REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie
Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : **Electronique**

Spécialité : système embarqué

Étude et conception d'un capteur de température à base des cristaux photoniques

---

Présentés par :
Fellague Walid
Boukettab Fateh
Proposés et Dirigés par :
Dr. Bensalah Hocine

Promotion 2022

Remerciement

Tout d'abord nous remercions le bon dieu tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme notre formation et pouvoir réaliser ce travail de recherche.

Nos remerciements s'adressent au Docteur *Bensalah Hocine*, pour son encadrement de qualité, sa motivation professionnelle, ses conseils et critiques constructives, ses corrections, sa gentillesse et sa patience ainsi pour le temps qu'il a consacré à la réalisation de ce travail.

Nous adressons également des remerciement à tous les enseignants de l'université Dr.Yahia Fares en général, plus particulièrement mes enseignants qui ont déployé leurs efforts pour assurer une formation aussi complète, pour aider et soutenir toute la promotion le long du cursus.

De peur d'en avoir oublier, nous souhaitons remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce parcours universitaire.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

À mon père *Aissa* et ma mère *Akila*, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. que dieu leurs procure bonne santé et longue vie

À mes frères *Mouhammed*, *Aberrahim* et mes sœurs pour leur tendresse, leur complicité et leur présence malgré la distance qui nous sépare. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

À mon binôme *Walid* et toute la famille *Fellague*.

Fateh

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à : A ma Chère Mère *Fatima Zahraa*, A mon Père *mahjoub* , que nul dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, Pour leur patience illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grand sacrifices.

À mes chères sœurs, À mes frères *Mohamed* et *Sidali* .

À mon cher binôme *Fateh* , A tous mes amis et collègues Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.

Walid

Liste des abréviations

CPhs : Cristaux photoniques.
BIP : Bande Interdite Photonique.
TE : Transverse Electrique, polarisation TE. TM : Transverse Magnétique, polarisation TM. λ : Longueur d'onde.
λ0 : Longueur d'onde de résonance.
a : Période du cristal photonique.
r : Rayon des motifs du cristal photonique.
n : Indice de réfraction.
ε : Permittivité diélectrique. Δ : Le contraste d'indice.
E : Champ électrique. H : Champ magnétique.
WDM : Wavelength Division Multiplexing, systèmes à multiplexage en longueur d'onde. PICs : Photonic Integrated Circuits, circuits photoniques intégrés.
FDTD : Méhode de calcul des différences finies dans le domaine temporel.
PWE : Plane Wave Expansion method, méthode de décomposition en ondes planes. RI : Refractive Index.
S : Sensibilité.
Q : Facteur de Qualité. LD : Limite de Détection

Table des matières

1 Les capteurs **2**

1.1 Généralités sur les capteurs 2

1.1.1 Définition 2

1.1.2 Types de grandeurs physiques 3

1.1.3 Le rôle du capteur 3

1.1.4 Les caractéristiques d'un capteur 3

1.1.5 Structure d'un capteur 5

1.1.6 Classification d'un capteur 6

1.1.7 Les grandeurs d'influence 8

1.1.8 Définition d'un biocapteur 9

1.2 Capteurs optiques 9

1.2.1 Les cristaux photoniques pour la détection optique 9

1.2.2 Capteur à fibre optique 10

1.2.3 Capteur à base des cristaux photoniques 11

2 Types des cristaux photoniques **14**

2.1 Historique :.....14

2.2 Définition d'un cristal photonique 14

2.3 Classification des cristaux photoniques.....15

2.3.1 Les cristaux photoniques unidimensionnels (Empilement de couches minces, réseau de Bragg).....15

2.3.2 Les cristaux photoniques bidimensionnels 16

2.3.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels.....18

2.4 Principales caractéristiques des Cristaux photoniques 19

2.4.1 Le contraste d'indice D_n :.....19

2.4.2 La période :.....19

2.4.3 Facteur de remplissage f.....20

2.5 Bande interdite photonique.....20

2.5.1 Zone de Brillouin : 20

2.5.2 Diagramme de bandes 20

2.6 Les défauts 21

2.6.1 Défauts ponctuels.....22

2.6.2 Défauts linéiques.....22

2.6.3 Défauts étendus.....23

2.7 Composants semi-conducteurs à cristal photonique bidimensionnel 23

2.8 Domaines d'application.....24

2.8.1 Les cavités 24

2.8.2 Guides d'ondes dans les cristaux photoniques 26

2.8.3 Filtre et Multiplexeur : 26

3 Simulations et résultats **28**

3.1 Méthodes de simulations associés.....28

3.1.1 La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).....28

3.1.2 La méthode des ondes planes (PWE).....28

Table des matières

3.2 Band SOLVE 29
3.3 Fullwave 29
3.4 Présentation du simulateur RSoftCAD 29
3.4.1 La création de la structure étudiée 29
3.4.2 Création d'un guide d'onde 30
3.4.3 Personnalisation du réseau 31
3.4.4 Créer des variables 32
3.4.5 Vérification du profil d'index 32
3.4.6 Présentation des autres applications 33
3.5 Description de la structure étudiée 33
3.6 Paramètres de la structure étudiée 33
3.7 La bande interdite photonique 34
3.8 Création d'un guide d'onde 35
3.9 Conception d'un premier capteur à base de cavité en configuration anneaux 36
3.9.1 Description de la structure étudiée 36
3.9.2 Etude de la transmission et de la sensibilité 37
3.9.3 Influence d'un rayon intérieur de l'anneau (R_{in}) sur la sensibilité du biocapteur . 38
3.10 Conception d'un deuxième capteur à base de double cavité en anneaux 41
3.10.1 Description de la structure étudiée 41
3.10.2 Etude de la transmission et de la sensibilité 42
3.11 Exemple d'application biocapteur de température 43
3.12 Comparaison du capteur RI proposé avec différents designs à bases CPs 44

Table des figures

1.1 Définition d'un capteur. 3
1.2 Courbe d'étalonnage d'un capteur. 4
1.3 Structure d'un capteur. 6
1.4 Signal numérique. 7
1.5 Signal analogique. 8
1.6 (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. (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. 12
1.7 Schéma du capteur d'ADN à base de PhC caractérisé par des guides d'ondes monomodes d'entrée et de sortie de 500 nm de largeur 13

2.1 BIP unidimensionnel, empilement de couches de permittivités différentes. 15
2.2 Réflexions et de transmissions aux interfaces d'un miroir de Bragg. 16
2.3 Structures périodiques bidimensionnelles. 16
2.4 Structure périodique 2D connectée. 17
2.5 Structure périodique 2D déconnectée 17
2.6 Structure "Yablonovite". 18
2.7 Structure "tas de bois". 18
2.8 Les opales directes et les opales inverses. 19
2.9 Période. 19
2.10 Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) triangulaire et (b) carré. 20
2.11 Polarisations possible dans une structure à bande interdite photonique : TM et TE. 21
2.12 Diagramme de bandes d'un cristal photonique (réseau triangulaire) gravé dans un milieu diélectrique de l'indice de réfraction substrat =11.4 avec un facteur de remplissage de f = 0.30 : (a) Polarisation TE ; (b) Polarisation TM. 21
2.13 Différents types de défauts (a) défauts ponctuels (b) défauts lacunaires (c) défauts de substitution. 22
2.14 Défaut lacunaire, Défaut de substitution. 22
2.15 Schéma d'un guide défaut dans un réseau (a) de colonnes d'un diélectrique (b) de trous d'air 22
2.16 Simulation de la propagation du champ électromagnétique dans un guide d'onde réalisé dans un cristal photonique 23
2.17 Images MEB (a) d'un guide d'onde et (b) d'une fibre optique photonique dans des CP 2D. 24
2.18 cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm. 25

2.19 cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm. 25
2.20 Cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm, cavité hexagonale sur membrane suspendue. 25
2.21 Onde mono-rangée réalisé dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant. 26
2.22 Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (Insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde). 26
2.23 Filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à Vautre....27

3.1 Interface graphique du Logiciel Rsoft. 30
3.2 (a) Fenêtre initiale de personnalisation des paramètres de structure, (b) La structure initiale. 30
3.3 La structure initiale avant de retirer les trous. 31
3.4 Fenêtre des paramètres globales de structure. 31
3.5 Fenêtre des tables de symboles....32
3.6 (a) Fenêtre des paramètre de simulation, (b) La représentation du modèle en montrant les différents indices de réfraction. 32
3.7 (a) Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 23×23. (b) Distribution de l'indice de réfraction d'un cristal photonique hexagonal. 33
3.8 (a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau hexagonal de trous d'air, a=0.430, r=0.14, f=33%.) calculé par la PWE. (b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D....34
3.9 Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde). 35
3.10 (a) Spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TM. (b) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence W1, pour une polarisation TM à λ=1.55µm. 35
3.11 Structure d'un couplage cavité/guide ($1^{e`re}$ structure)....36
3.12 : (a) Spectre de transmission de la structure couplage cavité/guide pour n=1, a=430nm, r=140nm et r_{in}=50nm. (b) La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à $\lambda_{rsonance}$ =1.448µm. 37
3.13 (a) Le spectre de transmission de la structure (1) pour différents indices de réfraction n à r=140nm, r_{in}=50nm et a= 430 nm. (b) la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction n du matériau à détecter....38
3.14 (a) Les spectres de transmission de l'indice de réfraction 1 en fonction de r_{in}. (b) Les longueurs d'onde de résonance en fonction de r_{in}....39
3.15 Le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n à r_{in}=40nm (a), r_{in}=60nm (b). 39
3.16 La sensibilité en fonction du rayon interne r_{in} des anneaux. 40
3.17 Structure d'un couplage cavité/guide ($2^{e`me}$ structure). 41
3.18 (a) Spectre de transmission de la structure couplage cavité/guide pour n=1. (b) La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à $\lambda_{re`sonnance}$ =1.477µm. 42
3.19 (a) Le spectre de transmission de la structure (2) pour différents indices de réfraction n à r=140nm, r_{in}=60nm et a= 430 nm. (b) la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction n du matériau à détecter....43

3.20 (a) Transmission du capteur de température (structure 2) pour différents RI de 1.34472 à 1 .392 correspond une variation de température de 60°C à -60°C respectivement. (b) Longueur d'onde de résonance du capteur de température en fonction de la température. 44

Liste des tableaux

1.1 Capteurs actifs : principes physiques de base. 6
1.2 Exemples de capteurs passifs. 7

3.1 La longueur d'onde de résonance (λ_o) et la sensibilité (S) en fonction de l'indice de réfraction (RI).....38
3.2 40
3.3 40
3.4 44

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, le développement des circuits photoniques intégrés représente un enjeu majeur pour répondre aux besoins industriels croissants dans des domaines aussi variés que multiples tels que les télécommunications (filtres, démultiplexeurs et fibres à cristaux photoniques), l'optoélectronique (lasers, photodétecteurs) et, plus récemment, la biodétection. Ces circuits doivent être de petite taille et doivent se soumettre à des impératifs de faible coût de réalisation. Ces besoins ont engendré l'émergence de nouvelles solutions technologiques, et en dans ce contexte, la photonique s'impose comme étant très prometteuse dans le domaine de la recherche pour le développement des dispositifs destinés à l'optique intégrée.

Notamment, Les propriétés optiques remarquables des cristaux photoniques (CPhs) ont conduit à la conception de nouveaux dispositifs photoniques visant des applications dans divers secteurs de l'industrie et des hautes technologies. Exploitant la technologie silicium et étant compatible avec les techniques de fabrication de la microélectronique actuelle [**1**], depuis leur découverte en 1987, les CPhs représentent un grand intérêt pour la communauté de l'optique intégrée [**2**]. Leurs propriétés optiques singulières, qui permettent la manipulation de la lumière à une échelle nanométrique, ont révolutionné le domaine de la photonique et ont permis la réalisation de nouvelle classe de dispositifs optiques très performantes. Leur application concerne un large éventail de domaines tels que la création de circuits de guidage de lumière nanophotoniques, de filtres et de modulateurs tout optiques ainsi qu'une nouvelle génération de capteur et de biocapteur à CPhs.

Les capteurs à CPhs pour les mesures d'indice de réfraction (RI) ont été un sujet de recherche très captivant ces dernières années, et jusqu'à aujourd'hui de nouvelles technologies sont proposées. L'application des capteurs RI inclut les mesures de paramètres tels que : la température, l'humidité, la composition chimique, la détection d'ADN, des protéines, des cellules et des bactéries.

La sensibilité du capteur est l'un des mérites les plus critiques pour évaluer la fonctionnalité du capteur pour diverses substances en fonction de la variation de l'indice de réfraction. Le but est d'améliorer l'aspect de sensibilité en utilisant diverses conceptions dans un espace limité et d'évaluer les caractéristiques de sensibilité et de transmission les plus efficaces.

Notre travail sera diffusé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux informations générales sur le capteur. Dans ce contexte, nous citons les différentes caractéristiques communes. Ensuite nous présentons les différents types de capteurs, leurs structures et leurs principes de fonctionnement. Ensuite, nous détaillerons spécifiquement les capteurs à base de cristal Photonique.

Dans le deuxième chapitre nous reviendrons sur le concept de cristaux Photonique et définitions de base liées à ces structures. Dans ce cas, nous présenteront leurs caractéristiques très importantes et

Dans le troisième chapitre nous présenterons le logiciel Rsoft CAD et les détails du Module Full wave et Bandesolve, avec une proposition de conceptions pour deux structures distinctes de capteurs de température.

Chapitre 1

Les capteurs

Préambule

Le contrôle et l'analyse sont intégrés dans la chaîne de production en tant que des outils de contrôle qualité, notamment en matière d'environnement, de santé et production agricole. Développement de capteurs chimiques, physiques et biologiques adopté depuis des décennies et largement utilisé dans tous les domaines de la vie quotidienne (qualité de l'eau et de certains produits agricoles, analyse biologique, décontamination, etc.).

La sensibilité, la sélectivité, la spécificité et la durabilité des capteurs ont toujours été paramètres de base dans la conception. Leur miniaturisation et leur autonomie sont dans un Progrès significatifs dans l'élargissement de son champ d'application.

Le développement de capteurs et de biocapteurs nécessitent une collaboration importante entre les chimistes, les physiciens, les informaticiens et les biologistes. Un grand nombre de chercheurs travaillant dans les biocapteurs ont montrer leur intérêt.

Dans ce chapitre, avant de s'intéresser plus spécifiquement aux capteurs à base de cristaux photoniques, il convient de tenter de définir et de clarifier le concept d'un capteur et les qualités d'un tel équipement.

1.1 Généralités sur les capteurs

1.1.1 Définition

Par définition, un capteur est un dispositif électronique qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable telle qu'une tension électrique, une intensité ou la déviation d'une aiguille.

On peut dire qu'un capteur est un dispositif qui, sous l'effet d'une grandeur physique que l'on souhaite caractériser (mesurande), délivre une grandeur physique exploitable, on parle ainsi d'un transducteur.

Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Leur mise en œuvre est du domaine de l'instrumentation. Généralement, on obtient une grandeur de sortie (réponse) du type électrique. Elle peut être soit : Une charge, une tension, un courant et une impédance (R, L, C).



Figure 1.1 – Définition d'un capteur.

1.1.2 Types de grandeurs physiques

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles, chaque capteur s'associe à l'une d'entre elles [**3**] :

- **Mécanique :** Déplacement, force, masse, débit…
- **Thermique :** Température, capacité thermique, flux thermique…
- **Électrique :** Courant, tension, charge, impédance, diélectrique…
- **Magnétique :** Champs magnétique, perméabilité, moment magnétique…
- **Radiatif :** Lumière visible, rayon X, micro-onde…
- **(Bio) chimique :** Humidité, gaz, sucre, hormone…

1.1.3 Le rôle du capteur

Parmi les informations de toutes natures issues de notre environnement, on distingue les grandeurs physiques associées à des événements climatiques, géométriques ou encore lumineux ou temporels. Le rôle du capteur est de rendre exploitable ces différentes grandeurs physiques en vue de leur traitement ultérieur.[**3**]

- **Mesure de présence :** indique la présence d'un "objet" à proximité immédiate.
- **Mesure de position, de déplacement ou de niveau :** indique la position courante d'un objet animé d'un mouvement de rotation ou de translation.
- **Mesure de vitesse :** indique la vitesse linéaire ou angulaire d'un "objet".
- **Mesure d'accélération, de vibrations ou de chocs.**
- **Mesure de débit, de force, de couples, de pressions.**
- **Mesure de température, d'humidité.**

1.1.4 Les caractéristiques d'un capteur

Les caractéristiques d'un capteur constituent les liens effectifs entre ce dernier et la grandeur qu'il mesure. Ils sont des paramètres qui déterminent les performances d'un capteur, parmi ces derniers on mentionne les plus utilisés :

L'étalonnage

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer sous forme graphique la relation entre la grandeur à mesurer (mesurande) et la grandeur de sortie.

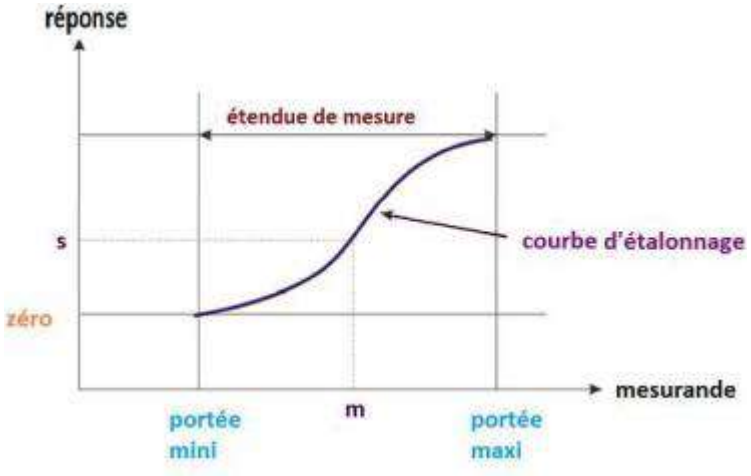


Figure 1.2 – Courbe d'étalonnage d'un capteur.

La sensibilité

C'est une spécification déterminante dans le choix d'un capteur de façon générale la sensibilité S est définie, autour d'une valeur mi constante du mesurande, par le rapport de la variation Δ_s de la grandeur de sortie à la variation Δ_m du mesurande qui lui a donné naissance :

$$S = \frac{\Delta_s}{\Delta_m^{out}} \qquad (m = m_i) \tag{1.1}$$

Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures.

Domaine de linéarité

Un capteur est dit linéaire s'il présente la même sensibilité sur toute l'étendue de sa plage d'emploi.

Résolution ou Précision

C'est le plus petit incrément de la valeur mesurée qui puisse être significativement mesuré par le capteur.

Fiabilité

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

Fidélité

Elle définit la qualité d'un capteur à délivrer des résultats les plus proches possibles lors d'analyses répétées sur une même grandeur physique m. L'erreur de fidélité correspond à la dispersion (écart type) σ des résultats autour de la valeur moyenne <m> de n mesures effectuées sur m :

$$< m >= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{n} \tag{1.2}$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(m_i - < m >)^2}}{n} \tag{1.3}$$

Où m_i est la valeur de m à la $i^{ie`me}$ mesure. Parmi les écarts de fidélité on distingue : la répétabilité et la reproductibilité [**4**]

Temps de réponse ou rapidité

La rapidité est caractérisée par le temps que met le capteur à réagir à une variation brus que de la mesurande. Cependant la valeur finale étant le plus souvent atteinte de manière asymptotique, elle correspond au temps nécessaire pour que le capteur délivre une certaine portion α de la pleine amplitude du signal. Le temps de réponse noté tα est tel que α vaut généralement 90%.La connaissance du temps de réponse d'un capteur est un élément essentiel lors de la réalisation de mesures.

Réversibilité

Elle définit la capacité du matériau à revenir à son état initial lorsqu'on supprime l'excitation.

Sélectivité

Correspond à sa capacité à détecter une substance parmi d'autres. Elle dépend de la partie sensible du capteur. [**5**]

Finesse

C'est la qualité d'un capteur à ne pas venir modifier par sa présence la grandeur à mesurer. Cela permet d'évaluer l'influence du capteur sur mesure. On la définit non seulement vis-àvis du capteur mais aussi vis-à-vis de l'environnement d'utilisation du capteur. La finesse d'un capteur donnée ne peut donc être appréciée qu'en fonction de ses conditions effectives d'utilisation.

1.1.5 Structure d'un capteur

1. **Le corps d'épreuve** Le corps du test est un élément sensible qui répond au mesurande. Sa fonction est de Convertir la grandeur mesurée en une autre grandeur dite mesurable.
2. **Transducteurs** Le transducteur est un élément sensible relié au corps d'épreuve. Il convertit la réponse du corps d'épreuve en quantité d'électricité qui constitue le signal de sortie.
3. **Le boîtier** Le boîtier est un élément mécanique utilisé pour protéger, maintenir et sécuriser le capteur.

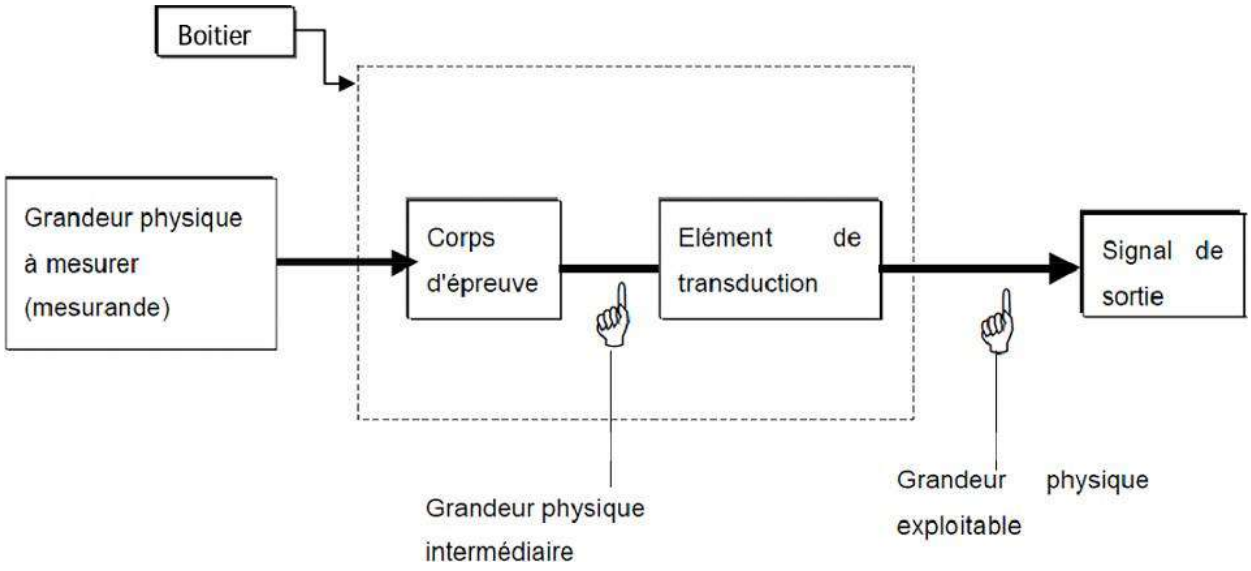


Figure 1.3 – Structure d'un capteur.

1.1.6 Classification d'un capteur

Capteur actif

Fonctionnant en générateur, ce capteur est basé sur des effets physiques, permettant la conversion directe du mesurande en électricité. Les plus importants parmi ces effets sont regroupés dans le tableau 1.1.

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

Tableau 1.1 – Capteurs actifs : principes physiques de base.

Capteur passif

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif. Le tableau 1.2 résume, en fonction de la mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

Les diverses techniques de détection associées à ces capteurs sont basées sur la variation d'une information caractérisant l'onde lumineuse comme :

— La variation de l'intensité lumineuse [**6**], basée sur la détection de la lumière transmise à la sortie d'un dispositif comparée à la lumière injectée dans ce dernier, l'amplitude de l'onde étant modifiée relativement à l'action d'une perturbation du milieu dans lequel le capteur est plongé.

— La variation de cohérence temporelle [**7**] , reposant sur des techniques interférométriques dont le principe consiste à introduire une différence de chemin optique, donc un retard, entre les deux bras de l'interféromètre inférieure à la longueur de cohérence de la source utilisée.

Mesurande	Grandeur de sortie	Matériaux
Température Très basse température	Résistivité Constante diélectrique	Platine Nickel Cuivre Semi-conducteur Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité perméabilité magnétique	Alliage Nickel Alliage ferromagnétique
Position	Résistivité	Magnétorésistance
Humidité	Résistivité	Clorure de lithium

Tableau 1.2 – Exemples de capteurs passifs.

capteur numérique

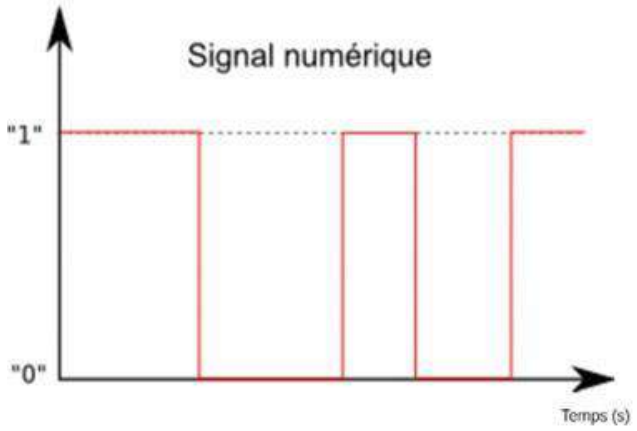


Figure 1.4 – Signal numérique.

Les capteurs numériques donnent en sortie une valeur finie. Par exemple, si une grandeur physique croît de manière linéaire, la sortie du capteur qui va la mesurer donnera soit une information du type "TOR "(Tout Ou Rien), un train d'impulsion ou un échantillonnage.

— tout ou rien (TOR) : il informe sur l'état d'un système ne pouvant avoir que deux états stables comme par exemple une vanne. Si cette vanne est ouverte, on affectera à la sortie du capteur un " 0 "ou un " 1 " logique selon la volonté du concepteur du capteur et la sortie prendra l'autre valeur si elle est fermée.

Ce type de montage est dit " bivalent " : c'est le fait que la sortie du montage ne peut prendre que deux valeurs (ouvert/fermé,1/0).

— train d'impulsions : chaque impulsion est l'image d'un changement d'état. Par exemple, un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsions par tour .

— échantillonnage : c'est l'image numérique d'un signal analogique sous la forme d'un " escalier " (on retrouve cette caractéristique en sortie des convertisseurs analogiques / numériques). Pour un intervalle de tension d'entrée, correspond une seule valeur de la sortie.

capteur analogique

Les capteurs analogiques servent à transformer une grandeur physique en un autre type de variation d'impédance , de capacité, d'inductance ou de tension. Un signal est dit analogique si l'amplitude de la grandeurphysique qu'il représente peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné. Ainsi, on peut dire que la tension de secteur sinusoïdale (230 VAC) est un signal de type analogique.

— signal continu : c'est un signal qui varie " lentement " dans le temps et qu'on retrouve en sortie d'une sonde de température, de pression ou encore d'une photo résistance.

— temporel : c'est la forme de ce signal au cours du temps. C'est aussi la trace du signal sur l'écran d'un oscilloscope.

— fréquentiel : c'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée

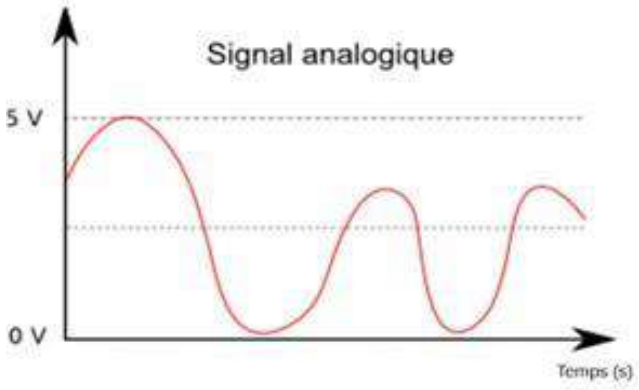


Figure 1.5 – Signal analogique.

1.1.7 Les grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des paramètres qui affectent le signal de sortie du capteur.

Ces grandeurs physiques « parasites » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influence. On mentionne :

— La température est grandeur d'influence pour un capteur optique comme la résistance photoconductrice.

— Il en est de même pour le champ magnétique vis-à-vis d'un capteur thermométrique comme la résistance de germanium.

Les principales grandeurs d'influence sont [**8**] :

— La température, qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.

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

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

— la tension d'alimentation, amplitude et fréquence lorsque, comme pour le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend.

1.1.8 Définition d'un biocapteur

Le terme « biocapteurs » représente la fusion de deux des plus importantes technologies de ce siècle : l'électronique et les biotechnologies. Leur association permet des dosages rapides, sensibles et spécifiques [**9**].

Les premiers biocapteurs, développes au début des années 1960, sont des électrodes enzymatique permettant le dosage du glucose dans une solution biologique (Clark et Lyon,1962 ;Updik et Hicks,1967). Depuis, les biocapteurs ont connu un développement considérable en raison de leurs nombreuses applications potentielles, que ce soit dans les domaines médical, agro-alimentaire ou contrôle de l'environnement.Ils peuvent ainsi devenir des outils complémentaires et apporter des avantages, par rapport aux techniques classiques d'analyses disponibles en laboratoire [**10**].

Un biocapteur est un dispositif analytique conçu pour transformer un phénomène biochimique en un signal mesurable .Il combine un composant biologique appelé ‹‹biorécepteur›› et un ‹‹transducteur›› représentant le mode de détection [**11**].

1.2 Capteurs optiques

Voyons les différents mécanismes d'interactions physiques externes qu'on veut caractériser, il est possible de développer des capteurs optiques performants.

Les capteurs optiques à base de fibres optiques, de plasmons de surface, de guides d'ondes planaires ou de cristaux photoniques sont privilégiés pour leur haute sensibilité et leur analyse non destructive.

Il existe plusieurs types de capteurs optiques, tels que les capteurs de température, de pression, d'humidité, de déplacement et les biocapteurs, Diverses techniques de détection liées à ces capteurs sont basées sur des changements dans l'information qui caractérise les ondes lumineuses.[**12**]

1.2.1 Les cristaux photoniques pour la détection optique

L'application des cristaux photoniques en tant que capteurs (senseurs) constitue un domaine de recherche qui semble être très prometteur en raison de leur micro-structuration périodique qui permet de piéger les photons et de créer des résonances optiques très sensibles à la présence des molécules à détecter, de leur extrême miniaturisation (0.1 mm2 de surface de détection), de leur haute sensibilité spectrale, de la préparation minimale de l'échantillon sans marquage par fluorescence, de la sélectivité dans le mécanisme de détection et de la possibilité de les intégrer aux MEMS. Récemment, plusieurs travaux de recherches utilisant les cristaux photoniques, en tant qu'élément de détection, ont été entrepris, en raison

de leur structure de bande et du confinement de la lumière [**13**][**14**]. Différents types de cristaux photoniques sont utilisés comme capteurs à cause de leur haute sensibilité aux variations d'indices de réfraction, par exemple :

— La technologie SPR (Surface Plasmon Résonance) qui exploite les changements de phase des plasmons qui correspond aux variations d'épaisseur des analytes biologiques dans un cristal photonique [**15**].

— Des lasers à base de cristaux photoniques qui ont été utilisés comme biocapteurs par la surveillance des changements du spectre de sortie du laser dus aux changements de l'indice de réfraction du matériau de sa cavité, ce qui permet la détection d'infime variation d'indice de réfraction à l'intérieur des échantillons de volumes femto-litres [**16**] .

— 3- Les fibres à cristaux photoniques, qui peuvent guider la lumière par effets de bandes interdites photoniques, non pas par réflexion totale interne, ont été utilisés dans la bio- détection [**17**][**18**].

— La technologie de cristal photonique basée sur l'hydrogel et les structures cristallines photoniques colloïdales ont été également des candidats dans la bio-détection [**19**][**20**].

— Lee et al. Ont utilisés un cristal photonique à deux dimensions ayant une cavité centrale formée par un trou plus petit que les autres trous du cristal photonique [**14**]. Ils ont fonctionnalisé la cavité pour que des protéines spécifiques s'y fixent. Lorsqu'elles s'attachent, le pic de résonance transmis est décalé vers le rouge. De la même façon, un guide d'onde formé par une ligne de trous omise dans un cristal photonique à deux dimensions permet de détecter la fixation d'une couche de 2,5 nm de streptavidine [**21**].

— D'autres chercheurs utilisent les pores des cristaux photoniques comme des micro- canaux : le fluide passe au travers le cristal photonique et la variation de l'indice de réfraction est détectée [**22**].

Le plus grand nombre de travaux sur les capteurs à cristaux photoniques est basé sur l'infiltration sélective des analytes et les changements des propriétés optiques basées sur la variation de l'indice de réfraction [**14**][**23**][**24**].

1.2.2 Capteur à fibre optique

Les capteurs à fibres optiques sont issus de la rencontre de deux technologies : les fibres optiques utilisées en télécommunication et l'optoélectronique. L'une et l'autre ont connu un développement extraordinaire ces deux dernières décennies : amélioration des performances, diminution des coûts et miniaturisation. Tout cela a permis l'émergence de ces capteurs dont le champ d'applications recouvre entièrement celui des capteurs traditionnels et offre également de nouvelles possibilités ainsi que de nombreux avantages :

— La fibre optique présente le plus haut degré de miniaturisation d'un composant optique.

— Elle s'affranchit des problèmes liés aux déplacements mécaniques des appareillages traditionnels.

— Elle permet enfin d'obtenir des mesures dans des endroits peu accessibles ou hostiles (explosifs) et est capable de transporter l'information sur la grandeur mesurée sur une longue distance.

Actuellement très peu de systèmes basés sur des biocapteurs entièrement fibrés sont sur le marché, nous en sommes encore au stade du développement.

La partie suivante s'articule en trois points. Nous présenterons tout d'abord et de manière sommaire les fibres optiques. Puis nous définirons et classerons les différents types de biocapteurs à fibres. Cette partie s'achèvera alors sur une description générale des grandes catégories qui composent la famille des biocapteurs fibrés.

1.2.3 Capteur à base des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques (PhCs) sont l'un des domaines de recherche les plus populaires en nano-optoélectronique et photonique de nos jours. Le cristal photonique, est une architecture périodique semblable à celle des cristaux minéraux, mais de période beaucoup plus grande, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. De telles structures aident à manipuler les photons, comme un circuit électrique le ferait avec des électrons.

Leur réalisation à grande échelle reste cependant problématique. Chaque jour, de nouvelles applications des PhCs sont découvertes.

Lorsqu'une onde lumineuse rencontre un matériau homogène, elle est soit transmise, soit réfléchie, dans une direction et une proportion parfaitement décrites par les lois de la réflexion et de la réfraction, les lois de Snell-Descartes. Passée cette frontière, l'onde poursuit sa route en droite ligne jusqu'à l'interface suivante. Manipuler la lumière dans ces conditions ne peut se faire qu'à une échelle macroscopique, par des jeux des guides d'ondes, les fibres optique, les lasers à faible seuil etc.[**25**]

Capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de CPs (RI-based PhC sensors)

Le mécanisme de détection de ce type de capteurs repose sur les changements induits sur une longueur d'onde de résonance ou de la localisation spectrale d'une bande dues aux changements d'indice de réfraction. La figure 1.6 montre deux dispositifs différents de capteurs à cristaux photoniques basés RI et les résultats de leur caractérisation. L'un des principes de fonctionnement de ces capteurs consiste en la mesure d'un changement d'indice de réfraction d'un élément sensible en fonction de la présence d'un analyte (substance à détecter).

La détection est effectuée par une monocouche sensible qui réagit avec l'analyte. La zone de détection est composée d'une structure photonique fonctionnant avec une monocouche sensible. Cette monocouche réagit avec l'analyte qui induit une variation de l'indice de réfraction, de l'épaisseur de la couche sensible et de son absorption. Cette structure doit être conçue pour être fortement sensible à la variation de l'indice de réfraction. L'étude de cette dernière consiste à calculer le spectre de transmission qui devrait donner un déplacement en longueur d'onde, d'une valeur bien définie, en présence de l'analyte.

Les applications des cristaux photoniques incluent la bio-détection en raison des propriétés particulières des CPs : comme la capacité d'augmenter l'interaction lumière matière et le contrôle de la vitesse de groupe. En conséquence, les structures du guide d'ondes à CP (PCW) sont de grand intérêt et il est prévu que ce type de détecteurs offrent la possibilité de multi-analytes , ainsi que la capacité de détecter de petites quantités d'analyte (nano-litres) et des échantillons à faible concentration (pico-moles), ce qui peut être un avantage par rapport aux approches conventionnelles tels que les capteurs à fibres optiques ou à guides d'ondes plans.

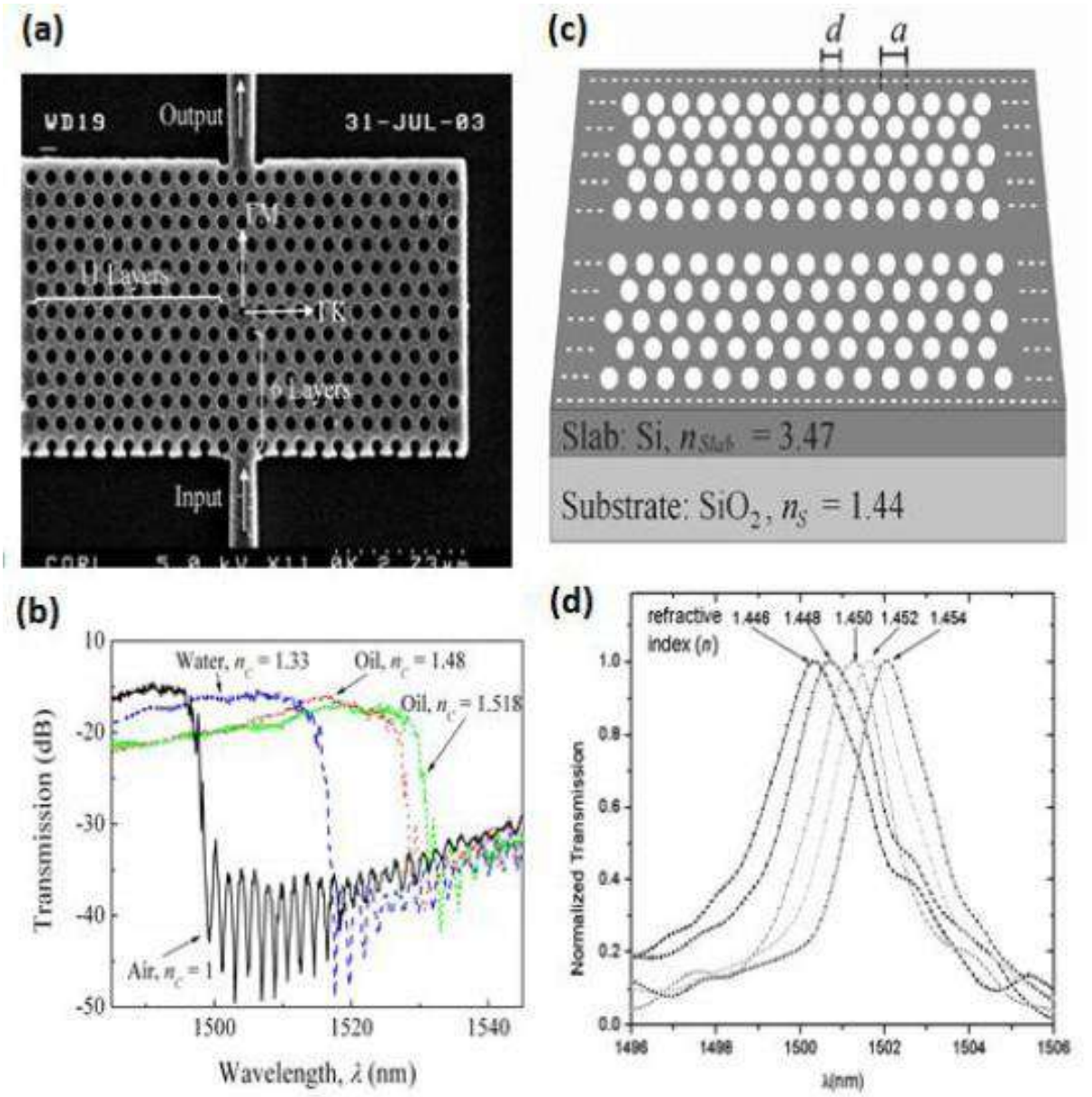


Figure 1.6 – (a) vue au microscope électronique à balayage d'une microcavité à cristal photonique intégrée avec deux guides d'ondes ruban, (b) spectres de transmission normalisés de la microcavité montrée en (a) avec cinq différents indices de réfraction allant de n = 1,446 jusqu'à n = 1,454. (c) vue 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.

Capteurs d'indice de réfraction (RI) à base des guides d'ondes à CP

Dans plusieurs capteurs à base de RI, le guide d'onde CP agit directement comme élément de détection sans concevoir de microcavité intégrée. Un guide d'onde CP est généralement réalisé en introduisant un défaut linéique dans la structure plane périodique. On note que, les modes de propagation sont limités par la réflexion interne totale (TIR) le long de la direction verticale et par la structure périodique latéralement.

Un autre biocapteur RI à CP a été proposé pour détecter l'ss ADN, présentant une limite de détection de 19,8 nm. Ce capteur, potentiellement capable de détecter des concentrations d'analyte très faibles (par exemple, des protéines, des bactéries, de l'ADN) est fabriqué dans une plaquette SOI avec une épaisseur de couche de silicium de 250 nm et un dioxyde de silicium enterré de 3 µm d'épaisseur.

La structure est un cristal photonique 2D à réseau triangulaire de trous d'air de rayon r=111nm et de

périodicité a = 390 nm. A l'entrée et à la sortie du guide d'ondes CP, la lumière est couplée ou recueillie par un guide d'ondes monomode de 500 nm de largeur, comme l'illustre la Figure 1.7.

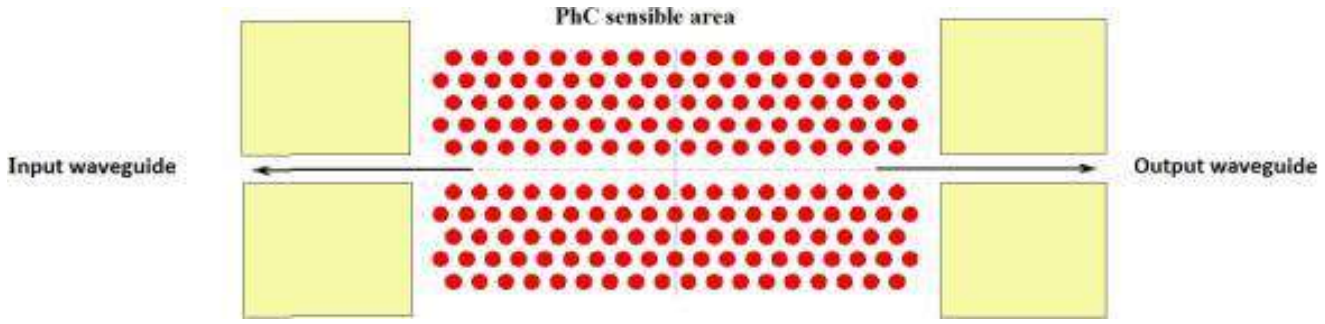


Figure 1.7 – Schéma du capteur d'ADN à base de PhC caractérisé par des guides d'ondes monomodes d'entrée et de sortie de 500 nm de largeur.

Capteurs d'indice de réfraction (RI) de température

En modélisant le changement de l'indice de réfraction d'un matériau ou milieu donné en fonction de la température, on peut mesurer et contrôlé la température dans laquelle ce milieu et/ou matériaux est placé. On parle alors de capteur de température RI.

Capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de microcavités résonantes à CP

Ces dispositifs sont créés en introduisant des défauts localisés dans la distribution périodique des trous (c'est-à-dire la suppression d'un ou plusieurs trous). De cette manière, la périodicité globale du cristal photonique est entrée pour former une carte de bande interdite de pseudo-état. Ceci permet d'exciter l'état de résonance.

Pour évaluer les performances d'un capteur de pores CP, nous devons considérer deux paramètres : le facteur de qualité Q et la sensibilité de la longueur d'onde $S\lambda$.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini et exposé les concepts de base liés aux capteurs, plus particulièrement les capteurs optiques. Nous avons aussi abordé quelques caractéristiques de ces derniers, montré leurs principe de fonctionnement et la conception des capteurs à base de fibre optique en utilisant le changement d'indice de réfraction pour la détection de mesurande.

Chapitre 2

Types des cristaux photoniques

2.1 Historique :

Au milieu des années 90, les avancées en nano-technologies ont rendu possible l'élaboration de matériaux artificiels dont le comportement vis-à-vis des ondes électromagnétiques est tout à fait surprenant, pour cette raison, ils sont appelés parfois cristaux photoniques. Le terme "cristal photonique" a été proposé pour la première fois en 1887, les premières hypothèses sur la possibilité de contrôler la propagation de la lumière utilisent des structures périodiques avec les travaux de Lord Rayleigh. Depuis lors, ces matériaux intéressent beaucoup la communauté scientifique, notamment dans le domaine de l'optique.

Le domaine des cristaux photoniques a commencé en 1987, quand Eli Yablonovitch et Saier John ont introduit séparément et dans des contextes différents, le concept de matériaux à bande interdite.[**26**]

En 1996, Thomas Krauss fit la première démonstration du cristal photonique 2D à la longueur d'onde optique [**27**]

En 1998, Philip Russell a développé la première fibre de cristal photonique utilisée commercialement. L'étude du cristal photonique 2-D est rapide par rapport à 3-D, en raison du niveau de difficulté de la construction.[**28**] En 2000, le premier cristal photonique tridimensionnel avec une bande interdite photonique complète dans le domaine infrarouge proche a été obtenu. [**29**]

En 2009, A. Labbani et al. ont présentés les modifications des bandes interdites des cristaux photoniques à base de nanoparticules de semi-conducteur.[**30**]

Au cours des dernières années, la recherche dans le domaine des cristaux photoniques a connu une expansion extraordinaire et a couvert presque toutes les disciplines scientifiques en réalisant des progrès sans précédent.

2.2 Définition d'un cristal photonique

Les cristaux photoniques, encore appelés matériaux à bandes interdites photoniques (BIP), sont des structures périodiques de matériaux diélectriques, semi-conducteur ou métalliques artificiellement ou naturellement structurés, dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde selon une ou plusieurs directions de l'espace, La périodicité peut être unidimensionnel, bidimensionnel, tridimensionnel (ces dimensions représentent les nombres de direction dans lesquelles une périodicité de la constante diélectrique).

Ce type de matériaux a une propriété très intéressante, cette dernière provient de la variation périodique de l'indice diélectrique à l'échelle de la longueur d'onde dans une ou plusieurs directions de l'espace, parce qu'ils produisent une certaine région de fréquence, où la propagation des ondes électromagnétiques est

interdite, et c'est ce qu'on appelle bande interdite photonique BIP (ou aussi dit GAP photoniques). Cela veut dire qu'une onde électromagnétique incidente avec une longueur d'onde située entre les limites de la bande interdite photonique, sera complètement réfléchie par le cristal photonique en raison de l'absence de modes de Bloch correspondants qui peuvent se propager à travers le cristal photonique.
Lorsqu'un défaut de réseau est introduit dans une structure cristalline photonique parfaite, ce défaut entraînera l'apparition de mode dit mode de défaut, permettant la propagation d'onde électromagnétique de fréquence résonance bien définie. Grâce à tels défauts, des microcavités de hautes qualités peuvent être formées au sein des cristaux photoniques.
Les interactions de la lumière-matière sont vaguement améliorées dans la microcavité du cristal photonique en raison du grand effet de confinement des photons dans la microcavité.
La propagation et le confinement de la lumière dans un cristal photonique peut être calculé en se basant sur la théorie d'électromagnétisme de Maxwell et celle de Bloch. Divers méthodes de calcul numérique ont été développées pour l'étude des caractéristiques d'un cristal photonique, ces méthodes de calcul numériques fournissent un grand aide aux chercheurs pour comprendre les propriétés uniques des cristaux photoniques et ainsi permettent le design de structures pour la réalisation de dispositifs photoniques intégrés.

2.3 Classification des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont classé selon leur dimensionnalité, qui sont principalement divisés en 3 types :

2.3.1 Les cristaux photoniques unidimensionnels (Empilement de couches minces, réseau de Bragg)

Ces structures sont généralement réalisées par un empilement de couches d'indice de réfraction différent et d'épaisseur optique λ/4, λ étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous incidence normale.

Ils possèdent une permittivité électrique périodique dans une direction et uniforme dans les deux autres directions. La figure 2.1 montre qu'ils consistent en un empilement de deux couches alternées de matériaux homogènes ayant des constantes diélectriques ϵ différentes.

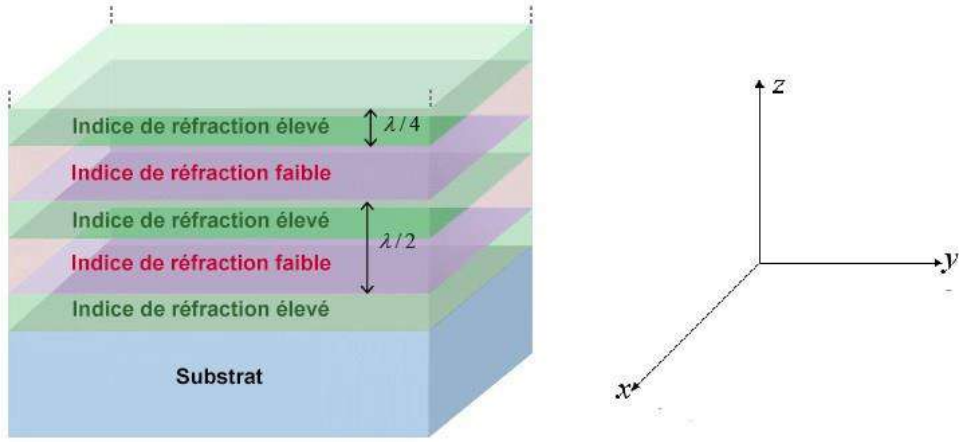


Figure 2.1 – BIP unidimensionnel, empilement de couches de permittivités différentes.

Le comportement du réflecteur de Bragg est expliqué à partir de processus d'interférences multiples comme le montre la figure 2.2. Une onde qui se propage dans le système multi-couche, subit une réflexion à chaque interface. Cette réflexion s'accompagne d'un changement de phase II si l'onde va d'un milieu de faible indice vers un milieu de fort indice, elle s'effectue sans changement de phase dans le cas contraire. Lorsque l'épaisseur optique totale des alternances est de λ/2, l'onde réfléchie par l'interface (1) est en phase avec celles réfléchies par les interfaces (3), (5), (7)... Par suite de ces interférences constructives, on finit ainsi par aboutir à une réflexion totale, ce qui revient à dire que l'onde ne peut se propager et que l'on est en présence d'une bande interdite photonique (BIP).

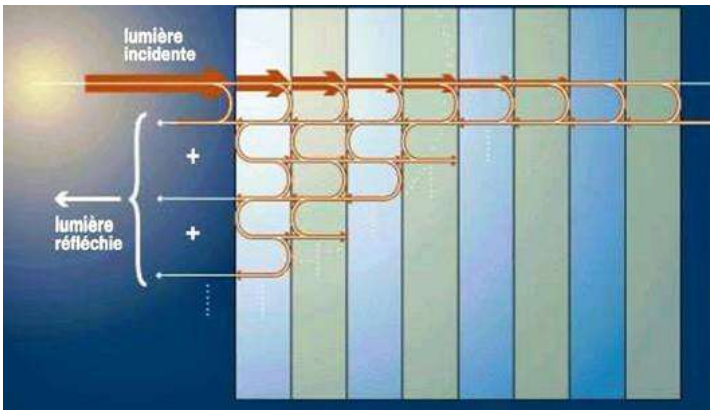


Figure 2.2 – Réflexions et de transmissions aux interfaces d'un miroir de Bragg.

Ces structures existent depuis longtemps et sont utilisées en optique pour obtenir des miroirs sans pertes (miroirs de Bragg). Ces derniers ont prouvés leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs etc.

2.3.2 Les cristaux photoniques bidimensionnels

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième.
Considérons que ce matériau est un réseau carré de colonnes diélectriques, de rayon r et de constante diélectrique ϵ. Le matériau est homogène le long de la direction *z* (nous imaginons que les cylindres sont très hauts, Elles présentent une relative simplicité géométrique qui facilite les études théoriques et expérimentales), et périodique le long de *x* et *y* avec une constante de réseau a. L'encadré de gauche montre le treillis carré d'en haut, avec la cellule unitaire encadrée en rouge figure 2.3.

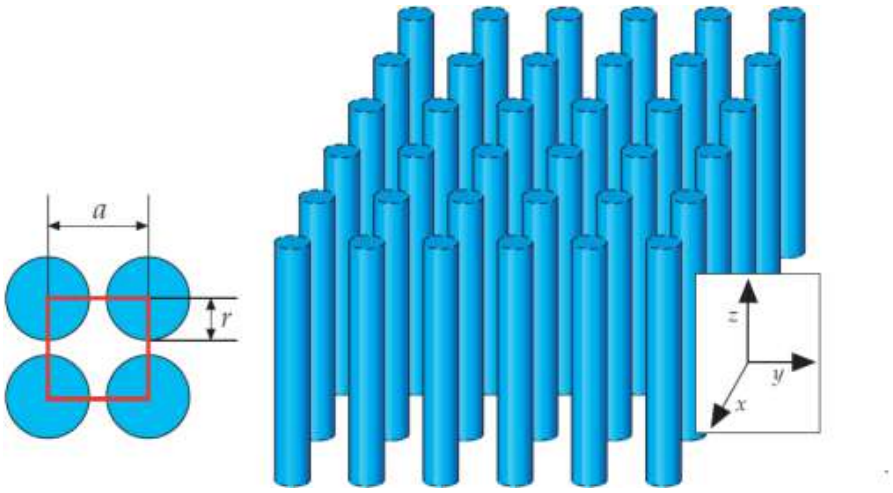


Figure 2.3 – Structures périodiques bidimensionnelles.

Les cristaux photoniques à trois dimensions posent encore de nombreux problèmes de fabrication. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés aux cristaux photoniques à deux dimensions qui peuvent être fabriqués facilement. Dans ce cas, on distingue deux types de structures : connectées et déconnectées.

Les structures dites «connectées» :

Les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique. Une structure connectée est formé de vecteurs de trous cylindriques périodiques d'air réalisés dans un substrat en matériau de fort indice de réfraction comme illustré dans la figure 2.4.

La fonction diélectrique du cristal suit une distribution périodique dans la direction perpendiculaire à

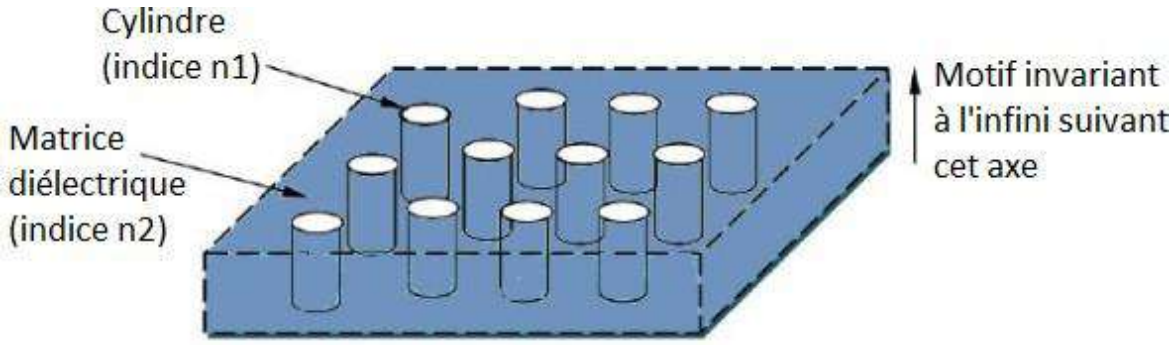


Figure 2.4 – Structure périodique 2D connectée.

l'axe des trous d'air. En ce qui concerne l'apparition du gap photonique ou non, cela dépend de la direction d'incidence de l'onde électromagnétique attaquant le cristal (même raisonnement que pour le cas de la structure déconnecté) [**31**]

Les structures dites «déconnectées» :

Les motifs élémentaires sont d'indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques à haut indice de réfraction alignées périodiquement dans l'air figure 2.5. La fonction diélectrique du cristal photonique est répartie périodiquement dans la direction perpendiculaire à l'axe des tiges. Quand une onde électromagnétique est incidente dans le plan perpendiculaire aux

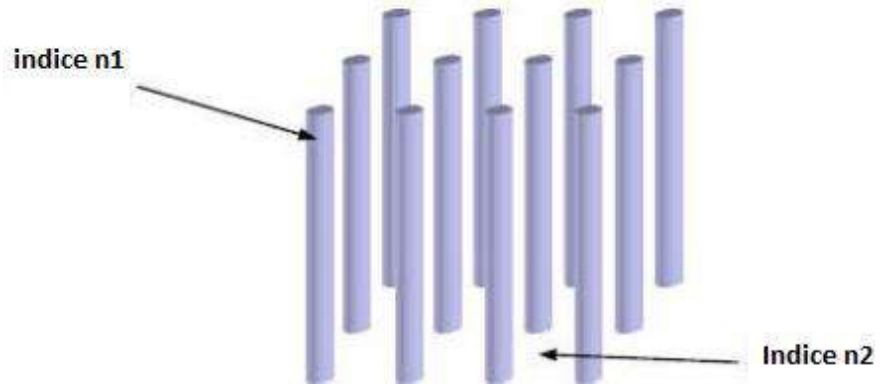


Figure 2.5 – Structure périodique 2D déconnectée

tiges diélectriques, les états de propagation de cette onde sont contrôlés par l'effet du gap photonique issu de la dispersion multiple et des interférences de cette onde aux interfaces entre les tiges et le fond qui les entourent d'indice de réfraction plus faible. Maintenant quand l'onde incidente se propage dans le plan parallèle aux tiges elle verra une distribution homogène de la fonction diélectrique du cristal photonique. Dans ce cas on ne verra jamais la création d'un gap photonique.[**32**]

2.3.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels

Les cristaux photoniques 3D sont des matériaux ayant une constante diélectrique périodique dans les trois directions de l'espace. Parmi les CPs 3D offrant la possibilité d'obtenir une bande interdite omnidirectionnelle.

Yablonovitch était parmi les premiers à réaliser le CP 3D, Il avait l'objectif d'obtenir une bande interdite complète pour toutes les directions de l'espace afin d'inhiber l'émission spontanée de la lumière.[**32**]

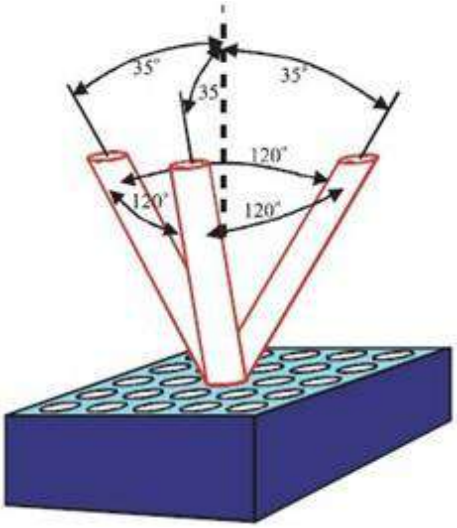


Figure 2.6 – Structure "Yablonovite".

La structure "Yablonovite" :

C'est le premier cristal photonique tridimensionnel à fabriquer et il a été nommé Yablonovite après Yablonovitch qui l'a conceptualisé. Une dalle de matériau est recouverte d'un masque constitué de rangées triangulaires de trous. Chaque trou est foré Par trois fois, à un angle de 35,26° loin de la normale, et répartis sur 120 sur l'azimut. Les trous traversants situés en dessous de la surface de la brame produisent une structure FCC tridimensionnelle complète. Le forage peut se faire par un foret réel pour le travail des micro-ondes, ou par gravure ionique réactive pour créer une structure FCC à des longueurs d'ondes optiques. La bande sombre à droite indique l'écart totalement interdit.[**33**] [**34**]

Avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois. Et puis de nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées, les plus prospectées sont : la structure tas de bois, la structure opale.

La structure "tas de bois" :

La structure périodique de ces cristaux photoniques tridimensionnels est bâtie en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranchées de silice. Cette fabrication se fait plan sur plan. Après avoir construit la structure, la silice est retirée pour obtenir un cristal photonique tridimensionnel Si/Air dont le contraste d'indice est suffisant pour ouvrir une bande d'énergie interdite omnidirectionnelle.

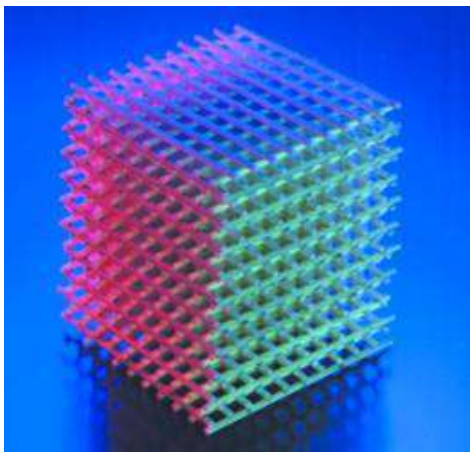
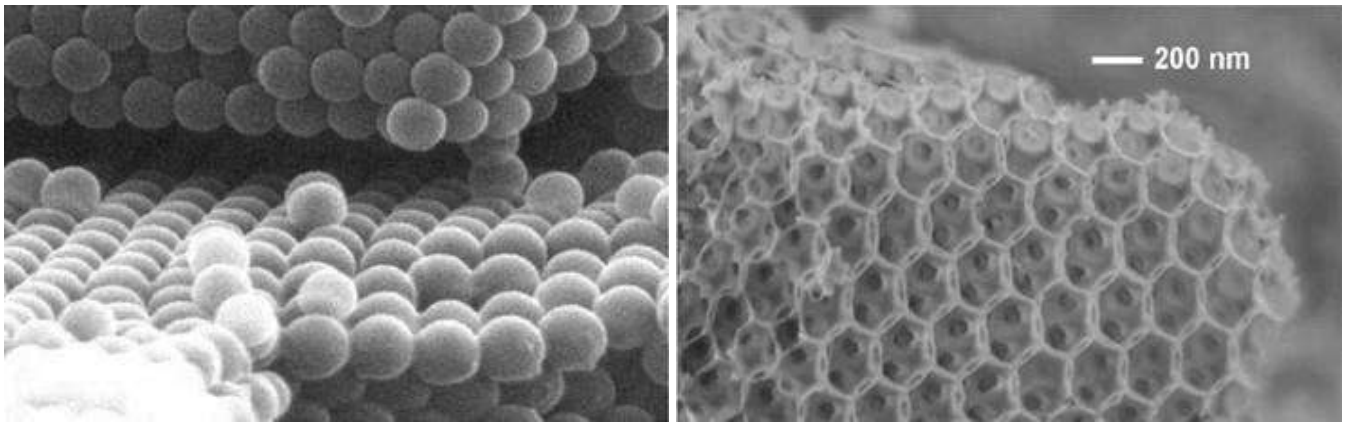


Figure 2.7 – Structure "tas de bois".

La structure "opale" :

S'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées (FCC). Le nombre important de défauts dans les premières opales a été fortement réduit grâce à des techniques de croissance auto-organisées proposées par Y.A. Vlasov.[**35**]

La plupart de ces cristaux ne présentent pas de bandes d'énergie interdites, à cause du faible contraste d'indice. Cependant, ces structures servent d'empreinte pour la réalisation d'opales inversées à partir de l'infiltration d'un matériau de haut indice dans les interstices qui séparent les sphères. Ces dernières sont ensuite dissoutes chimiquement pour aboutir à la structure finale de sphères d'air dans une matrice de haut indice.[**36**]



(a) **(b)**

Figure 2.8 – Les opales directes et les opales inverses.

2.4 Principales caractéristiques des Cristaux photoniques

2.4.1 Le contraste d'indice D_n :

Le contraste d'indice D_n est la différence entre les indices de réfraction des deux matériaux [21], qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique du solide. Il est donné par l'équation (2.1) :

$$D_n = nh - nl \qquad (2.1)$$

Avec :

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

nl : l'indice de réfraction du matériau de faible indice. [**37**]

2.4.2 La période :

La période (a) est donnée par : $a = (a_1+a_2)$, avec a_1 épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 et a_2 épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2, noter que l'indice de réfraction et la permittivité sont reliés par la relation : $n = \sqrt{\epsilon}$

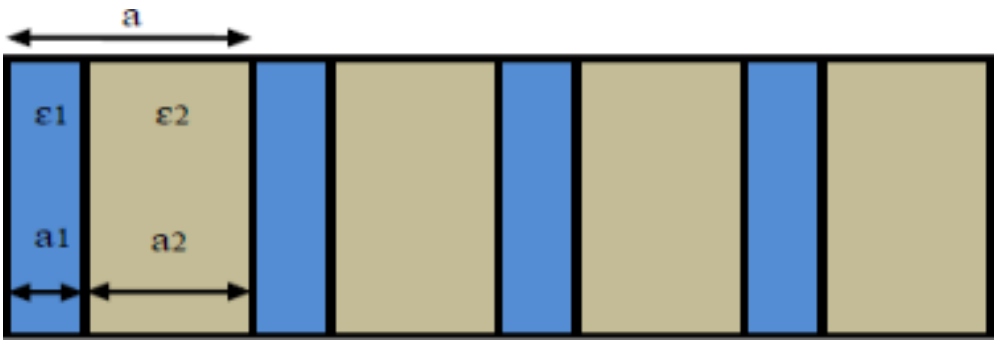


Figure 2.9 – Période.

2.4.3 Facteur de remplissage f

Pour un cristal photonique bidimensionnel planaire composé de trous d'air percés dans une matrice diélectrique, le facteur de remplissage en air f désigne le rapport entre l'aire du motif (ici un disque : $A_{motif} = \pi x^2$) et l'aire de la cellule élémentaire du réseau considéré.[**38**]

$$\mathbf{f} = \frac{A_{motif}}{A_{maille\ élémentaire}} \tag{2.2}$$

Dans le cas de motifs circulaires de rayon r dans un cristal carré de période a (A maille élémentaire $=\alpha_2$), on peut définir le facteur de remplissage dans l'air :

$$f = \pi\left(\frac{r_2}{a}\right) \tag{2.3}$$

Dans le cas de motifs circulaires de rayon r dans un cristal triangulaire de période a, le facteur de remplissage dans l'air est donné pour l'expression :

$$f = \frac{2\pi r_2}{\sqrt{3}\left(a\right)} \tag{2.4}$$

L'influence de ces différents paramètres sur le comportement d'une structure photonique (sur le diagramme de bandes) peut être comprise par analogie avec un potentiel périodique induit de l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur.

2.5 Bande interdite photonique

2.5.1 Zone de Brillouin :

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

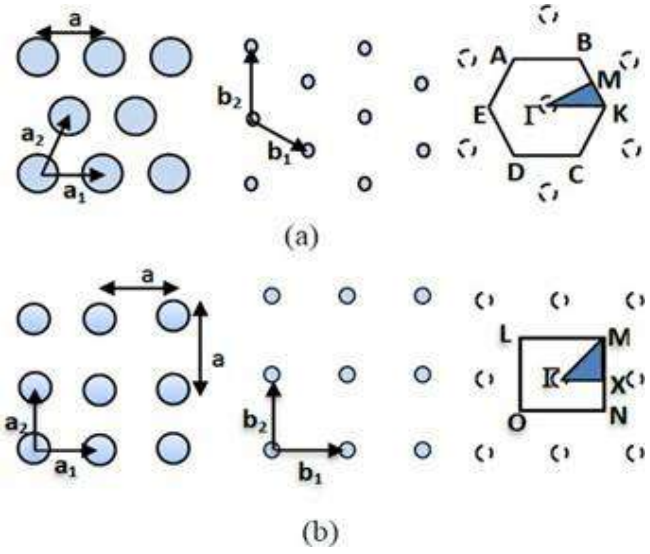


Figure 2.10 – Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) triangulaire et (b) carré.

2.5.2 Diagramme de bandes :

Si on prend comme exemple un cristal photonique à deux dimensions avec des tiges, le calcul du diagramme de bande de ce cristal nous renseigne sur les propriétés (la position et la largeur) des bandes interdites photoniques pour chaque polarisation.

— La polarisation TE lorsque le champ magnétique ($\vec{H}$) est parallèle à l'axe des tiges.

— La polarisation TM lorsque le champ électrique ($\vec{E}$) est parallèle à l'axe des tiges.

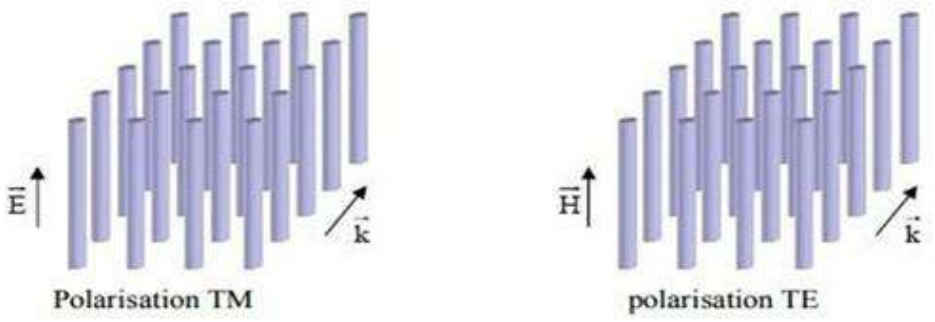


Figure 2.11 – Polarisations possible dans une structure à bande interdite photonique : TM et TE.

Un cristal photonique est caractérisé par son diagramme de bandes. Ces diagrammes ont été calculés par la méthode de décomposition en ondes planes. Le facteur de remplissage est f= 0.30 et le réseau du cristal photonique est triangulaire. Une bande interdite est observée pour la polarisation TE entre u = a/λ= 0.21-0.27 (2.12). Par contre, pour la polarisation TM, aucune bande interdite ne s'ouvre (2.12).

En effet, l'ouverture de bandes interdites photoniques TE est plus favorisée si des zones de fort indice de réfraction sont connectées.

Dans le cas contraire, si les zones de faibles indices de réfraction sont connectées (par exemple, des piliers diélectriques dans l'air), c'est l'ouverture d'une bande interdite en polarisation TM qui est favorisée.[**39**]

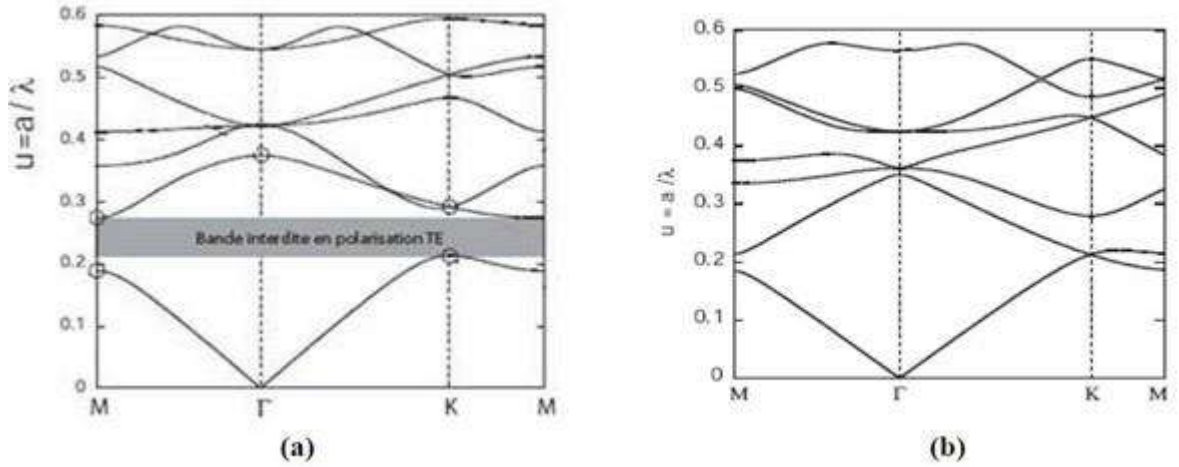


Figure 2.12 – Diagramme de bandes d'un cristal photonique (réseau triangulaire) gravé dans un milieu diélectrique de l'indice de réfraction substrat =11.4 avec un facteur de remplissage de f = 0.30 : (a) Polarisation TE ; (b) Polarisation TM.

2.6 Les défauts

Plusieurs types de défauts sont possibles et permettent de réaliser certaines applications, telles que les filtres à haute sélectivité, puisque seule l'onde électromagnétique dont la fréquence correspond à celle du mode autorisé sera transmise ou même des filtres accordables. L'imperfection dans la disposition périodique de la structure diélectrique est une façon simple de créer un ou plusieurs modes permis dans le gap et d'introduire un défaut dans le cristal. Dans le cas des cristaux photoniques bidimensionnels qui nous intéressent particulièrement dans ce travail, plusieurs types de défauts peuvent être considérés.

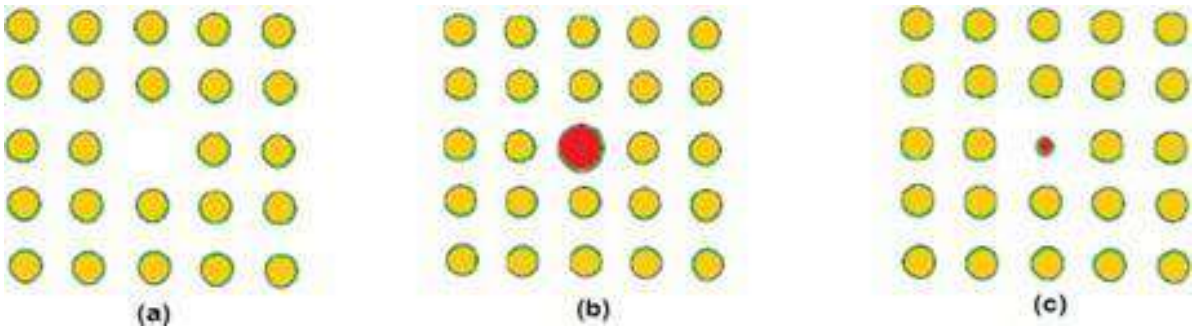


Figure 2.13 – Différents types de défauts (a) défauts ponctuels (b) défauts lacunaires (c) défauts de substitution.

2.6.1 Défauts ponctuels

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Il existe plusieurs manières de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. On peut procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal. Ce qui correspond à des défauts lacunaires ou de substitution (2.14) Dans tous les cas, on crée des cavités optiques dont les modes de résonances vont venir se positionner en énergie au sein des bandes interdites du cristal.

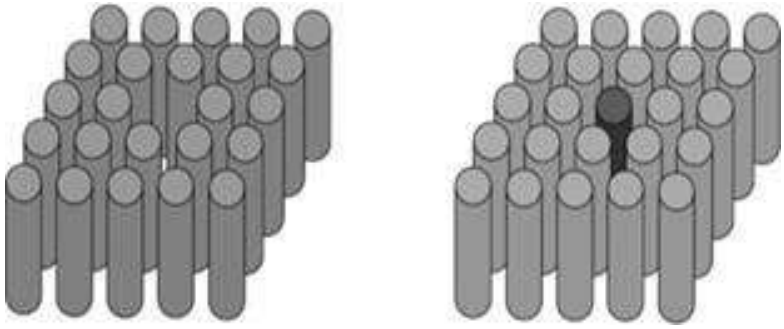


Figure 2.14 – Défaut lacunaire, Défaut de substitution.

Les caractéristiques de ces défauts ont été étudiées par plusieurs équipes [**40**],[**41**], qui ont pu déterminer les fréquences des modes de défauts dans un cristal photonique de réseau carré. La transmission de ces structures a été étudiée par [**42**] ; [**43**] ; [**44**] Joanopoulos et all qui ont montré théoriquement que les propriétés des modes de défauts peuvent être contrôlées en modifiant la taille et le type de défauts.

2.6.2 Défauts linéiques

Un guide est un défaut linéique introduit au sein d'un cristal photonique si l'on retreint à une périodicité dans deux directions dans l'espace. Le cristal photonique 2D est constitué soit de colonnes de diélectrique entourées d'air, soit de trous d'air gravés au travers d'une matrice diélectrique. Un guide d'onde peut alors être créé en écartant deux demi-plans comme il est montré dans la figure (2.15). L'écart entre les deux demi-plans, la direction cristallographique ainsi que la symétrie des bords définissent un guide unique.

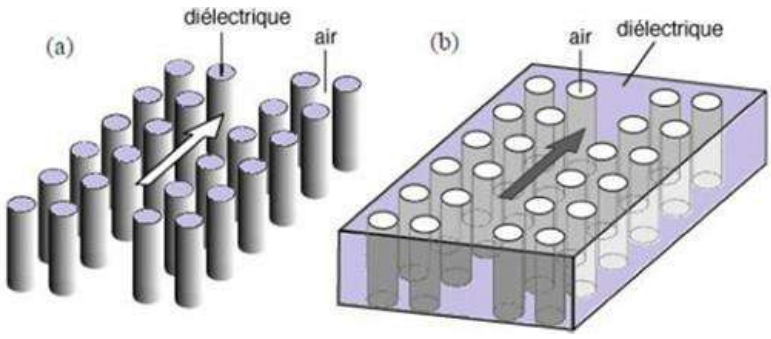


Figure 2.15 – Schéma d'un guide défaut dans un réseau (a) de colonnes d'un diélectrique (b) de trous d'air.

2.6.3 Défauts étendus

Les défauts étendus sont obtenus en modifiant les cylindres ou les trous sur plusieurs sites voisins. Il existe trois types de défauts étendus, défauts 1D, 2D ou 3D. Ils ne peuvent être obtenus que dans les cristaux de dimensions au moins équivalentes. Les défauts étendus de dimension 1D sont appelés aussi défauts linéiques et permettent de réaliser un guidage diffractif des ondes. Ils sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études, Les défauts 2D et 3D constitués d'une suite de guides 1D orientés dans des directions différentes de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins optiques possibles à l'intérieur du cristal. Les recherches actuelles ont montré que ces guides présentent des pertes importantes et que leur réalisation est loin d'être évidente.[**45**]

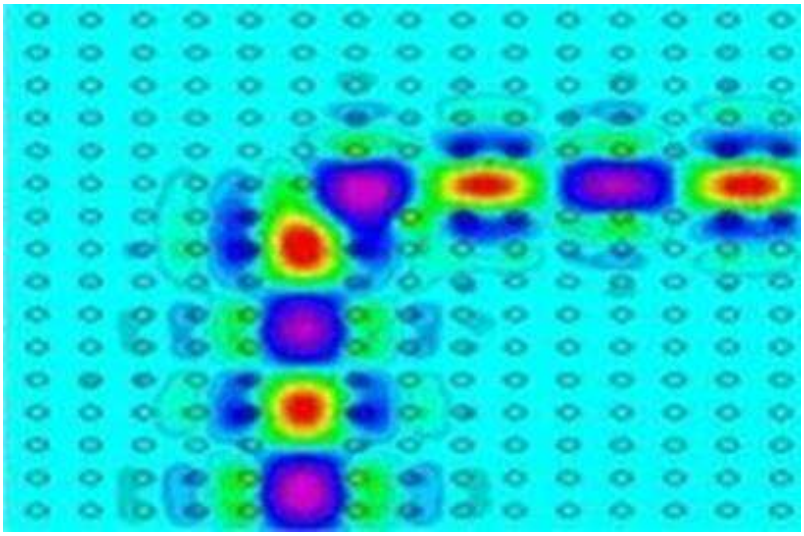


Figure 2.16 – Simulation de la propagation du champ électromagnétique dans un guide d'onde réalisé dans un cristal photonique

2.7 Composants semi-conducteurs à cristal photonique bidimensionnel

Les cristaux photoniques 2D se présentent typiquement sous la forme d'un réseau périodique de trous gravés dans une ou plusieurs couches semi-conductrices. Le choix se porte le plus souvent sur un réseau de symétrie hexagonale, qui représente toujours une bande interdite photonique dans toutes les directions du plan pour au moins une polarisation du champ TE. Cela étant, ce sont les modifications du réseau qui vont permettre de réaliser les fonctions et les composants optiques. La difficulté principale des CPs 2D reste d'assurer le confinement optique dans la troisième direction de l'espace, la direction verticale. La solution standard de l'optoélectronique consiste à réaliser le CP dans un guide planaire multicouches avec un contraste modéré d'indice de réfraction entre couches. Le problème est alors de disposer d'un système de gravure profonde pour limiter les pertes par diffraction du CP. Une solution alternative est de faire le CP dans une membrane semiconductrice, suspendue dans l'air. Le contraste de l'indice est alors élevé, un système de gravure standard peut être utilisé, et c'est avec cette solution que la meilleure performance, c'est-à-dire les plus faibles pertes, ont été obtenue pour les composants à CPs 2D. La contrepartie est que les structures membranes sont affectées par les effets accrus d'échauffement thermique et que la mise en œuvre de l'excitation électrique y est plus difficile. De ce point de vue, une troisième solution d'intérêt

pour la nanophotonique silicium, en particulier, consiste à réaliser le CP dans la couche supérieure de silicium d'un substrat de SOI, Laquelle forme un guide planaire confiné entre la silice et air.[**46**]

2.8 Domaines d'application

Par leurs périodicités et leurs propriétés, les cristaux photoniques permettent de réaliser des dispositifs optiques ou électromagnétiques capables de stocker, filtrer ou guider la lumière à l'échelle de la longueur d'onde.

Les cristaux photoniques sont souvent utilisés dans le domaine de la télécommunication et de l'informatique [**47**]'[**48**] et [**49**] notamment dans le domaine des optiques intégrées. En effet, en utilisant les photons à la place des électrons, les informations seront transmises plus rapidement avec moins de perte, du fait d'une baisse d'interaction avec les matériaux diélectriques en comparaison aux électrons. Ils peuvent être déclinés sous forme de filtres afin de ne laisser qu'une longueur d'onde du spectre de la lumière passer [**50**], [**51**], de guides d'onde pour la lumière par l'insertion de défauts linéaires ou planaires qui guideront les photons à travers le système [**52**], ou encore de fibres optiques permettant une réflexion interne totale où la lumière y est confinée car sa propagation hors de ce domaine est interdite [**47**] (2.17).

L'utilisation des cristaux photoniques dans d'autres applications se développent comme pour le solaire avec l'amélioration de l'efficacité des cellules photovoltaïques [**53**], [**54**] [**55**][**56**], les batteries Lithium-ion pour augmenter leur efficacité [**57**],[**58**], les capteurs biologiques ou chimiques [**59**] [**60**] [**61**] [**62**] [**63**] ou encore les lasers avec l'optimisation de leurs performances pour les lasers à bas seuil [**64**], [**65**] ainsi que pour des revêtements miroir ou antireflet ; [**66**],[**67**]

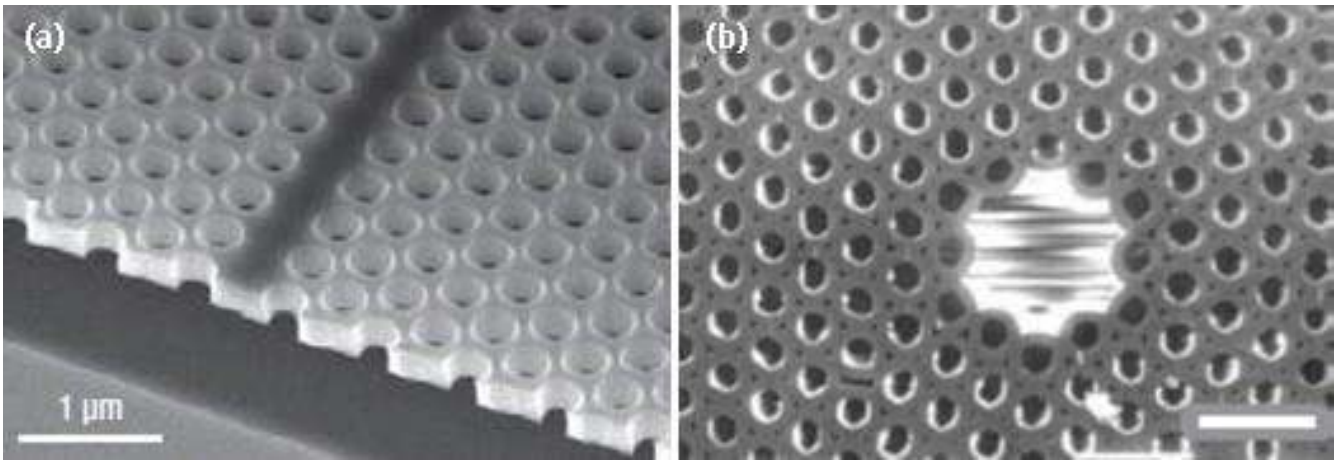


Figure 2.17 – Images MEB (a) d'un guide d'onde et (b) d'une fibre optique photonique dans des CP 2D.

2.8.1 Les cavités

Les premières cavités avec des cristaux photoniques bidimensionnels sont réalisées en 1996, ces cavités sont élaborées en incluant des mono défauts sur le réseau cristallin photonique. Il est montré que ce dispositifs présentent un facteur de qualité élevé pour les modes résonants grâce a l'excellente propriété de réflexion du cristal, tout cela sur des cavités à grande dimension possédants plusieurs modes.

Cavité carrée

Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités sont de type S_n, de forme carrée, n étant le nombre de lignes et de rangés manquantes du carré. Par exemple la cavité S_1 est constituée en omettant une ligne et une rangée.

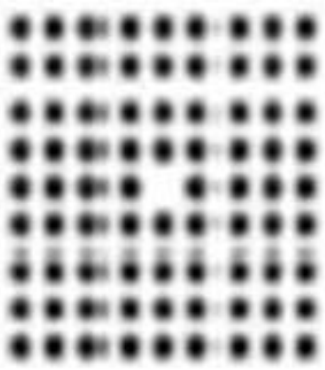


Figure 2.18 – cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm.

Cavité triangulaire

La figure 2.20a représente la cavité triangulaire, cette cavité est obtenue en omettant plusieurs trous dans un réseau triangulaire de trous d'air de section circulaire (r=200 nm) plongé dans une matrice diélectrique (ϵ=8.12).

Cavité rectangulaire

Le réseau CP2D triangulaire est défini par les paramètres suivant : paramètre de maille a=560nm, La figure 2.20b représente une cavité rectangulaire correspondant à l'omission de 3 rangées finies de trous dans le CP.

Cavité hexagonale

Dans un cristal triangulaire, les cavités hexagonales, dont les côtés sont les rangées denses, constituent une série de cavités canoniques. Il est commode de les nommer par le nombre de périodes le long de chaque côté. Ainsi, un seul trou manquant correspondra à H_1, sept trous manquants à H_2, etc. (Figure 2.19). Les cavités de type H_n, de forme hexagonale, n étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées.

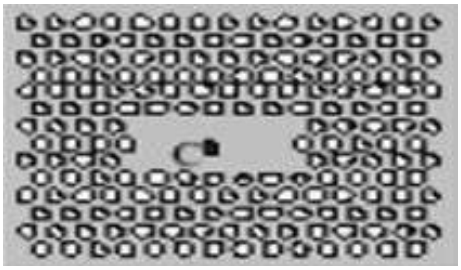
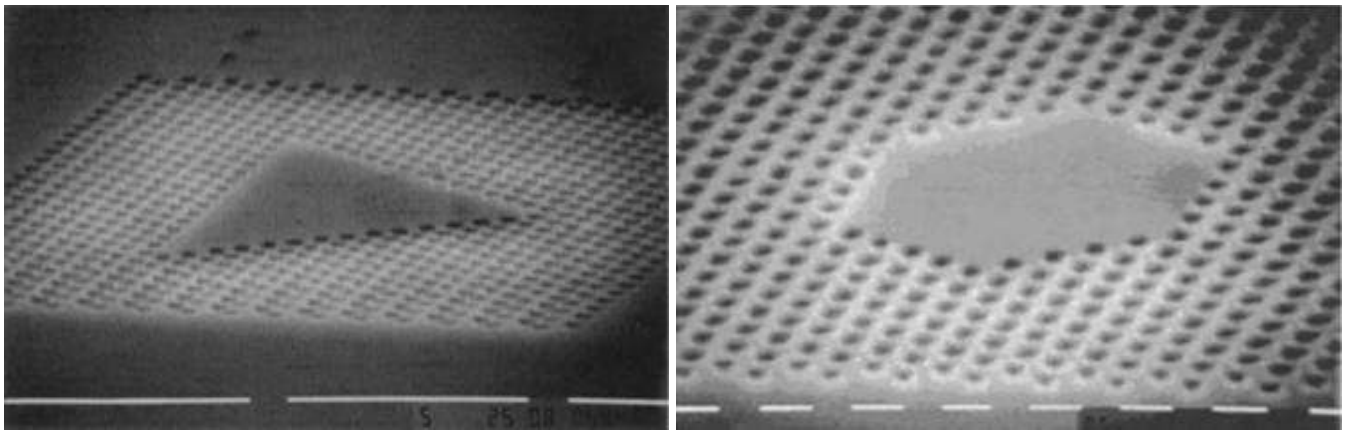


Figure 2.19 – cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm.



(a) **(b)**

Figure 2.20 – Cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm, cavité hexagonale sur membrane suspendue.

2.8.2 Guides d'ondes dans les cristaux photoniques

L'idée des guides d'ondes est apparue en 1994 sous l'impulsion de Joannopoulos, Meade et al. [**68**], mais les premières réalisations ont été effectuées cinq à six ans plus tard.[**69**]

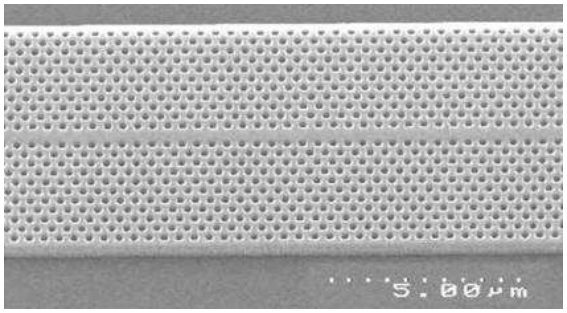


Figure 2.21 – Onde mono-rangée réalisé dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.

Ici, le défaut est une ligne de trous qui a été omise, formant un défaut linéique (Figure 2.21). La lumière ne pouvant pénétrer au sein du cristal photonique, elle est contrainte de se propager le long du défaut : on a ainsi réalisé un guide. Ce guide est appelé guide Wl, car il est formé par l'omission de la gravure d'une ligne de trous. Les guides formés de l'omission de deux lignes de trous sont appelés W2, ceux de trois rangées de trous W3, etc.[**68**] En fait, il existe une grande variété de guides à cristal photonique. Notons, par exemple, que les cristaux photoniques 2D constitués de réseaux de trous sont généralement préférés aux réseaux de tiges diélectriques déconnectées, non seulement parce qu'ils permettent d'aboutir à une bande interdite complète, mais aussi et surtout parce que les pertes par diffraction hors du plan de propagation y sont moins importantes. Or, dans le cas de réseaux de trous, la façon la plus naturelle de créer un guide optique consiste à obturer les trous d'une ou plusieurs rangées.

Dans ce cas, le coeur du guide se retrouve avec un indice moyen plus élevé que ce lui des régions environnantes. On peut donc aboutir à une situation hybride où l'on a simultanément un guidage réfractif et un guidage par bande interdite photonique.

2.8.3 Filtre et Multiplexeur :

Une fonction particulièrement importante d'optique intégrée pourrait être réalisée avec des cristaux photoniques le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing). Le but est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises dans un flux de données. Ce dispositif peut être réalisé en utilisant la sélectivité d'une cavité résonante couplée à des guides d'ondes (Figure 2.22) [**69**].

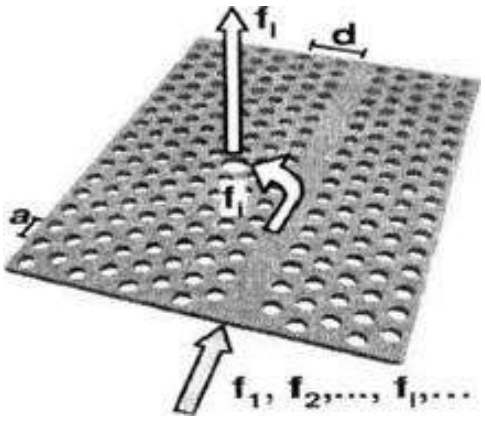


Figure 2.22 – Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (Insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde).

Cette fonction peut aussi être réalisée dans le plan en utilisant deux guides comme l'illustre la figure 2.23. Dans ce cas, les longueurs d'onde qui résonnent dans l'anneau central peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre. Le processus de couplage est néanmoins très complexe et dépend de la symétrie et de la dégénérescence des modes résonnants. De plus, la taille du défaut (de la cavité résonnante) doit être très bien contrôlée afin de sélectionner les longueurs d'onde désirées.[**69**]

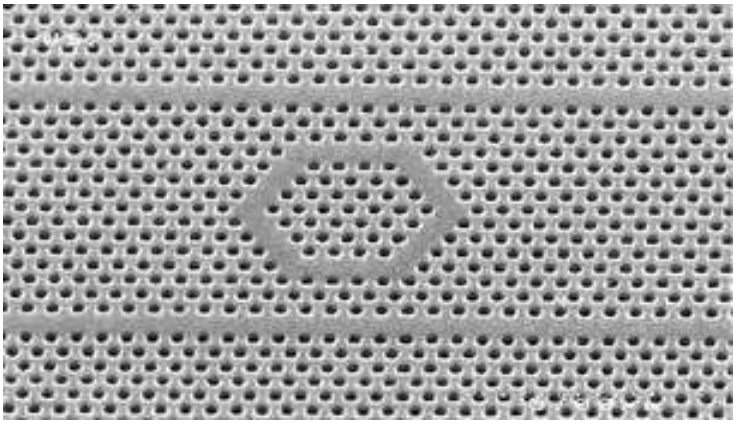


Figure 2.23 – Filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à Vautre.

Conclusion

Le $2^{ème}$chapitre donne un aperçu globale sur les cristaux photoniques en passant par un bref historique, leurs classifications et leurs caractéristiques. nous avons aussi fourni des informations générales sur les bandes interdites photoniques et les défauts , puis nous avons enchainés avec leurs domaines d'applications. Enfin, pour ce qui nous intéresse le plus, nous avons abordés quelques méthodes numériques dont on a besoin dans le dernier chapitre .

Chapitre 3

Simulations et résultats

Préambule

Depuis une dizaine d'années seulement, l'étude des cristaux photoniques pour le développement de biodétecteurs optiques connait un réel essor. Bien que les recherches en soient encore à un stade précoce, nous verrons l'intérêt que présentent ces structures photoniques pour une telle application. Les cristaux photoniques à deux dimensions (2D) ont montré leurs aptitudes dans la mise en évidence de microcavités optiques à haut facteur de qualité Q. Ce point les rend tout particulièrement attrayant pour la réalisation de capteurs à haute sensibilité [**70**] [**71**].

3.1 Méthodes de simulations associés

3.1.1 La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)

La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) est une méthode générale qui permet de simuler la plupart des systèmes . Elle a été proposée pour la première fois par K. S. Yee . Cette technique très utilisée en électromagnétisme consiste à discrétiser les équations de Maxwell dans l'espace et dans le domaine temporel et non dans le domaine fréquentiel, ce qui conduit à la résolution d'une équation aux différences dans le temps et le passage au domaine fréquentiel se fait par transformée de Fourier . Cette méthode permet non seulement de calculer les diagrammes de bandes mais aussi de simuler l'évolution temporelle du champ électromagnétique se propageant dans les structures à cristaux photoniques, ce qui permet d'avoir des informations sur de nombreuses autres grandeurs comme le vecteur de Poynting ou l'énergie électromagnétique stockée. Par contre, elle exige une excellente résolution qui Chapitre II : L'outil numérique de simulation (FDTD-2D). Nécessite des moyens de calcul et des mémoires informatiques importantes, ce qui oblige à réduire la taille de l'espace de travail. La méthode FDTD a été retenue en raison de sa simplicité d'utilisation et d'implémentation d'une part et de son adéquation à la simulation des structures miniaturisées d'autre part. De plus, elle opère directement dans le domaine temporel.

3.1.2 La méthode des ondes planes (PWE)

La décomposition en ondes planes, communément appelée PWE (Plane Wave Expansion), est sans aucun doute la méthode la plus utilisée par la communauté scientifique travaillant dans les domaines de la photonique, pour lesquels les systèmes étudiés sont généralement périodiques. Elle s'est imposée comme l'un des outils de modélisation privilégiés des cristaux photoniques et figure, par ailleurs, parmi les

premiers formalismes à avoir été employés afin de mettre théoriquement en évidence l'existence de bandes interdites photoniques. La PWE est une méthode vectorielle qui traite le problème électromagnétique macroscopique en appliquant une périodicité aux conditions aux limites.

Le théorème de Bloch permet de décomposer le champ magnétique ou électrique sur une base d'ondes planes et de transformer la résolution des équations de Maxwell en un problème classique de diagonalisation de matrice (calcul de valeurs et vecteurs propres). Cette méthode est essentiellement utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques, elle permet aussi de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie ainsi que distribution du champ pour les modes d'une structure à cristal photonique.

3.2 Band SOLVE

BandSOLVE est un module de simulation pour la génération et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Ce module de simulation utilise la méthode des ondes planes pour calculer les bandes interdites structures périodique.

BandSOLVE est idéal pour la réalisation de structures de bande pour les structures à bande interdite photonique classique tels que des guides d'ondes 2D et 3D à cristal photonique, des sites de défauts. En outre, il peut être appliqué à des structures de fibres tels que les fibres à cristal photonique et des fibres à bande interdite photonique, qui sont particulièrement difficiles pour les autres techniques de simulation.

En particulier, BandSOLVE est particulièrement utile pour l'optimisation des propriétés de structure de bandes des cristaux photoniques, qui sont ensuite simulées dans le FullWAVE d'examiner la propagation de la lumière dans les matériaux BIP.

3.3 Fullwave

Le moteur de simulation FullWAVE est une partie de Rsoft photonique, Il est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Il calcule le champ électromagnétique en fonction du temps et de l'espace dans une structure d'index donné en réponse à une excitation électromagnétique donnée. Le FullWAVE est idéal pour étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques.

3.4 Présentation du simulateur RSoftCAD

RSoft CAD Environment™ est le programme principal de RSoft Photonic Device Tools et permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception de dispositifs de guide d'ondes, de circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Il agit comme un programme de contrôle pour les modules d'appareils passifs de RSoft, y compris BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD, DiffractMOD, FemSIM et ModePROP, et définit l'entrée importante requise par ces programmes : les propriétés des matériaux et la géométrie structurelle de l'appareil à étudier.

3.4.1 La création de la structure étudiée

Dans l'interface de CAD, on choisit (Utility/Array layout) la disposition 2D XZ sur menu de CAD et on place les paramètres comme la montre sur la figure 3.1).Après l'introduction des différentes données

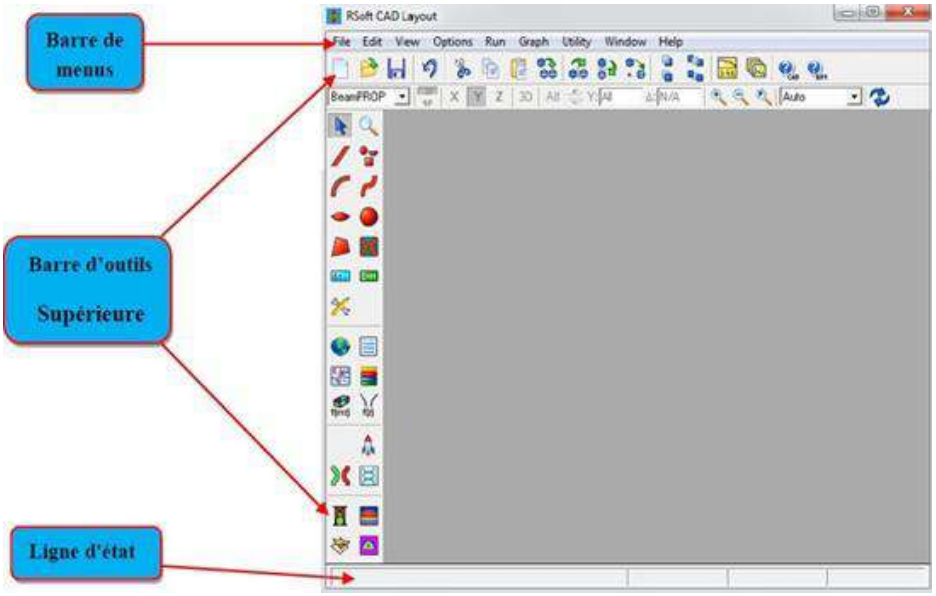
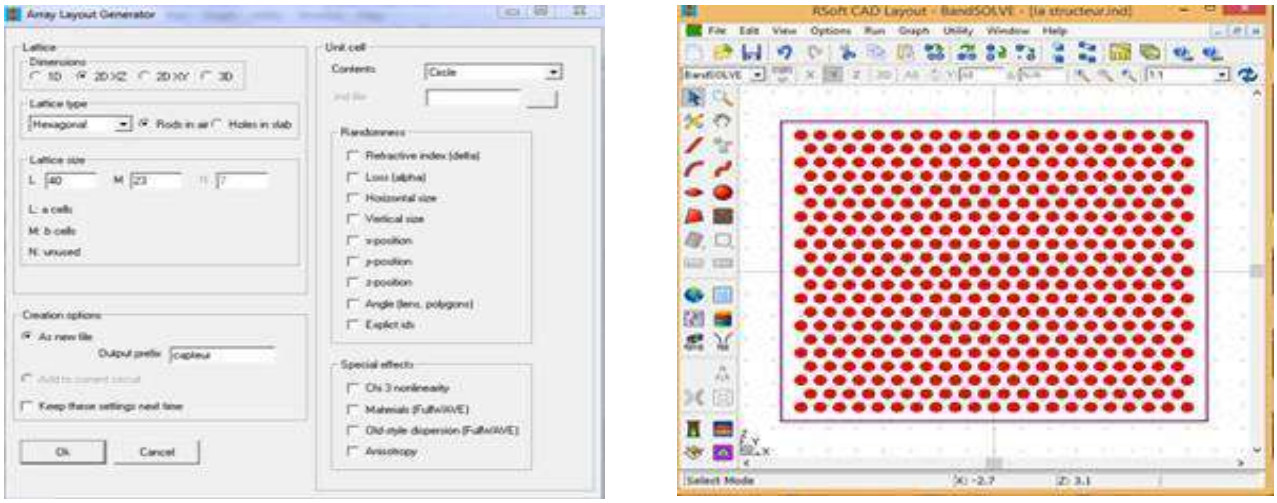


Figure 3.1 – Interface graphique du Logiciel Rsoft.

(type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton OK pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la figure 3.2b.



(a) **(b)**

Figure 3.2 – (a) Fenêtre initiale de personnalisation des paramètres de structure, (b) La structure initiale.

3.4.2 Création d'un guide d'onde

Nous considérons dans cette section un guide d'onde à cristaux photoniques W_1. Il est formé en enlevant une rangée de trous dans la direction ΓK du réseau triangulaire.

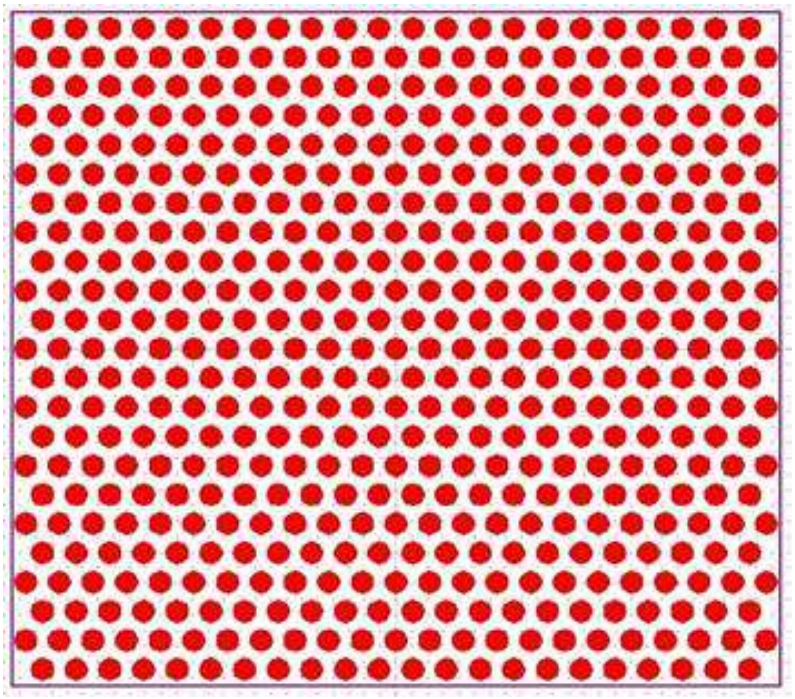


Figure 3.3 – La structure initiale avant de retirer les trous.

3.4.3 Personnalisation du réseau

Le bouton global d'arrangements d'édition permet de définir les propriétés du réseau. Dans cet exemple, nous allons créer les trous dans l'air circulaires (n=1) plongés dans un diélectrique Si n_{Si} =3.42, et la longueur d'onde de l'espace libre est de 1.55µm (voir Figure 3.4)

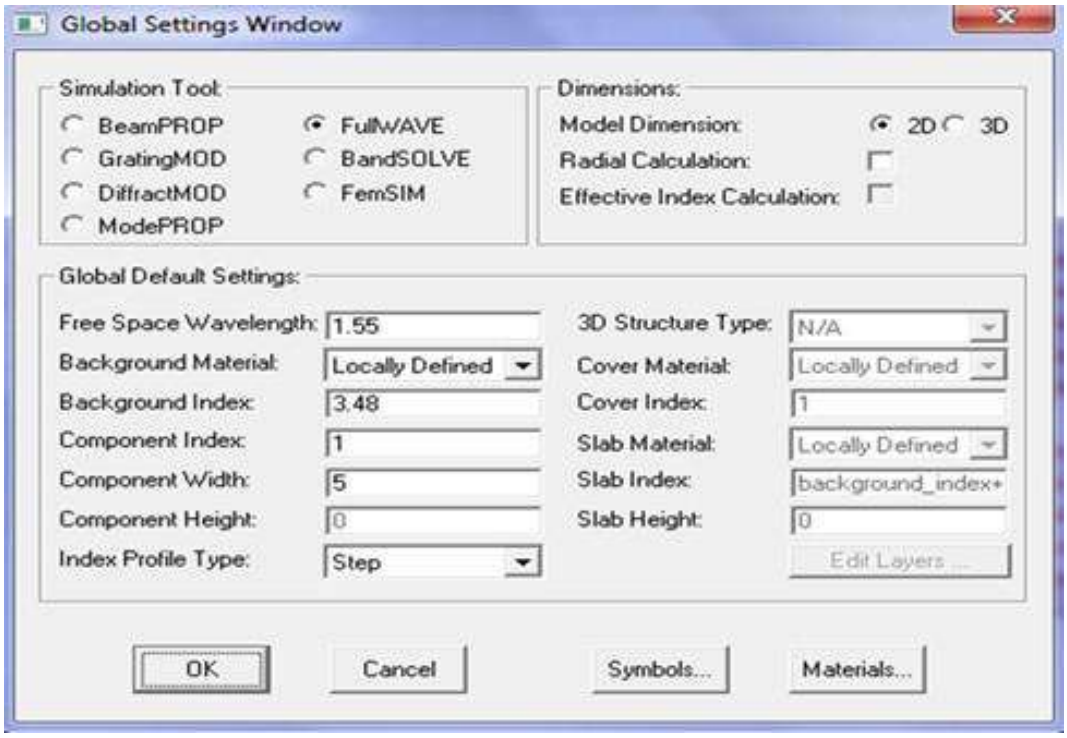


Figure 3.4 – Fenêtre des paramètres globales de structure.

3.4.4 Créer des variables

On clique sur l'icône de symboles d'édition dans la fenêtre de CAD. Ceci ouvrira (symbole Table Editor) comme montré dans la figue 3.5. Cette fenêtre nous donnera la possibilité de varier la période a et le rayon r.

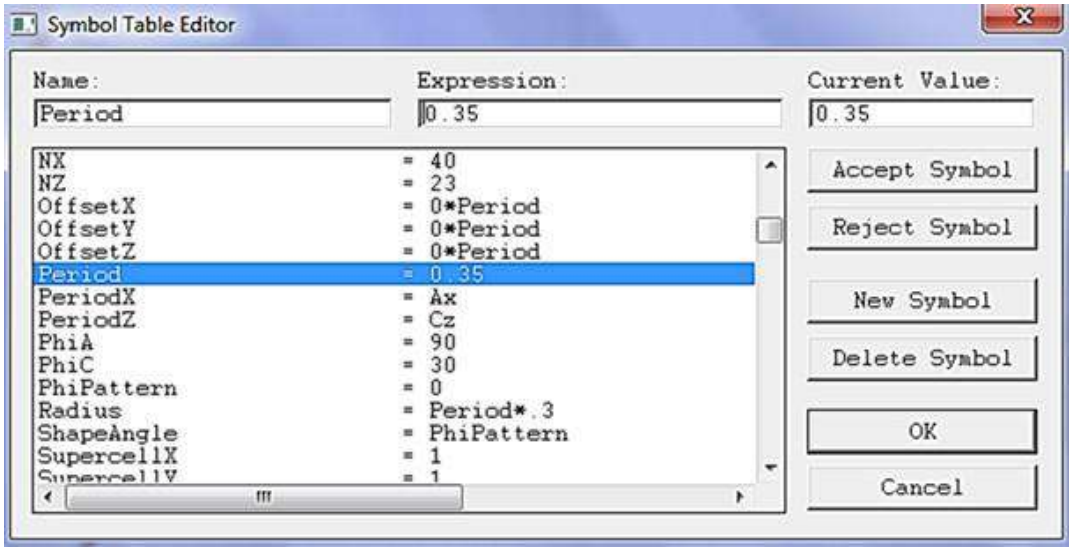
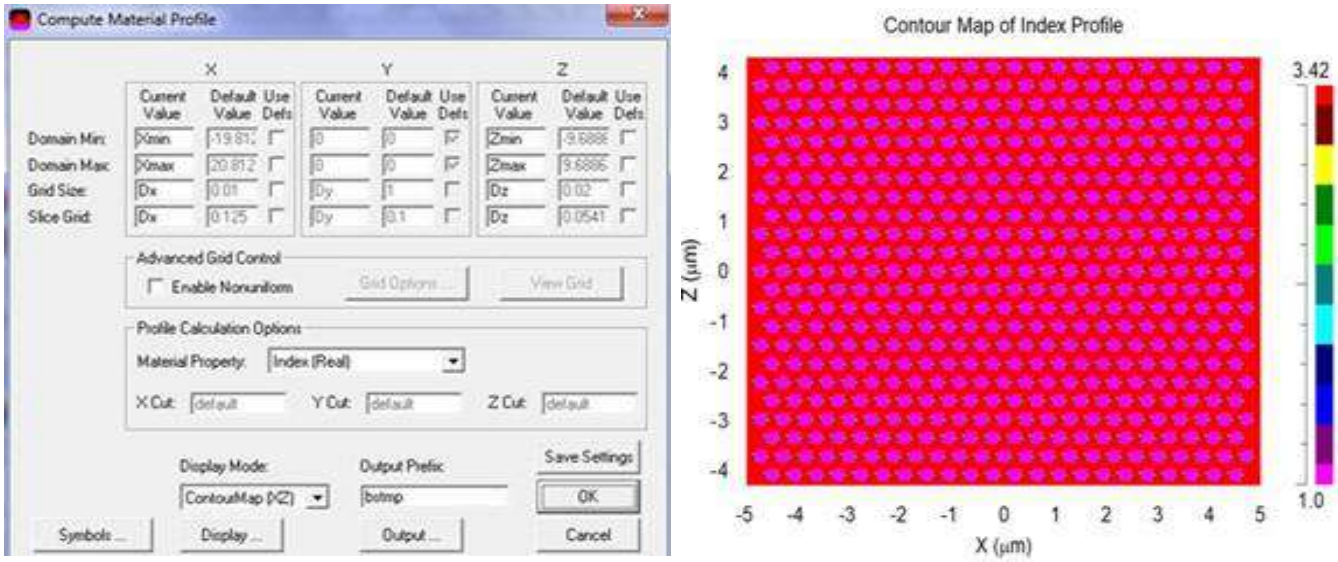


Figure 3.5 – Fenêtre des tables de symboles.

3.4.5 Vérification du profil d'index

Pour vérifier la distribution d'indexe de la structure qu'on a créé. On appuie sur le bouton de profil d'index .La structure obtenue est sur la figure 3.6



(a) **(b)**

Figure 3.6 – (a) Fenêtre des paramètre de simulation, (b) La représentation du modèle en montrant les différents indices de réfraction.

3.4.6 Présentation des autres applications

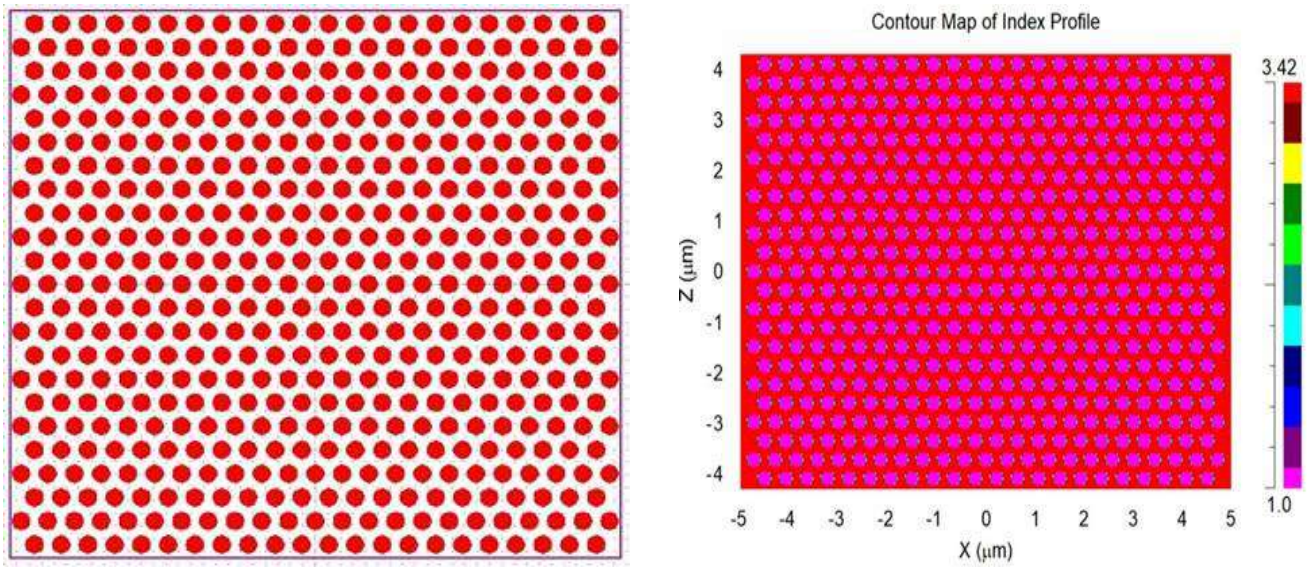
— **COMPUTE FUNDAMETAL MODE (mode fondamentale de calcule) :** Cette option permet a l'utilisateur de calculer le mode fondamentale du circuit. Noté que des modes d'ordre plus supérieur peuvent être calculés par l'intermédiaire de l'option de menu Run.

— **PERFORME SIMULATION (Effectuer La simulation) :** Cette option ouvre la boite de dialogue du paramètre de simulation (simulation paramètres) ou l'utilisateur peut indique des paramètres de simulations avant de l'effectuer.

— **LAUNCH DATA BROWSER :** Cette option ouvre le RSOFT data browser.

3.5 Description de la structure étudiée

Dans ce qui va suivre, nous allons étudier le cas des cristaux photoniques bidimensionnels membranaires à réseau de trous d'air (23 × 23) dans un diélectrique à fort indice (n_{Si} =3.42), il s'agit d'un réseau à maille hexagonal.



(a) **(b)**

Figure 3.7 – (a) Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 23×23. (b) Distribution de l'indice de réfraction d'un cristal photonique hexagonal.

3.6 Paramètres de la structure étudiée

Les propriétés des cristaux photoniques sont théoriquement décrites par leurs structures de bandes interdites photoniques. Le calcul et l'évolution des diagrammes de ces bandes sont déterminés par la méthode des ondes planes. Tandis que pour la transmission, elle est calculée par la méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD-2D. En ce qui concerne le réseau, notre choix s'est orienté vers le réseau triangulaire de trous d'air. Pour des raisons de symétrie, ce dernier présente la plus large bande interdite photonique.

Dans un premier temps, Nous avons utilisé le logiciel de simulation (BandSOLVE de RSoft basé sur la méthode des ondes planes PWE) pour optimiser les premières bandes interdites (TE et TM) en fonction du rayon *R*. Nous considérons un réseau triangulaire de trous d'air dans une membrane de Silicium (*n*=3.42 et *a* la période du réseau est de 0.43 µm, la période étant fixée de façon à obtenir une bande interdite pour au moins une polarisation à des longueurs d'onde d'intérêt).Dans ce travail, les conditions de PML sont parfaitement prises en compte dans les calculs afin d'éviter toute réflexion à la limite de la région analysée [**72**]. Avant d'examiner les caractéristiques de la structure en termes de transmission, il est judicieux de présenter le diagramme de bandes de la structure sans défaut car d'un point de vue matériau, il faut s'assurer de l'existence d'une bande interdite photonique suffisamment large : celle-ci n'existe que pour des contrastes d'indice suffisamment élevés.

3.7 La bande interdite photonique

Un facteur de remplissage *f* élevé peut poser des problèmes techniques : en effet, plus le facteur de remplissage est élevé, compte tenu de la production imprécise de composants de ces tailles, plus la possibilité de chevauchement de motifs est grande. Le choix optimal du rayon *R* est donc fixé à 0,14 µm pour un facteur de remplissage *f* =33%.

La Figure 3.8a : (a) présente le diagramme de bande calculé par la méthode des ondes planes (méthode PWE) a l'aide de simulateur Bandsolve, pour un réseau 2D triangulaire, ccomme source de lumière, nous utilisons une onde plane de type gaussienne. Dans ces conditions, le cristal étudié présente une large bande interdite centrée autour d'une fréquence normalisée a/λ de 0.25975. Cette bande est en mode TM comprises entre les deux fréquences normalisées 0.2162 et 0.3033 qui correspondant à une longueur d'onde de 1.988 µm à 1.417 µm.

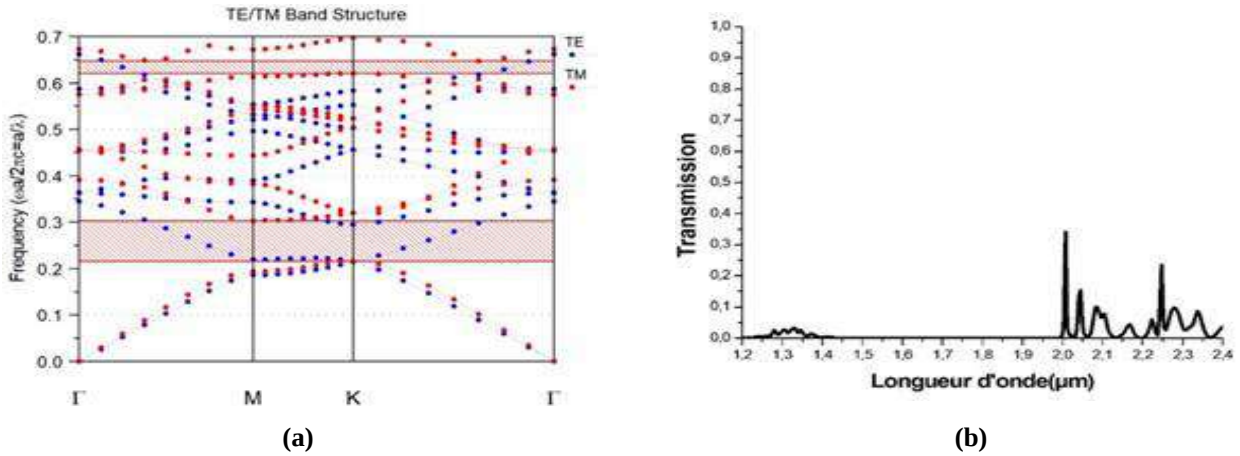
La Figure 3.8b présente la présentation du spectre de transmission calculé par la méthode FDTD fait par le logiciel FullWave de RSoft

— a=0.430 µm, R=0.14 µm

— a/λ_1=0.2162, λ_1 =0.430/0.2162 = 1.988 µm

— a/λ_2 =0.3033, λ_2 =0.430/0.3033 = 1.4177µm

1.417 < λ < 1.988 µm



(a) **(b)**

Figure 3.8 – (a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau hexagonal de trous d'air, a=0.430, r=0.14, f=33%.) calculé par la PWE. (b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D.

3.8 Création d'un guide d'onde

Nous considérons dans cette section un guide d'onde à cristaux photoniques $W_1^K A$. Il est formé en enlevant une rangée de trous dans la direction ΓK du réseau triangulaire (Figure 3.9)

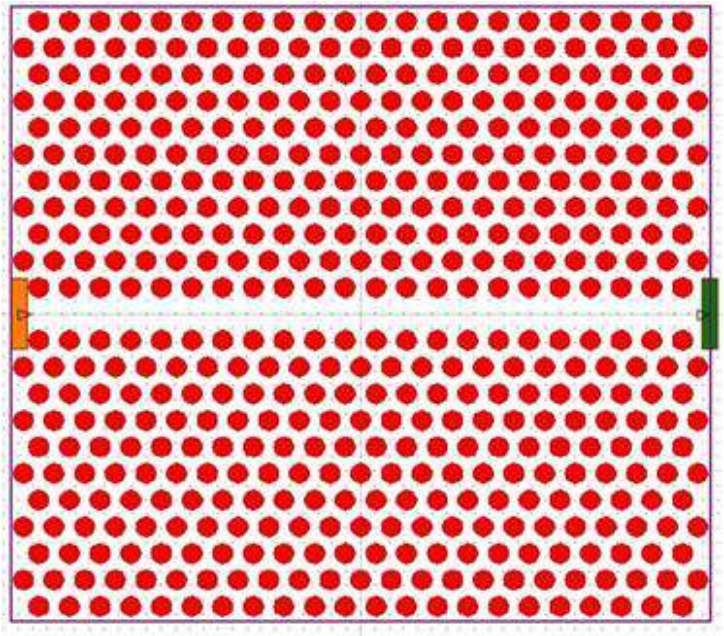
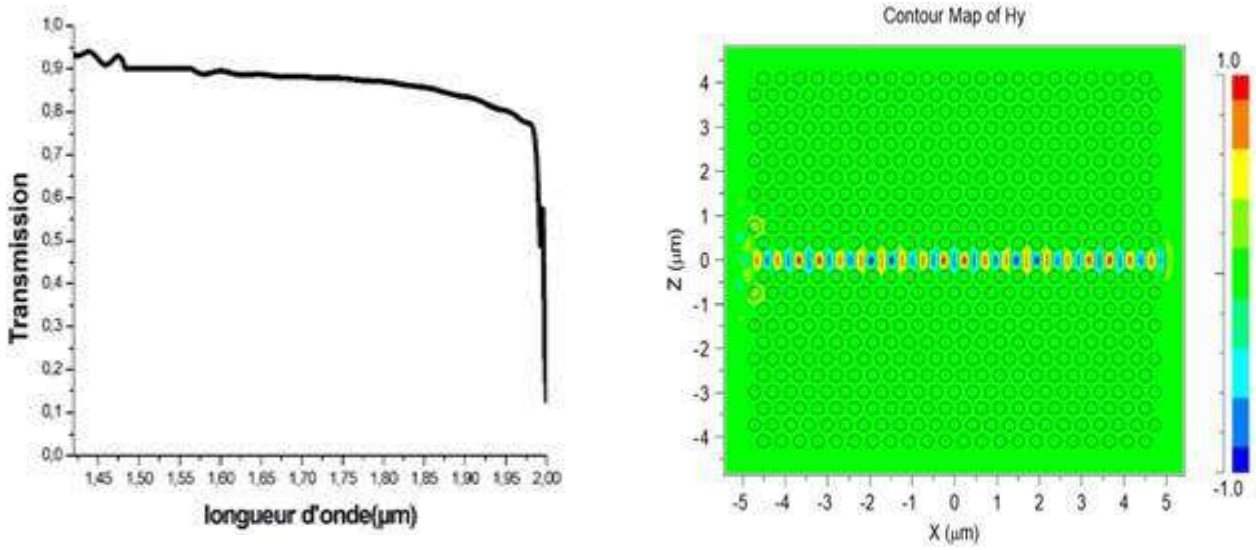


Figure 3.9 – Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde).



(a) **(b)**

Figure 3.10 – (a) Spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TM. (b) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence W1, pour une polarisation TM à λ=1.55µm.

Un calcul FDTD fait par le logiciel FullWave de RSoft, permet de tracer le spectre de transmission (Figure 3.10a), une large transmission du guide droit W_1 est observée s'étalant sur plus de 600nm et elle

est de 92 %. On s'est limité dans ce cas à la région spectrale de la bande interdite du cristal 2D calculée précédemment. (BIP entre 1417 nm à 1988 nm).

Issue du calcul FDTD, la (Figure 3.10b) représente la distribution spatiale d'une excitation de type continue (CW) à une longueur d'onde de 1.55µm (longueur d'onde permise) pour la polarisation TM du guide droit W_1. Nous constatons que le champ est bien confiné et l'allure de sa distribution démontre clairement l'existence du phénomène de guidage de la lumière le long du guide W_1.

3.9 Conception d'un premier capteur à base de cavité en configuration anneaux

3.9.1 Description de la structure étudiée

Le dispositif proposé se compose d'un système de deux guides d'ondes couplés à une cavité (figure 3.11). Les deux guides d'ondes sont obtenus en enlevant une rangée de trous d'air dans la direction x. Ils sont utilisés pour coupler la lumière dans et hors la cavité à CPh. La cavité consiste en des trous en forme d'anneau gravés dans la couche de Si. Il faut noter que cette configuration des trous en forme d'anneau offre non seulement plus de flexibilité en termes de conception par rapport aux configurations circulaires classiques, mais augmente également le confinement du champ optique et donc les interactions lumière-analyte dans la zone annulaire à faible contraste d'indice [**73**]. Les paramètres des trous en forme d'anneau sont définis par leurs rayons internes et externes R_{in}= 50 nm et R_{out}= 140 nm respectivement. La région d'air annulaire est donnée par R_{out}-R_{in}= 90 nm. L'ensemble du système de la cavité est séparé des guides d'ondes d'entrée et de sortie par trois trous.

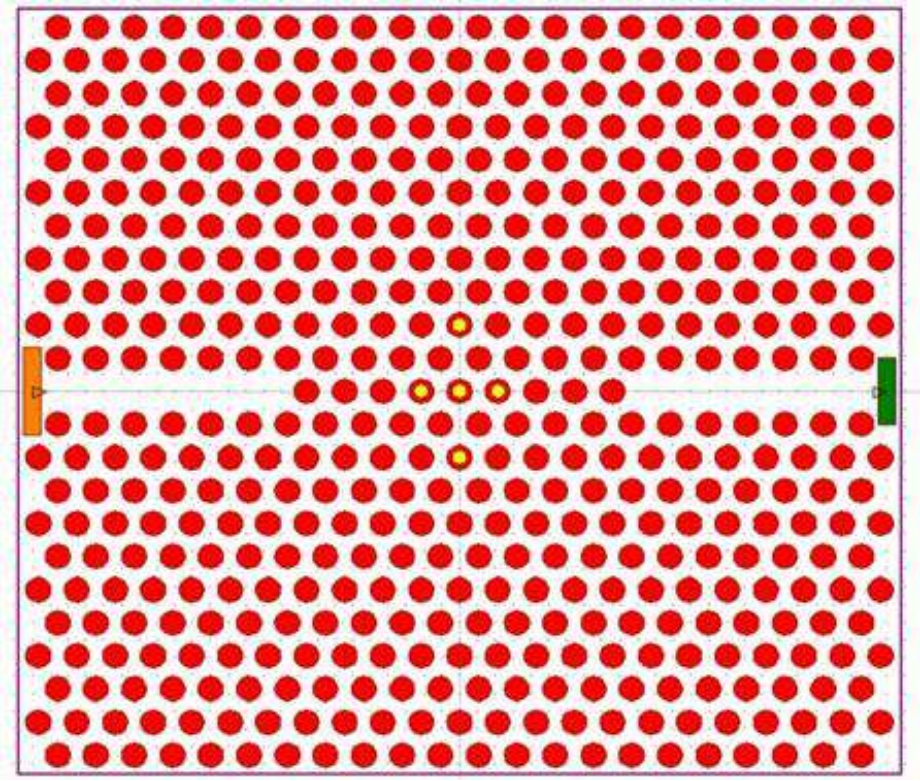
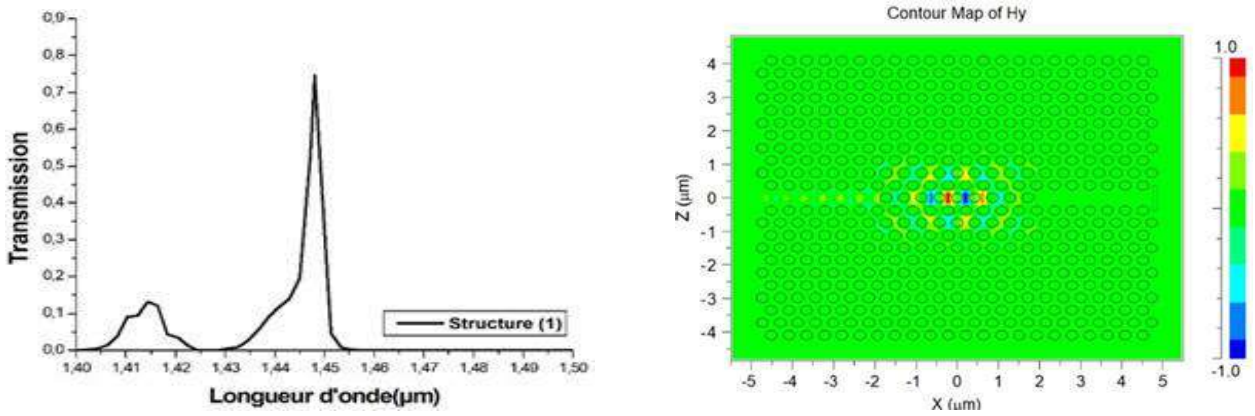


Figure 3.11 – Structure d'un couplage cavité/guide (1$^{e`re}$ structure).

Dans le processus de simulation, une impulsion gaussienne polarisée TM, couvrant toute la plage de fréquences d'intérêt, est injectée dans le port du guide d'entrée pour exciter les modes de la cavité. Un moniteur de puissance est placé à la fin du guide d'onde de sortie pour mesurer le signal transmis. Afin d'améliorer la précision de la simulation, l'analyse 2D- FDTD du logiciel commercial RSoft a été réalisée avec une grille de pas 0,01. La lumière d'excitation se propage dans le premier guide et se couple au deuxième à travers la cavité. Cette lumière est ensuite détectée à la sortie du guide d'ondes. Via la cavité ce type de couplage permet d'extraire une ou plusieurs fréquences se propageant dans le guide d'entrée. Ces fréquences peuvent par la suite être réorientées, de manière directive, vers le second guide également juxtaposer à la cavité.

3.9.2 Etude de la transmission et de la sensibilité

La figure 3.12 représente le spectre de transmission du système couplé guide /cavité (lorsque l'air est sélectionné comme matériau de sous-détection à l'intérieur des trous) et la distribution du champ magnétique calculé par la méthode FDTD du logiciel Fullwave de la structure (1).



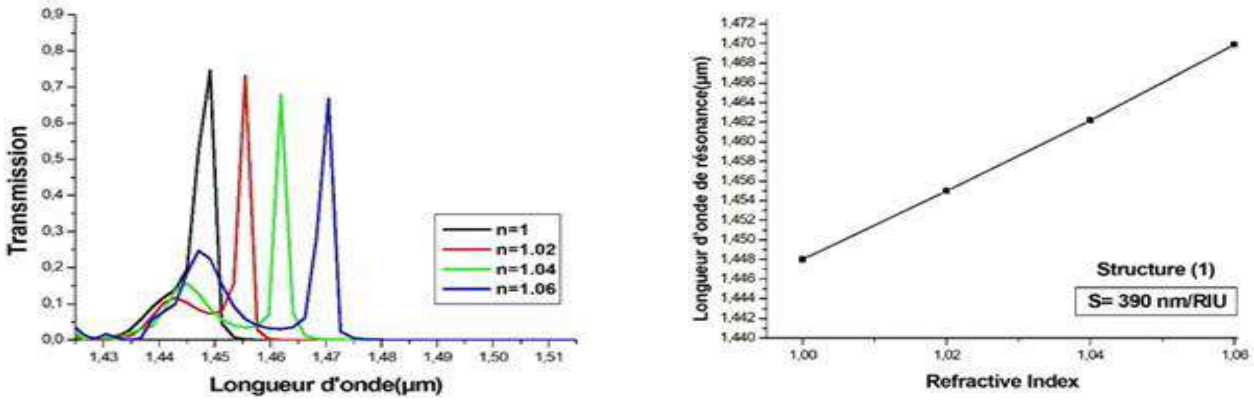
(a) **(b)**

Figure 3.12 – : (a) Spectre de transmission de la structure couplage cavité/guide pour n=1, a=430nm, r=140nm et r_{in}=50nm. **(b)** La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à $\lambda_{rsonance}$ =1.448µm.

Avec les paramètres choisis, une seule résonance apparaît dans la gamme de longueur d'onde choisie. L'interaction entre le guide et la cavité a contribué à la transmission d'un pic étroit à la longueur d'onde de 1.448 µm (figure 3.12a). Dans la figure 3.12b il est clair que la lumière incidente avec la longueur d'onde de 1,448 µm, est couplée au résonateur à cavité et interdite ainsi de passer à travers le guide d'onde. Cela rend la cavité sensible aux changements d'indice de réfraction en raison de la forte interaction lumière-matière.

Notre étude consiste à calculer le spectre de transmission avec la présence d'un liquide dans les trous d'air (élément à analyser), ces spectres sont calculés pour différent indices de réfraction (n=1 jusqu'à n=1.06 avec un pas d'indices de 0.02).

Sur la figure 3.13a, les spectres de transmission de la conception proposée pour différents indices de réfraction variant de 1 à 1,06 sont représentés. On note que l'augmentation de l'indice de réfraction n entraîne un décalage des spectres transmis vers les longueurs d'ondes les plus longues. La figure 3.13b représente la linéarité maintenue entre les longueurs d'onde de résonance et les indices de réfraction.



(a) **(b)**

Figure 3.13 – (a) Le spectre de transmission de la structure (1) pour différents indices de réfraction n à r=140nm, r_{in}=50nm et a= 430 nm. (b) la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction n du matériau à détecter

La sensibilité du capteur est l'un des mérites les plus critiques pour évaluer la fonctionnalité du capteur pour diverses substances en fonction de la variation de l'indice de réfraction. Le but est d'améliorer l'aspect de sensibilité en utilisant diverses conceptions dans un espace limité et d'évaluer les caractéristiques de sensibilité et de transmission les plus efficaces.

Pour calculer la sensibilité *S* du biocapteur RI à CPhs, on calcule le décalage de longueur d'onde de résonance $\Delta\lambda_o$sur la variation de l'indice de réfraction.

$$S = \frac{\Delta_o}{\Delta_n} \tag{3.1}$$

On va classer les résultats obtenus (le changement de la longueur d'onde et la sensibilité *S* en fonction de du changement du l'indice de réfraction) dans le tableau 3.1 suivant :

L'indice de réfraction	Longueur d'onde λ_o (µm)	La sensibilité S (nm/RIU)
1	1.448	.....
1.02	1.455	350
1.04	1.4622	360
1.06	1.4699	385

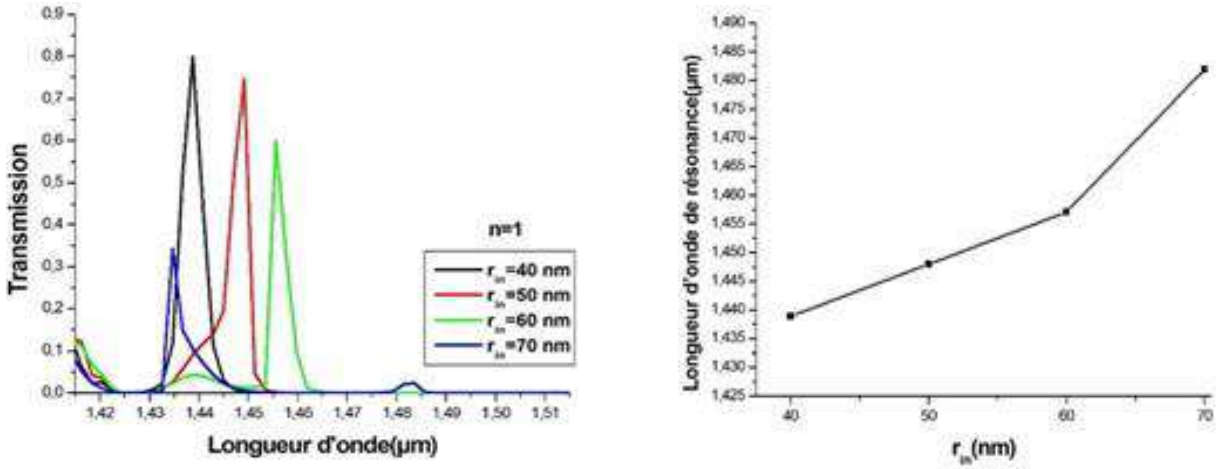
Tableau 3.1 – La longueur d'onde de résonance (λ_o) et la sensibilité (S) en fonction de l'indice de réfraction (RI).

La sensibilité de cette structure est approximativement 365 nm/RIU.

3.9.3 Influence d'un rayon intérieur de l'anneau (R_{in}) sur la sensibilité du biocapteur

Pour étudier l'influence du rayon intérieur de l'anneau R_{in} sur les spectres de transmission du capteur RI à base de cristaux photoniques, le rayon R_{in} est définie comme une variable de 40 nm à 70 nm avec un pas de 10 nm, tout en gardant les autres paramètres structurels fixes. (a = 430 nm, R_{out} = 140 nm et n = 1,0). D'après la figure 3.14a, il est noté que l'augmentation de la valeur R_{in} est associée à une augmentation de la longueur d'onde de résonance. Cela signifie que la valeur de R_{in} provoque un décalage de la longueur d'onde de résonance.

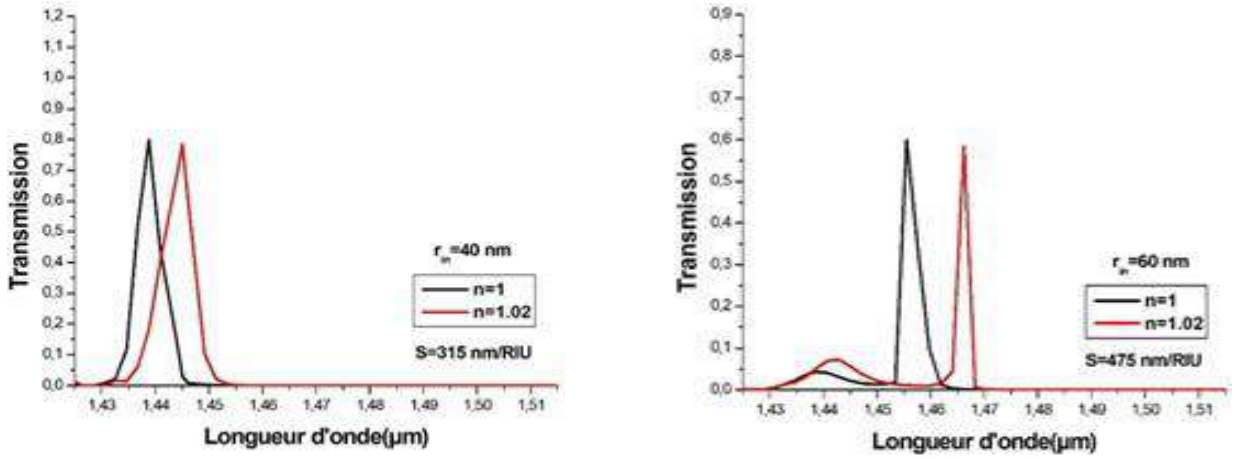
Lorsque le rayon intérieur de l'anneau R_{in}) augmente, nous observons une augmentation de la longueur d'onde de résonance (Figure 3.14b)



(a) **(b)**

Figure 3.14 – (a) Les spectres de transmission de l'indice de réfraction 1 en fonction de r_{in}. (b) Les longueurs d'onde de résonance en fonction de r_{in}.

Sur la figure 3.15a et 3.15b, les spectres de transmission de la conception proposée pour l'indice de réfraction variant de 1 et 1,02 sont représentés. On note que l'augmentation de l'indice de réfraction *n* entraîne un décalage des spectres transmis vers les longueurs d'ondes les plus longues, avec un décalage plus important en R_{in} =60 nm en comparaison au R_{in} =40 nm.



(a) **(b)**

Figure 3.15 – Le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n à r_{in}=40nm (a), r_{in}=60nm (b).

R_{in}=40nm.

l'indice de refrection	longueur d'onde λ_o (µm)	La sensibilité S (nm/RIU)
1	1.438	…….
1.02	1.4443	315

Tableau 3.2

R_{in}=60.

l'indice de refrection	longueur d'onde λ_o (µm)	La sensibilité S (nm/RIU)
1	1.4585	…….
1.02	1.468	475

Tableau 3.3

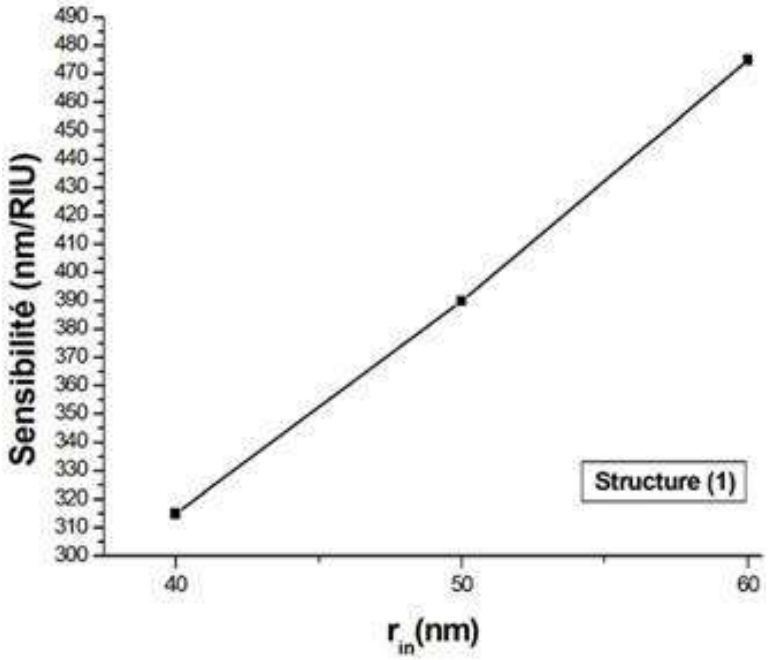


Figure 3.16 – La sensibilité en fonction du rayon interne r_{in} des anneaux.

D'après la figure 3.16, il est clairement noté que l'amélioration de la sensibilité du capteur est obtenue en augmentant la valeur de R_{in} , la sensibilité est de 475 nm / RIU est obtenue correspondant à la valeur de R_{in} = 60 nm, par rapport à la sensibilité de 315 nm / RIU, où la valeur de R_{in} était de 40 nm, il est clairement montré que plus la valeur de R_{in} est élevée, meilleures sont les performances du capteur.

3.10 Conception d'un deuxième capteur à base de double cavité en anneaux

L'amélioration des performances d'un capteur et l'augmentation de ses capacités à détecter les petites concentrations d'analyte et les variations dans ce dernier, dépendent fortement de l'amélioration et du renforcement du confinement de la lumière au sein de la zone de détection. Cela favorise l'interaction lumière analyte à l'emplacement précis du milieu de l'analyte. Par conséquent, la sensibilité et le facteur Q peuvent être améliorés de manière significative. Dans ce contexte, nous présentons la conception et la modélisation d'un capteur à CPh basé sur une double cavité en anneaux. Cette dernière, fournit un excellent confinement optique dans la région de détection, ce qui améliore les interactions lumière- matière à l'emplacement précis de l'analyte. Ainsi, la sensibilité et le facteur de qualité peuvent être améliorés de manière significative. Le dispositif est potentiellement utilisé pour la détection de température.

3.10.1 Description de la structure étudiée

Le dispositif proposé se compose d'un système de deux guides d'ondes couplés à une double cavité en anneaux (figure 3.17). Les paramètres des trous en forme d'anneau sont définis par leurs rayons internes et externes R_{in} = 60 nm (R_{in} est fixé avec la meilleure valeur précédemment trouvée de 60 nm pour la prochaine analyse) et R_{out} = 140 nm respectivement. La région d'air annulaire est donnée par R_{out}-R_{in} = 80 nm.

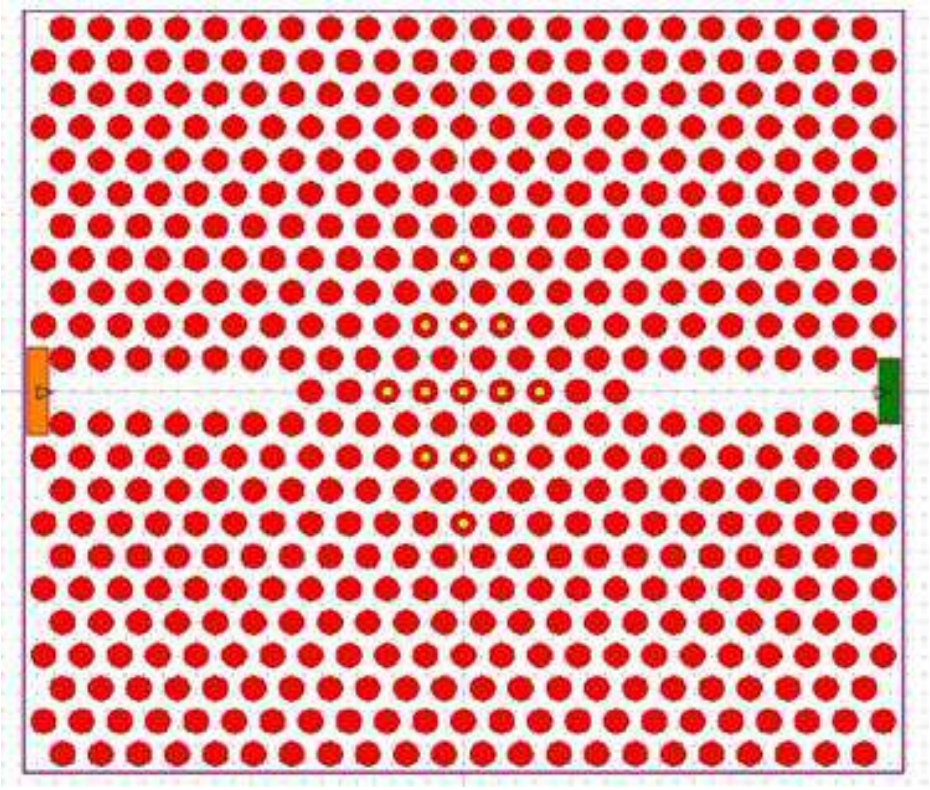
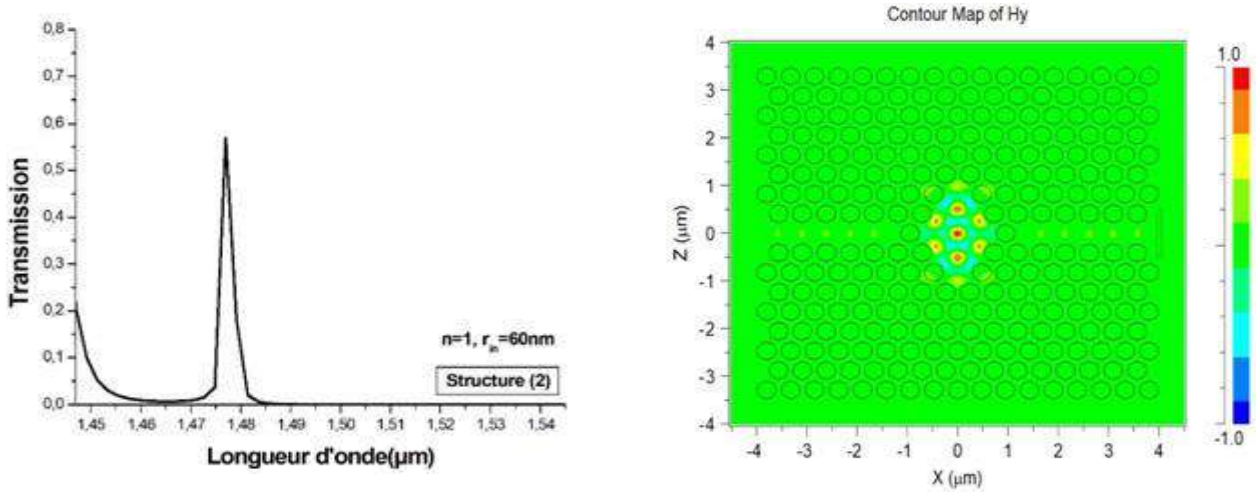


Figure 3.17 – Structure d'un couplage cavité/guide ($2^{e`me}$ structure).

3.10.2 Etude de la transmission et de la sensibilité

La figure 3.18 représente le spectre de transmission du système couplé guide /cavité (lorsque l' ;air est sélectionné comme matériau de sous-détection à l'intérieur des trous) et la distribution du champ magnétique calculé par la méthode FDTD du logiciel Fullwave de la structure (2). Avec les paramètres choisis, une seule résonance apparaît dans la gamme de longueur d'onde choisie. L'interaction entre le guide et la double cavité a contribué à la transmission d'un pic étroit à la longueur d'onde de 1.477 µm (figure 3.18a). Dans la figure 3.18b il est clair que la lumière incidente avec la longueur d'onde de 1,477 µm, est couplée au résonateur à cavité et interdite ainsi de passer à travers le guide d'onde, sur cette figure on peut clairement

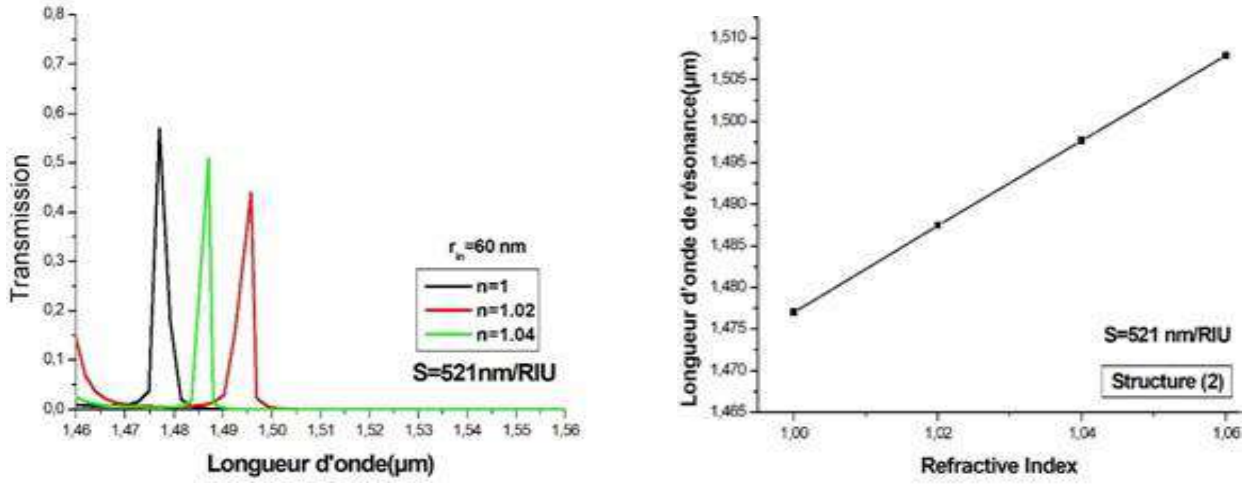
voir que le champ est fortement confiné dans la zone annulaire de la cavité et il est plus renforcé que la première structure. Cela rend la cavité très sensible aux changements d'indice de réfraction en raison de la forte interaction lumière-matière.



(a) **(b)**

Figure 3.18 – (a) Spectre de transmission de la structure couplage cavité/guide pour n=1. (b) La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à $\lambda_{re'sonnance}$ =1.477µm.

La Figure 3.19a présente le spectre de transmission du capteur pour trois indices de réfraction variant de 1 à 1,04, On constate que les décalages de la longueur d'onde de résonance λ_o augmentent avec l'augmentation de l'indice de couverture du milieu RI. Selon la figure 3.19b, qui représente la relation entre les longueurs d'onde de résonance et les indices de réfraction (*n* variant de 1 à 1,06), il est clairement montré que la linéarité est maintenue entre les longueurs d'onde de résonance avec indice de réfraction. Ce qui est plus important est la sensibilité obtenue des deux structures des capteurs, on voit clairement que l'existence d'une double cavité en anneaux dans la structure (2) entraîne une augmentation de la sensibilité du dispositif de 521 nm / RIU par rapport à 475 nm / RIU dans la structure (1).



(a) **(b)**

Figure 3.19 – (a) Le spectre de transmission de la structure (2) pour différents indices de réfraction n à r=140nm, r_{in}=60nm et a= 430 nm. (b) la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction n du matériau à détecter.

La sensibilité de cette structure est approximativement 521 nm/RIU.

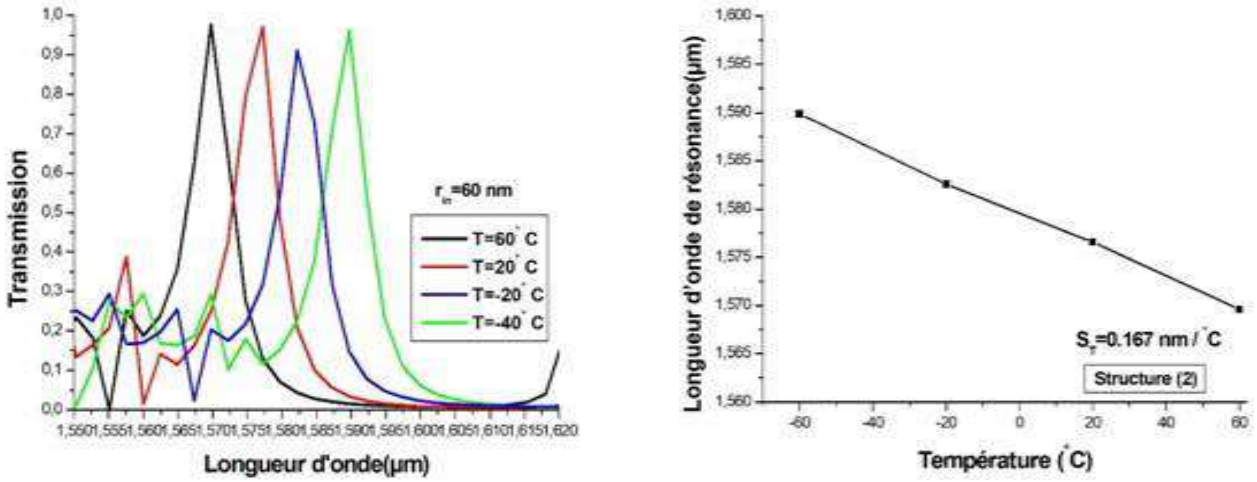
3.11 Exemple d'application biocapteur de température

Comme exemple d'application de la dernière structure optimisée, nous étudierons, le capteur de température. Le dispositif conçu est approprié pour être utilisé comme un capteur de température à l'échelle nanométrique, avec une méthode de réglage de la température. Un liquide, l'éthanol, avec un coefficient de température RI élevé (c'est-à-dire = 3,94 10^{-4}) peut être injecté dans les cavités annulaires pour servir de capteur de température. L'IR de l'éthanol peut être défini comme [**74**] :

$$n = 1.36048 - 3.94 \times 10^{-4}(T - T_o) \qquad (3.2)$$

Ici, T_o (température ambiante) est réglée sur 20°C [**74**] et T est la température ambiante allant de -60 à 60 degrés Celsius avec un pas de 40°C degrés (changement de RI de T =1.34472 à 1.392). La relation linéaire entre n et T est illustrée dans l'équation (4). La sensibilité du capteur de température est spécifiée comme . La figure 3.20a illustre le spectre de transmission du capteur proposé à différentes températures ambiantes (T), les autres paramètres restants inchangés par rapport à la figure 3.19. Le pic se déplace vers des longueurs d'onde plus courtes lorsque la température est augmentée de -100°C à 60°C (par incréments de 40°C), comme le montre la figure 3.20a. Cependant, la figure 3.20b montre une relation linéaire entre les positions des pics de transmission et les

fluctuations de température. De plus, la sensibilité à la température du capteur peut être calculée à 0,167 nm/°C.



(a) **(b)**

Figure 3.20 – (a) Transmission du capteur de température (structure 2) pour différents RI de 1.34472 à 1 .392 correspond une variation de température de 60°C à -60°C respectivement. (b) Longueur d'onde de résonance du capteur de température en fonction de la température.

3.12 Comparaison du capteur RI proposé avec différents designs à bases CPs

Références	Sensibilité (nm/RIU)	L'année
[**75**]	330	2008
[**76**]	240	2011
[**77**]	293	2012
[**78**]	425	2015
Dans ce travail	510	2021

Tableau 3.4

Conclusion

Dans le chapitre 3 nous avons introduit une structure du capteur, basée sur couplage de guide et une cavité en anneaux. A base de simulateur fullwave nous avons clairement vu que le champ est fortement confiné dans la zone annulaire de la cavité. Une étude a été faite pour le changement de la longueur d'onde et la sensibilité *S* en fonction de du changement du l'indice de réfraction, ensuite nous avons trouvé que cette structure a permis d'obtenir sensibilité acceptable (475 nm / RIU). Afin d'améliorer la sensibilité du notre capteur ; nous avons proposé une nouvelle conception à base de double cavité en anneaux, Cette structure a permis d'augmenter la sensibilité à 521 nm / RIU. Enfin nous avons montré que ce dispositif peut être destiné à la détection de température avec une sensibilité très prometteuse (0,167 nm/°C).

Conclusion générale

Après l'étude menée dans les chapitres mentionnés précédemment, nous pouvons conclure les résultats suivants :

— Les cristaux photoniques sont des structures très marquantes en tant qu'une plateforme de détection optofluidique à cause de leur caractéristique intéressante qui lui permet d'infiltrer un fluide dans des trous qu'ils possèdent naturellement, et c'est la raison pour laquelle on est intéressé particulièrement par les capteurs à RI(refractive index).

— L'application de ce type des capteurs est très vaste en mentionnant le domaine médicale, mesure de température, d'humidité, détection d'ADN, détection des protéines, détection des cellules et des bactéries.

— Le CP dispose d'un large éventail de détection, ce qui le rend applicable dans une large gamme dynamique des mesures RI s'étendant de l'air jusqu'aux fluides très visqueux comme l'huile ou les polymères.

Au début de ce travail nous avons fixés un but qui été la réalisation d'un capteur de température à base de structure à cristaux photonique ayant une haute sensibilité et pour cela nous avons divisé notre projet de fin d'études en trois parties principales :

Le premier chapitre est conçu pour les capteurs, nous avons fait une étude des caractéristiques générales et des principes de fonctionnement de différents type de ce dernier. Puis on s'est focalisés sur les capteurs à base des cristaux photoniques.

Ensuite, dans le $2^{e`me}$ chapitre nous avons parlés des cristaux photoniques en temps que théorie et concept, leurs principes de base, leurs définitions, leurs différents types et leurs principes de fonctionnement.

Finalement, Le $3^{e`me}$ chapitre a été consacré à la partie logiciel et l'interprétation des résultats obtenus ,dans ce chapitre nous avons fait une présentation du logiciel Rsoft cad et détailler ses modules de simulation, nous avons aussi montré les étapes suivis pour la conception du capteur désiré.

En effet, les résultats que nous avons obtenus avec notre structure pour la conception du capteur de température sont très satisfaisants avec une efficacité et une sensibilité très importantes.

Enfin, nous incitons les PFEs des promotions à venir, à effectuer d'autre types d'optimisation de cette structure comme par exemple optimiser les dispositions et les longueurs des guides d'ondes d'entré et de sortie, afin de garantir un meilleur couplage entre la source et la cavité, cela d'une part. D'autre part, tenter d'améliorer le rendement de capture de la cavité résonante que nous avons utilisés.

Bibliographie

[1] Shinji Matsuo, Akihiko Shinya, Chin-Hui Chen, Kengo Nozaki, Tomonari Sato, Yoshihiro Kawaguchi, Hideaki Taniyama, and Masaya Notomi. 20-gbit/s directly modulated photonic crystal nanocavity laser with ultra-low power consumption. *Optics Express*, 19(3) :2242–2250, 2011.

[2] E Yablonovitch. Photonic band-gap crystals. *Journal of Physics : Condensed Matter*, 5(16) :2443, 1993.

[3] Sami Laid SAOUCHA. *Cristaux photoniques pour la réalisation de capteur de basse pression*. PhD thesis, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.

[4] Feida Bougriou. Etude theorique des materiaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels. 2013.

[5] Ali Bougharouat. Modification de la sensibilité d'un qcm (quartz cristal microbalance) par le dép ? t dessus de films minces élaborés par le plasma à partir de vapeurs de teos. 2009.

[6] Nicholas Lagakos, JH Cole, and Joseph A Bucaro. Microbend fiber-optic sensor. *Applied optics*, 26(11) :2171–2180, 1987.

[7] Daniele Inaudi, Samuel Vurpillot, and Sandra LLoret. In-line coherence multiplexing of displacement sensors : a fiber optic extensometer. In *Smart Structures and Materials 1996 : Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, volume 2718, pages 251–257. International Society for Optics and Photonics, 1996.

[8] Georges Asch. coll., les capteurs en instrumentation industrielle. *Ed. Dunod*, 2006.

[9] Silvia Fabiano. *Immobilisation d'enzymes dans des films de polymère conducteur : le PEDT. Application à la réalisation de biocapteurs ampérométriques pour le dosage du glucose et de composés phénoliques*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2002.

[10] Christophe Védrine. *Exploitation de signaux biologiques pour la réalisation de capteurs environnementaux. Application à la construction d'un biocapteur à micro-algues immobilisées et d'une bioélectrode à enzyme immobilisée*. PhD thesis, Saint-Etienne, EMSE, 2003.

[11] Céline Chouteau. *Développement d'un biocapteur conductimétrique bi-enzymatique à cellules algales*. PhD thesis, Lyon, INSA, 2004.

[12] Ahlam Harhouz. *Contribution à l'étude et la conception des capteurs à base de cristaux photoniques*. PhD thesis, Université de M'sila, 2017.

[13] Merzoug Ammari and Farida Hobar. *Étude de microcavités à base de cristaux photoniques*. PhD thesis, قسنطينة. منتوري الإخوة جامعة

]**14**] Mindy Lee and Philippe M Fauchet. Two-dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection. *Optics express*, 15(8) :4530–4535, 2007.

[15] Maksim Skorobogatiy and Andrei V Kabashin. Photon crystal waveguide-based surface plasmon resonance biosensor. *Applied physics letters*, 89(14) :143518, 2006.

[16] Marko Lončar, Axel Scherer, and Yueming Qiu. Photonic crystal laser sources for chemical detection. *Applied Physics Letters*, 82(26) :4648–4650, 2003.

[17] MT Myaing, JY Ye, TB Norris, T Thomas, JR Baker Jr, WJ Wadsworth, G Bouwmans, JC Knight, and P St J Russell. Enhanced two-photon biosensing with double-clad photonic crystal fibers. *Optics Letters*, 28(14) :1224–1226, 2003.

[18] Aurelien Duval, Marie Lhoutellier, JB Jensen, PE Hoiby, Valentin Missier, LH Pedersen, Theis Peter Hansen, A Bjarklev, and Ole Bang. Photonic crystal fiber based antibody detection. In *SENSORS, 2004 IEEE*, pages 1222–1225. IEEE, 2004.

[19] Teck-Choon Ayi, Jill Mei-Mei Tong, and Peter Vee-Sin Lee. Optically tunable hydrogel biosensor material. In *Chemical and Biological Sensing VII*, volume 6218, pages 149–156. SPIE, 2006.

[20] Seung-Kon Lee, Gi-Ra Yi, and Seung-Man Yang. High-speed fabrication of patterned colloidal photonic structures in centrifugal microfluidic chips. *Lab on a Chip*, 6(9) :1171–1177, 2006.

[21] SC Buswell, VA Wright, JM Buriak, V Van, and S Evoy. Specific detection of proteins using photonic crystal waveguides. *Optics express*, 16(20) :15949–15957, 2008.

[22] Min Huang, Ahmet Ali Yanik, Tsung-Yao Chang, and Hatice Altug. Sub-wavelength nanofluidics in photonic crystal sensors. *Optics express*, 17(26) :24224–24233, 2009.

[23] Leo L Chan, Saujanya L Gosangari, Kenneth L Watkin, and Brian T Cunningham. High throughput cytotoxicity screening using photonic crystal biosensors. In *TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, pages 799–802. IEEE, 2007.

[24] Edmond Chow, A Grot, LW Mirkarimi, M Sigalas, and GJOL Girolami. Ultracompact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity. *Optics letters*, 29(10) :1093–1095, 2004.

[25] Aicha Bougoufa and Ilham Berbache. *Caractérisation d un capteur thermique basé sur un cristal photonique 1D Avec défaut central de cristalliquide*. PhD thesis, Univ M'sila, 2020.

[26] Eli Yablonovitch, TJ Gmitter, and Kok-Ming Leung. Photonic band structure : The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms. *Physical review letters*, 67(17) :2295, 1991.

[27] Thomas F Krauss, Richard M Rue, and Stuart Brand. Two-dimensional photonic-bandgap structures operating at near-infrared wavelengths. *Nature*, 383(6602) :699–702, 1996.

[28] Deeksha Rani and RS Kaler. *Design and Analysis of All Optical Logic Gates Based On 2-D Photonic Crystals*. PhD thesis, 2015.

[29] Alvaro Blanco, Emmanuel Chomski, Serguei Grabtchak, Marta Ibisate, Sajeev John, Stephen W Leonard, Cefe Lopez, Francisco Meseguer, Hernan Miguez, Jessica P Mondia, et al. Large-scale synthesis of a silicon photonic crystal with a complete three-dimensional bandgap near 1.5 micrometres. *Nature*, 405(6785) :437–440, 2000.

[30] Amel Labbani. *Matériaux BIP à base de nanoparticules métalliques et semiconductrices : étude des propriétés optiques par FDTD*. PhD thesis, Saint-Etienne, 2009.

[31] Zhenfeng Xu, Liangcai Cao, Claire Gu, Qingsheng He, and Guofan Jin. Micro displacement sensor based on line-defect resonant cavity in photonic crystal. *optics express*, 14(1) :298–305, 2006.

[32] José-Philippe Pérez, Robert Carles, Robert Fleckinger, and Robert Lagoute. *Electromagnétisme : fondements et applications avec 300 exercices et problèmes résolus*. Dunod, 2002.

[33] D Maystre. Electromagnetic study of photonic band gaps. *Pure and Applied Optics : Journal of the European Optical Society Part A*, 3(6) :975, 1994.

[34] Yannick Merle. Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels. *PhDthesis, Université de Limoges*, 2003.

[35] BENLAKHDAR Moatazz. *CONCEPTION DES BIOCAPTEURS RI A BASE DES GUIDES D'ONDE A CRISTAUX PHOTONIQUE (PCW)*. PhD thesis, UNIVERSITE DE M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2015.

[36] Robert Farha. *Etude d'une structure à cristal photonique" LOM" gravée dans un guide Ti liNbO3 dopé erbium pour l'émission de la lumière à 1.55* µm. PhD thesis, Evry, Institut national des télécommunications, 2010.

[37] Benoît Lombardet. Etude et réalisation de cristaux photoniques pour l'optique intégrée. Technical report, EPFL, 2005.

[38] D Felbacq and E Centeno. Theory of diffraction for 2d photonic crystals with a boundary. *Optics communications*, 199(1-4) :39–45, 2001.

[39] John D Joannopoulos, Steven G Johnson, Joshua N Winn, and Robert D Meade. Photonic crystals. In *Photonic Crystals*. Princeton university press, 2011.

[40] KM Ho, Che Ting Chan, and Costas M Soukoulis. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Physical Review Letters*, 65(25) :3152, 1990.

[41] Robert D Meade, Karl D Brommer, Andrew M Rappe, and JD Joannopoulos. Photonic bound states in periodic dielectric materials. *Physical Review B*, 44(24) :13772, 1991.

[42] M Sigalas, Costas M Soukoulis, Eleftherios N Economou, Che Ting Chan, and KM Ho. Photonic band gaps and defects in two dimensions : Studies of the transmission coefficient. *Physical Review B*, 48(19) :14121, 1993.

[43] Frederique Gadot. *Modelisation et caracterisation experimentale de materiaux a bandes interdites photoniques (bips) dans le domaine micro-ondes*. PhD thesis, Paris 11, 1999.

[44] Kazuaki Sakoda. *Optical properties of photonic crystals*, volume 80. Springer Science & Business Media, 2004.

[45] Ségolène Olivier. *Nouvelles structures miniatures dans des cristaux photoniques bidimensionnels planaires pour les fonctions de l'optique intégrée*. PhD thesis, Paris 6, 2002.

[46] Chalabi Sara. *Amélioration de la sensibilité d'un capteur à base d'un cristal photonique*. PhD thesis, Faculté des Sciences et Technologies, 2021.

[47] Jonathan C Knight. Photonic crystal fibres. *nature*, 424(6950) :847–851, 2003.

[48] Markus Deubel, Georg Von Freymann, Martin Wegener, Suresh Pereira, Kurt Busch, and Costas M Soukoulis. Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications. *Nature materials*, 3(7) :444–447, 2004.

[49] Philip Russell. Photonic crystal fibers. *science*, 299(5605) :358–362, 2003.

[50] Shanhui Fan, Pierre R Villeneuve, John D Joannopoulos, and Hermann A Haus. Channel drop filters in photonic crystals. *Optics express*, 3(1) :4–11, 1998.

[51] A Gomyo, J Ushida, and M Shirane. Highly drop-efficient channel-drop optical filters with si-based photonic crystal slabs. *Thin Solid Films*, 508(1-2) :422–425, 2006.

[52] Toshihiko Baba. Slow light in photonic crystals. *Nature photonics*, 2(8) :465–473, 2008.

[53] Peter Bermel, Chiyan Luo, Lirong Zeng, Lionel C Kimerling, and John D Joannopoulos. Improving thin-film crystalline silicon solar cell efficiencies with photonic crystals. *Optics express*, 15(25) :16986–17000, 2007.

[54] Alongkarn Chutinan, Nazir P Kherani, and Stefan Zukotynski. High-efficiency photonic crystal solar cell architecture. *Optics Express*, 17(11) :8871–8878, 2009.

[55] Shrestha Basu Mallick, Mukul Agrawal, and Peter Peumans. Optimal light trapping in ultra-thin photonic crystal crystalline silicon solar cells. *Optics Express*, 18(6) :5691–5706, 2010.

[56] Dayu Zhou and Rana Biswas. Photonic crystal enhanced light-trapping in thin film solar cells. *Journal of Applied Physics*, 103(9) :093102, 2008.

[57] Jeffrey S Sakamoto and Bruce Dunn. Hierarchical battery electrodes based on inverted opal structures. *Journal of Materials Chemistry*, 12(10) :2859–2861, 2002.

[58] Huigang Zhang, Xindi Yu, and Paul V Braun. Three-dimensional bicontinuous ultrafast-charge and-discharge bulk battery electrodes. *Nature nanotechnology*, 6(5) :277–281, 2011.

[59] J-F Dechézelles, G Mialon, T Gacoin, C Barthou, Catherine Schwob, Agnès Maître, RAL Vallée, H Cramail, and S Ravaine. Inhibition and exaltation of emission in layer-controlled colloidal photonic architectures. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 373(1-3) :1–5, 2011.

[60] Christoph Fenzl, Thomas Hirsch, and Otto S Wolfbeis. Photonic crystals for chemical sensing and biosensing. *Angewandte Chemie International Edition*, 53(13) :3318–3335, 2014.

[61] Mindy R Lee and Philippe M Fauchet. Nanoscale microcavity sensor for single particle detection. *Optics letters*, 32(22) :3284–3286, 2007.

[62] Preeta Sharan, SM Bharadwaj, Fleming Dackson Gudagunti, and Pooja Deshmukh. Design and modelling of photonic sensor for cancer cell detection. In *2014 International Conference on the IMpact of E-Technology on US (IMPETUS)*, pages 20–24. IEEE, 2014.

[63] Poonam Sharma, Preeta Sharan, and Pooja Deshmukh. A photonic crystal sensor for analysis and detection of cancer cells. In *2015 International conference on pervasive computing (ICPC)*, pages 1–5. IEEE, 2015.

[64] Bryan Ellis, Marie A Mayer, Gary Shambat, Tomas Sarmiento, James Harris, Eugene E Haller, and Jelena Vučković. Ultralow-threshold electrically pumped quantum-dot photonic-crystal nanocavity laser. *Nature photonics*, 5(5) :297–300, 2011.

[65] Adam C Scofield, Se-Heon Kim, Joshua N Shapiro, Andrew Lin, Baolai Liang, Axel Scherer, and Diana L Huffaker. Bottom-up photonic crystal lasers. *Nano letters*, 11(12) :5387–5390, 2011.

[66] Nicolas Bonod and Jérôme Neauport. Design of a full-silica pulse-compression grating. *Optics letters*, 33(5) :458–460, 2008.

[67] Stuart A Boden and Darren M Bagnall. Tunable reflection minima of nanostructured antireflective surfaces. *Applied Physics Letters*, 93(13) :133108, 2008.

[68] Robert D Meade, A Devenyi, JD Joannopoulos, OL Alerhand, DA Smith, and K Kash. Novel applications of photonic band gap materials : Low-loss bends and high q cavities. *Journal of applied physics*, 75(9) :4753–4755, 1994.

[69] Marc Zelsmann. *Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de lumière*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2003.

[70] Cameron LC Smith, Uwe Bog, Snjezana Tomljenovic-Hanic, Michael W Lee, Darran KC Wu, Liam O'Faolain, Christelle Monat, Christian Grillet, Thomas F Krauss, Christian Karnutsch, et al. Reconfigurable microfluidic photonic crystal slab cavities. *Optics express*, 16(20) :15887–15896, 2008.

[71] Daquan Yang, Huiping Tian, and Yuefeng Ji. The properties of lattice-shifted microcavity in photonic crystal slab and its applications for electro-optical sensor. *Sensors and Actuators A : Physical*, 171(2) :146–151, 2011.

[72] Jean-Pierre Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of computational physics*, 114(2) :185–200, 1994.

[73] Hemant Sankar Dutta, Amit Kumar Goyal, and Suchandan Pal. Sensitivity enhancement in photonic crystal waveguide platform for refractive index sensing applications. *Journal of Nanophotonics*, 8(1) :083088, 2014.

[74] Md Jubayer Al-mahmod, Rakib Hyder, and Md Zahurul Islam. Numerical studies on a plasmonic temperature nanosensor based on a metal-insulator-metal ring resonator structure for optical integrated circuit applications. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 25 :52–57, 2017.

[75] Xiaoling Wang, Zhenfeng Xu, Naiguang Lu, Jun Zhu, and Guofan Jin. Ultracompact refractive index sensor based on microcavity in the sandwiched photonic crystal waveguide structure. *Optics Communications*, 281(6) :1725–1731, 2008.

[76] F Bougriou, T Bouchemat, M Bouchemat, and N Paraire. High sensitivity of sensors based on two-dimensional photonic crystal. In *2011 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC)*, pages 1–4. IEEE, 2011.

[77] F Hosseinibalam, S Hassanzadeh, A Ebnali-Heidari, and CJAO Karnutsch. Design of an optofluidic biosensor using the slow-light effect in photonic crystal structures. *Applied optics*, 51(5) :568–576, 2012.

[78] Ahlam Harhouz and Abdesselam Hocini. Design of high-sensitive biosensor based on cavity-waveguides coupling in 2d photonic crystal. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 29(5) :659–667, 2015.

Résumé
Au cours des dernières décennies, Le développement de la photonique a connu un essor considérable. Les cristaux photoniques ont eu un grand rôle dans ce développement.
Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique de l'indice optique entraîne l'apparition de bandes interdites photoniques : gammes de fréquences pour lesquelles la lumière ne peut pas se propager dans la structure, quelque soit sa polarisation et sa direction de propagation.
Dans ce projet nous avons fait la conception d'un capteur à base des cristaux photoniques pour la mesure de température.
Mots clés : cristaux photoniques bidimensionnels – les capteurs - guide d'ondes à CP.

Abstract:
Over the past decades, the development of photonics has grown considerably. Photonic crystals have had a big role in this development.
Photonic crystals are structures whose dielectric index varies periodically along one or more directions in space. This periodic variation of the optical index leads to the appearance of photonic forbidden bands: frequency ranges for which the light cannot propagate in the structure, whatever its polarization and its direction of propagation.
In this project we designed a sensor based on photonic crystals for temperature measurement.

Keywords: two-dimensional photonic crystals - sensors - CP waveguide.

ملخص
في العقود الأخيرة ، شهد تطور الضوئيات طفرة ضخمة. كان للبلورات الضوئية دور كبير في هذا التطور.
البلورات الضوئية هي هياكل يختلف مؤشر عزلها بشكل دوري على طول اتجاه واحد أو أكثر في الفضاء. هذا الاختلاف الدوري للمؤشر البصري يؤدي إلى ظهور النطاقات الممنوعة الضوئية: نطاقات التردد حيث لا يمكن للضوء أن ينتشر في الهيكل ، مهما كان استقطابه واتجاه انتشاره.
في هذا المشروع ، صممنا جهاز استشعار يعتمد على البلورات الضوئية لقياس درجة الحرارة.
الكلمات المفتاحية: البلورات الفوتونية ثنائية الابعاد - اجهزة الاستشعار – مُوجه الموجة في البلورات الفوتونية