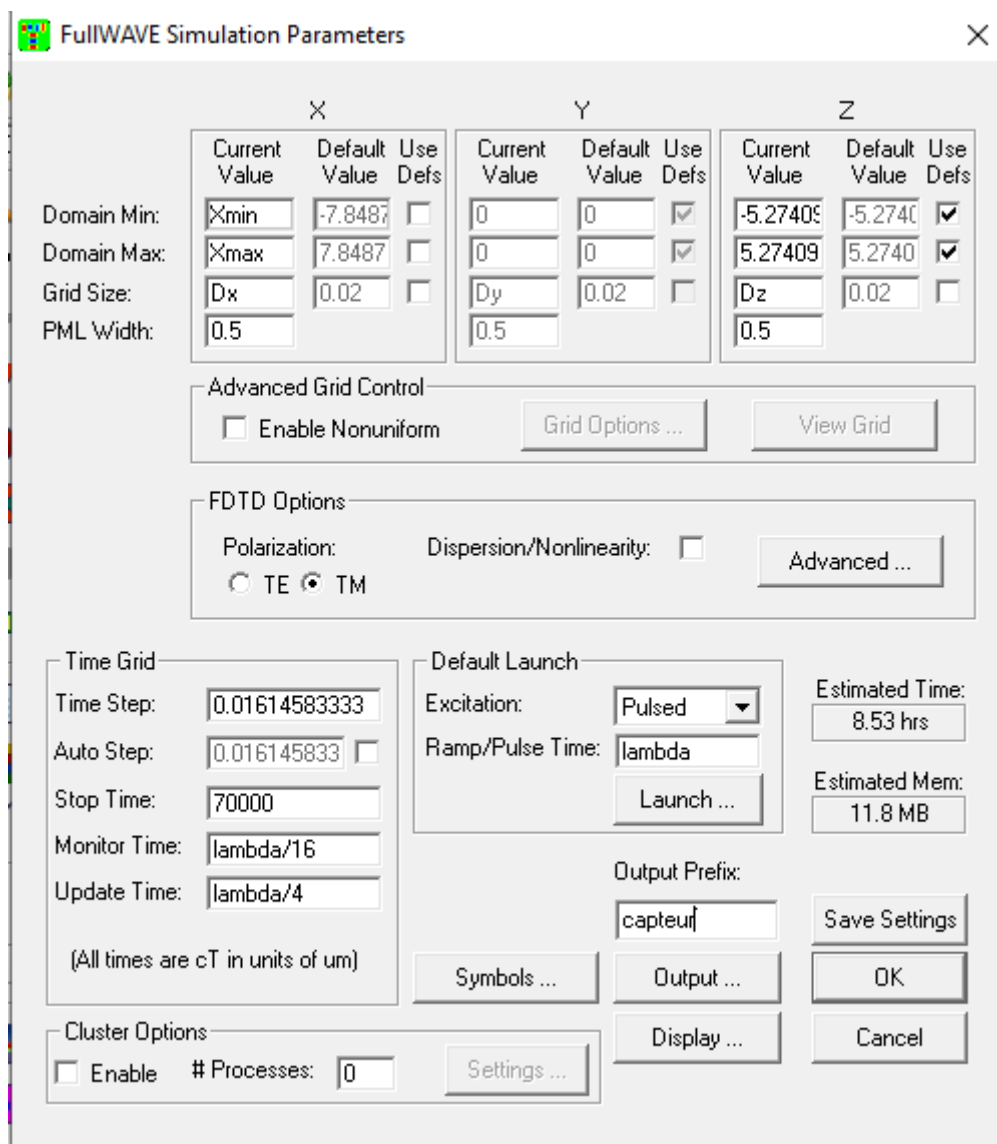


Figure III.12: la fenêtre de paramètre de la simulation.

En utilisant la méthode FDTD, on a présenté le spectre de transmission et la distribution du champ électrique de la cavité CP en utilisant l'indice de réfraction infiltré de $n = 1$, qui correspond à la longueur d'onde de bourdonnement de la cavité du PC. Comme le montre la figure III.13.

À la longueur d'onde de 1109.9 nm, on observe un pic très étroit, comme le montre la figure III.14. Quand on établit la longueur d'onde réelle de la cavité CP à 1109.9 nm, on peut observer la répartition du champ électrique de la cavité CP dans le plan x-z dans l'encart de la figure III.13, ce qui indique qu'il existe un confinement important de l'énergie lumineuse dans la cavité de défaut.[18].

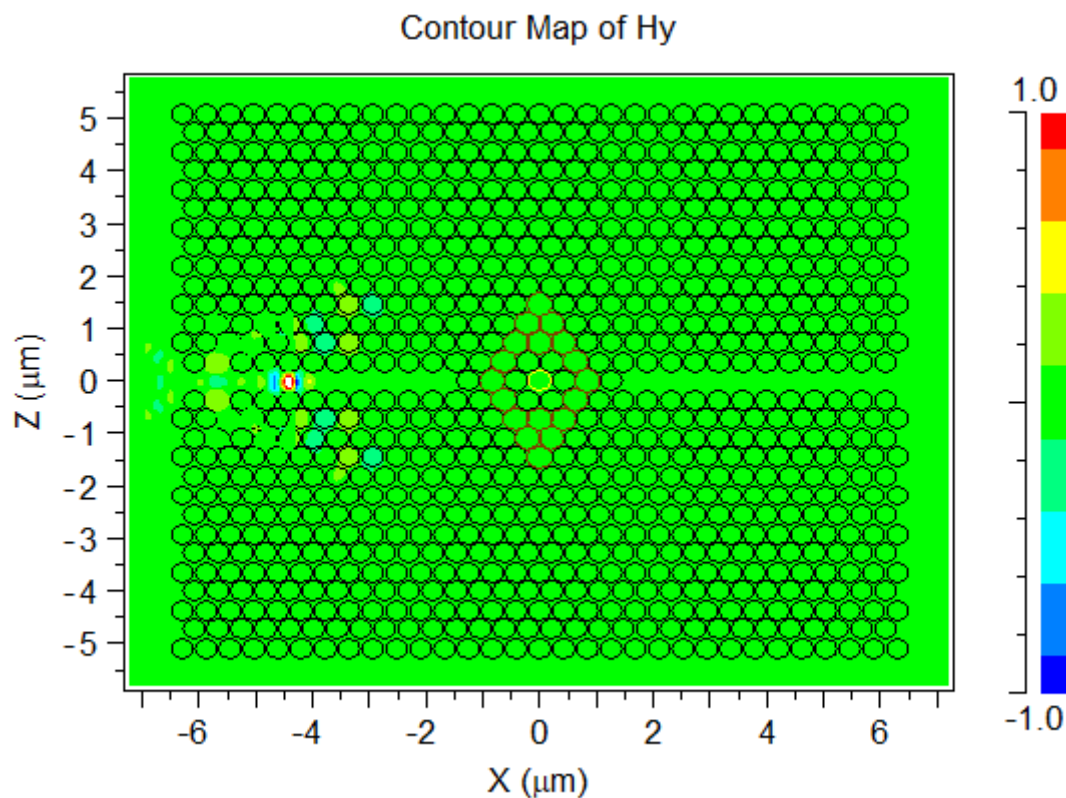


Figure III.13 : La distribution de champ électrique de la cavité CP.

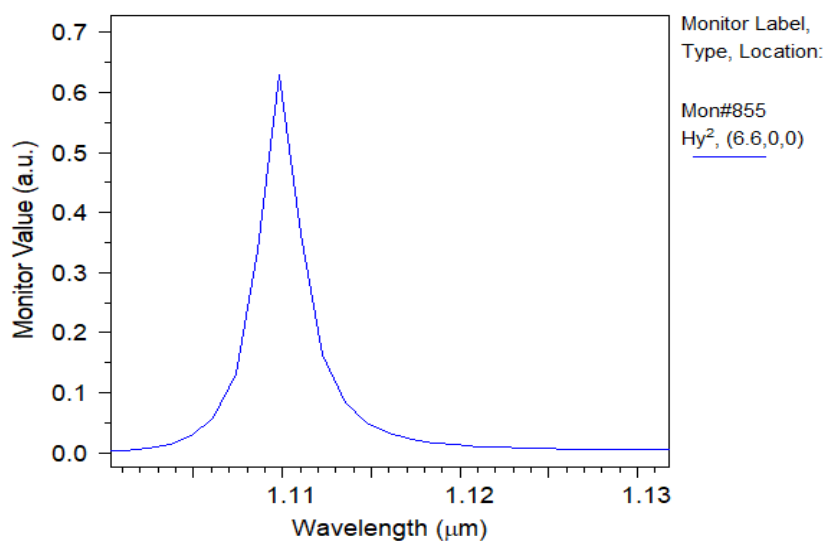


Figure III.14: Le Spectre de transmission de la cavité CP.

III.5. L'étude de la structure :

Dans la plupart des cas, les capteurs à cristaux photoniques se composent d'une structure périodique bidimensionnelle (2D) dont l'indice de réfraction varie de manière régulière. L'indice optique varie périodiquement, ce qui crée des bandes interdites de photons, c'est-à-dire des bandes de fréquences sur lesquelles la lumière ne peut pas circuler dans la structure,

Chapitre III : Résultats et interprétations

quelle que soit sa polarisation et sa direction de propagation. Les capteurs détectent en ajustant l'indice de réfraction du matériau (le silicium) en fonction du paramètre à mesurer.

Les principales caractéristiques du capteur à cristal photonique sont :

III.5.1. La sensibilité :

La sensibilité d'un capteur à cristal photonique est définie comme le changement de longueur d'onde de résonance par unité de changement d'indice de réfraction. Il est généralement exprimé en nm/RIU (unité d'indice de réfraction) par l'équation (II.3). Le résultat est présenté dans le (Tableau.III.2) et la (Figure III.15).

Tableau. III.2: la longueur d'onde et la sensibilité obtenu pour les différentes valeur n.

| N | λ (nm) | S (nm/RIU) |
|----------|----------------------------------|-------------------|
| 1 | 1109.9 | X |
| 1.01 | 1117.1 | 720 |
| 1.02 | 1123.7 | 690 |
| 1.03 | 1131.2 | 710 |
| 1.04 | 1137.7 | 695 |
| 1.05 | 1145.5 | 712 |

Chapitre III : Résultats et interprétations

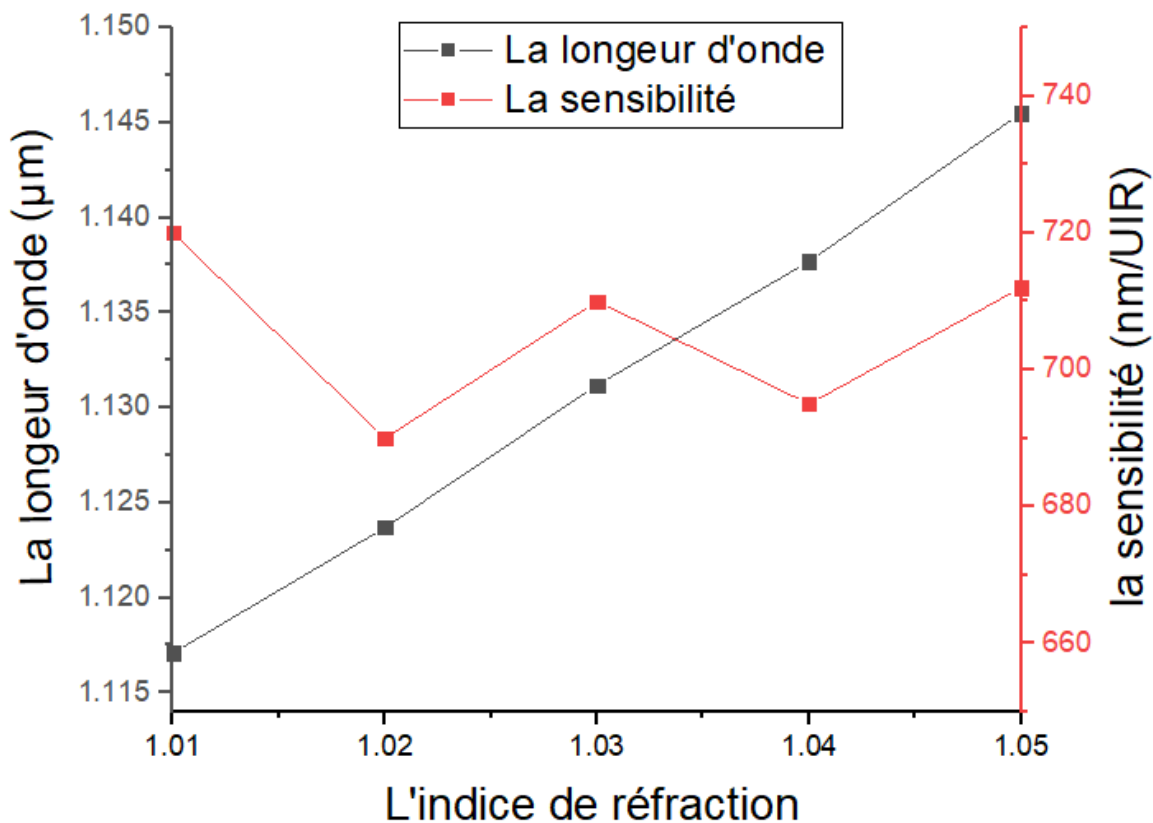


Figure III.15: Variations de la sensibilité S et la longueur d'onde avec l'indice de réfraction.

La sensibilité n'est pas constante et varie avec la valeur de l'indice de réfraction (Figure III.15).

Notre étude montre que la sensibilité varie de 690 nm/RIU à 720 nm/RIU pour différentes valeurs d'indice de réfraction de la couche de détection.

L'indice de réfraction du matériau est un paramètre fondamental qui détermine la longueur d'onde de résonance du capteur à cristal photonique.

L'indice de réfraction change avec la longueur d'onde de la lumière, un phénomène appelé dispersion. Cela signifie que la longueur d'onde de résonance changera à mesure que l'indice de réfraction change avec la longueur d'onde.

D'après la (Figure III.15), on observe une variation linéaire des positions des longueurs d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction.

Le décalage de la longueur d'onde de résonance est influencé par la variation de l'indice de réfraction, voir (Figure III.16).

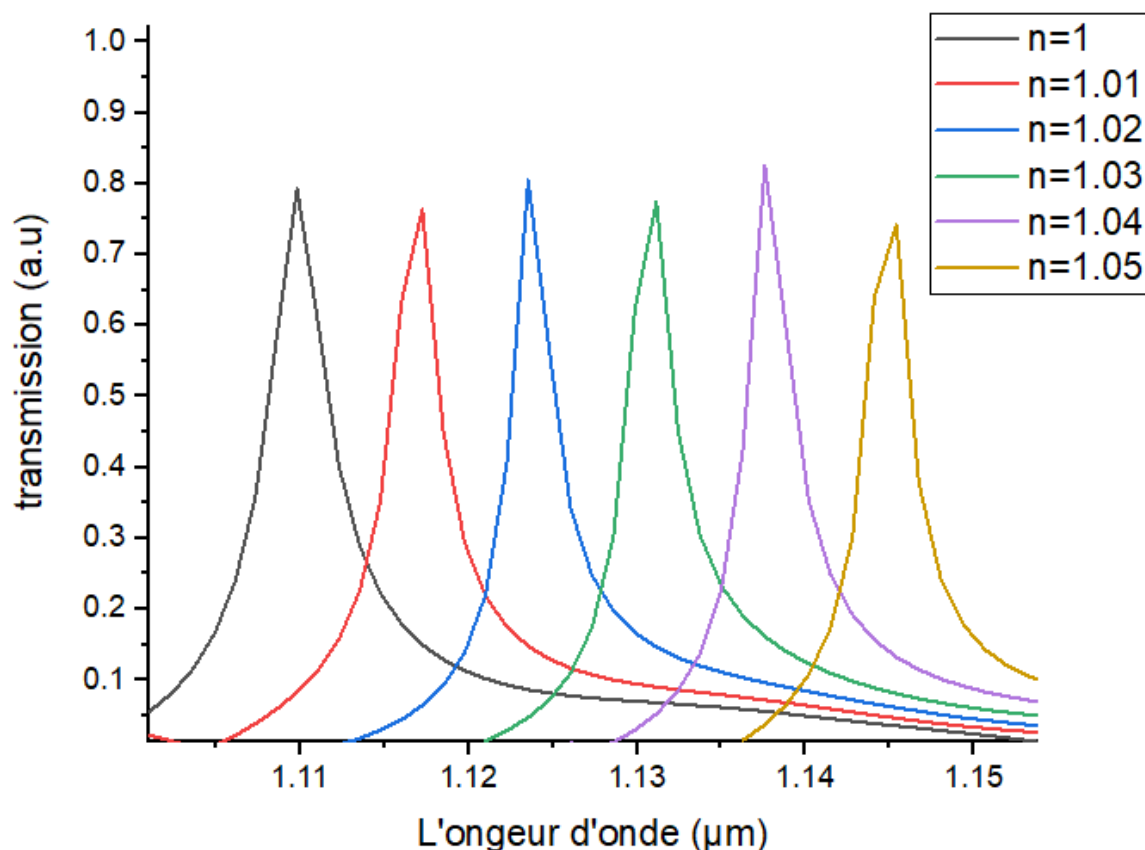


Figure III.16 : Les spectres de résonance de la cavité CP pour différentes valeurs de RI.

La structure périodique du cristal photonique est déficiente dans les cavités à cristaux photoniques, ce qui permet de retenir la lumière dans une région donnée de l'espace. Quand on introduit la lumière dans la cavité, elle produit des résonances à des fréquences spécifiques qui sont déterminées par les caractéristiques géométriques et optiques du système.

Les fréquences de résonance dans la cavité sont déterminées par l'indice de réfraction du matériau qui forme le cristal photonique.

Le fonctionnement des capteurs à cristaux photoniques repose sur ce décalage des fréquences de résonance en fonction de l'indice de réfraction. La mesure du déplacement des pics de résonance permet de surveiller la fluctuation de l'indice de réfraction et donc du paramètre physique à évaluer (Figure III.16).

Il est crucial de contrôler de manière précise les spectres de résonance d'une cavité photonique optimisée en ajustant l'indice de réfraction du matériau afin de fabriquer des capteurs optiques de haute performance. Ainsi, l'analyse et la simulation de ces systèmes sont des étapes cruciales dans leur évolution.

III.5.2. Le facteur de qualité :

Chapitre III : Résultats et interprétations

La finesse de la résonance est un paramètre associé au facteur de qualité (Q-factor). Un facteur de Q élevé implique une résonance fine et bien résolue, ce qui est parfait pour une détection précise.

En mesurant le rapport de la longueur d'onde de résonance à la largeur à mi-hauteur du pic, on peut évaluer la finesse de la résonance observée. Une résonance fine et bien résolue est associée à un Q-factor élevé, ce qui permet une détection très précise des changements d'indice minimes. Le résultat *est* présenté dans le (Tableau.III.3) et la (Figure III.17).

Tableau. III.3: la variation du facteur de qualité avec le différent de fonction de l'indice de Réfraction.

| N | W0 | Δw | Facteur de qualité |
|------|--------|------------|--------------------|
| 1.01 | 1117.1 | 2.7 | 413740 |
| 1.02 | 1123.7 | 2 | 561850 |
| 1.03 | 1131.2 | 2.7 | 418962 |
| 1.04 | 1137.7 | 2.1 | 541761 |
| 1.05 | 1145.5 | 2.6 | 440576 |

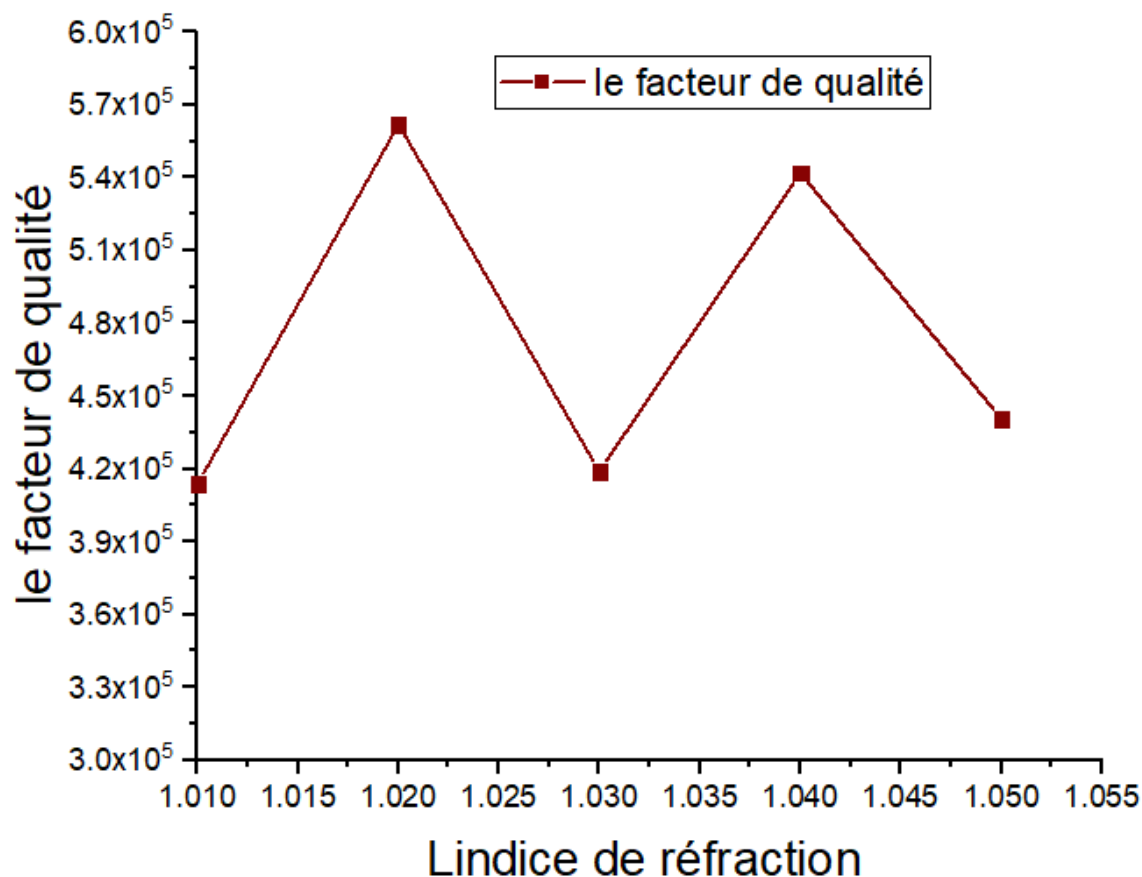


Figure III.17: Variations du facteur de qualité avec l'indice de réfraction.

L'indice de réfraction du matériau composant le cristal photonique joue un rôle crucial dans la détermination du facteur de qualité de la cavité. Lorsque l'indice de réfraction change, les fréquences de résonance changent.

L'indice de réfraction élevé et le fort contraste entre les matériaux à cristaux photoniques permettent d'obtenir un excellent facteur de qualité. Cela se traduit par une meilleure sensibilité et précision pour détecter les différences d'indice de réfraction, qui est le principe de fonctionnement des capteurs à cristaux photoniques.

III.5.3. La Détection Limite :

Le terme "DL" (RIU) désigne le changement de longueur d'onde (Unité d'Indice de Réfraction). Il s'agit d'un paramètre qui évalue la variation de la longueur d'onde de résonance d'un capteur lorsque l'indice de réfraction du milieu environnant change.

Le déplacement de la longueur d'onde de résonance d'un mode guidé à la suite d'une variation de l'indice de réfraction effectif du milieu environnant est connu sous le nom de décalage en longueur d'onde (DL ou $\Delta\lambda$). En général, ce décalage est mesuré en nanomètres (nm). Il est

Chapitre III : Résultats et interprétations

recommandé d'avoir un DL élevé car cela facilite la détection du changement d'indice. le résultats est présenté dans le (Tableau.III.4) et la(Figure III.18).

Tableau. III.4: la variation de La limite détection avec la différent de fonction d'indice de réfraction.

| λ | FQ | S | DL |
|-----------|--------|-----|------------------------|
| 1117.1 | 413740 | 720 | $3.75 \cdot 10^{(-7)}$ |
| 1123.7 | 561850 | 690 | $2.89 \cdot 10^{(-7)}$ |
| 1131.2 | 418962 | 710 | $3.36 \cdot 10^{(-9)}$ |
| 1137.7 | 541761 | 695 | $2.65 \cdot 10^{(-9)}$ |
| 1145.5 | 440576 | 712 | $3.18 \cdot 10^{(-9)}$ |

La limite de détection (LOD) est un paramètre clé pour évaluer les performances d'un capteur à cristaux photoniques. Elle est inversement proportionnelle à la sensibilité du capteur. Plus précisément, la LOD est définie comme la plus petite variation de la grandeur mesurée qui peut être détectée par le capteur de manière fiable. Autrement dit, c'est la plus faible variation d'indice de réfraction que le capteur peut détecter. La sensibilité d'un capteur à cristaux photoniques est généralement exprimée en nm/RIU (nanomètres par unité d'indice de réfraction). Plus cette sensibilité est élevée, plus le décalage spectral de la résonance est important pour une même variation d'indice de réfraction.

En bref, la détection limite est inversement corrélée à la sensibilité du capteur cristaux photoniques. L'objectif principal est de réduire le LOD afin d'obtenir des capteurs performants, tout en optimisant la sensibilité et le facteur de qualité de la résonance.

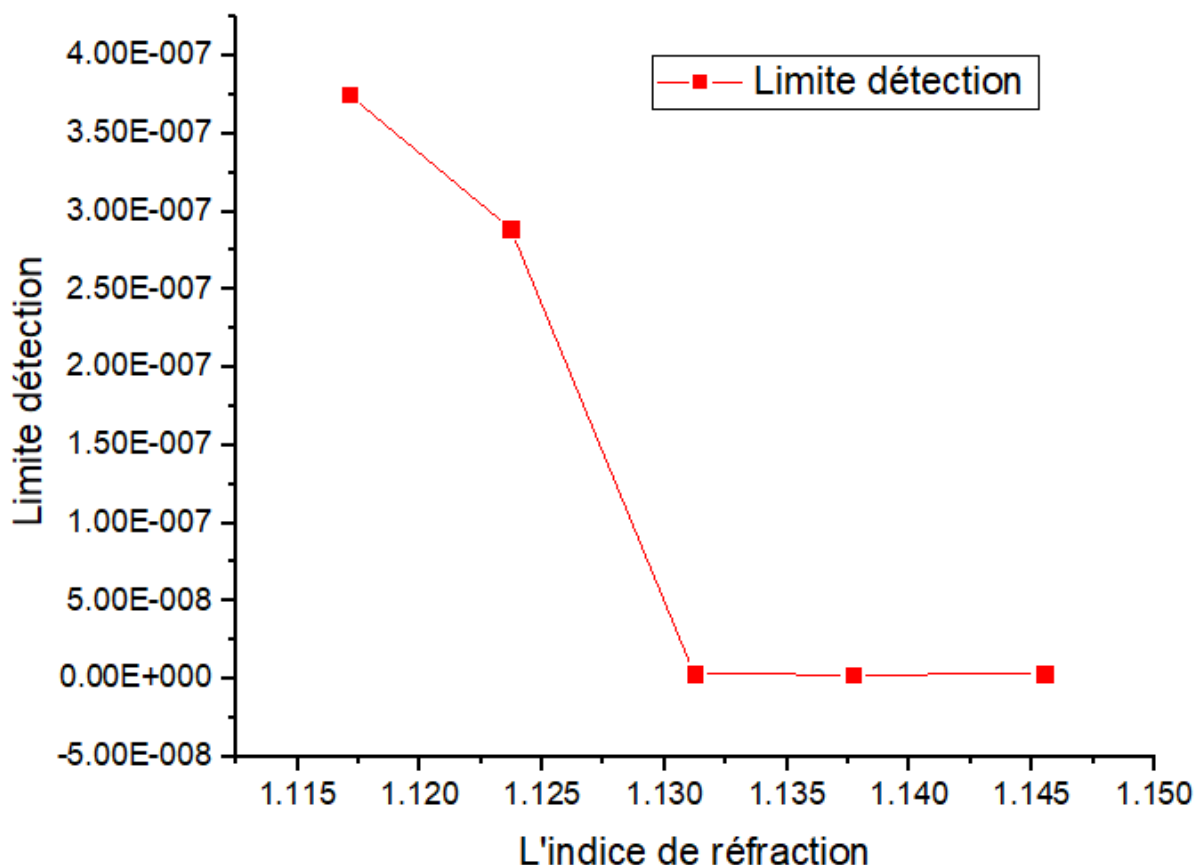


Figure III.18: Variations de la limite détection avec l'indice de réfraction.

III.6. L'optimisation :

Les paramètres sont cruciaux pour caractériser les performances des capteurs optiques à résonance, notamment pour des applications de détection biochimique ou de suivi environnemental. Leur permet d'améliorer la sensibilité, la résolution et la fiabilité de ces dispositifs.

III.6.1. L'effet de rayon de de RC :

Notre optimisation repose sur la suppression du trou central de la structure du capteur RI à cristal photonique voir figure (III.19), qui affecte la transmission de la lumière, la longueur d'onde de résonance, la sensibilité et le facteur de qualité. Ces différences peuvent affecter les performances du capteur dans la détection des différences d'indice de réfraction. On remarque une augmentation remarquable de ces paramètres illustrés dans le tableau (III.4), et la figures (III.20).

Chapitre III : Résultats et interprétations

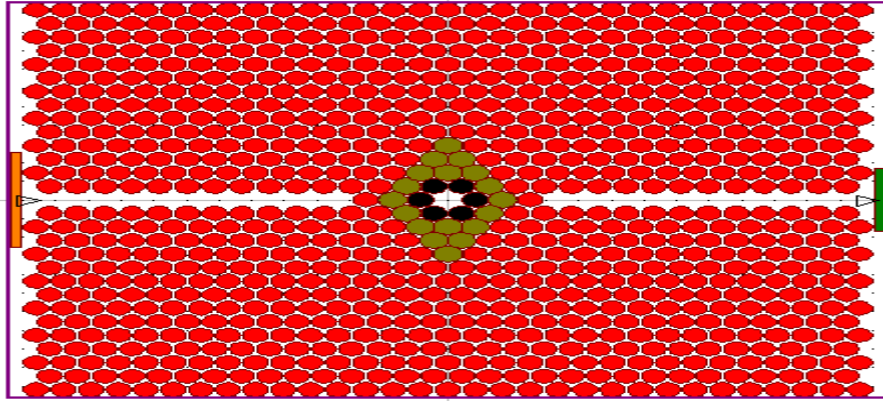


Figure III.19 : la structure optimisée.

Tableau. III.5 : les différentes caractéristiques du capteur optimisé.

| N | λ | S | FQ | DL |
|------|-----------|-----|--------|----------------------|
| 1 | 1288.6 | X | X | X |
| 1.01 | 1297 | 840 | 341315 | $4.52 \cdot 10^{-8}$ |
| 1.02 | 1303.9 | 765 | 501500 | $3.39 \cdot 10^{-7}$ |
| 1.03 | 1310.6 | 733 | 504076 | $3.45 \cdot 10^{-7}$ |
| 1.04 | 1315.9 | 682 | 387029 | $4.98 \cdot 10^{-7}$ |
| 1.05 | 1322.7 | 682 | 661350 | $2.93 \cdot 10^{-7}$ |

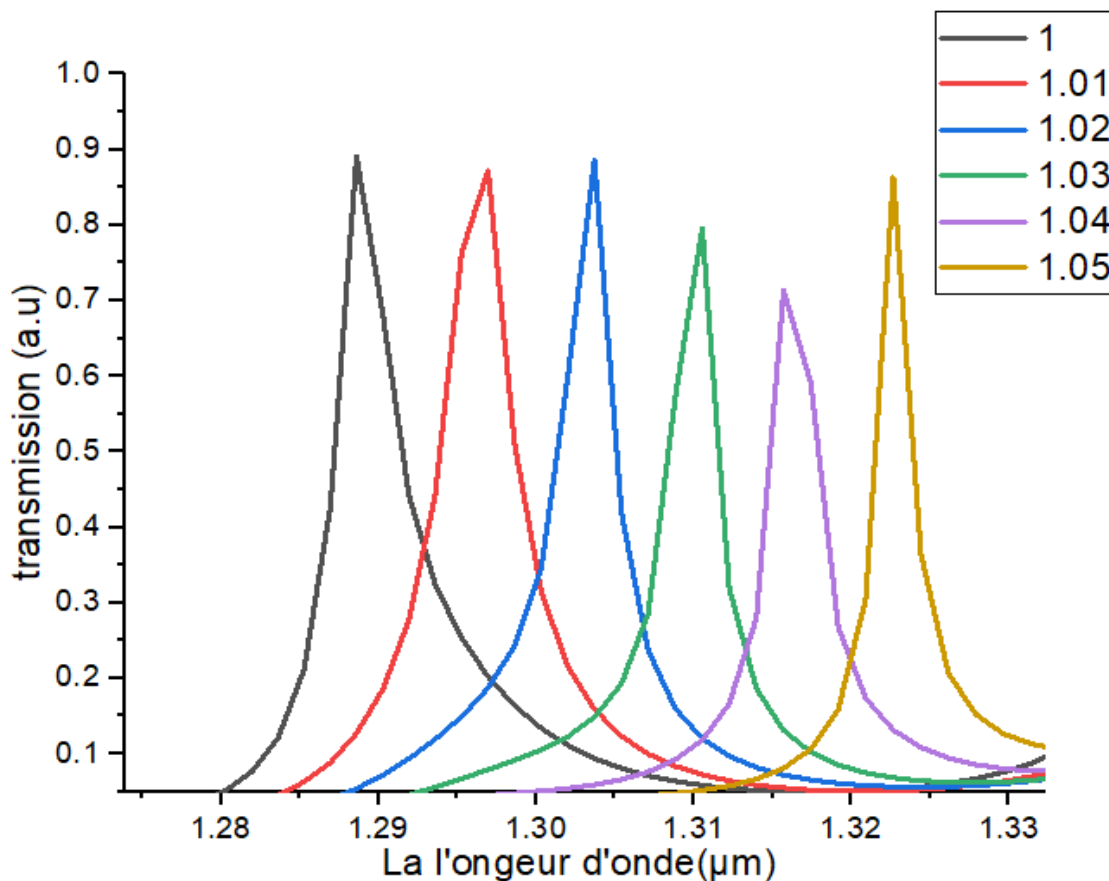


Figure III.20 : Les spectres de résonance de la cavité CP optimisée.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous implémentons un capteur d'indice de réfraction (RI) basé sur des cristaux photoniques 2D, en utilisant un réseau hexagonal de trous d'air gravés dans un film de silicium (Si). Nous avons ensuite étudié la structure proposée en fonction de la variation de l'indice de réfraction. Notre étude montre que les structures proposées sont très sensibles aux variations de l'indice de réfraction et peuvent détecter des changements très minimes.

Les résultats de la simulation indiquent que la première structure atteint un niveau de sensibilité de 720 nm/RIU, avec un facteur de qualité de 561850 et une limite de détection de 3.18×10^{-9} . En supprimant le trou central r_c , on observe une augmentation de la sensibilité, qui atteint 820 nm/RIU, avec un facteur de qualité de 661350 et une limite de détection de 2.93×10^{-7} .

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les cristaux photoniques se sont révélés être des structures très prometteuses pour le développement de capteurs optiques hautes performances. Les résultats de simulation présentés dans ce travail démontrent la capacité des cristaux photoniques à concevoir des capteurs très sensibles.

L'étude a mis en évidence les propriétés clés des capteurs à cristaux photoniques, notamment leur excellente sensibilité, leur haute qualité de fonctionnement et leur fort piégeage de la lumière dans les cavités. Les simulations ont montré que les paramètres géométriques des structures de cristaux photoniques, tels que les dimensions des cavités et la périodicité du réseau, ont été améliorés.

L'étude se compose de trois chapitres : Le premier chapitre donne un aperçu des cristaux photoniques, y compris leurs types, leurs caractéristiques et leurs inconvénients courants. Le deuxième chapitre traitait des capteurs optiques à base de cristaux photoniques, avec une explication détaillée de leur définition, principes de fonctionnement et caractéristiques. Le troisième chapitre a été consacré au développement et à la conception du capteur à cristal photonique bidimensionnel utilisant différentes structures de cavité. Utilisation des modules de simulation RSoft, Full Wave et Band-SOLVE

L'étude se termine en présentant les résultats de la simulation et en les discutant en détail, mettant en évidence l'amélioration du piégeage de la lumière dans les cavités à cristaux photoniques pour améliorer la sensibilité du capteur.

Cette structure optimisée offre une sensibilité et une transmission **75 à 85 %** supérieures. La sensibilité de ce capteur RI atteint une valeur de **$S = 840 \text{ nm/RIU}$** et un facteur de qualité **$Q = 661350$** pour un déplacement du curseur de **$\Delta n = 0,01$** .

Bibliographie

- [1] **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).
- [2] **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).
- [3] **G. Malpuech, A. Kavokin, G. Panzarini, and A. Di Carlo,** Theory of photon Blochoscillations in photonic crystals, Physical Review B 63, 035108 (2001).
- [4] **Yablonovitch, E.: Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. Physical Review Letters. 58, 2059–2062 (1987).**
- [5] **Wonjoo Suh, M. F. Yanik, Olav Solgaard, and Shanhui Fan,** Applied Physics Letters, 2003, Vol. 82, No 13, pp 1999- 2001(2003)
- [6] **Rafraf Asma** « Etude et modélisation d'un Bio-capteur à base de cristaux Photoniques » 2019
- [7] **F. Kiheli, K. Djebrit,** « Conception des diviseurs de puissance optique 1x21x3 et 1x4 à base des cristaux photoniques », Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, Université Kasdi Merbah OUARGLA, 23/10/2020
- [8] **E. Yablonovitch,** « Photonic band-gap structures », JOSAB, Vol. 10, n° 1, pp. 283– 295, 1993.
- [9] **P. Pottier, C. Seassal,** et al., « Triangular and hexagonal high Q-factor 2-D photonic bandgap cavities on III-V suspended membranes », Journal of lightwave technology, Vol. 17, n° 11, pp. 2085-2062, 1999.
- [10] **S. Noda, M. Imada, et al.,** « Semiconductor three-dimensional and two-dimensional photonic crystals and devices », IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 38, n° 7, pp. 726- 735, 2002.
- [11] **A. Ouaret, Y. Taklit, M. Bendjelloul,** « Etude et conception d'un Demultiplexeur à base de cavités a cristaux photoniques », Université Abderrahmane Mira- Béjaia, 2020.

Bibliographie

- [12] **S. Chalabi**, « Amélioration de la sensibilité d'un capteur à base d'un cristal Photonique », Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj 15/09/2021.
- [13] **Barbara WILD** « Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux Photoniques Bidimensionnels et de leur accordabilité », Thèse de doctorat n° 3573, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.
- [14] **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
- [15] **H. Rigneault, J.-M. Lourtioz, C. Delalande**, « La nanophotonique », 2005.
- [16] **R. Moukhtari**, Contribution à L'étude et La Conception Des Cavités à Cristaux Magneto Photoniques, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 14/05/2018 .
- [17] **M. Filali**, Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux Photoniques Bidimensionnels, université Mohamed Boudiaf - m'sila, 17 / 06 /2018.
- [18] **K. Boudiaf, SAFER Hadjer** « Thème Etude et conception des capteurs à cristaux Photoniques pour des applications biomédicales » 17/06/2018.
- [19] **Y. MERLE**, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques Diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat n° 47-2, Université de Limoges, Novembre 2003.
- [20] **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
- [21] **A. Benmerkhi**, « thème influence des paramètres géométriques sur la cavité à Cristaux photoniques bidimensionnels »
- [22] **A. Belhassos, S. Metref**, « Etude et simulation des cristaux photoniques » Université Kasdi Merbah OUARGLA, 20-Jun-2017.
- [23] **BOUGRIOU Fiada**, Etude théorique des matériaux à bandes interdites Photoniques Bidimensionnels : applications dans le domaine de guidage optique et La détection, Université de Constantine, 2013.
- [24] [http:// www.sst.ph.ic.ac.uk/photronics](http://www.sst.ph.ic.ac.uk/photronics).
- [25] **Yannick MERLE**, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux Périodiques diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat n° 47-2003, Université de Limoges, Novembre 2003.

Bibliographie

- [26] **J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, and J.N. Winn** « Photonic Crystals, Molding the Flow of Light », Princeton University Press, 1995.
- [27] **Barbara WILD** « Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux Photoniques Bidimensionnels et de leur accordabilité », Thèse de doctorat n° 3573, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.
- [28] **D. GERARD**, « Etude en champ proche et en champ lointain de composants Périodiquement nano structurés : cristaux photoniques et tamis à photons », Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 09 juillet 2004.
- [29] **O. Levy, B.Z. Steinberg, A. Boag, S. Krylov, I. Goldfarb**, « Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro Electro mechanical flexures » Sens. and Act. A., Vol 139, N° 1-2, pp 47–52. 2007
- [30] **P.Pottier, C. Seassal, X. Letartre, J.L. Leclercq, P. Victorovitch, D. Cassagne et C. Jouanin** « Triangular and Hexagonal High Q-Factor
- [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] **Jean-Michel LOURTIOZ**, « **Cristaux photoniques et « gaps » de photons – Propriétés Et applications** », Techniques de l'Ingénieur, AF 3 711, 07/2004.
- [35] **BENMERKHI Ahlem**, « INFLUENCE DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES SUR LA CAVITÉ À CRISTAUX PHOTONIQUES BIDIMENSIONNE » Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2008.
- [36] **K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis**, «Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures», Physical Review Letters, vol. 65, no. 25, pp.3152, 1990.
- [37] **Christophe vedrine**, exploitation de signaux biologiques pour la réalisation de Capteur environnementaux, N° d'ordre : 294CD, 2003, p5.

- [38] **K. S. Yee**, «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media», IEEE Trans. Antennas and Propagation, 14, p. 302–307, 1966.
- [39] **C. T. Chan, Q. L. Yu et K. M. Ho**, « Order N spectral method for electromagnetic waves », Phys. Rev. B, Vol.51, p. 16635, 1995.
- [40] **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.
- [41] **A. AMOUMENE, I. HALASSA** « Etude et conception des capteurs à base de Cristaux Photoniques pour la détection de la température », Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022
- [42] **A. Georges**, Les capteurs en instrumentation industrielle, Edition : 4, Publié par Dunod,1993, 816 pages.
- [43] **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.
- [44] **A. Boughrouat.**, « Modification de la sensibilité d'un QCM (Quartz Cristal Microbalance) par le dépôt dessus de films minces élaborés par plasma à partir de Vapeurs de TEOS » Université MENTOURI constantine,2009
- [45] **HARHOUZ Ahlam**, «Contribution à l'étude et la conception des capteurs à base de cristaux photoniques» 27/04/2017.
- [46] **N. Skivesen, A. Têtu, M. Kristensen, J. Kjems, L.H. Frandsen, and P.I. Borel**, "Photoniccrystal waveguide biosensor," Optics Express 15, pp. 3169-3176 (2007).
- [47] **E. Chow, A. Grot, L. W. Mirkarimi, M. Sigalas, and G. Girolami**, "Ultracompact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity," Optics Letters 29, pp. 1093-1095 (2004).
- [48] **Nicolas Gaignebet**. Réalisation et caractérisation de puces de capteurs à cristaux photoniques : Vers un dispositif de biodétection intégré. Micro et Nanotechnologies / Microélectronique. Université de Lyon, 2020. Français.
- [49] <https://www.electricity-magnetism.org/fr/comment-fonctionne-un-cristal-photonique/>
- [50] **M . Maamri , A .Briki** Étude des capteurs à cristaux photoniques planaires

Bibliographie

14/06/2022

- [51] **S. Amoudache** Cristaux phoxoniques accordables ; application au domaine des Capteurs 26/11/2015
- [52] <https://www.sfoptique.org/medias/files/photoniques124-2024.pdf>
- [53] **F. Metehri** Contribution à l'étude de composants optiques pour Des applications en optique intégrée 27/08/2020