

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° : 2018/INST 03/87



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : INSTRUMENTATION

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: SAOUCHA Sami Laid

BENDJOUDI Mohamed Tahar

Intitulé

Cristaux photoniques pour la réalisation de
capteur de basse pression

Soutenu devant le jury composé de:

Me HOUSINI Abdsalam	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Me ZOUACHE Tarek	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
Me OUDIRA Hosin	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

Remerciements

Je remercie Dieu, car il nous a donné la force, le courage et la volonté qui nous ont permis de mener à bien cet humble travail.

Je remercie les superviseurs de *Dr . T. Zouache* pour son aide, son enthousiasme et ses efforts pour mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à remercier le jury d'avoir accepté de présider et d'examiner ce travail.

Nous aimerions également remercier tous nos professeurs pendant les années d'études.

Enfin, je voudrais remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à leur soutien moral ou matériel, dans la réalisation de ce projet.

Dédicace

Nous dédions ce mémorial à notre cher peuple pour leur amour,

leurs encouragements et leurs sacrifices à nos chers parents,

sans oublier notre cher professeur Zouache tarek

Et enfin à tous nos amis et à toutes les personnes

qui ont contribué au succès de ce travail.

Sommaire

Liste de symboles et abréviations	V
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	X
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les capteurs

I-1-Introduction	5
I-2-Généralités sur les capteurs	5
I-2-1-Définition	5
I-2-2- Chaîne de mesure	6
I-2-3-Types de grandeur physique	6
I-2-4 - Grandeurs d'influence	7
I-2-5-Rôle du capteur	7
I-2-6-Eléments constitutifs d'un capteur	8
I-3-Classification des capteurs	8
I-3-1- Capteurs passifs	9
I-3-2- Capteurs actifs	9
I-4 -Caractéristiques d'un capteur	10
I-4-1-La sensibilité	10
I-4- 2-Etalonnage	10
I-4- 3- Domaine de linéarité	10
I-4-4-Précision	10
I-4-5 -Temps de réponse ou rapidité	11

I-4-6-Sélectivité	11
I-4-7-Fidélité	11
I-5-Différents types de capteurs	11
I-5-1- Capteurs physiques	12
I-5-2- Biocapteurs	12
I-5-3- Les capteurs chimiques	12
1-5-4- Capteur de pression	13
1-5-4-1- Définition de la pression	13
a- Les différentes unités de pression	14
b- Les Différents types de pressions	14
- La pression absolue	14
- La pression atmosphérique (ou barométrique)	14
- La pression relative	14
- La pression différentielle	15
- La pression hydrostatique	15
- La pression hydrodynamique	15
- La dépression	15
1-5-4-2- Principe d'un capteur de pression	15
a- Capteur de pression Capacitif	16
b- Capteur de pression résistif	16
c- Capteurs à base de cristaux photoniques	17
1-6-Conclusion	18

Chapitre II : Cristaux photoniques principe et concept

II-1- Introduction	19
II-2- Historique sur les cristaux photonique	19
II-3- Définition	20
II-4- Analogie électron photon	21
II-5- Généralité sur les cristaux photonique	21
II-5-1- Facteur de remplissage	21
II-5-2- Contrats diélectrique et choix de matériaux	22

II-5-3- Les périodes	22
II-6- Différents types de cristaux photoniques suivant leur géométrie	23
II-6-1 Le cristal photonique unidimensionnel	23
II-6-2- Le cristal photonique bidimensionnel	24
a- Les structures dites « connectées »	25
b- Les structures dites « déconnectées »	25
II-6-3- Cristaux photoniques tridimensionnels	27
a- La Yablonovite	27
b- La structure « tas de bois »	27
II-7- Opales	28
II-8- Les type de défauts de cristaux photoniques	28
II-8-1- Les défauts ponctuels	29
II-8-2- Les défauts étendus	29
II-8-3- Les cavités en cristaux photoniques	30
a) Cavité hexagonale	30
b) Cavité carrée	30
c) Cavité triangulaire	31
d) Cavité rectangulaire	31
II-9- Conclusion	32

Chapitre III :

Utilisation des cristaux photoniques dans la détection et la réalisation des capteurs

III-1- Introduction	34
III-2- Application des CP à la détection	34
III--1- Le biocapteur	34
III-2-1-1- Structure du capteur	35
III-2-2-2- Sensibilité et transmission	36
III-2-2- Capteur optique de salinité basé sur PC pour différentes températures	37
III-2-2-1 Principe du capteur	37

III-2-2-2 Structure et forme du capteur	38
III-2-2-3 Évaluation des caractéristiques de détection	39
III-2-3- Les capteurs de pression à base de cristaux photoniques	41
III-2-2-1- Capteur RI pour la mesure de pression	41
III-2-2-2- Principe de détection	42
III-2-2-3- Structure de capteur	42
III-2-2-4- Description de la réponse de structure	43
III-5- Conclusion	44

CHAPITRE IV : Etude et optimisation du capteur de basse pression par cristaux photoniques

IV-1- Introduction	46
IV-2- Structure à cristaux photoniques du capteur de pression	46
IV-2-1- Structure Originale	46
IV-2-2- Structure améliorée proposé	46
IV-3- Utilisation de l'indice effectif du matériau	48
IV-4- Optimisation des paramètres de la structure	49
IV-4-1- Optimisation de la structure en fonction de R_c	49
IV-4-2- Résultats de l'optimisation	49
a- Réponse de la structure en fonction de R_c	49
b- Optimisation de la valeur de R_c	52
c- Variation des facteurs de qualité correspondants à n_1 et n_2 en fonction de R_c	52
d- Variation de la sensibilité de la structure en fonction de R_c	53
• La sensibilité à la variation de l'indice de réfraction	53
• La sensibilité à la variation de pression hydrostatique	53
e- Variation des transmissions correspondants à n_1 et n_2 en fonction de R_c	54
IV-5- Structure finale du capteur de pression	56
IV-5- 1- Réponse de la structure optimisée pour différentes pression	57

IV-5- 2- Tracé des longueurs d'onde de résonance de la réponse du capteur	61
IV-5- 3- Tracé des sensibilités du capteur	61
IV-6- Conclusion	63
Annexe	A

Liste des symboles et abréviation

Δs_{out} : la variation du signal de sorti

Δm : la variation du mesurande

S : Sensibilité

m: mesurande

PhCs : Les cristaux photoniques

BIP : bandes interdites photoniques

PBG : Photonic Band Gap

MEB : micro scope électronique a balayage

λ : la longueur d'onde guidée

ϵ : permittivité

a : La période

n : L'indice de réfraction du matériau

f : Le facteur de remplissage

v_i : Volume occupé par le matériau de permittivité

Λ : Volume de la cellule

FCC : un réseau cubique à faces centrées

Δ : Le contraste d'indice

E : le champ électrique

H : le champ magnétique

TM : transverse électrique, la polarisation magnétique

TE : transverse magnétique, la polarisation électrique

ΓK : la direction du réseau réciproque correspond à la direction des premiers voisins du réseau réel.

ΓM : la direction correspond à la direction des seconds voisins

RIU : unité de l'indice de réfraction.

RI : indice de réfraction

Q : facteur de qualité.

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

n_L : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

λ_{cutoff} : longueur d'onde de coupure.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1- : Définition d'un capteur. [3]	5
Figure I-2- : constitution d'une chaîne de mesure classique	6
Figure I-3- : Eléments constitutifs d'un capteur.[2]	8
Figure I-4-: Courbe d'étalonnage d'un capteur	10
Figure I -5- : Schéma synoptique d'un capteur de pression. [8]	15
Figure 1-6- : Schéma en coupe de la structure d'un capteur de pression capacitif. [8]	16
Figure I-7- : capteur résistif. [11]	17

Chapitre II

Figure II-1- : Cristaux photoniques à une (1D), deux (2D) et trois dimensions (3D)	20
Figure II-2- : Période d'un cristal photonique unidimensionnel [19]	23
Figure II-3- : (a) Représentation schématique d'un miroir de Bragg	23
Figure II-3- : (b) Relation de dispersion d'un miroir de Bragg à incidence normale une bande interdite apparaît en bord de zone de Brillouin. [17]	23
Figure II-4- : structures périodiques bidimensionnelles.	25
Figure II-5-: (a)Structure à deux dimensions 2D connectée	25
Figure II-5-: (b) Structure à deux dimensions 2D déconnectée [25]	25
Figure II-6- : structure de bande.	27
Figure II-7- : Structures 3D.	27
Figure II-8-: (a) Les opales directes,	28
Figure II-8-: (b) Les opales inverses [24]	28
Figure II-9-: (a) Défauts ponctuels	29
Figure II-9-: (b) Défaut lacunaire,	29
Figure II-9- : (c) Défauts de substitutions [25]	29
Figure II-10-: Exemple de guide W à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium Sur isolant. [25]	29
Figure II-11-: Les différents types de cavités [26].	30
Figure II-12-: Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm [26].	31
Figure II-13-: Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm. [26]	31

Figure II-14-: Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm [26].	32
---	-----------

Chapitre III

Figure III-1- Schéma du capteur à guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI2 [27]	35
Figure III-2- Spectres de transmission mesurés pour quatre solutions d'indices différents [27].	35
Figure III-3- (a) Senseur de référence W1 (Un rangée de trous omise)	36
Figure III-3- (b) Spectres de transmission pour le senseur référence à CPs :.[23]	36
Figure III-4 - Spectre de transmission des deux modèles.[23]	37
Figure III-5- Schematic structure of the PCRR based sensor for seawater sensing.	38
Figure III-6 -(a) la puissance de sortie normalisée du capteur pour la salinité de 0% à la température de 25 °C,[28]	39
Figure III-6- (b) la puissance de sortie normalisée du capteur pour différents niveaux de sel à la température de 25 °C [28]	39
Figure III-6-c la puissance de sortie normalisée pour diverses salinités (0% -100%) et leurs indices de réfraction.[28]	40
Fig. III-7- : Variation de la puissance de sortie par rapport à la Salinité de l'eau de mer à différentes températures.[28]	40
Figure III-8-: Structure du capteur de pression [31].	43
Figure III-9- : Déplacement des spectres de sortie (pour 1nm à 10nm) en fonction de la pression appliquée [32]	43
Figure III-10- : Variation de la fréquence des impulsions de sortie en fonction de la pression [32]	44

Chapitre IV

Figure IV-1-: Structure originale de Zhan[3]	46
Figure IV-2-(a) : la matrice de trous d'air dans le substrat du silicium proposée	47
Figure IV-2-(b) : Diagramme de dispersion des bandes interdites du mode TM	47
Figure IV-3-(a) : La première structure considérée	48
Figure IV-3-(b) : La seconde structure considérée	48

Figure IV-4-(a) : Réponse en fonction de R_c pour $n= 2.8$	50
Figure IV-4-(b) : Réponse en fonction de R_c pour $n= 2.83985$	50
Figure IV-4-(c) : Réponse de la structure en fonction de R_c pour les indices de réfraction n_1 et n_2 considérés	52
Figure IV-5-(a): Tracé du facteur de qualité pour $n=2.8$	53
Figure IV-5-(b): Tracé du facteur de qualité pour $n=2.83985$	53
Figure IV-(6) : Tracé de la sensibilité en en fonction de R_c	54
Figure IV-7-(a): Tracé de la Transmission en fonction de R_c pour $n = 2.8$	55
Figure IV-7-(b): Tracé de la Transmission en fonction de R_c pour $n = 2.83985$	55
Figure IV-8-: Structure finale du capteur de pression adoptée	56
Figure IV-9- : Indice de réfraction du silicium en fonction de la pression.	58
Figure IV-10- : Réponse de capteur pour des pressions situées entre 0 GPa et 7 GPa	58
Figure IV-11- : Réponse de capteur pour des basses pressions situées entre 0 GPa et 1GPa	59
Figure IV-12- : Réponse finales du capteur pour basse pressions situées.	60
Figure IV-13- : Longueurs d'onde de résonances correspondantes aux pressions situées entre 0 GPa et 1GPa	61
Figure IV-14- : Les sensibilités SRI et SP du capteur finale tracées pour les pressions considérés.	62

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1- : Les effets utilisés pour réaliser la mesure.	9
Tableau I-2 : L'effet utilisé sur la mesurande pour réaliser la grandeur de sortie.	9
Tableau I-3- : Les différentes unités de pression).	14

Chapitre IV

Tableau IV-1 : Caractéristiques principales de la structure en fonction de Rc pour $n = 2.8$ et $n=2.83985$	51
Tableau IV-2 : Indice de réfraction du silicium en fonction de la pression.	57
Tableau IV-3 : Grandeurs caractérisant la réponse du capteur en fonction de la pression pour des pression inférieure à 100 MPa.	59
Tableau IV-4 : Grandeurs caractérisant la réponse du capteur en fonction de la pression pour des pressions situées entre 0.1 et 1GPa.	60

Introduction général

La cristauphotonica vu le jour pour la première fois en 1987[1] et le premier cristal photonique a été réalisé en 1991[2]. Les structures à cristaux photoniques (PhCs) formées par l'empilement de matériaux dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Cette périodicité du milieu induit sur la lumière qui se propage dans ce cristal, un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal. De même qu'il existe pour les électrons des bandes d'énergie permises et des bandes interdites, il existe des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique et une bande interdite photonique (BIP) correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions de ce cristal.

Les cristaux photoniques (PhCs) forment un bon support physique pour le contrôle de la propagation de la lumière à des dimensions de l'ordre des grandeurs de longueurs d'ondes se propageant dans ce cristal, et c'est d'ailleurs cette propriété qui les rends un bon support pour de nombreuses applications. L'adaptation des cristaux photoniques à l'optoélectronique permet d'envisager de nouvelles perspectives telles que la réalisation de composants pour l'optique intégrée de dimensions réduites et l'intégration de plusieurs fonctions sur un même substrat.

Les applications potentielles des BIP (bandes interdites photoniques) 2D sont différentes et multiples et entre autre on trouve, la réalisation des cavités résonantes de taille très réduite, des guides d'ondes, des virages, des filtres sélectifs, des multiplexeurs - démultiplexeurs et des fibres optiques. Ces matériaux ont donnés à jour de nouveaux composants optoélectroniques plus performants et compacts comparés aux composants classiques connus actuellement.

Les cristaux photoniques dans leurs états intrinsèques sont peut utiles mais leurs vrais intérêts est du à la réalisation de cavités par l'inclusion de défauts structuraux dans ces cristaux. Les cavités (les défauts) ne sont apparues qu'en 1998 et les excellentes propriétés de réflexion de lumières dans ce cristal environnant, permettent d'avoir des facteurs de qualités élevés pour les modes résonnants créés par ces défauts dans sa BIP [2]. Se sont ces modes résonnants qui représentent le point de départ de l'utilisation des PhCs dans les domaines de la détection, de la mesure et de la capture des grandeurs physiques connues. En effet, de nos jours les capteurs les

plus performants qu'ont trouvé sur le marché quel que soit leurs genres, utilisent au moins une cavité résonante implanté dans une structure à cristaux photoniques.

La pression est l'une des grandeurs physiques les plus contrôlées dans la vie quotidienne. La mesure de pression peut dans certains cas être vitales si on parle par exemple d'environnement aquatique, ou spatial et pour cette raison sa mesure avec précision été toujours un souci pour la technologie. L'apparition des cristaux photoniques a résolu ce problème et on trouve maintenant des capteurs de pression très précis et à temps de réponse très faible puisque qu'ils utilisent les propriétés fantastiques de la lumière (ce dernier élément ne dépendra maintenant que de l'électronique associée à la structure (PhCs).

La mesure exacte de la pression (quelques soit son ordre de grandeurs) dépend principalement de la sensibilité du capteur. Cette propriétés (la sensibilité) est très importante et constitue de nos jours un domaine de recherche parmi les plus compétitifs. Différentes publication sont étés menés dans ce domaine et ayants tous comme but d'améliorer son ordre de grandeur et par conséquent la limite de détection des capteurs de pression à bas de cristaux photonique, notre travail entre dans ce contexte.

Dans le présent travail nous avons fait le design et la simulation d'un capteur de la pression à haute sensibilité destinés à la mesure pression de l'ordre du Mega pascal (basse pression). La structure que nous avons utilisée représente un design amélioré de la structure de proposée par [3]. La réalisation de notre travail sera étalée en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les capteurs. Dans ce contexte, nous avons donnés les caractéristiques générales communes aux différents types des capteurs, leurs structures et leurs principes de fonctionnement. Puis nous allons abordés précisément les capteurs de pression et en particulier ceux à base de cristaux photoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons passé en revues les notions de cristaux photoniques et les définitions de bases relatives à ces structures. Dans ce contexte nous avons montré leurs caractéristiques très importantes et leurs capacités à fournir une bande interdite photonique (BIP) qui représente le support essentiel pour la réalisation de différents types de capteurs utilisant ce type de structure.

Le troisième chapitre sera en totalité consacré à l'étude de quelques applications importantes des systèmes à cristaux photoniques. Entre autre nous avons donné dans ce chapitre des exemples de réalisation de capteurs biologiques, de capteurs chimiques et des capteurs de grandeurs mécaniques comme la pression.

Dans le quatrième chapitre nous avons proposé une structure à cristaux photoniques optimisée que nous définissons nous-mêmes ses caractéristiques optimales. Cette dernière sera utilisée à la suite pour la conception d'un capteur de pression destiné à la mesure des faibles pressions. Cette structure doit être en premier lieu optimisée de façon à produire un maximum de sensibilité par l'optimisation de ces paramètres géométrique. Puis et après l'optimisation, cedesign sera utilisé pour la mesure de pression avec une très bonne sensibilité.

Chapitre I

Généralités sur les capteurs

I-1-Introduction

Les capteurs chimiques, physiques et les biocapteurs sont développés depuis quelques dizaines d'années sont maintenant adoptés et largement utilisés dans tous les domaines de la vie courante (qualité de l'eau et de quelques produits de l'agroalimentaire, analyses biologiques, dépollution,.....). La sensibilité, la sélectivité, la spécificité et la durabilité des capteurs ont toujours été des paramètres essentiels dans leur conception.

Récemment, il y a eu plusieurs travaux de recherches utilisant les cristaux photoniques en tant qu'élément de détection en raison de leur structure de bande et du confinement de la lumière.

Dans Ce premier chapitre, nous présentons les notions de base sur les capteurs et dans ce cadre nous aborderons leurs principales caractéristiques et leurs différents types.

I-2-Généralités sur les capteurs**I-2-1-Définition**

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité ou la déviation d'une aiguille. On fait souvent (à tort) la confusion entre un capteur et un transducteur le capteur est au minimum constitué d'un transducteur.

Le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre une grandeur physique et une information manipulable. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Le capteur, lui, en est dépourvu. Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Leur mise en œuvre est du domaine de l'instrumentation [4].

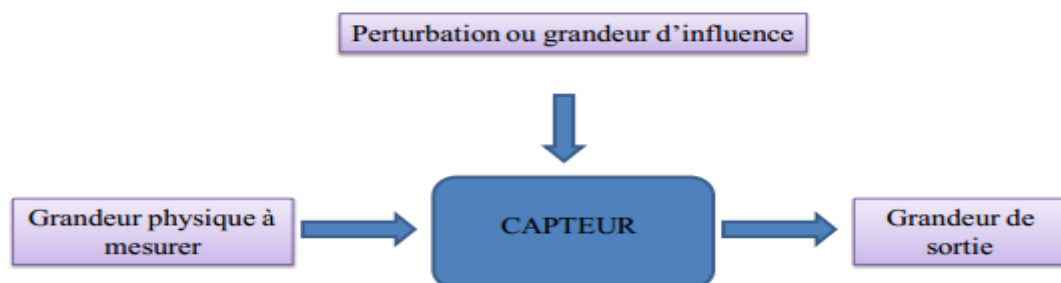


Figure I.01 : Définition d'un capteur. [5]

I-2-2- Chaîne de mesure

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. Par exemple, la mesure d'un débit peut se faire en plusieurs étapes : -Transformation du débit en une pression différentielle.

- Transformation de la pression différentielle en la déformation mécanique d'une membrane.
- Transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézo-électrique) via un circuit électronique associé figure I-2.

L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure : [5]

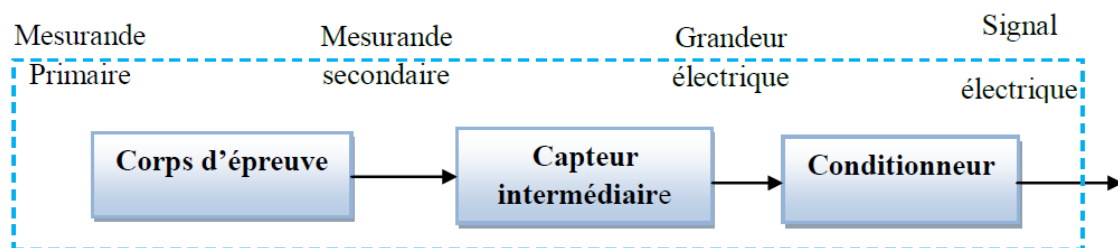


Figure I-2- : constitution d'une chaîne de mesure classique.

De manière classique la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs. On appelle corps d'épreuve celui qui est en contact direct avec le mesurande, le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable.

I-2-3-Types de grandeur physique

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles, chaque capteur s'associant à l'une d'entre elles :

- Mécanique : déplacement, force, masse, débit...
- Thermique : température, capacité thermique, flux thermique...
- Electrique : courant, tension, charge, impédance, diélectrique...
- Magnétique : champs magnétique, perméabilité, moment magnétique...
- Radiatif : lumière visible, rayon X, micro-onde...
- (Bio) chimique : humidité, gaz, sucre, hormone... [5]

I-2-4 - Grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur le capteur. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie.

La plupart des grandeurs d'influence sont liées à l'environnement du capteur. Citons en particulier :

- la température (c'est la grandeur d'influence la plus répandue et la plus gênante),
- la pression environnante,
- les vibrations mécaniques ou acoustiques, les chocs, le temps,
- la position du capteur et sa fixation,
- l'humidité, la projection d'eau, l'immersion,
- les ambiances corrosives,
- les perturbations électromagnétiques,
- les rayonnements nucléaires,
- les accélérations et la pesanteur,
- l'alimentation électrique du capteur.

I-2-5-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.

- 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 [4].

I-2 -6-Eléments constitutifs d'un capteur

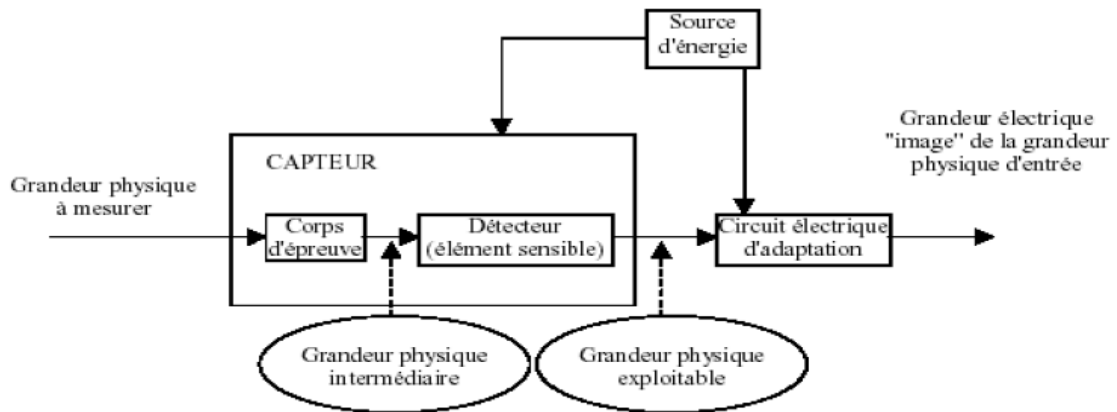


Figure I-3- : Eléments constitutifs d'un capteur [5].

I-3-Classification des capteurs

On classifie les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé.

I-3-1- Capteurs passifs

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande.

Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés :

- d'une part à sa géométrie et à ses dimensions ;
- d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité ρ , perméabilité Magnétique μ , constante diélectrique ϵ .

La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande :

- soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles ;
- soit sur les propriétés électriques des matériaux ;
- soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable. Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position, c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de

position ou de déplacement, potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile [9].

Mesurande	Effet utilisé	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteur, verre
Très basse température	Constant diélectrique	
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de Lithium

Tableau I-1-: Les effets utilisés pour réaliser la mesure.

I-3-2- Capteurs actifs

On parle de capteur actif lorsque le phénomène physique qui est utilisé pour la détermination du mesurande effectue directement la transformation en grandeur électrique. C'est la loi physique elle-même qui relie le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Un capteur actif fonctionne assez souvent en électromoteur et dans ce cas, la grandeur de sortie est une différence de potentiel.

Le nombre des lois physiques permettant une telle transformation est évidemment limité, on peut donc recenser facilement les capteurs actifs (dont le nombre est fini). Toutefois, les domaines d'application sont eux très étendus.[4]

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectrique (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

Tableau I-2-: L'effet utilisé sur la mesurande pour réaliser la grandeur de sortie.

I-4 -Caractéristiques d'un capteur

I-4-1-La sensibilité

Ce paramètre caractérise l'aptitude du capteur à détecter la plus petite variation de la grandeur à mesurer. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures. Elle est définie comme étant la variation du signal de sortie (Sout) par rapport à la variation du mesurande (m) (pente de la portiolinéaire de la courbe d'étalonnage) et s'écrit :

$$S = \frac{\Delta s_{out}}{\Delta m} \dots \dots \dots \text{I-01}$$

Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures.[7]

I-4- 2-Etalonnage

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie (figure I-4-).

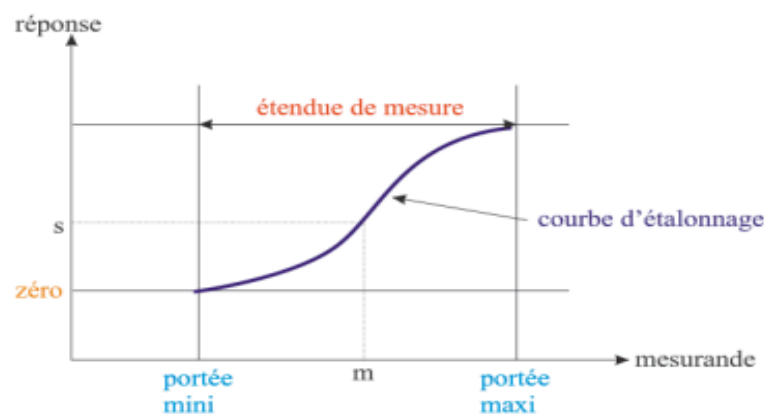


Figure I-4-: Courbe d'étalonnage d'un capteur

I-4- 3- Domaine de linéarité

Dans ce domaine de linéarité, la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation de la mesurande.

I-4-4-Précision

La définition du terme « précision » inclut soit uniquement la reproductibilité ou fidélité, soit également la notion de « justesse ». Elle définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur [6].

I-4-5 -Temps de réponse ou rapidité

La chaîne d'acquisition est rapide quand elle est à même de suivre les évolutions de la grandeur d'entrée. On doit connaître la plage de variation de fréquence du mesurande. Par exemple, la variation de température sera un phénomène assez lent à comparer par l'acquisition d'une tension. Pour respecter la condition de Nyquist, l'échantillonnage doit respecter la condition suivante [8].

$$F_e \geq 2.F_{max} \dots\dots\dots \text{I-02}$$

I-4-6-Sélectivité

Un capteur est dit sélectif, si la variation du signal de sortie est due uniquement à la seule grandeur (physique, chimique, biologique...) qu'on veut mesurer. C'est la capacité du capteur à ne mesurer qu'une seule grandeur dans le milieu où il est utilisé ou en d'autres termes, d'être le plus insensible aux grandeurs d'influence, grandeurs qui ne font pas l'objet de la mesure, mais influent sur la sortie du capteur.

I-4-6-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 $\langle m \rangle$ de n mesures effectuées sur m :

$$\langle m \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \dots\dots\dots \text{I-03}$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \langle m \rangle)^2}}{n-1} \dots\dots\dots \text{I-04}$$

Où m_i est la valeur de m à la $i^{\text{ème}}$ mesure. Parmi les écarts de fidélité on distingue : la répétabilité et la reproductibilité [7].

I-5-1-Différents types de capteurs

Il existe plusieurs classifications des capteurs. La plus répandue se réfère à la nature de mesurant ou à la transduction, de façon indépendante de l'utilisation.

I-5-1- Capteurs physiques

Ce sont des dispositifs sensibles à des phénomènes physiques, les mesures étant notamment la température, la pression, la masse, la force, la vitesse, le débit ...etc. La sensibilité est assurée par divers phénomènes physiques, comme la piézoélectricité, l'effet hall, des variations d'impédance, la photosensibilité...etc. Cette dénomination n'a donc rien à voir avec l'utilisation, tous ces capteurs pouvant trouver des applications par exemple dans des systèmes chimiques.

I-5-2- Biocapteurs

Par définition un biocapteur est un système analytique qui exploite la capacité de détection biologique pour une molécule cible, en conjonction avec un transducteur physicochimique qui transforme la reconnaissance biologique en un signal physiquement mesurable. Trois principaux éléments composent un biocapteur : une couche biologique sensible, un transducteur et un signal de sortie. La couche biologique contient un bio-récepteur, qui reconnaît l'espèce biologique souhaitée et qui est immobilisé sur le transducteur. Ce dernier assure la conversion de la réponse biologique en un phénomène physique. Au plus haut niveau, le signal de sortie permet la mesure du phénomène physique élaboré par le transducteur. Ce niveau contient souvent des étapes d'amplification et d'affichage, de manière appropriée et interprétable par l'utilisateur [7].

I-5-3- Les capteurs chimiques

Les problèmes de sécurité, pollution, économie d'énergie, contrôle de qualité des produits, santé, etc..., se posent avec acuité depuis ces dernières années du fait de l'essor industriel sans précédent dans de nombreux pays.

La connaissance d'un problème nécessite la mesure préalable du phénomène correspondant, en d'autres termes l'utilisation de capteurs. Le capteur constitue en effet le maillon de base de toute chaîne de mesures.

La possibilité de réaliser des dispositifs performants par adjonction d'une électronique sophistiquée (microprocesseurs, ASIC, etc....) aux capteurs est sans nul doute à l'origine du développement considérable des recherches fondamentales et appliquées dans ce domaine. On peut citer par exemple les capteurs de température.

Le terme "capteur", dans sa définition la plus générale désigne un élément sensible qui, soumis à une modification de son environnement physico-chimique présente une caractéristique électrique fonction de cette variation.

Les capteurs chimiques sont destinés à la détection et/ou à l'analyse de la concentration d'espèces chimiques ou biochimiques, gazeuses ou liquides en général. L'analyse d'espèces solides, bien que moins évidente, peut cependant être envisagée. Contrairement aux autres types de capteurs, les capteurs chimiques ont connu un succès limité sur le plan commercial, malgré la forte demande de nombreux secteurs de l'économie, tels que les industries chimique, métallurgique, automobile, électronique, agro-alimentaire, l'environnement, le domaine médical, les biotechnologies, etc... Ce fait est vraisemblablement lié à la difficulté technique de transformer une grandeur telle que la concentration d'une espèce chimique dans un liquide ou un gaz en signal électrique, tout en assurant simultanément reproductibilité, sensibilité et sélectivité.

1-5-4-Capteur de pression

La pression, comme chacun sait, constitue une variable essentielle pour l'étude métrologique d'un milieu environnant qui peut-être soit un gaz soit un fluide.

La mesure de cette variable est réalisée à l'aide d'un capteur de pression, dispositif capable d'associer à la grandeur mesurée, un signal électrique reconnaissable appelé « réponse ».

Il est constitué de deux parties : une partie de détection dite « Cellule sensible » et une partie de traitement de l'information par l'intermédiaire d'un circuit électronique que l'on peut appeler « Circuit électronique de traitement » ou encore « Circuit convertisseur ». La partie détection est quant à elle constituée d'un « corps d'épreuve » et d'un « transducteur » qui transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur physique, la plupart du temps électrique [12].

I-5-4-1- Définition de la pression

La pression est la force appliquée à une surface ou répartie sur celle-ci.

Elle se définit comme suit :

$$P = \frac{F}{S} \dots \dots \dots \text{I-05}$$

P : pression en N/m^2 ($1 Pa = 1 N/m^2$).

F : force en Newton

S : surface en m^2

La pression est souvent exprimée en bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$) [11].

a- Les différentes unités de pression

La relation $p = dF/ds$ définit, à la fois, la pression et l'unité de pression en tant qu'unité dérivée. Cette unité, le pascal (Pa), correspond dans le Système International (S.I.) à une pression uniforme exerçant sur une surface d'un mètre carré, une force totale de un newton. La pression d'un pascal étant relativement faible on utilise de préférence pour la mesure des pressions dans l'industrie son multiple le bar valant 10^5 pascals

	pascal (Pa)	bar (b)	atmosphère
(1 pascal) ²	1	10^{-5}	$9,869 \cdot 10^{-6}$
(1 bar) ³	10^5	1	0,987167
(1 kgf/cm ²) ⁴	98039	0,9803	0,968
(1 atmosphère) ⁵	101 325	1,0133	1
(1 cm d'eau) ⁶	98,04	$980 \cdot 10^{-6}$	$968 \cdot 10^{-6}$
(1 mm de Hg) ⁷	133	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$
(1 mb) ⁸	102	10^{-3}	$987 \cdot 10^{-6}$
(1 inch Hg) ⁹	$3,386 \cdot 10^3$	$33,86 \cdot 10^{-3}$	$33,42 \cdot 10^{-3}$
(1 psi) ¹⁰	6892	$68,9 \cdot 10^{-3}$	$68 \cdot 10^{-3}$
(1 torr) ¹¹	133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$

Tableau I-3-: Les différentes unités de pression [11]

b- Les Différents types de pressions

La pression absolue

Pression mesurée au-dessus du vide totale ou de zéro absolu. Le zéro absolu représente une absence de pression (Le vide correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni même dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé).

- La pression atmosphérique (ou barométrique)

C'est la pression exercée par l'atmosphère de la terre. La pression atmosphérique au niveau de la mer est de 1.012 bar.

Elle peut varier de +/- 25 mbar avec la pluie ou le beau temps. La valeur de la pression atmosphérique décroît lorsque l'altitude augmente.

-La pression relative

C'est une pression au-dessus de la pression atmosphérique. Elle représente la différence positive entre la pression mesurée et la pression atmosphérique existante. C'est celle qui est le plus souvent utilisée, parce que la plupart des capteurs sont soumis à la pression atmosphérique et mesurent en relatif. Pour faire une mesure en absolu, il leur faut un vide poussé dans une chambre de référence (pression de gonflage d'un pneu par exemple).

- La pression différentielle

C'est la différence de deux pressions où la différence de grandeur entre une valeur de pression donnée et une pression de référence donnée.

- La pression hydrostatique

C'est la pression exercée au-dessous de la surface d'un liquide par le liquide situé au-dessus, quand le fluide est au repos.

A l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la mesure de fluide sur la surface considérée.

Cette pression est $p = r \times g \times h$ (avec r masses volumiques du fluide).

- La pression hydrodynamique

Elle résulte de la vitesse du fluide en mouvement.

Un fluide qui se déplace crée une pression supplémentaire :

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \dots\dots\dots \text{I-06}$$

avec : v est la Vitesse de déplacement du fluide en m/s

- La dépression

C'est la pression en dessous de niveau atmosphérique. [11]

I-5-4-2-Principe d'un capteur de pression

Un capteur de pression est un système constitué de deux parties : une partie détection appelée « Cellule sensible » et une partie traitement de l'information appelée «circuit électronique de traitement » ou encore « Circuit conditionneur ». Un capteur de pression peut donc être représenté par le schéma de la figure ci-dessous [10] :

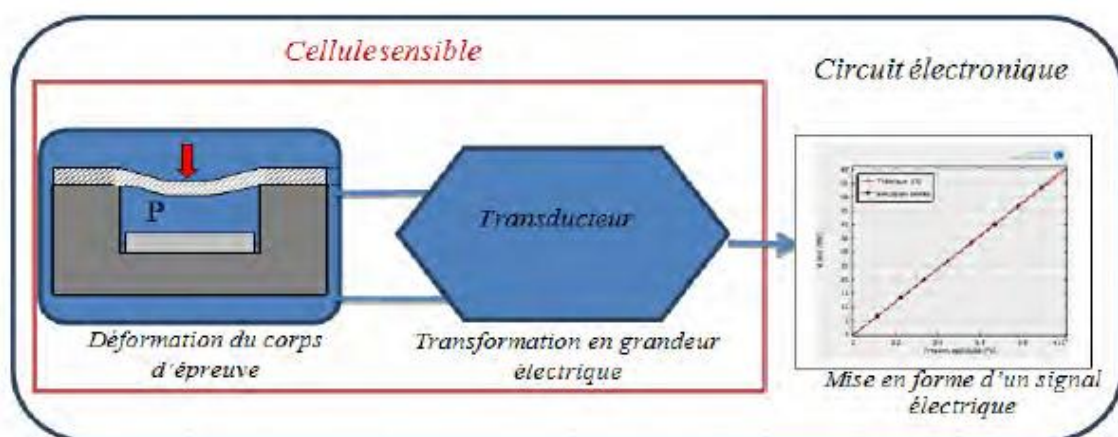


Figure I-5-: Schéma synoptique d'un capteur de pression [10]

La partie détection est constituée d'un « Corps d'épreuve » et d'un «Transducteur».

- Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui soumis aux variations de la

grandeur à mesurer (mesurande) a pour rôle de la transformer en une grandeur Physique mesurable. Pour les capteurs de pression cette grandeur est généralement Une déformation, les corps d'épreuve les plus utilisés sont les plaques, les poutres et les membranes.

- Le transducteur est l'élément sensible qui, lié au corps d'épreuve, traduit les Réactions de ce dernier en signal électrique.
- Le module électronique est le module de traitement du signal en vue d'une éventuelle exploitation [10].

A- Capteur De Pression Capacitif

La figure 1-6- représente le schéma en coupe de la structure d'un capteur de pression capacitif. La membrane fine au silicium constitue l'armature mobile, tandis que le substrat en Pyrex 7740, sur laquelle est déposée une couche métallique forme l'armature fixe. Les deux électrodes, fabriquées séparément, ont été collées par soudure anodique (procédé thermoélectrique de soudure). La pression appliquée P engendre une variation de la déflexion $w(x, y)$ qui à son tour fait croître la capacité $C(P)$. La valeur de la capacité au repos C_0 est donnée par: [10]

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \dots\dots\dots \text{I-07}$$

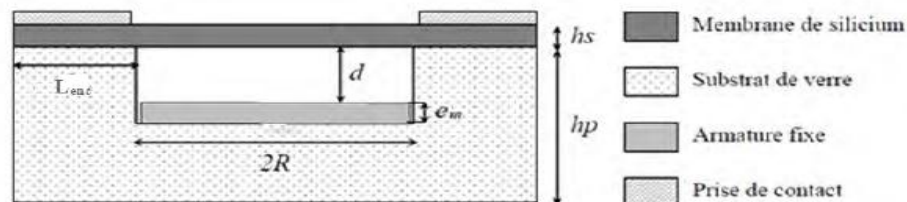


Figure 1-6-: Schéma en coupe de la structure d'un capteur de pression capacitif [10]

B - Capteur de pression résistif

La piste résistive est placée sur la partie fixe du capteur et le mouvement mécanique mesuré est accouplé à un curseur qui se déplace sur celle-ci, ainsi la résistance entre un point fixe et la partie mobile du potentiomètre est fonction de la position à mesurer. L'élément sensible est constitué d'un support sur lequel est déposée une pate résistive qui incorpore un liant plastique et du carbone (cas des capteurs a piste résistive) ou un bobinage résistif (cas des capteurs à fil résistif). L'élément sensible ainsi obtenu peut être apporté.

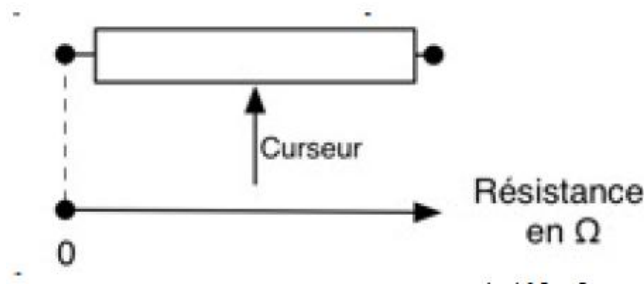


Figure : I-7-: Capteur résistif [13]

- ✓ Soit à l'intérieur d'une forme cylindrique pour constituer un potentiomètre rotatif.
- ✓ Soit fixé sur un support plat pour réaliser un capteur de déplacement rectiligne.

C- Capteurs à base de 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 réfléchi, 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 optiques, les lasers à faible seuil,...etc.

L'application des PhCs dans le domaine des capteurs est un domaine de recherche d'actualité, en effet les PhCs ont un potentiel de détection très important des paramètres physiques (Température et pression hydrostatique) avec une très haute résolution et sensibilité. Ces microstructures sont de nos jours utilisés pour détecter les gaz, l'humidité, Mesures et détection chimique et biologique [13] ainsi que la détection des grandeurs mécaniques et en particulier la pression.

Certain capteur de pression utilisent des guides d'onde à PhC et d'autres utilisent des guides d'onde couplés à une /ou plusieurs nano-cavités. Dans le premier cas, le spectre du guide d'onde se trouve décalé par rapport à sa position d'origine (position du repos du

capteur). Dans le second cas, la longueur d'onde de résonance de la nano-cavité elle aussi se décale de sa position de repos d'une distance qui dépend de la pression appliquée [14].

I-6-Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons abordé les capteurs en terme générale, leurs caractéristiques, leurs types et leurs principes de fonctionnement. Puis nous avons parlé des cristaux photoniques et de leurs utilisations dans le domaine de la détection des différents phénomènes mesurable que ce soit physique, chimique, biologique ou autres.

A la fin de ce chapitre nous avons abordés les capteurs de pression et en particulier ceux à base de cristaux photonique et dans ce contexte nous avons situés quelques type de ces capteurs ainsi que le principe de détection qu'ils utilisent pour la mesure de pression.

Chapitre II

Cristaux photoniques : principe et concept

II.1 Introduction

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels ou naturels dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans les différentes directions de l'espace et constituent à l'heure actuelle une nouvelle classe de matériaux.

Ces cristaux sont des structures dont l'indice diélectrique varie fortement à l'échelle de la longueur d'onde sur une deux ou trois direction de l'espace. Cela en fait des réflecteurs efficaces, multidirectionnels, et compacts, dont l'utilisation permet d'envisager une réduction en taille des composants d'optique guidée.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base et la théorie fondamentale des cristaux photoniques et d'introduire les cristaux photoniques bidimensionnels qui nous intéressent dans notre travail.

II.2 Historique sur les cristaux photonique

Un cristal photonique est un matériau dont la constante diélectrique varie périodiquement dans une ou plusieurs directions de l'espace. Cette définition qui peut sembler très simple, a pourtant d'importantes conséquences. En effet, si la période de modulation de la constante diélectrique est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée, cette modulation conduit à l'apparition d'intervalles d'énergie ayant une densité de modes électromagnétiques nulle [14]. le terme « cristal photonique » ne fut introduit qu'en 1987 avec l'apparition de deux articles majeurs de Eli Yablonovitch et Sajeev John. Ils y prévirent la possibilité de produire des structures à deux ou trois dimensions qui posséderaient des bandes interdites. Avant 1987, les cristaux photoniques unidimensionnels, qui sont des structures périodiques composées d'un empilement multicouche similaires à un « miroir de Bragg », étaient principalement étudiés .

Une étude théorique détaillée de structures optiques unidimensionnelles a été réalisée par V.P. Bykov en 1972, qui a été le premier à examiner l'effet de bandes interdites sur l'émission spontanée provenant d'atomes et de molécules intégrées à la structure. Bykov fit aussi des hypothèses sur l'emploi de structures bi- ou tridimensionnelles. Ce concept de cristal photonique tridimensionnel fut ensuite examiné par Ohtaka en 1979, qui développa un protocole pour le calcul de structures de bandes. Toutefois, ses publications ne prirent de la valeur qu'à partir de la parution des articles de Yablonovitch et John. Après 1987, le

nombre de publications concernant les cristaux photoniques commença à croître exponentiellement. Cependant, à cause de la difficulté de fabrication de ces structures pour qu'elles soient effectives dans le spectre visible, les premières études étaient soit théoriques, soit dans les micro-ondes, car les cristaux pouvaient être fabriqués plus facilement à la grandeur du centimètre. En 1991, Yablonovitch conçoit le premier cristal photonique tridimensionnel possédant une bande interdite dans les micro-ondes.

II.3 Définition

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques de matériaux diélectriques, semi-conducteur ou métallo-diélectrique modifiant la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur affecte le déplacement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisée et interdite. Il existe néanmoins trois principales catégories unidimensionnel, bidimensionnel, tridimensionnel. Ces dimensions représentent les nombres de direction dans lesquelles une périodicité de la constante diélectrique.

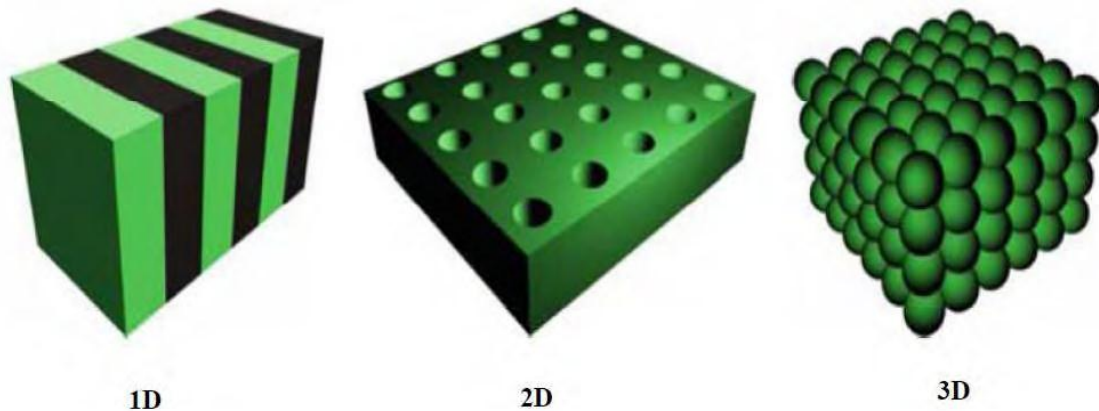


Figure II-1- : Cristaux photoniques à une (1D), deux (2D) et trois dimensions (3D).

Ces structures peuvent être obtenues par arrangement périodique de matériaux différents. Leur forme la plus simple est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement de couche également appelé « miroir de Bragg ». Les cristaux photoniques ont la capacité d'inhiber la propagation de la lumière dans certaines directions pour une gamme de fréquences, il en résulte une bande interdite photonique (BIP). Cette particularité optique intervient lorsque la longueur de la maille du cristal est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière dans le milieu. Ce phénomène est

dans une certaine mesure analogue à celui de l'ouverture de bandes interdites électroniques dans des cristaux atomiques de matériaux semi conducteurs. On peut noter qu'il existe des cristaux photoniques naturels tels que les opales.

II.4 Analogie électron photon

Les équations gouvernant la propagation de la lumière dans un cristal photonique sont les quatre équations de Maxwell.

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r)E(r,t)) = 0 \quad \text{II-1}$$

$$\nabla \cdot H(r,t) = 0 \quad \text{II-2}$$

$$\nabla \times E(r,t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} H(r,t) \quad \text{II-3}$$

$$\nabla \times H(r,t) = \varepsilon_0 \varepsilon(r) \frac{\partial}{\partial t} E(r,t) \quad \text{II-4}$$

Après simplification des équations et en appliquant un ensemble d'opérations, on obtient

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H(r) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \quad \text{II-5}$$

L'équation (I-5) est l'analogie formel de l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal, $H(r)$ étant l'analogie électromagnétique de la fonction d'onde électronique $\psi(r)$ et $\varepsilon(r)$ l'analogie du potentiel atomique $V(r)$ [16].

II-5- Caractéristique des cristaux photonique

Les principaux paramètres d'un réseau à cristaux photonique sont les suivants :

II-5-1- Facteur de remplissage

Nous considérons le cas des "atomes" qui ne se chevauchent pas. Le facteur.

Or de remplissage (f) est défini comme le rapport entre la zone "atome" (A) et la zone de la cellule primitive:

$$f = \frac{A}{|a_1 \times a_2|}, 0 \leq f \leq 1 \dots \dots \dots \text{II-6}$$

Il est clair que pour des valeurs extrêmes ($f = 0$, $f = 1$) le PhC se réduit à un milieu homogène. Dans la pratique, le facteur de remplissage a une limite supérieure donnée par la condition de "compactage", qui dépend de la topologie du réseau. Le treillis hexagonal a un facteur de remplissage : [21]

$$f_{hex} = 3 \left(\frac{r}{a} \right)^2 \dots \dots \dots \text{II-7}$$

II-5-2- Contraste diélectrique et choix de matériaux

Le contraste diélectrique (également connu sous le nom de contraste d'indice de réfraction) dans un binaire PhC peut être défini comme le module de la différence entre la réfraction d'indices de l'arrière-plan (n_b) et du média "atom" (n_a):

$$\Delta n = n_b - n_a \dots \dots \dots \text{II-8}$$

où l'indice de réfraction est $n = \sqrt{\epsilon_r}$. Il y a une valeur minimale $\Delta n_{\min}$ nécessaire pour ouvrir un BIP, dépend du treillis et de la forme "atom". La taille du BIP augmente strictement monotone avec Δn , lorsque tous les autres paramètres PhC sont fixés. De plus, en augmentant Δn les bords de l'espace se déplacent vers des fréquences plus basses et les bandes s'aplatissent (cet aplatissement signifie que, pour une gamme de vecteurs d'ondes proches des bords de l'entrefer, la vitesse du groupe diminue beaucoup) [21].

II-5-3-Les périodes

Ces paramètres géométriques, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influent sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. La période a est : $a = (a_1 + a_2)$ avec a_1 l'épaisseur de la couche de permittivité relative ϵ_{r1} et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité relative ϵ_{r2} (figure II.2) [19].

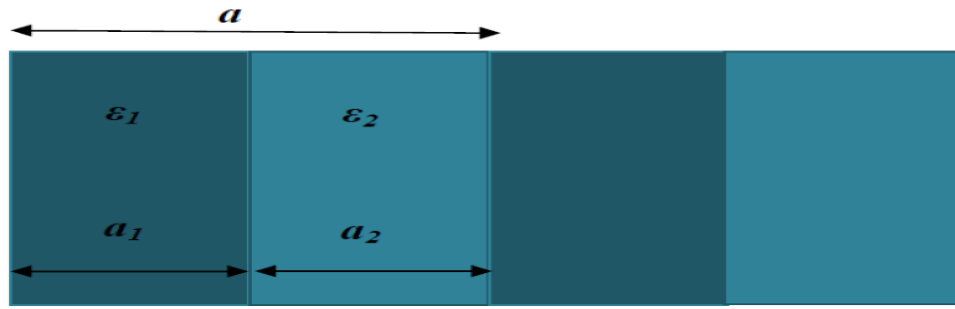


Figure II-2-Période d'un cristal photonique unidimensionnel [19].

II-6-Différents types de cristaux photoniques suivant leurs géométries

II-6-1-Le cristal photonique unidimensionnel

Pour aborder l'étude des cristaux photoniques, nous étudions le cas simple d'un milieu dont le constant diélectrique est périodique suivant une seule dimension. Ce milieu peut être constitué d'une alternance de couches de diélectriques de permittivités différentes ϵ_1 et ϵ_2 . Cette structure porte le nom de miroir de Bragg. Elle est souvent utilisée pour réaliser les miroirs de cavités lasers [17].

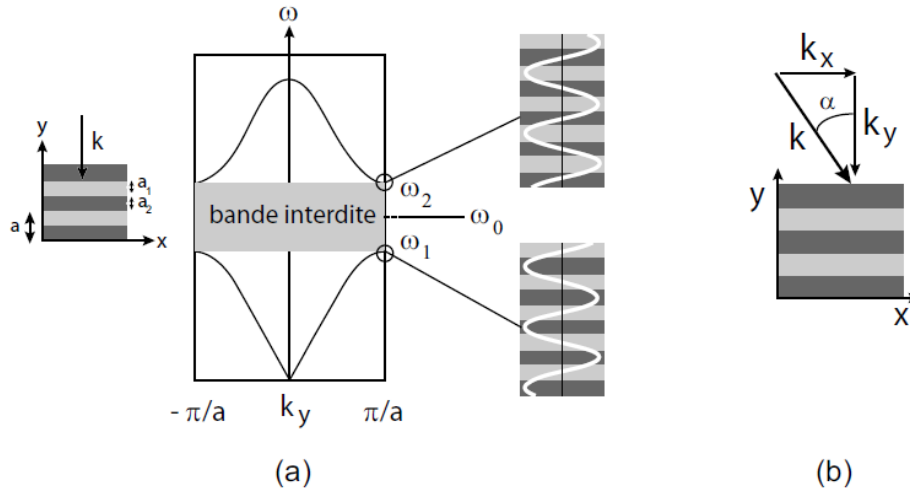


Figure II-3- : Représentation schématique d'un miroir de Bragg **(a)**, Relation de dispersion d'un miroir de Bragg à incidence normale **(b)**, une bande interdite apparaît en bord de zone de Brillouin [17]

Considérons une onde électromagnétique de vecteur d'onde k qui se propage à incidence normale dans un miroir de Bragg constitué d'une alternance de couches d'épaisseurs a_1 et a_2 et de permittivités ϵ_{r1} et ϵ_{r2} (Figure II-3- (a)). La période est $a = a_1$

+a₂ dans la direction de l'empilement. A chaque nouvelle cellule du réseau direct, l'onde subit une réflexion. Le déphasage entre deux ondes réfléchies successives est 2ka. Tant que 2ka est très différent de 2π, les ondes réfléchies successivement n'interfèrent pas constructivement. En bord de zone de Brillouin, k se rapproche de $\frac{\pi}{4}$ et les ondes réfléchies par les interfaces successives sont en phase. L'onde incidente de vecteur d'onde k donne naissance à une onde réfléchie de vecteur d'onde -k. La périodicité du milieu diélectrique couple ces deux ondes de même énergie et forme deux ondes stationnaires d'énergies distinctes E₁ et E₂. Cette levée de dégénérescence ouvre une bande d'énergie interdite dans la direction normale à l'empilement. Lorsque les épaisseurs optiques des différentes couches sont égales (n₁a₁ = n₂a₂), la largeur ΔE de cette bande interdite ne dépend que du contraste d'indice [18].

$$\Delta\omega = \frac{4}{\pi}\omega_0 \sin^{-1} \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right| \dots\dots\dots \text{II-9}$$

Où n₁ et n₂ sont les indices de réfraction des deux matériaux diélectriques.

Lorsque l'onde se propage à incidence oblique (Figure II-4-), elle sonde un milieu de période différente. Lorsque l'angle d'incidence augmente au-delà d'un angle critique α₀, les bandes interdites ne se recouvrent plus et la propagation de l'onde est à nouveau autorisée à la fréquence ω₀. Le cône d'angle au sommet α₀ définit l'ouverture angulaire de la bande interdite: à l'intérieur de ce cône, aucune onde électromagnétique ne peut se propager à la fréquence ω₀.

II-6-2-Le cristal photonique bidimensionnel

Un cristal photonique bidimensionnel. 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), 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. [20] (Figure II.3).

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

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

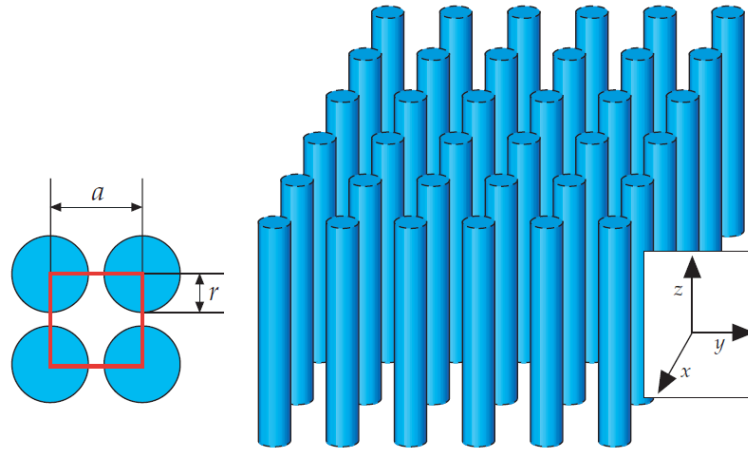


Figure II-4 : structures périodiques bidimensionnelles

Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

- a. **Les structures dites « connectées »** (figure II-5-a): les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.
- b. **Les structures dites « déconnectées »** (figure II-5-b): les motifs élémentaires sont d'indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air [25].

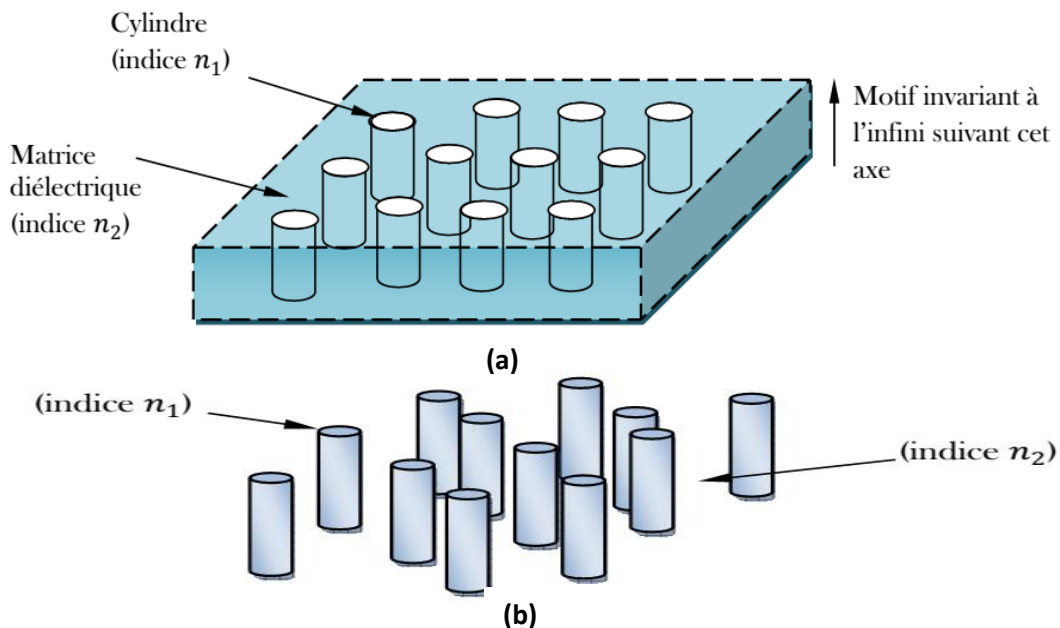


Figure II-5-(a) Structure à deux dimensions 2D connectée (b) Structure à deux dimensions 2D déconnectée [25].

A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différentes: TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bande indépendants. Il n'existe donc pas forcément une bande interdite dans les deux cas.

Indexant les modes du cristal par k_z , k et n , ils prennent la forme maintenant familière des états de Bloch

$$\mathbf{H}_{(n, k_z, k)}(\mathbf{r}) = e^{ik \cdot \rho} e^{ik_z \cdot z} \mathbf{u}_{(n, k_z, k)}(\rho) \dots \dots \dots \text{II-10}$$

Dans cette équation, ρ est la projection de $\mathbf{r}$ dans le plan xy et $\mathbf{u}(\rho)$ est la fonction, $\mathbf{u}(\rho) = \mathbf{u}(\rho + \mathbf{R})$, pour tous les vecteurs de réseau $\mathbf{R}$. La principale différence est que dans le cas présent, k est restreint à la zone de Brillouin et k_z n'est pas restreint. Dans le film multicouche, les rôles de ces deux vecteurs d'onde ont été inversés. De plus, $\mathbf{u}$ est maintenant périodique dans le plan, et non dans la direction z comme auparavant.

Tous les modes avec $k_z = 0$ (c'est-à-dire qui se propagent strictement parallèlement au plan xy) sont invariants sous les réflexions à travers le plan xy . Comme discuté au chapitre 3, cette symétrie miroir permet de classer les modes en les séparant en deux polarisations distinctes. Les modes transverse-électrique (TE) ont $\mathbf{H}$ normal au plan, $\mathbf{H} = H(\rho) \mathbf{z}$, et $\mathbf{E}$ dans le plan, $\mathbf{E}(\rho) \cdot \mathbf{z} = 0$. Modes transversaux magnétiques (TM) ont juste l'inverse: $\mathbf{E} = E(\rho) \mathbf{z}$ et $\mathbf{H}(\rho) \cdot \mathbf{z} = 0$.

Les structures de bande pour les modes TE et TM peuvent être complètement différentes. Il est possible, par exemple, qu'il y ait des bandes interdites photoniques pour une polarisation mais pas pour l'autre polarisation. Dans les prochaines sections, nous étudierons les structures de bandes TE et TM pour deux cristaux photoniques bidimensionnels différents, en nous limitant principalement à la propagation dans le plan ($k_z = 0$). Les résultats fourniront des indications utiles sur l'apparition des bandes interdites (figure II-6-) [20].

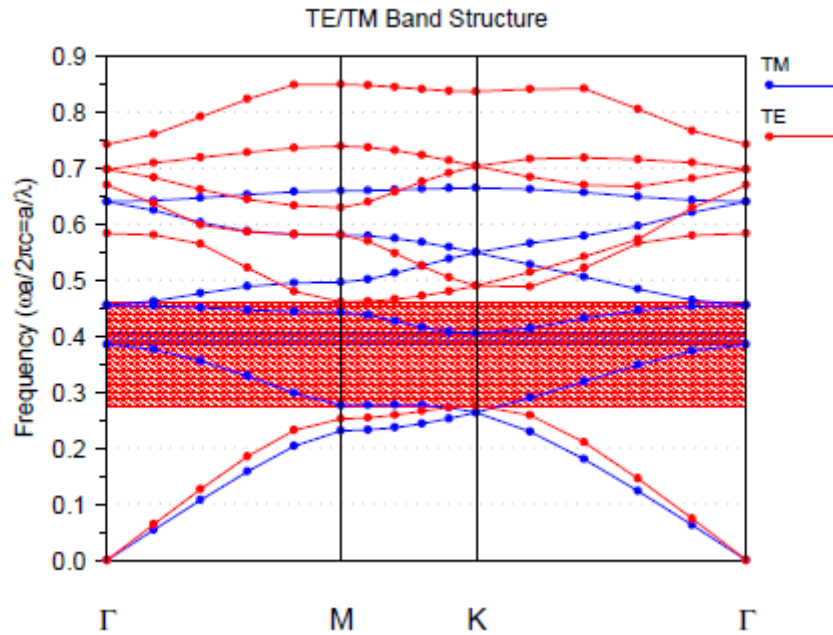
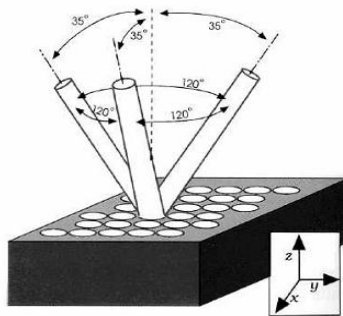


Figure II-6- : structure de bande

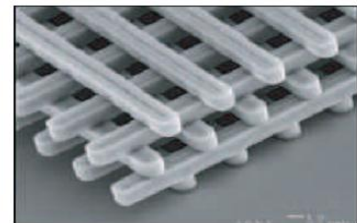
II-6-3- Cristaux photoniques tridimensionnels

Les seules structures qui permettent d'obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions de l'espace sont les cristaux photoniques 3D constituent :

- a) **La Yablonovite** est un des premiers cristaux photoniques tridimensionnels fabriqués. Elle a été réalisée en 1993 par E. Yablonovitch en perçant des trous selon trois angles azimutaux séparés de 120° , et faisant un angle de 35° par rapport à la normale [11], les trous de ce cristal ont été percés dans un bloc de plexiglas et forment un réseau fcc.
- b) **La structure « tas de bois »** est obtenue en déposant par couches successives des rubans de silicium poly cristallin dans des tranchées de silice [22].



(a) La Yablonovite



(b) cristal photonique du type tas de bois

Figure II-7-: Structures 3D

II.7 Opales

Des opales sont obtenues chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation, ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées (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 [23]. 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 [22].

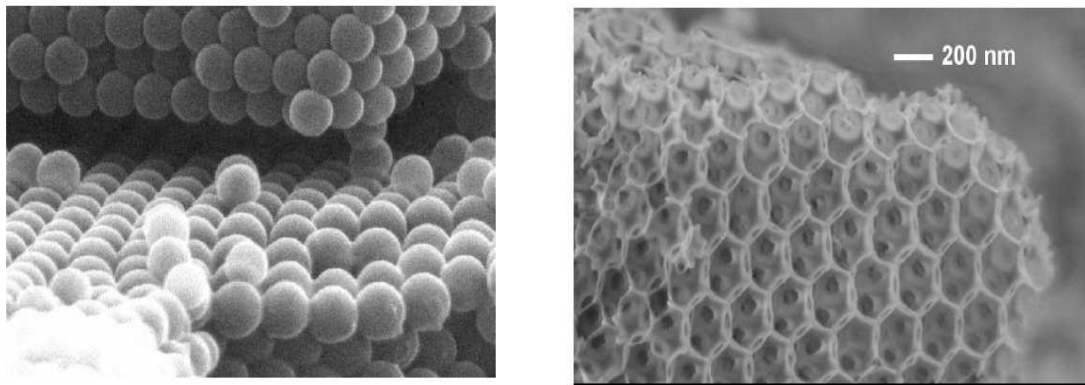


Figure II-8-: (a) Les opales directes (b) Les opales inverses [22]

II-8- Les type de défauts de cristaux photoniques

Les cristaux photoniques ne permettront de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler les flux de lumière que si l'on y introduit des défauts.

il existe deux principaux types de défauts : les défauts ponctuels et les défauts étendus. Les premiers, associés à une rupture locale de périodicité, se traduisent par la présence de modes électromagnétiques à des fréquences discrètes, analogues aux défauts électroniques. Les seconds, que l'on peut considérer comme analogues aux dislocations, peuvent donner lieu à des bandes permises de propagation, là où se trouve une bande interdite dans le cristal idéal [25].

II-8-1- Les défauts ponctuels

Il existe de multiples manières de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. On peut aussi procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal (figure II-9-).

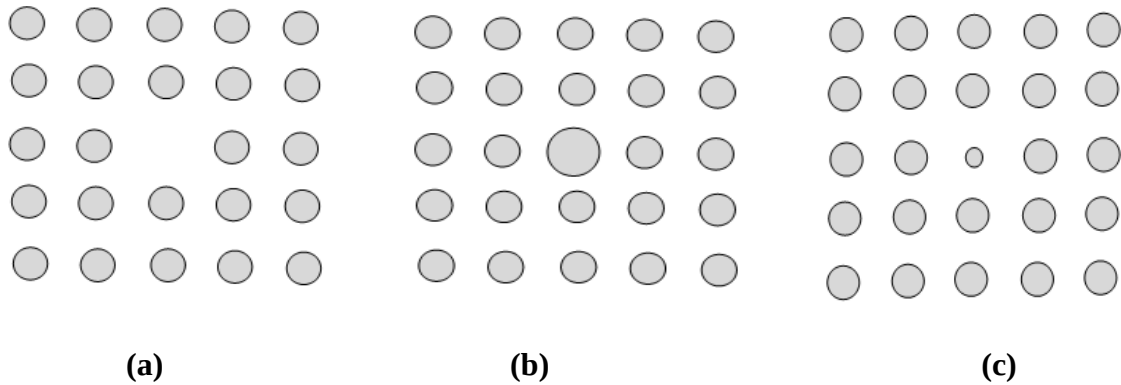


Figure II-9-: Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions [25]

II-8-2- Les défauts étendus

Les défauts étendus, de dimension 1, 2 ou 3, ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalente. Parmi ces défauts, les défauts 1D (W1) (Figure II-10-), sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études car ils ont vocation à être utilisés comme guides de lumière au sein d'un cristal donné. On peut d'ailleurs imaginer des défauts 2D (W2) ou 3D (W3) constitués d'une suite de guides W1, mis bout à bout et orientés dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal [25].

L'exemple de base est celui du guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique 2D.

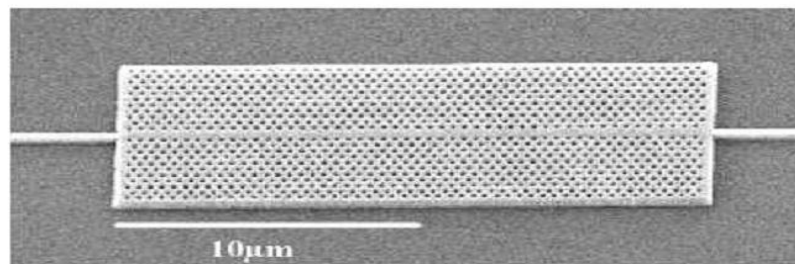


Figure II-10-: Exemple de guide W à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium Sur isolant [25].

II-8-3-Les cavités à cristaux photoniques

Considérons un cristal photonique bidimensionnel ; il est en général constitué d'un réseau de trous percés dans un matériau diélectrique, ou de colonnes de diélectrique dans l'air. Dans un cas comme dans l'autre, considérons un défaut localisé : un emplacement où le trou n'est pas percé, ou bien où il n'y a pas de colonne. Plus généralement, on peut faire varier le rayon de la colonne ou du trou en question pour faire varier continûment la perturbation qu'on introduit.

Si on injecte dans ce défaut un mode électromagnétique dont l'énergie est dans la bande interdite du cristal photonique où situé autour, il se retrouve complètement confiné, vu qu'il est entouré d'un matériau réfléchissant à cette longueur d'onde.

Il existe plusieurs types de cavités qui dépendent de la forme du réseau (triangulaire ou carré), ou du nombre de défauts (omission d'un ou plusieurs tiges) ; parmi ces cavités nous citons :

a) 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 II-11-). 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.

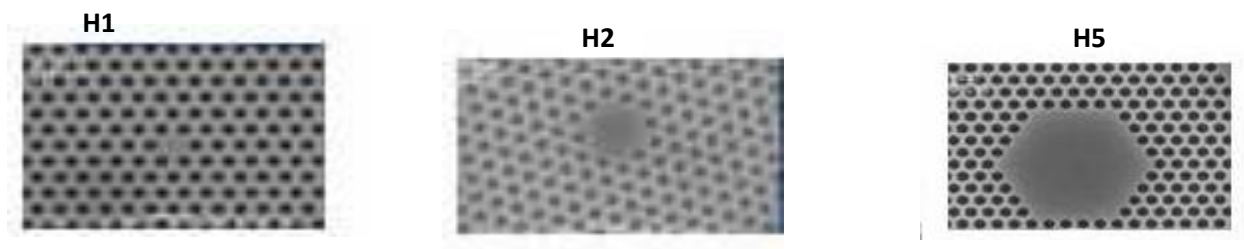


Figure II-11-: Les différents types de cavités [26].

b) 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 rangées manquantes du carré. Par exemple la cavité S_1 est constituée en omettant une ligne et une rangée.

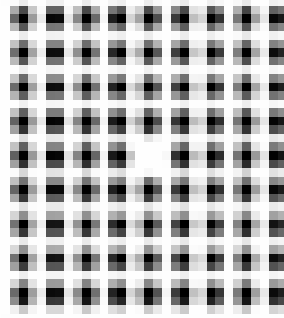


Figure II-12-: Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm [26].

c) Cavité triangulaire

La Figure II-13- représente la cavité triangulaire, cette cavité est obtenue en omettant plusieurs trous dans un réseau triangulaire de trous d'air de section circulaire ($r = 200\text{nm}$) plongé dans une matrice diélectrique ($\epsilon=8.12$).

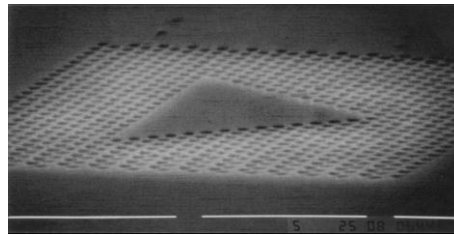


Figure II-13-: Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm [26].

d) Cavité rectangulaire

Le réseau CP2D triangulaire est défini par les paramètres suivant : paramètre de maille $a=560\text{nm}$, La Figure II-14- représente une cavité rectangulaire correspondant à l'omission de 3 rangées finies de trous dans le CP.

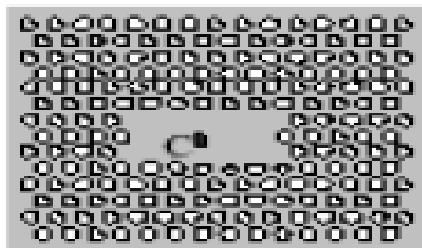


Figure II-14-: Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm [26].

II-9- Conclusion

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont la constante diélectrique varie de façon périodique, à l'échelle de la longueur d'onde, dans une, deux ou trois directions de l'espace. Cette périodicité est à l'origine de plusieurs propriétés intéressantes comme par exemple l'ouverture d'une bande photonique interdite interdisant la propagation de la lumière.

Le développement d'une optique intégrée à base de CP2D passe par la conception et la réalisation de guides optiques performants. Ces derniers sont obtenus en insérant un défaut linéique dans le réseau périodique 2D.

Chapitre III

Les cristaux photoniques

Pour la réalisation de différents

types de capteurs

III-1- Introduction

Au cours des dernières décennies, l'effort de nombreux groupes de recherche dans le monde a été axée sur l'étude et le développement d'une nouvelle génération de dispositifs photoniques basés sur des structures à bande interdite photonique (PBG), également appelé cristaux photoniques (PhC). Ces structures ont très intéressantes propriétés de confinement de la lumière et de la localisation avec la forte réduction de la taille de l'appareil, des ordres de grandeur inférieure aux dispositifs photoniques conventionnels, permettant une très grande échelle potentielle de l'intégration.

Les auteurs présentent dans ce chapitre un aperçu introductif de la base concepts de cette technologie nouvelle et émergente à partir de la forme principes fondamentaux de fonctionnement. Un certain nombre de fonctions optiques des dispositifs basés sur des structures de bande interdite photonique ont été rapportés y compris les micros résonateurs optiques et les lasers, guides d'ondes, filtres, supercollimateurs et super-prismes.

Une attention particulière a été accordée à l'exploitation de propriétés fascinantes de PhCs pour le développement de prometteuses plates-formes technologiques intégrées et multifonctionnelles à utiliser dans applications chimiques et biologiques. Les capteurs PhC ont été revus y compris les configurations basées sur l'effet de bande interdite, l'ingénierie des défauts et des fibres de cristal. De nouvelles solutions intrigantes exploitant leurs uniques propriétés de dispersion ont également été analysées décrivant le prévu avantages, potentialités et limites à venir.

III-2- Application des PC à la détection

III-1- Le biocapteur

Un capteur RI à cristaux photonique à base de guide d'onde est proposé pour la bio détection (figure III.1) [26]. Ce capteur est utilisé pour mesurer l'indice de réfraction et détecter la concentration protéine. 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 dernière réagit avec l'analyte qui induit une variation de l'indice de réfraction, de l'épaisseur de la couche sensible et de son absorption. Des concentrations autour de 10 $\mu\text{g} / \text{ml}$ sont mesurées avec un excellent rapport signal-bruit, et une large plage de détection d'indice de réfraction dynamique s'étendant de l'air à des fluides visqueux élevés est présentée.

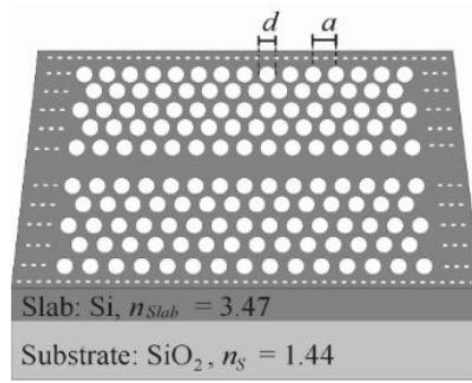


Figure III.1. Schéma du capteur à guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI2 [26].

Le mécanisme de détection de ce capteur repose sur les changements induits sur la localisation spectrale d'une bande passante du guide dû aux changements d'indice de réfraction (figure III.2).

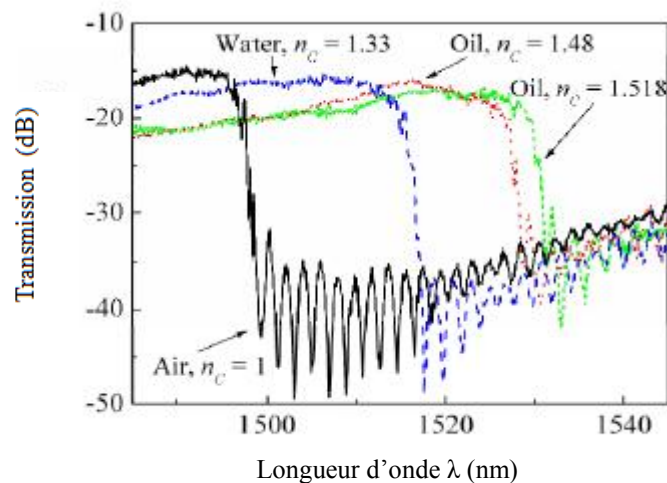


Figure III.2. Spectres de transmission mesurés pour quatre solutions d'indices différents [26].

III-2-1-1- Structure du capteur

Afin d'augmenter les performances de détection dans un capteur à CP à base de guide d'ondes, est le rayon de trous localisés au niveau de chaque côté de la ligne du défaut doit correctement conçu.

Dans ce contexte, un capteur intégré basé sur un guide d'onde CP a été proposé. L'architecture de ce capteur est formé d'un guide d'onde à cristaux photoniques W1 : Le cristal photonique est composé d'un réseau triangulaire de trous d'air de rayon $r = 0,12 \mu\text{m}$ et de périodicité $a = 0,37 \mu\text{m}$. Ce qui correspond à un facteur de remplissage en air de 30

%. Un défaut linéique de type W1 (une rangée de trous manquante) est défini selon la direction ΓK .

La structure est de 15 rangées de long et 7 rangées de large de part et d'autre du défaut. Lorsque les trous d'air du CP sont remplis d'eau désionisée homogène ($n_c = 1.33$), le bord supérieur de la bande passante de ce capteur se déplacera en conséquence avec la variation de l'indice de refraction. Un décalage de 30nm est obtenu correspondant à une sensibilité de 90.90 RIU.

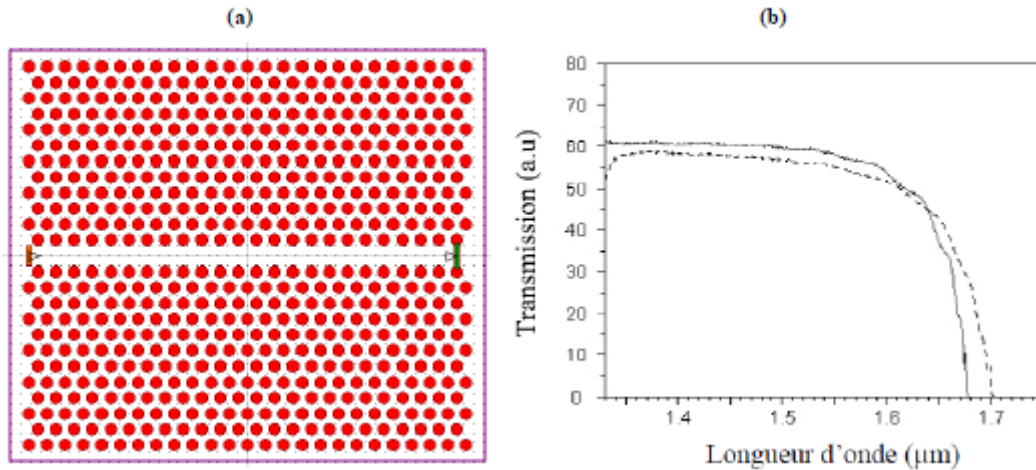


Figure III-3- : (a) Senseur référence W1 (Un rangée de trous omise) réalisé dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air sur une membrane de Si suivant la direction ΓK , $f_{air}=30\%$, (b) Spectres de transmission pour le senseur référence à CPs : pour l'air ($n_c=1$) (trait plein) et pour les trous d'air infiltrés d'eau désionisée homogène (ligne en pointillés) ($n_c = 1,33$). Le décalage du bord supérieur de la bande passante est de 30 nm. . [23]

III-2-2-2- Sensibilité et transmission

Pour améliorer la sensibilité et la transmission, deux conceptions optimisées de capteurs sont décrites (en figures III-3-), où le rayon des trous localisés de chaque côté de la ligne du défaut sont optimisés et infiltrés avec de l'eau désionisée homogène. La transmission et la surface disponible pour la détection dans les régions centrales où le champ est intense augmentent considérablement dans ces structures, améliorant ainsi la sensibilité.

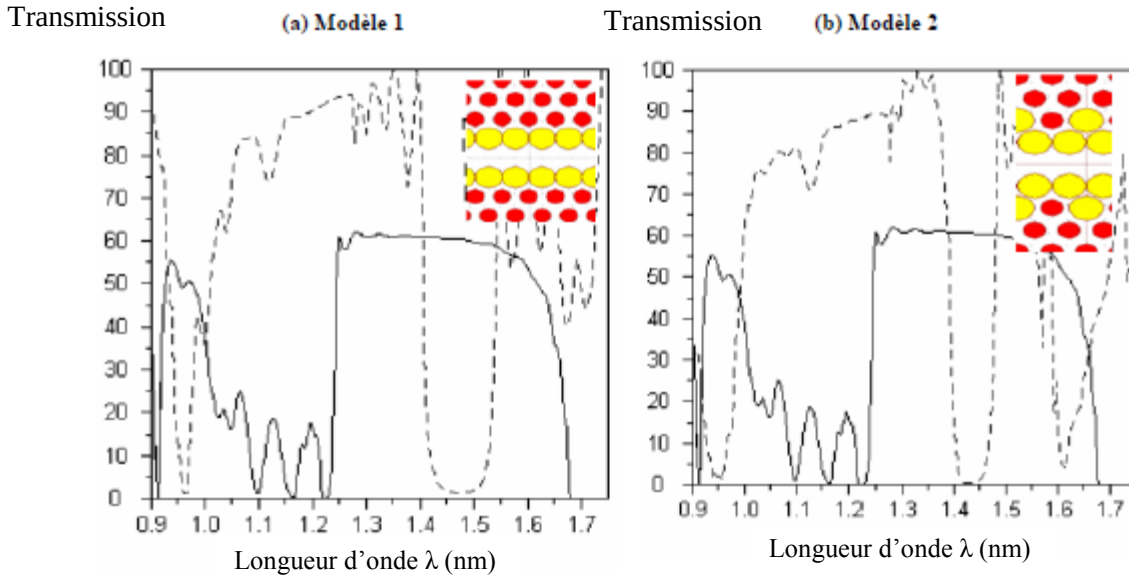


Figure III-4- : Spectre de transmission des deux modèles [23].

A partir de ces figures, il apparaît une amélioration notable et, par conséquent, une sensibilité optimale ($S = 869\text{nm/RIU}$) est obtenue pour une valeur du rayon de $1.67r$ relatif au modèle 1 respectivement ($S = 927\text{nm/RIU}$) pour $1.65r$ correspondant au modèle 2.

III-2-2- Capteur optique de salinité basé sur PhCs pour différentes températures

III-2-2-1 Principe du capteur

À température constante, chaque niveau de, La salinité de la mer a un lien unique, l'indice de réfraction augmente de $0,00092\%$ par personne augmentation de 5% (5 g / L) de la salinité. Compte tenu de la différence d'indice de réfraction ($0,00092\%$), le Niveau de puissance de sortie ($2,69\%$) en ligne quasi le capteur basé sur le guide d'ondes change en conséquence.. L'eau de mer peut être identifiée en connaissant la valeur de la Puissance de sortie. Le capteur se compose de colonnes Si dans un hôte d'antenne Qui est emballé dans un canal fluide. L'eau de mer Flux à travers la structure, la salinité dans L'eau de mer modifie l'indice de réfraction du capteur ceci à son tour change la puissance de sortie. Par Mesure de la puissance de sortie, il est possible de Évalues la présence ainsi que quantifier le niveau de salinité dans l'eau [27].

2.2.2 Structure et forme du capteur

La boîte en treillis parfaite se compose d'un châssis d'ordinateur 21 x 21. Considérez la conception du capteur. Rayon de la tige est de $0,185 \times (100 \text{ nm})$, où "A" est la distance entre les barres les plus proches, appelées comme Treillis fixe. Isolation électrique fixe de la tige 11,9716 (indice de réfraction, n , est 3,46), et la chaîne La constante a été choisie pour être de 540 nm. La structure a L'entrefer magnétique transversal (TM) de l'écart photovoltaïque est au-dessus. La gamme de longueur d'onde est comprise entre 1241 nm et 830 nm. La figure III-5- représente le diagramme du Capteur d'eau de mer avec capteur basé sur la PCR. L'émetteur envoie le signal optique à travers longueurs d'onde intéressantes pour les capteurs informatiques. Il est placé dans l'eau de mer. Indice de réfraction variation de l'eau de mer dans la salinité détermine la densité de sortie disponible dans la sortie du capteur. Ceci à son tour est envoyé au récepteur qui convertit le signal lumineux en signal électrique. Les unités de traitement de signal adressent la quantité perçue. Dans le formulaire lu à l'aide de la table de recherche. Ce qui est affiché dans le panneau d'affichage la température.

Le capteur se compose de deux quasi-inclines guides d'ondes dans la direction horizontale (r-x) et PCRR circulaire entre eux (figure III-5). Le couplage la tige est placé soit du côté de l'entrée, soit dans la sortie des guides d'onde en ligne, ce qui est noté la structure à utiliser ici pour la détection de la salinité a déjà été analysé par un filtre passe-bande. La disposition de la tige intérieure, externe tige et autres tiges présentées dans la structure était discuté dans [27].

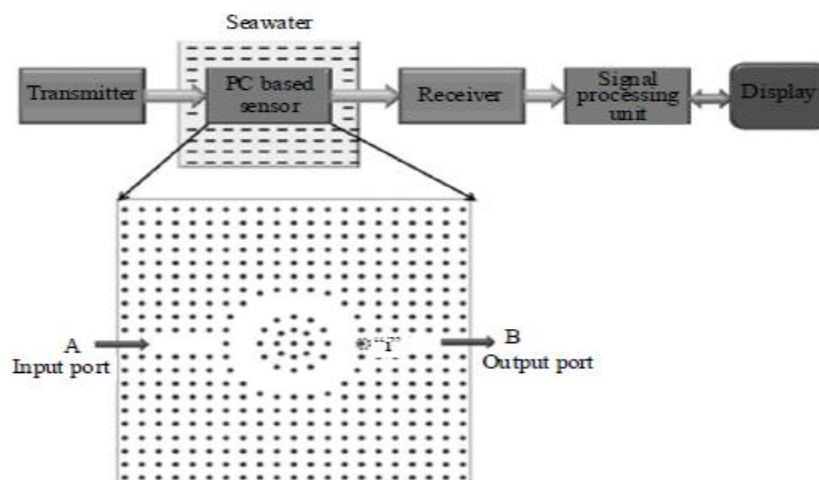


Figure III-5-: Structure schématique du capteur à base de PCRR pour détection de salinité

III-2-2-3 Évaluation des caractéristiques de détection

Une impulsion de lumière temporelle avec la puissance d'entrée de 1 mW est lancée dans le port d'entrée (A) du guide d'onde quasi on linge. Le signal de sortie est enregistré par le moniteur de puissance sur le port de sortie (B). La puissance de sortie est obtenue en appliquant le Transformée de Fourier rapide (FFT) au signal temporel enregistré par le moniteur de puissance. Le signal de sortie du moniteur de puissance gardé à la sortie output port est normalisé par la puissance du signal d'entrée, c'est-à-dire la puissance de sortie est la puissance d'entré normalisée (figure III-5-) [27].

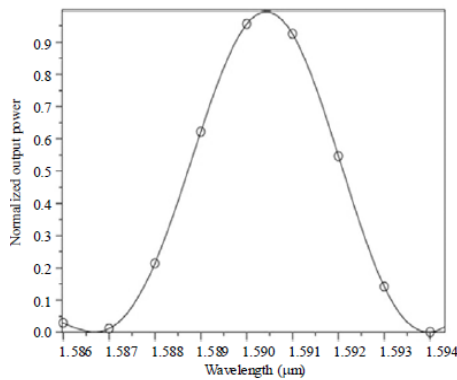


Figure III-6 - (a) - la puissance de sortie normalisée du capteur pour la salinité de 0% à la température de 25 °C [27].

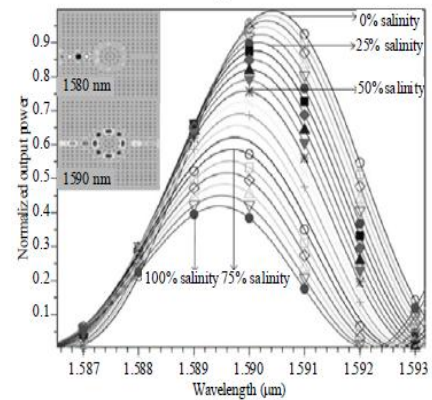


Figure. III-6- (b) la puissance de sortie normalisée du capteur pour différents niveaux de sel à la température de 25 °C [27].

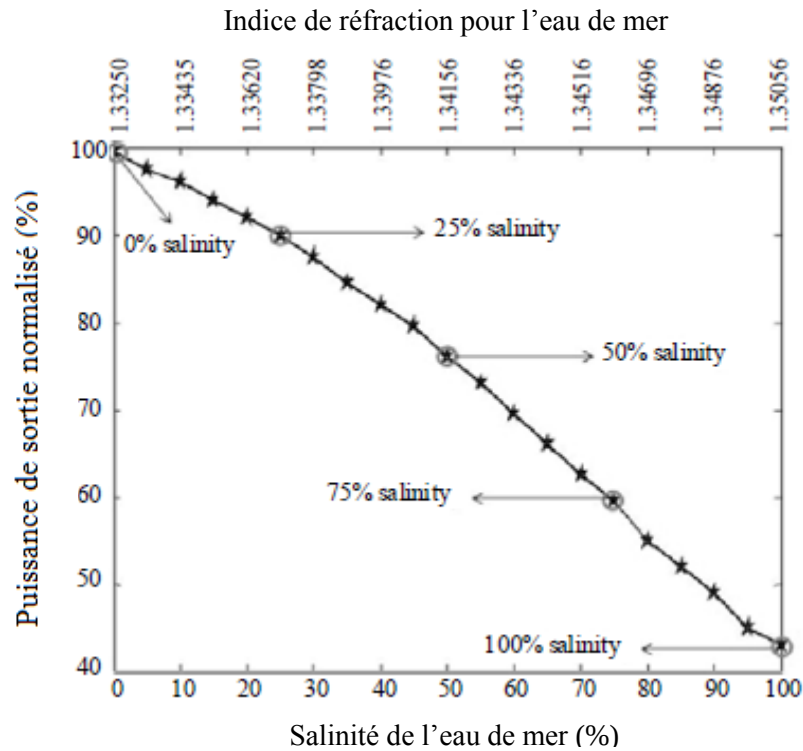


Figure –III-6- c : la puissance de sortie normalisée pour diverses salinités (0% -100%) et leurs indices de réfraction [27].

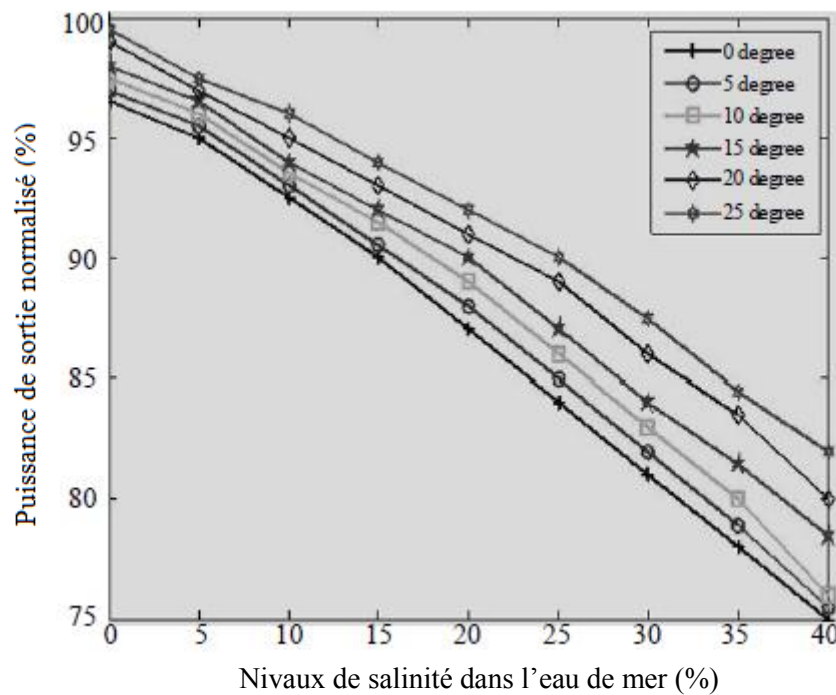


Fig. III-7 : Variation de la puissance de sortie par rapport à la Salinité de l'eau de mer à différentes températures [27].

Un capteur est proposé et conçu pour détecter la salinité de l'eau de mer à l'aide d'un résonateur à anneau circulaire à base de cristaux bidimensionnels. Au température de 25 °C, le résonant observé la longueur d'onde, le facteur de qualité et la puissance de sortie du capteur sont 1590,55 nm, 477,83 et 99,5%, respectivement. On remarque qu'il y a 2,69% de réduction sortie de puissance pour chaque augmentation de 5% du salinité qui est très suffisante pour mesurer la salinité de l'eau de mer. La minimum détectable sensibilité et gamme dynamique de la proposition du capteur de salinité sont de 1% (1 g / L) et 100%, et les températures pertinentes sont de 5 °C et 25 °C, respectivement. En outre, le changement dans la sortie de puissances de différentes températures avec les divers niveaux de salinité sont également calculés. Ce type de capteurs pourrait être déployé pour l'environnement en temps réel surveillance [27].

III-2-3- Les capteurs de pression à base de cristaux photoniques

Les recherches qui ont été menés dans ce cadre ont effectivement aboutis à la réalisation particulièrement de détecteur de grandeur physique et/ou chimique tel que : la pression. Cela en exploitant les propriétés fantastiques de la lumière par l'intermédiaire de structures adéquates à base de cristaux photonique. La propriété essentielle qui a facilité cette tâche est l'attitude de certains matériaux à changer leurs indices de réfraction de lumière après leurs interactions avec les grandeurs à détecter. Ainsi le changement des indices de réfractions du milieu conduit directement à la mesure de la grandeur qui est en cause de son changement. Le but essentiel de notre travail est le design d'un capteur de pression de fonctionnement basé sur le changement de l'indice de réfraction d'une structure à cristaux photoniques bidimensionnels quand une contrainte lui est appliquée.

III-2-2-1- Capteur RI pour la mesure de pression

Les performances des capteurs RI à base de guide d'ondes sont quantifiées en surveillant les changements de la longueur d'onde de coupure (λ_{cutoff}) en fonction de l'indice de réfraction. On note que, λ_{cutoff} décrit la longueur d'onde maximale à laquelle le mode optique peut se propager dans le guide d'ondes CP. Elle dépend de RI du milieu de couverture. Par conséquent, la sensibilité du capteur peut être définie comme le rapport entre les changements de longueur d'onde de coupure et les changements RI de couverture, comme suit

$$S = \frac{\delta \Gamma}{\delta n_c} = \frac{\Delta \lambda_{\text{cutoff}}}{\Delta n_c} \dots \dots \dots \text{III-1}$$

Où :

T : est le spectre de transmission,

Δn_c : est le changement d'indice de réfraction

$\Delta \lambda_{\text{cutoff}}$: est le changement de longueur d'onde de coupure.

III-2-2-2- Principe de détection

Il existe plusieurs types de capteurs utilisant le principe du changement du RI d'un milieu pour mesurer la force ou la pression appliquée. Un point commun entre ces différents types de capteur est l'exploitation du changement des paramètres opto-élastiques des matériaux de base constituant l'élément sensible tel que le silicium ou le germanium ou même le GaAs, quand une contrainte est lui appliquée.

La relation liant l'indice de réfraction du milieu à la contrainte est :

$$n = n_0 - (\sigma_1 + 2\sigma_2) * P \dots \dots \dots \text{III-2}$$

Où n_0 est l'indice de réfraction du milieu à l'équilibre,

σ_1, σ_2 , sont des constantes opto-élastiques de la couche sensible du capteur

P : la pression appliquée [28].

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.

III-2-2-3- Structure de capteur

La structure est un cristal photonique 2D à réseau triangulaire de trous d'air de rayon $r = 111 \text{ nm}$ et de périodicité $a = 390 \text{ nm}$. À 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 III-8 [29].

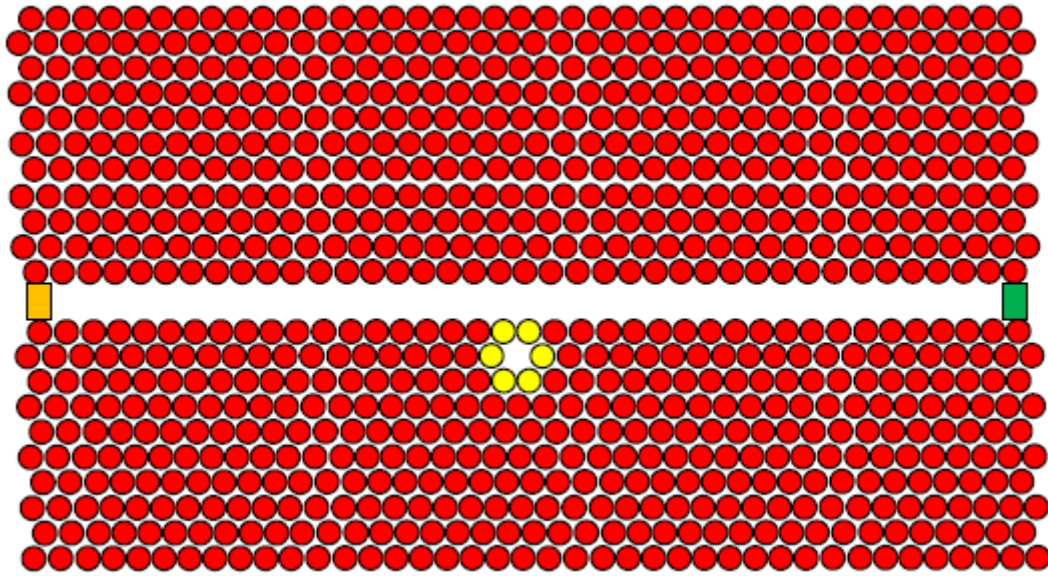


Figure III-8-: Structure du capteur de pression [30].

III-2-2-4- Description de la réponse de structure

Quand la pression est appliquée sur la cavité résonante, la propagation de la lumière et l'indice de réfraction changent [31]. La figure ci-dessus montre de déplacement du spectre de sortie (de 1nm à 10nm) en fonction de la pression appliquée. En analysant la courbe de la figure III-9-, on constate que la fréquence de coupure correspondante à chaque pression se décale d'une grandeur $\Delta\lambda$ par rapport à l'état de repos.

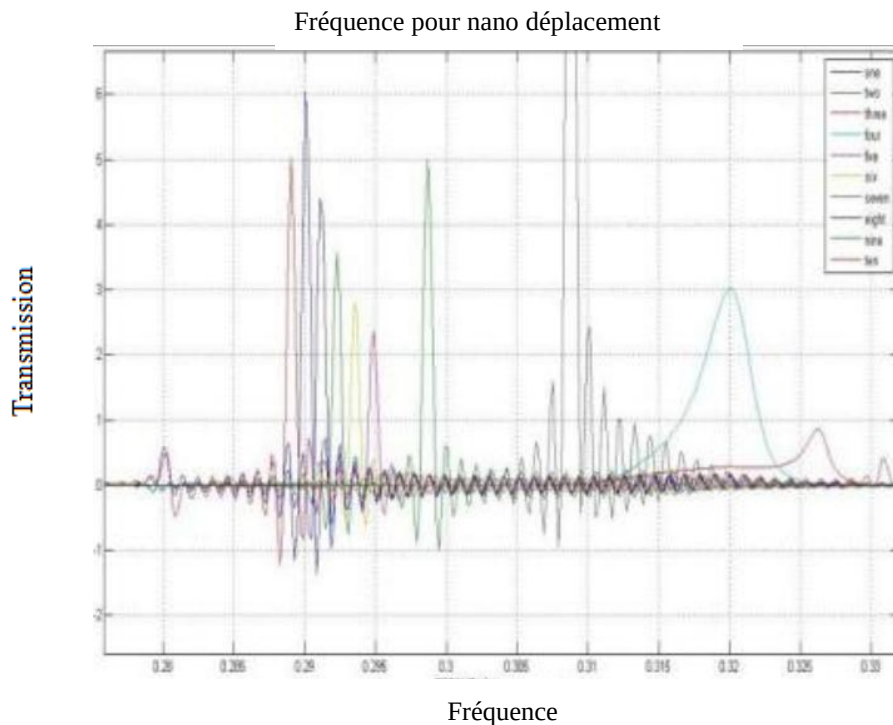


Figure III-9 : Déplacement des spectres de sortie (pour 1nm à 10nm) en fonction de la pression appliquée [31].

La figure III-10 montre la dépendance linéaire de la fréquence de résonance en fonction de la pression appliquée.

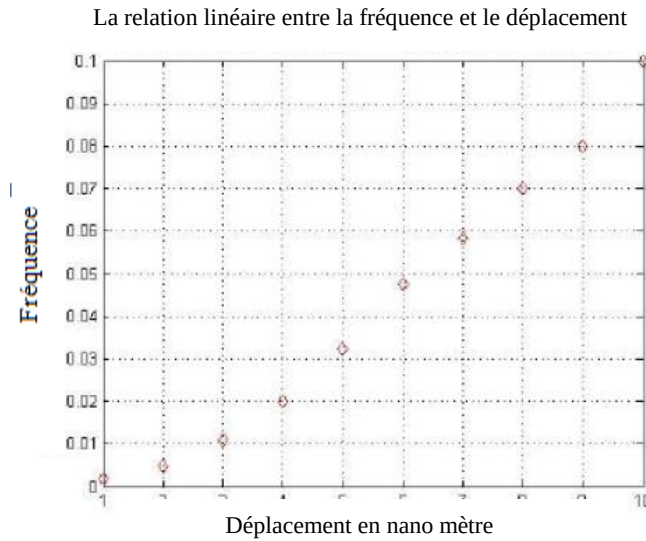


Figure III-10 : Variation de la fréquence des impulsions de sortie de sortie en fonction de la pression [31].

III-5- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montrés comment les cristaux photoniques sont utilisés pour la réalisation de capteurs pour la mesure de différents types des mesurandes. En effet, dans ce contexte nous avons fait le tour de la littérature du domaine pour donner quelques applications importantes de ces structures entre autres pour la réalisation de biocapteur, de capteur de salinité de l'eau et finalement nous avons montés comment on utilise les structures à cristaux photonique pour la réalisation de capteur de pression. Cette dernière application sera le sujet d'une étude détaillée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Etude et optimisation du capteur de basse pression par cristaux photoniques

IV-1- Introduction

Après avoir fait un tour d'horizon dans le chapitre précédent sur l'utilisation des cristaux photoniques dans le domaine des capteurs, nous nous concentrerons dans ce chapitre sur leurs utilisations exclusive pour la réalisation de capteurs de pression, Les simulations faites dans ce chapitre ont été réalisées grâce au logiciel professionnel RSoft de RsoftPhotonics, un logiciel spécialisé dans la conception et la caractérisation des structures cristallines optiques, leader dans ce domaine des études scientifiques.

IV-2- Structure de base du capteur

IV-2-1- Structure Originale

La structure que nous proposerons plus tard est basée sur celle proposée par [3] et qui est représentée en figure IV-1. Dans leur structure Zhan et al, [3] ont proposés une matrice de trous d'air réalisée dans une couche de silicium de période a de $0,351 \mu\text{m}$ et un rayon de trou de $0,3a$. La cavité d'origine est constituée d'un ensemble de 28 trous de rayon $R_c = 0,45a$ situé autour du trou central (trou en rouge sur la figure). Il y a aussi deux parties du guide d'ondes à gauche et à droite des trous qui limitent la cavité. Dans sa structure La sensibilité à la variation d'indice de réfraction S_{RI} obtenue par [3] été de $363,7 \text{ nm} / \text{URI}$ dans cette étude nous allons donner une autre structure améliorée dans le but d'augmenter cette sensibilité.

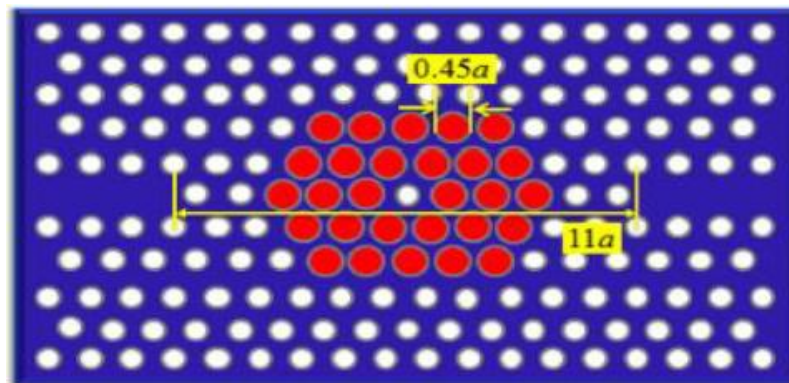


Figure IV-1: Structure originale de Zhan[3]

IV-2-2- Structure améliorée proposé

La structure que nous avons proposés, est une matrice de 21×23 de trous d'air creusées dans une couche active en silicium (ayant un indice de réfraction effectif de 2.8) avec une période a de $0.5 \mu\text{m}$ et un rayon de trous $r = 0.33a$ semblables à ceux de la structure originale (voire figure IV-2-a). Le diagramme de bande interdite de cette

structure est représenté en (figure IV-2-b), de cette figure on constate l'existence de deux bande interdite optique seulement pour le mode de propagation TM (Transverse magnétique) et entre ces deux bandes, c'est la plus grande qui sera exploité. De la(figure IV-2-b), on peut aisément voir que le plus grand gap optique est situé entre $0.32364 \, a/\lambda$ et $0.25521 \, a/\lambda$, ce qui fournit une bande interdite optique pour les longueurs d'ondes situées entre $1.08453 \, \mu\text{m}$ et $1.3753 \, \mu\text{m}$. le calcul des bandes interdites est réalisé par le module **BandSolve** de l'environnement RSoft.

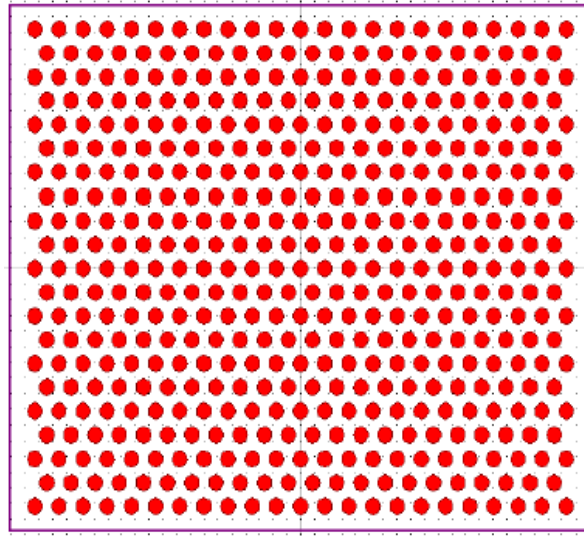


Figure IV-2-a : la matrice de trous d'air dans le substrat du silicium proposée

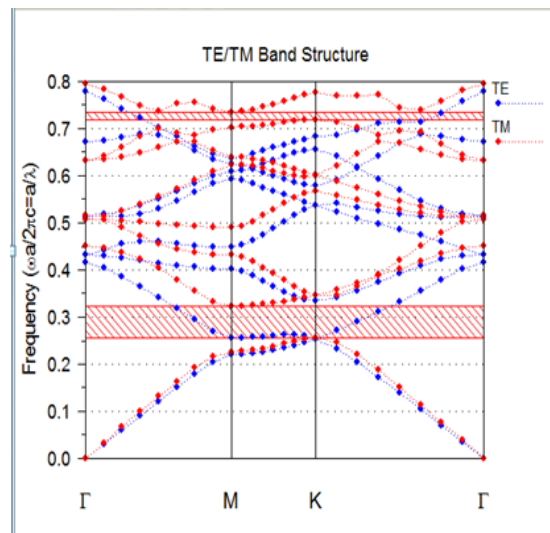


Figure IV-2-b : Diagramme de dispersion des bandes interdites du mode TM

La structuré que nous avons proposé est représentée en (figure IV-3). En effet, nous avons déplacé les guides d'onde dans les positions L3, gardés le nombre 28 des trous de la cavité, le trou central étant resté intacte (sans changement).

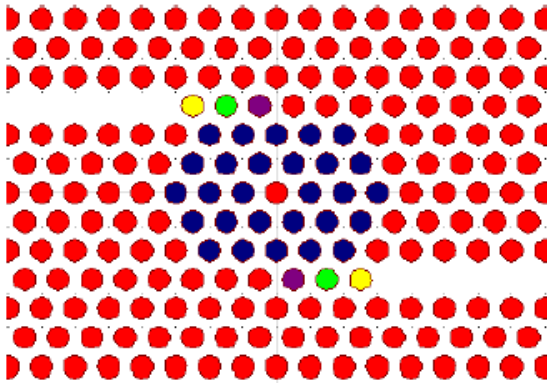


Figure IV-3-a : La première structure considérée

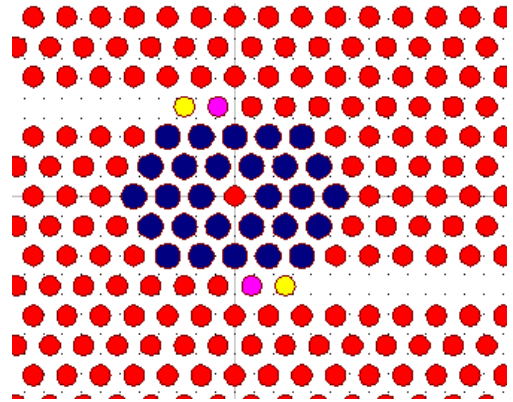


Figure IV-3-b : La seconde structure considérée

IV-3- Utilisation de l'indice effectif du matériau

Pour avoir de meilleurs résultats lors de la simulation de la structure on doit travailler en 3 dimensions. Pour ce dernier cas il est nécessaire d'introduire l'épaisseur du substrat et de la couche active du capteur ainsi que leurs indices de réfraction respectifs. L'inconvénient majeur des simulations 3D est qu'elle nécessite beaucoup de temps voire des journées entière (ou même des semaines) pour effectuer un seul calcul. Pour cette raison on fait recours à l'indice effectif qu'on calcul séparément grâce à un logiciel appropriée dit « Python ». L'utilisation de l'indice de réfraction effective de la structure prend en considération la géométrie 3D du capteur pour faire une simulation 2D, ce qui représente un énorme gain de temps et de précision au même temps [3].

Dans toutes les simulations que nous allons faire à la suite nous allons considérer un indice de réfraction du silicium de 2.8 ; cette valeur ayant été obtenues en considérant :

- Un indice de réfraction réel du silicium est de 3.48.
- L'épaisseur de la couche du silicium h de 0.2104 μm
- L'épaisseur du substrat SiO_2 sur le quel est déposé la couche active de silicium de 1.5 μm .
- L'indice de réfraction du SiO_2 de 1.45.

IV-4- Optimisation des paramètres de la structure

IV-4-1- Optimisation de la structure en fonction de R_c

Le changement que nous avons fait sur la structure originale exige un nouveau processus d'optimisation. En effet, faire varier l'emplacement de l'excitation et le moniteur ainsi que les indices de réfractions influe sans aucun doute sur les positions des longueurs d'onde de résonances et sur la transmission du signal reçu à cause du faible couplage probable entre le guide d'onde d'entrée et celui de la sortie. Par conséquent nous allons dans ce qui suit ré-optimiser le rayon R_c des trous de la cavité de façon à avoir les mêmes performances (sensibilité, facteur de qualité....etc) que ceux obtenues par [3] voire même mieux.

Dans les deux guides d'onde considérées, nous avons en premier lieu laissés trois trous de part et d'autre de la ligne verticale centrale (les trous jaune-vert et violets), mais cette forme ne nous a donné aucun résultat au niveau du récepteur (figure IV-3-a). Alors nous avons enlevés un trou pour ne garder que deux trous (voir figure IV-3-b) et cette dernière structure a fournie de bons résultats comme nous verrons à la suite. Ensuite nous avons fait varier le rayon des trous de la cavité R_c entre $0.36a$ et $0.43a$ avec un pas de $0.01a$ pour deux différentes valeurs de l'indice de réfraction $n = 2.8$ et $n = 2.83985$, et nous avons tracés, la sensibilité, le facteur de qualité et la transmission ; dans le but de trouver un optimum de R_c garantissant un bon compromis entre ces différents paramètres. La simulation étant réalisée par le module **Full Wave** de l'environnement RSoft et comme excitation nous avons choisi une longueur d'onde d'entrée de $1.55 \mu\text{m}$ du fait qu'elle est très utilisée dans ce domaine. Les résultats que nous avons obtenus sont représentés dans la partie qui suit.

N.B : le facteur de qualité ou facteur Q est un paramètre sans dimension qui décrit la sous-modulation d'un oscillateur ou d'un résonateur et caractérise la bande passante d'un résonateur par rapport à sa fréquence centrale. Pour cela le bon facteur de qualité nous a donné la meilleure sélectivité pour notre capteur.

IV-4-2- Résultats de l'optimisation

a- Réponse de la structure en fonction de R_c

Les figures (IV-4-a, b) représentent les transmissions de signaux obtenus au niveau de l'écran en fonction de R_c pour $n = 2,8$ et $n = 2,83985$, respectivement. De ces formes, on voit clairement que l'amplitude des signaux augmentent avec l'augmentation de R_c (et vice versa) à partir de 0.15023 pour $R_c = 0.36a$ à 0.9093 pour $R_c = 0.42a$ qui est pour $n = 2,8$ et

0,166793 pour $R_c = 0,36a$ à 0,8895 pour $R_c = 0,42a$ pour $n = 2,83985$. Le plus haut niveau est de 0,42a, résultats pouvant être constaté à partir de ces deux courbes.

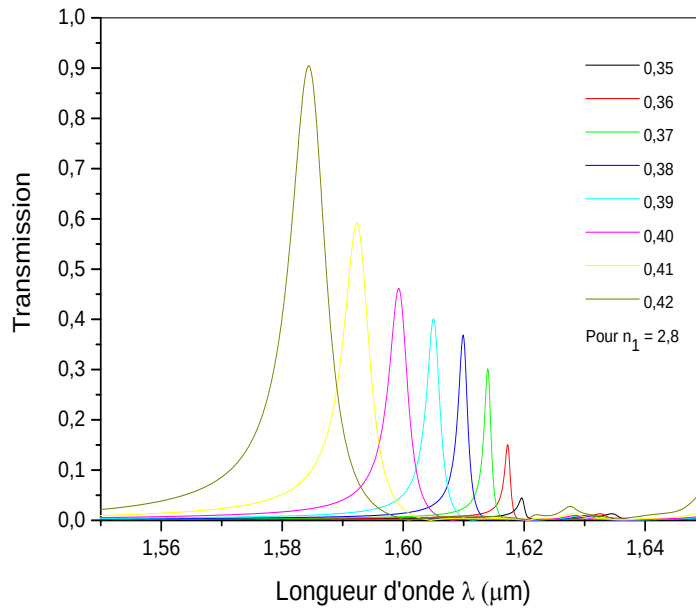


Figure IV-4-a : Réponse en fonction de R_c pour $n= 2.8$

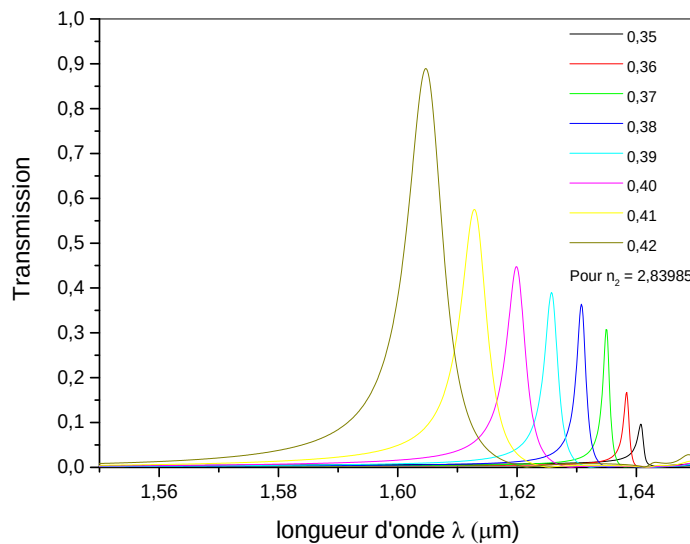


Figure IV-4-b : Réponse en fonction de R_c pour $n= 2.83985$

En ce qui concerne les longueurs d'onde de résonance (d'abscisse de longueur d'onde au niveau des pics de résonance), l'inverse est vrai ; les grandes longueurs d'ondes sont obtenues pour les faibles valeurs de R_c et vice versa. pour chacun de la réfraction (figure IV-4-a,b).

Chapitre IV : Conception d'un capteur de pression par cristaux photoniques

Les résultats numériques obtenus sont collectés dans le tableaux IV-1 et les valeurs Rc sont changées à chaque fois de 0,36a à 0,43a par pas de 0.01a.

Pour chaque changement, nous calculons la transmission, la sensibilité à la variation de l'indice de réfraction, la sensibilité à la variation de pression hydrostatique, les positions des peaks de résonances et les facteurs de qualités correspondants à chaque peaks.

Il est à noter que les valeurs de Rc supérieures à 0.42a ne sont pas prises en compte dans le tableau car pour ces valeurs, la réponse de la structure est non significative pour n_2 comme pour n_1 . Et les signaux de sorties correspondants présentent des sommets multi-peaks ce qui rend leurs utilisations insignifiantes.

La figure IV-4-c présente la combinaison des deux figures précédentes. Nous avons tracé cette figure pour regrouper d'une part les résultats précédents et aussi pour montrer un autre résultat très important qui est la différence entre les longueurs d'ondes de résonance

RC	Indice	Transmission	Q	Delta lambda	S _{RI}	SP Pour $\Delta P=1$
0.36a	2.8	0.15023	545.11	0.0211	530.1507538	21.1
	2.83985	0.16793	560.42			
0.37a	2.8	0.30162	1225.6	0.021	527.638191	21
	2.83985	0.30729	1225.2			
0.38a	2.8	0.36898	881.9	0.0209	525.1256281	20.9
	2.83985	0.364	885.83			
0.39a	2.8	0.40279	612.32	0.0208	522.6130653	20.8
	2.83985	0.3901	609.89			
0.40a	2.8	0.4649	442.49	0.0208	522.6130653	20.8
	2.93985	0.4477	432.95			
0.41a	2.8	0.594	317.36	0.0205	515.07537769	20.5
	2.83985	0.57515	313.9			
0.42a	2.8	0.9093	238.5	0.0204	512.568141	20.4
	2.83985	0.8895	235.39			

Tableau IV-1 : Caractéristiques principales de la structure en fonction de Rc

pour $n = 2.8$ et $n=2.83985$

Pour une même valeur de R_c mais pour les deux indices de réfraction considérés. De cette figure on peut remarquer que le décalage des longueurs d'ondes de résonances correspondant à n_1 et n_2 pour chaque valeur de R_c est assez important ce qui donnera certainement naissance à de fortes sensibilités comme nous montrerons plus loin.

En ce qui concerne les transmissions, on constate que les transmissions obtenues pour les grandes valeurs de R_c sont importantes et assez importantes pour les faibles valeurs de R_c , ce qui montre la bonne qualité de la structure.

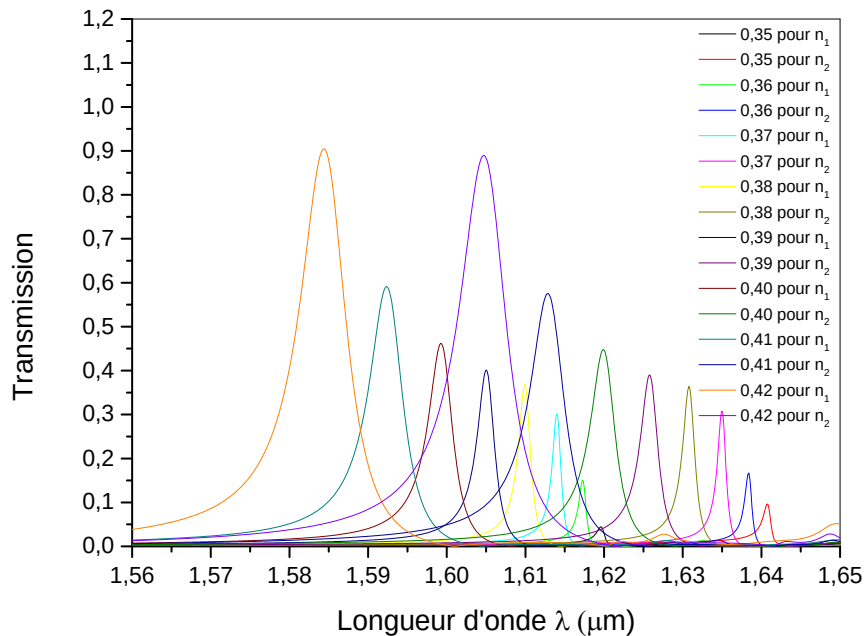


Figure IV-4-c : Réponse de la structure en fonction de R_c pour les indices de réfraction n_1 et n_2 considérés

b- Optimisation de la valeur de R_c

Dans cette étape nous allons tenter de chercher une valeur de R_c offrant un bon compromis entre les caractéristiques importantes du capteur qui sont : la sensibilité, le facteur de qualité et la transmission.

c-Variation des facteurs de qualité correspondants à n_1 et n_2 en fonction de R_c

Les courbes des figures IV-5-a et IV-5-b représentent les facteurs de qualité correspondant à $n = 2,8$ et $n = 2,83985$. De ces courbes on constate que le facteur de qualité atteint une valeur maximale pour les deux cas de d'indice de réfraction pour une valeur R_c de 0,37a.

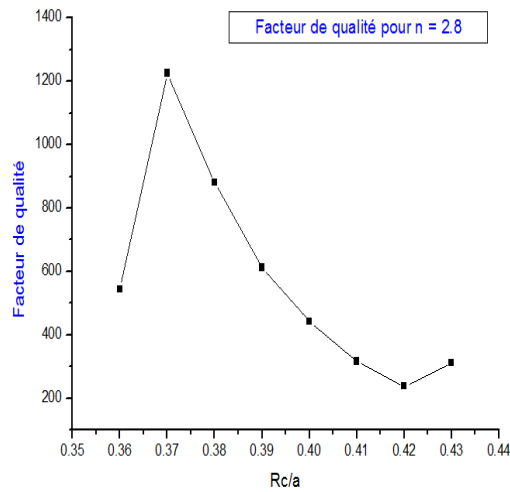


Figure IV-5-a: Tracé du facteur de qualité pour $n=2.8$

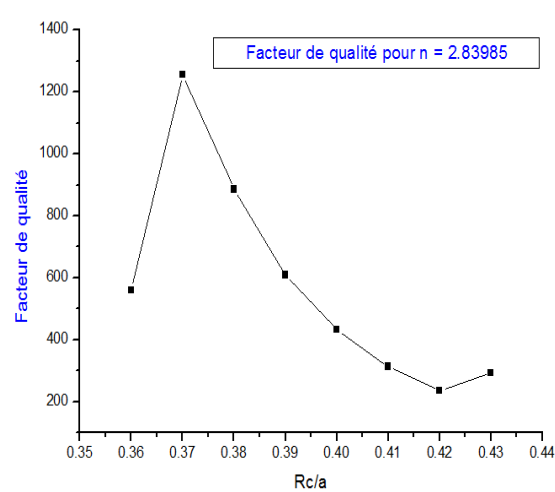


Figure IV-5-b: Tracé du facteur de qualité pour $n=2.83985$

d- Variation de la sensibilité de la structure en fonction de Rc

- **La sensibilité à la variation de l'indice de réfraction**

Cette sensibilité exprime le caractère du capteur à modifier la longueur d'onde du flux de lumière entrant à sa sortie (le décalage de la longueur d'onde de résonance) pour chaque changement d'indice de réfraction (le changement d'indice de réfraction dans ce cas de sensibilité peut être issu de différent facteur entre autre, a cause de facteurs biologique (come sang et ADN), présence de gaz, présence de substance chimique, effort mécanique comme la pression, le déplacement....etc.).

Cette sensibilité est calculée à partir de la relation :

$$S_{RI} = 1000 \times \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, \text{ en nm/URI} \dots\dots\dots \text{IV-1}$$

De cette expression on conclut que S_{RI} est de plus en plus important quand le décalage $\Delta\lambda$ sera important pour les faibles changements d'indice de réfractons.

- **La sensibilité à la variation de pression hydrostatique**

Elle est définie comme étant la capacité du capteur à modifier (à décaler) la longueur d'onde de résonance du flux de lumière entrant à sa sortie suite à l'application d'un seul facteur qui est la pression mécanique. Cette sensibilité est calculée à partir de la relation :

$$S_p = \frac{\Delta\lambda}{\Delta P} \dots\dots\dots \text{IV-2}$$

$$S_p = \frac{\Delta\lambda}{\Delta P} \times \frac{\Delta n}{\Delta P}$$

$$S_p = S_{RI} \times \frac{\Delta n}{\Delta P}, \text{ en nm /GPa} \dots\dots\dots \text{IV-3}$$

La figure suivante donne la variation de la sensibilité en pression de la structure en fonction de R_c .

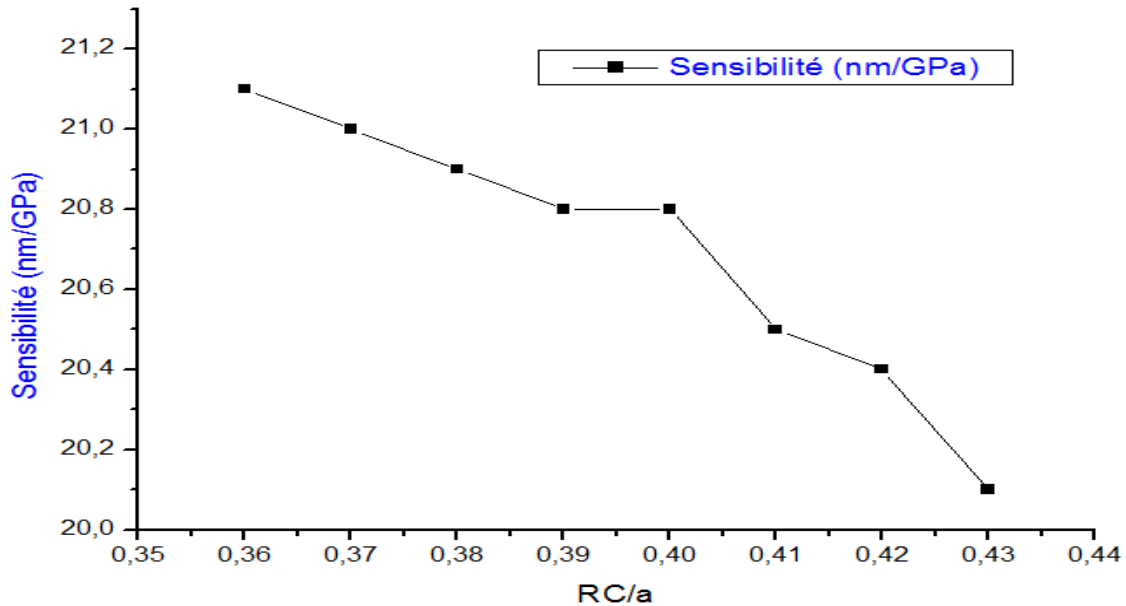


Figure IV-6 : Tracé de la sensibilité en en fonction de R_c

En traçant la courbe de sensibilité en fonction de la variation de R_c , on peut aisément constater que son changement est limité dans un interval situé entre 20,4 nm/GPa et 21.1 nm/GPa pour l'ensemble des valeurs de R_c . De cette courbe on remarque que la sensibilité décroît à partir de 21.1nm/GPa (pour $R_c = 0.36a$) jusqu'à 20.4(pour $R_c = 0.42a$). Cette sensibilité présente aussi une zone stable située entre $R_c = 0.39a$ et $0.40a$.

e- Variation des transmissions correspondants à n_1 et n_2 en fonction de R_c

La courbe suivante donne la variation des transmissions en fonction de R_c pour n_1 et n_2

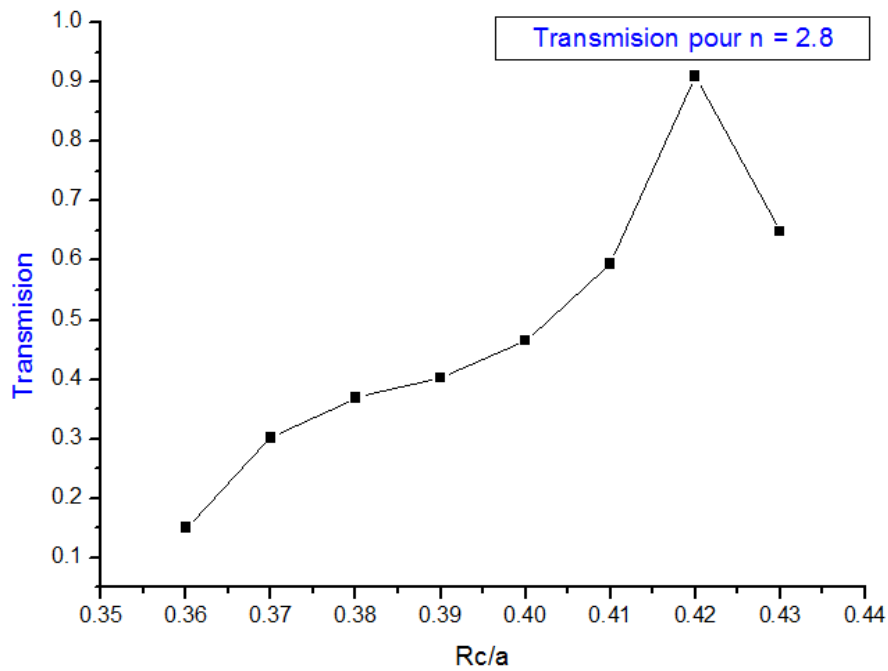


Figure IV-7-a: Tracé de la Transmission en fonction de Rc pour $n = 2.8$

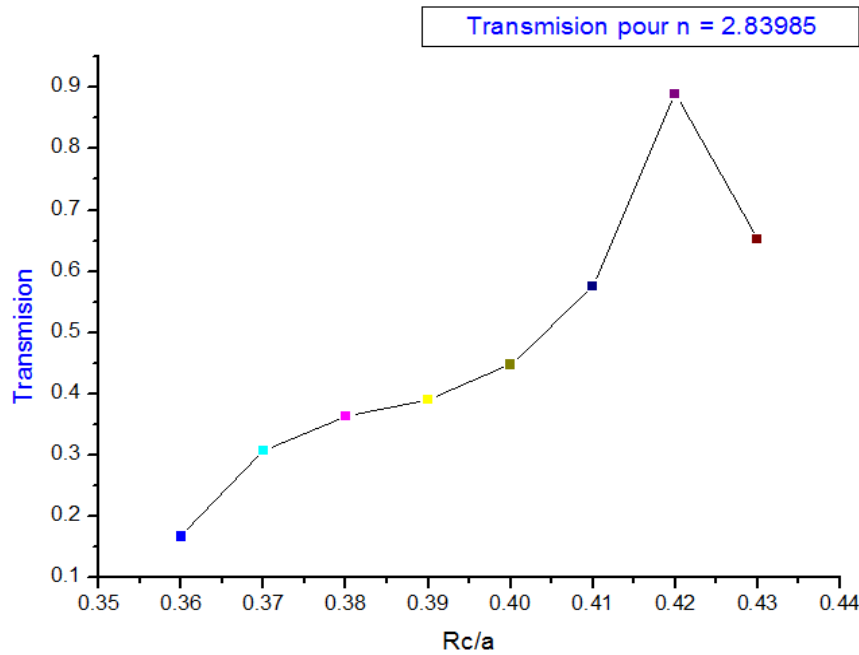


Figure IV-7-b: Tracé de la Transmission en fonction de Rc pour $n = 2.83985$

A partir de ces deux figures(IV-7-a, IV-7-b), nous pouvons clairement voir que les transmissions dans les deux cas passent du minimum correspondant à $Rc = 0,36a$ au maximum correspondant à $Rc = 0,42 a$.

IV-5- Structure finale du capteur de pression :

En comparant les résultats obtenus plus haut, on peut aisément constater que $R_c = 0.37a$ est la valeur optimale cherchée puisqu'elle correspond à une sensibilité élevée de 21, un bon facteur de qualité de 1225.6 pour n_1 , 1255.2 pour n_2 et une transmission acceptable de 0.30162 pour n_1 et de 0.30729 pour n_2 .

Cette valeur sera utilisée dans la seconde partie du travail, pour déterminer la réponse proprement dite du capteur de pression. Dans la suite du travail nous allons considérer la structure finale représentée en (figure IV-8)

Cette structure est caractérisée par les paramètres suivant :

- Une matrice de 21×23 trous d'air dans le substrat de silicium.
- Une période de $0.351 \mu\text{m}$.
- Un rayon r de $0.3a$.
- Un rayon de cavité de $0.37a$.

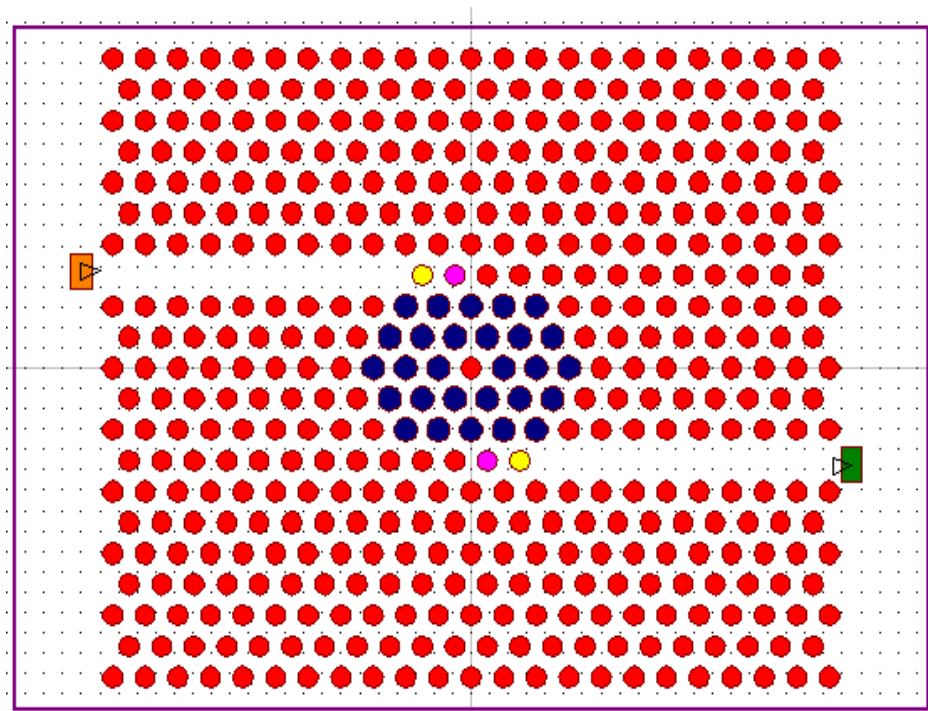


Figure IV-8: Structure finale du capteur de pression adoptée

IV-5-1-Réponse de la structure optimisée pour différentes pression

Après la détermination de la structure optimale, l'étape suivante dans notre étude est de l'utilisée pour la mesure et la capture de de la pression hydrostatique de l'ordre du Méga pascal. La pression hydrostatique est caractérisée par sa nature à affecter la surface sensible qui est appliquée de la même manière dans toutes les directions. Dans notre travail, nous avons considéré une plage de pression de 0 à 1 GPa. Grâce à des études antérieures trouvées dans [3], nous avons constaté que l'indice de réfraction du silicium diffère linéairement par un pas de 0,03985 pour chaque pas de 1GPa appliquée. Le tableau IV-2 donne les valeurs de l'indice de réfraction n pour le silicium en fonction de la pression.

P (GPa)	n (UIR)
0	2.8
0.01	2.8004
0.02	2.8008
0.03	2.8012
0.04	2.80159
0.05	2.80199
0.1	2.80398
0.15	2.80598
0.2	2.80797
0.25	2.80996
0.3	2.81196
0.4	2.81594
0.5	2.81993
0.6	2.82391
0.7	2.82789
0.8	2.83188
0.9	2.83587
1	2.83985

Tableau IV-2 : Indice de réfraction du silicium en fonction de la pression.

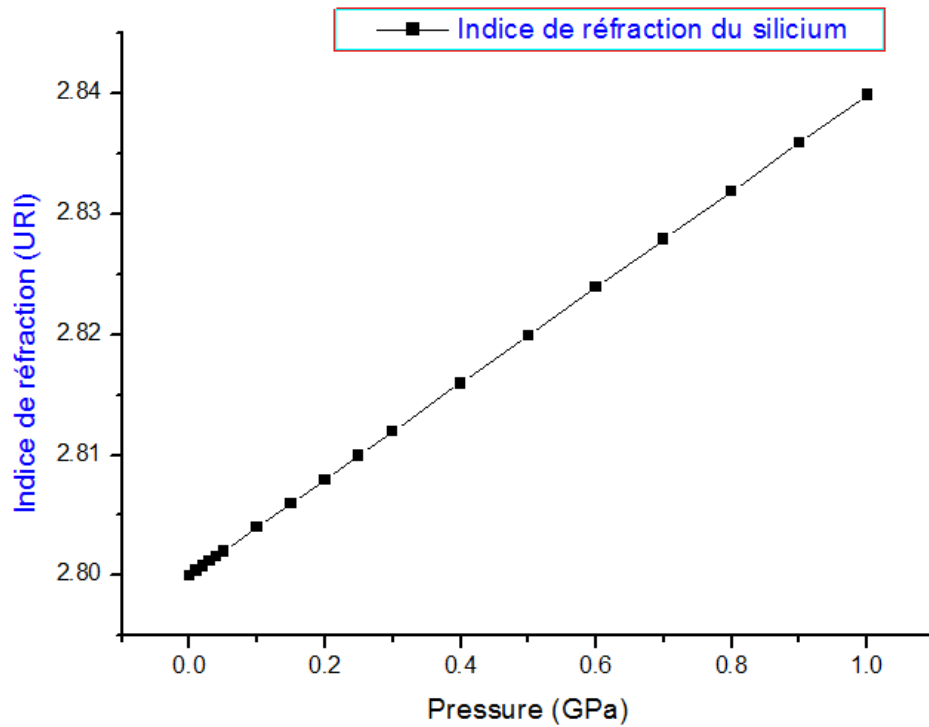


Figure IV-9 : Indice de réfraction du silicium en fonction de la pression.

La figure IV-9 donne la réponse de la structure pour les hautes pressions situées entre 0 et 7GPa. Cette étude a été faite par nos amis de la promotion précédente (année 2016-2017).

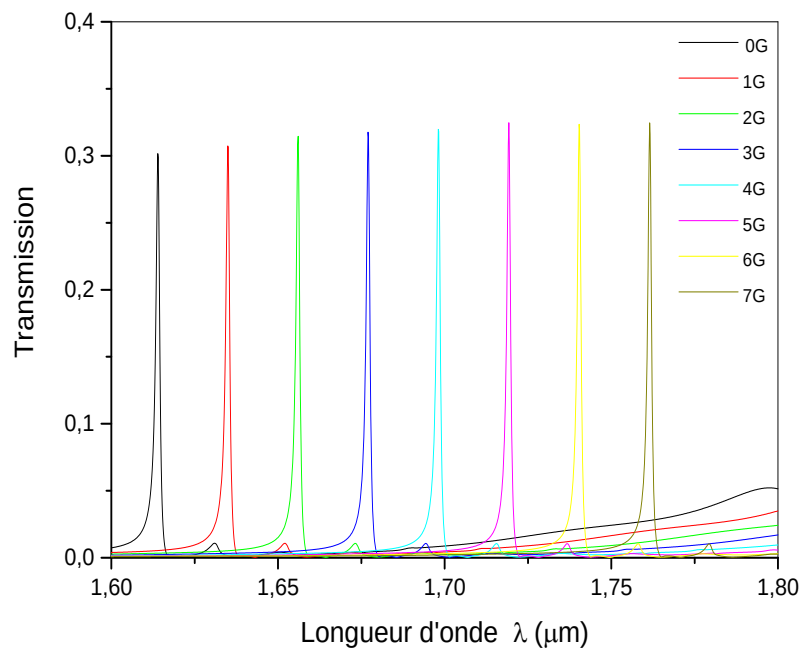


Figure IV-10 : Réponse de capteur pour des pressions situées entre 0 GPa et 7 GPa

Chapitre IV : Conception d'un capteur de pression par cristaux photoniques

Pour ce qui est des faibles pressions, les courbes de réponse que nous avons obtenus avec notre structure sont représentées en figure IV-11 et IV-12.

Les résultats que nous avons trouvés sont regroupés en tableau IV-3 et 4. La gamme de pression considérée ici est située entre 0 et 1GPa par pas variable entre 0.01GPa et 0.1 GPa.

Pression	indice	résonance	transmission	Δn	$\Delta \lambda$ (μm)	ΔP	S_p	S_{RI}
0	2.8	1.614	0.30161					
0.01	2.8004	1.6142	0.30344	0.0004	0.0002	0.01	20	501.882
0.02	2.8008	1.6144	0.30159	0.0004	0.0002	0.01	20	501.882
0.03	2.8012	1.6146	0.30294	0.0004	0.0002	0.01	20	501.882
0.04	2.80159	1.6148	0.30305	0.0004	0.0002	0.01	20	501.882
0.05	2.802	1.615	0.3012	0.0004	0.0002	0.01	20	501.88

Tableau IV-3 : Grandeurs caractérisant la réponse du capteur en fonction de la pression

Pour de la pression inférieure à 100 MPa.

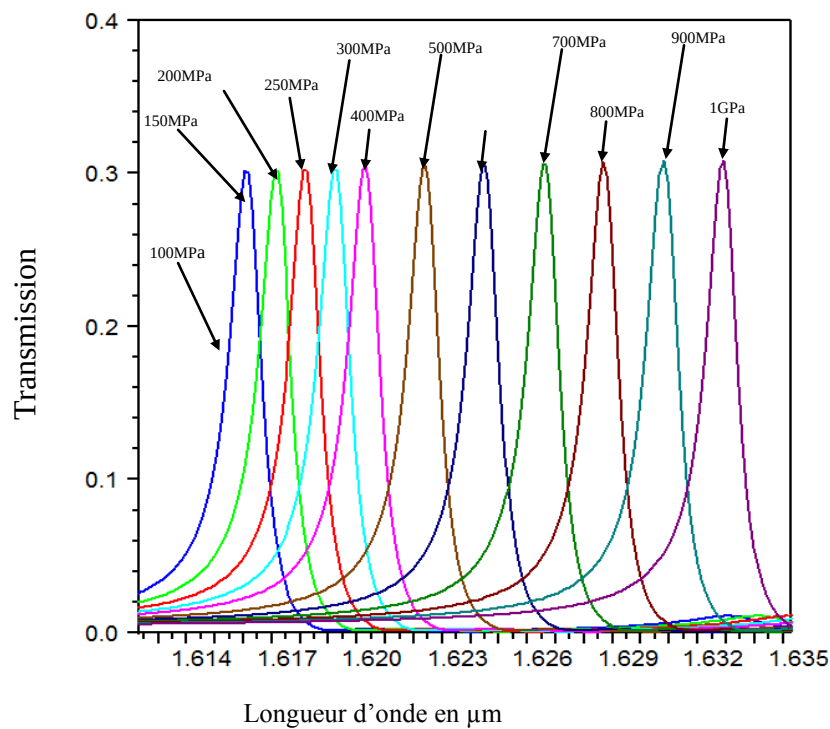


Figure IV-11 : Réponse de capteur pour des basses pressions situées entre 0 GPa et 1GPa

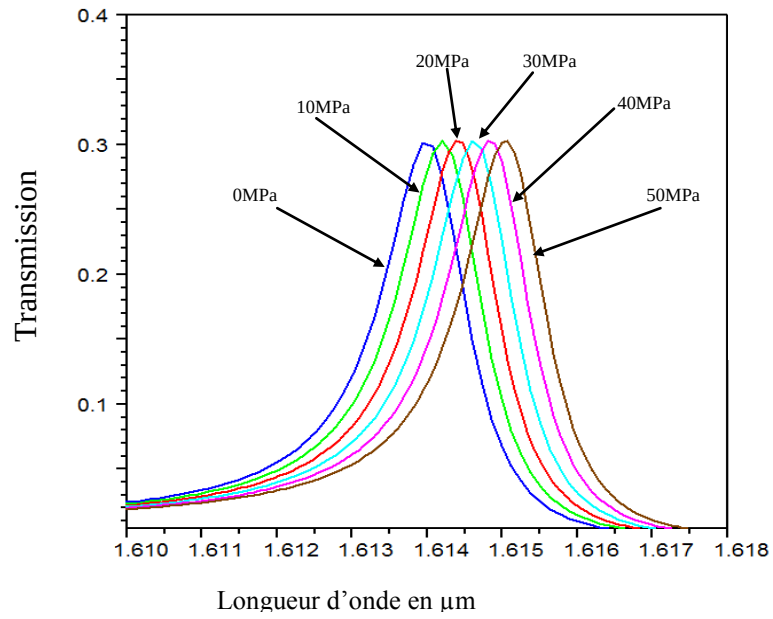


Figure IV-12 : Réponse finale du capteur pour basses pressions situées.

Pression	indice	résonance	transmission	Δn	$\Delta \lambda$ (μm)	ΔP	S_p	S_{RI}
0.1	2.80399	1.616	0.30183	0.00199	0.001	0.05	20	501.882
0.15	2.806	1.6171	0.3017	0.002	0.0011	0.05	22	552.07
0.2	2.808	1.6181	0.3019	0.002	0.0011	0.05	20	501.88
0.25	2.81	0.6192	0.3033	0.002	0.0011	0.05	22	552.07
0.3	2.81196	1.6203	0.305	0.00199	0.0011	0.05	22	552.07
0.4	2.81594	1.6224	0.30558	0.00399	0.0021	0.1	21	526.976
0.5	2.8199	1.6245	0.3058	0.004	0.0021	0.1	21	526.98
0.6	2.8239	1.6265	0.3064	0.004	0.002	0.1	20	501.88
0.7	2.8279	1.6287	0.30778	0.00399	0.0022	0.1	22	552.07
0.8	2.8319	1.6308	0.3087	0.004	0.0021	0.1	21	526.98
0.9	2.83587	1.6329	0.0738	0.00398	0.0021	0.1	21	526.976
1	2.83985	1.6349	0.30736	0.00399	0.002	0.1	20	501.882

Tableau IV-4 : Grandeurs caractérisant la réponse du capteur en fonction de la pression

Pour des pressions situées entre 0.1 et 1GPa.

IV-5-2- Tracé des longueurs d'onde de résonance de la réponse du capteur

La réponse du capteur est le décalage des longueurs d'onde de résonance en fonction de la pression. Le capteur est d'autant plus performant que sa réponse est linéaire.

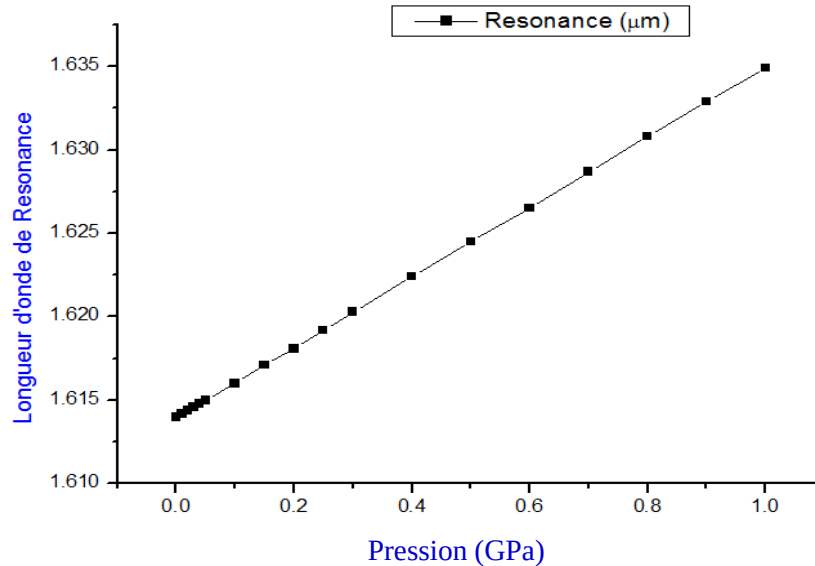


Figure IV-13 : Longueurs d'onde de résonances correspondantes aux pressions

Situées entre 0 GPa et 1GPa

Cette figure montre que des longueurs d'ondes de résonance du capteur varient linéairement avec la pression hydrostatique appliquée. Cette forme de variation offre un grand atout en ce qui concerne la prédiction du comportement du capteur (par le calcul des longueurs d'ondes de résonance) pour des pressions autres que ceux du que nous avons considéré dans notre travail.

IV-5- 3- Tracé des sensibilités du capteur

En se basant sur les résultats du tableau IV.3, nous avons tracé les courbes de la sensibilité du capteur S_{RI} et S_P . Les résultats sont représentés en figures IV-13.

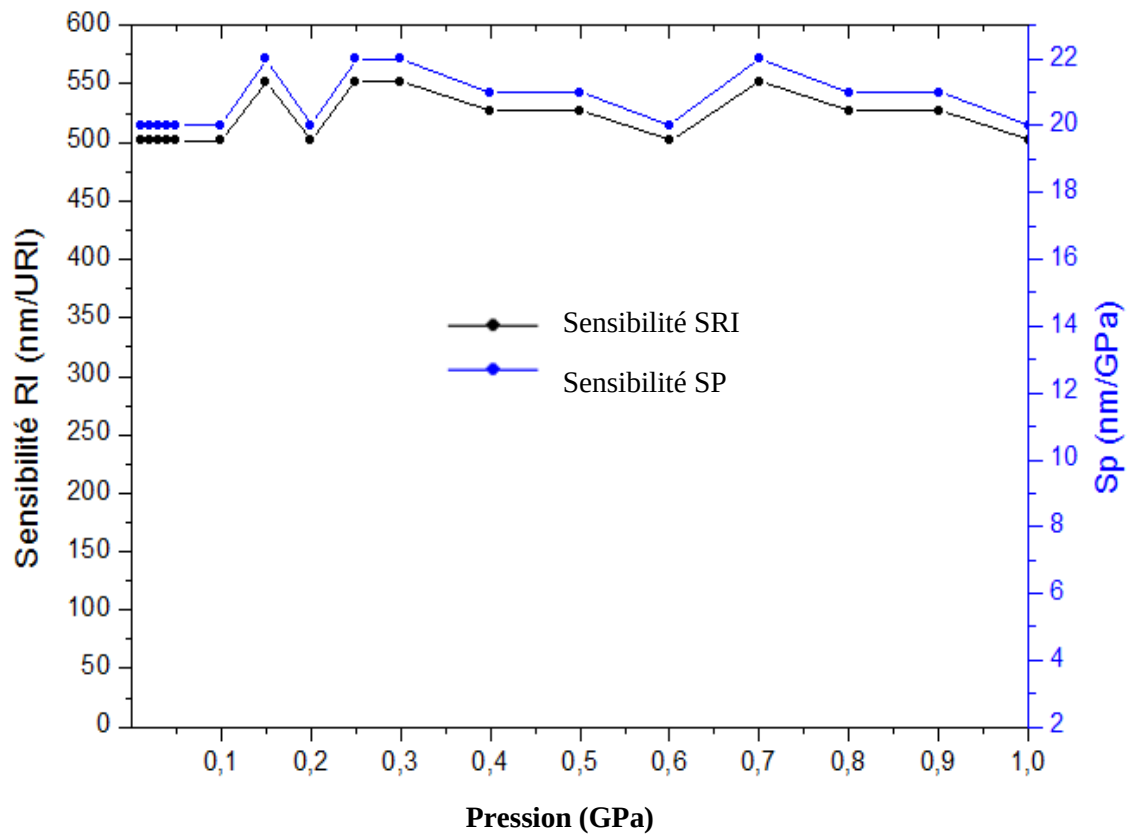


Figure IV-14 : Les sensibilités S_{RI} et S_P du capteur finale tracées pour les pressions considérés.

De cette figure on peut constater aisément que :

a-On note que la sensibilité S_{RI} du capteur varie entre 500 et 600 nm/URI reste constante dans le domaine de la pression 0 à 1GPa. Ces résultats sont très bons et constituent une réelle amélioration de la sensibilité par rapport à ceux trouver dans le design original de [3] qui était 363.7 et aussi par rapport à ceux trouver par nos amis de l'année précédente (384nm/URI).

b-En ce qui concerne la sensibilité au stress, nous pouvons dire que notre conception fournie une sensibilité élevée allant jusqu'à 22 nm / GPa près de 250MPa et 300 MPa et une sensibilité stable de 20 nm / GPa dans la gamme de pression de 0 à100MPa Ces résultats sont très bons, et même excellents montre à quel point le capteur fonctionne bien pour les basses pressions.

IV-6- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une structure à cristaux photonique pour la réalisation d'un capteur de pression. Cette représente une version améliorée d'une structure existante en littérature du domaine. Nous avons trouvé que cette structure a permis d'augmenter la sensibilité RI de 363,7 nm / URI à 552,07026nm / URI menant à une sensibilité pour la pression SP allant jusqu'à 22 nm /GPa pour des pressions appliquée de l'ordre de quelque dizaine à quelque centaine de Méga pascal (de 0 à 1GPa).

Les résultats que nous avons obtenus sont très bons et aussi très compétitifs avec la littérature du domaine (13.7nm/GPa pour [3] et 15.3nm/GPa pour les résultats obtenus par le binôme de la promotion de l'année précédente).

Conclusion général

Conclusion général et perspective:

Au début de ce travail nous avons fixés un but qui été la réalisation d'un capteur de pression à base de structure à cristaux photonique ayant une haute sensibilité. Et pour aboutir à ce but nous avons suivies les étapes suivantes :

- La première étape été de faire une étude des caractéristiques générales et des principes de fonctionnement de différents type de capteur. Puis on s'est focalisés sur l'étude des capteurs de pressions.
- Dans une seconde étape, nous avons parlés des cristaux photoniques en temps que théorie et concept, puis on s'est penchés sur l'utilisation de telles structures pour la fabrication de détecteur et de capteurs de différents types couvrants ainsi, presque la totalité des besoins industriels en capteurs de hautes performances.
- La dernière étape de notre travail été de proposer une structure, de définir ses caractéristiques (période, rayon de trous r , forme de la cavité et des formes des guides d'ondes inclus) et son GAP optique à fin de définir la plage de longueur d'onde dans laquelle elle doit être exploité. En suite cette structure est optimisée afin d'obtenir une sensibilité maximale et de bon facteurs de qualité.

Les résultats que nous avons obtenus grâce au design que nous avons utilisé, sont très satisfaisants du faite qu'ils montrent une grande amélioration de la sensibilité par rapport à celle trouvé par [33] avec sa structure originale. De nos résultats on peut constater que la sensibilité RI a grimpé de **363.7nm/URI** à **552.07 nm/URI**, ce qui la rendue un très bon support pour la réalisation d'un capteur pour la mesure des faibles pressions.

Avec le design que nous avons utilisé, nous avons pu obtenir une sensibilité en pression pouvant atteindre **les 22 nm/GPa**. Cette sensibilité est très importante et en la comparant avec la littérature du domaine on a constatés qu'elle présente une valeur très compétitive.

En perspective, nous incitons les PFEs des promotions à venir, à découvrir d'autre designs pour ce capteur et/ou de faire d'autre processus d'optimisation comme optimisation les dispositions et les longueurs des guides d'ondes d'entrée et de sortie, afin de garantir un meilleur couplage entre la source et la cavité et aussi avoir un meilleur facteur de qualité.

Bibliographies

- [1] E. Yablonovitch, « Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics » Phys. Rev. Lett., 58, 2059-2062, 1987.
- [2] Benmerkhi Ahlem, « influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnel » Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2008.
- [3] Y.Zhang, Y.Zhao, Q .Wang «Measurement of methane concentration with cryptophane Infiltrated photonic crystal micro cavity», Sensors and Actuators B 209, 431–437, 2015.
- [4] Lycées E. Pérochon et J. Desfontaines, section Sciences de l'Ingénieur. «capteurs _ cr»p1, 2.
- [5] N. Jaffrezic-R.C. Martelet. P. Clechet. « Capteurs chimiques et biochimiques ». In Techniques de l'Ingénieur, Vol. R 420. Paris : Techniques de l'Ingénieur, Pp R 420-14, 2001.
- [6] Yacouba Sanogo « conception et fabrication de capteur et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la santé et de l'environnement » these de doctorat, 26 May 2014, P16.
- [7] BougriouFeida, « Etude theorique des materiaux a bandes Interdites photoniques bidimensionnels : Applications dans le domaine du guidage Optique et la detection », thèse de doctorat Université Constantine 1, 16 décembre 2013.
- [8] P.Poulichet «Cours sur l'électronique de conditionnement du capteur» GROUBE ESIEE PARIS Novembre 2006.
- [9] Georges Asch, Bernard poussery « les Capteurs en instrumentation industriels 8^{eme} édition», DUNOD 2017.
- [10] kemouche saleh « simulation thermomécanique de capteur de pression en silicium pour des applications Biomédicale ». Mémoire de magister, université Constantine 1, 2014.
- [11] BABACI SOFIAN, BERROUA BENZINA MOHAMMED. « Étude de réalisation d'un capteur de pression différentielle à inductance variable ». Mémoire de master Université ABOUBEKR BELKAID, TLEMCEM 2011/2012.

- [12] Philippe Menini « Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium », Thèse doctorat de l'université P. Sabatier Toulouse. 1998.
- [13] Samira Amoudache «cristaux photonique accusables : application ou domaine des capteur » P23,25.
- [14] Benaissa Fatima «Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres optiques» mémoire de magister, Université de Abou-Bakrbelkaïd, Tlemcen, 2013.
- [15] Rihane besma «Etude des guides d'onde à cristaux photoniques bidimensionnels» mémoire de master Université Mentouri, Constantine 2008/2009.
- [16] Benoît LOMBARDET, « Étude et réalisation de cristaux photoniques pour l'optique intégrée ». École polytechnique fédéral de Lausanne.
- [17] T.E. Sale « Vertical cavity surface emitting lasers », Research Studies Press. Taunton, Somerset, England, 1995.
- [18] Saidani Asma « Application des méthodes stochastiques pour l'optimisation des filtres passe-bande à base des cristaux photoniques unidimensionnels », mémoire master, Université de Abou-Bakrbelkaïd, Tlemcen, 2014.
- [19] John D. Joannopoulos Steven G. Johnson «Photonic Crystals Molding the Flow of Light» Second Edition.
- [20] Cazimir Gabriel Bostan «Design and fabrication of quasi-2D photonic crystal componment based on silicon insulator technologie».
- [21] Barbara Wild « Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité », Thèse de doctorat N° 3573, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.
- [22] Robert Michaël 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 μ m », thèse doctorat, Université Pierre et Marie Curie ,2010.
- [23] BENLAKHDAR Moatazz « Conception des biocapteur RI à base des guide d'ondes a cristaux photonique (PWC) », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA
- [24] Kaddour Nassiba « Design de capteur de pression haute sensibilité à base de cristaux photoniques 2D sur substrat en silicium », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF, M'SILA

- [25] S.Tao,D.Chen, G.Wang, J.Qiao and Y.Duan. « A high sensitivity pressure sensor based on tow-dimentional photonic crystal. Photonic sensor». p142. 2016.
- [26] N. Skivesen, A. Têtu, M. Kristensen, J. Kjems, L. H. Frandsen, and Peter I. Borel. « Photonic-crystal waveguide biosensor », Opt. Express, Vol 15, N°6, p 46-48-46-50, March 2007.
- [27] S. ROBINSON and R. NAKKEERAN « PC Based Optical Salinity Sensor for Different Temperatures » Department of Electronics and Communication Engineering, Pondicherry Engineering College, Puducherry-605 014, India.P3-4.
- [28] F. Gao, H. Liu C. Sheng, C. Zhu, and S. N. Zhu « Refractive index sensor based on the leaky radiation of a microfiber », Optical Society of America, 2014.
- [29] N .BOUZIDI « Etude et conception d'un capteur d'indice de réfraction (RI) à base de cristaux photoniques bidimensionnels à usage multiple», mémoire de master Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2016.
- [30] T. Zouache, A. Hocini, A. Harhouz, and R. Mokhtari, «Design of Pressure Sensor Based on Two-Dimensional Photonic Crystal», Special Issue of the 6th International Congress& Exhibition (APMAS2016), Maslak, Istanbul, Turkey, Ju ne 1– 3, 2016.
- [31] Mohankumar, I. Bahaddur, « NANOCAVITY BASED OPTICAL PRESSURE SENSOR », International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056 Volume: 02 Issue: 03, June-2015

Annexe

1-a-Présentation du logiciel Rsoft CAD

1-a-1-Environnement de CAD :

Le RSoft CAD est un programme de base de RSoft Photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que : des guide d'ondes, des cavités résonantes, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Cette logiciel calcule la réflexion, l'absorption et l'efficacité de transmittance de diffraction à tout ordre de diffraction sous la forme d'un la réflexion ou la transmittance de spectre.

L'un des avantages de ce programme est qu'il possède une interface CAO facile à utiliser qui permet une définition précise d'un profil arbitraire associé à une approximation grossière. Des résultats améliorés peuvent être trouvés rapidement, le processus de conception et de modélisation est entièrement personnalisable permettant l'émulation par lots. Un avantage important de l'interface CAD partagée est qu'une fois que les concepteurs de créer et d'analyser la structure de la diffraction dans la conception même de la conception DiffractMOD et peut brandir directement et d'autres aspects de la simulation BandSOLVE la même structure - plage de temps de réponse à l'aide de la structure à grande échelle de la méthode de différence de temps limitée ou une analyse en utilisant la méthode d'extension de l'onde de surface. DiffractMOD peut également être facilement utilisé avec BeamPROP, BandSOLVE, dual-wave et GratingMOD pour simuler l'hybride d'une unité multi-composants.

1-a-2-Le simulateur « BandSOLVE» :

Le logiciel que nous avons exploité pour modéliser les structures par la méthode des ondes planes s'appelle «BandSOLVE» développé par Rsoft.

BandSOLVE est un logiciel de simulation des structures de bande photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour produire des diagrammes de bande des structures à bandes interdites photoniques classiques tels que 2D et 3D et les guides à cristaux photoniques en utilisant une méthode

supercellule type onde plane. A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une

bande interdite dans les deux cas. En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation. BandSOLVE est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques, qui sont simulés par la méthode FDTD implémentée dans le logiciel FullWave, pour examiner les propriétés dépendant du temps comme les pertes, et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies .

BandSOLVE est destiné pour fonctionner avec les autres modules de simulation de Rsoft tels que BeamPROP et FullWAVE, il partage le même outil de CAD avec ces modules. En particulier, le BandSOLVE est spécialement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques.

1-a-3 Le simulateur Full WAVE :

Les simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel FullWAVE qui est un logiciel de simulation électromagnétique, basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel .La méthode FDTD repose sur la résolution des équations de Maxwell dans un domaine discrétisé spatialement et temporellement. Il permet de suivre l'évolution du champ EM au cours du temps en tout point de la structure. On peut ainsi obtenir les cartographies du champ EM à n'importe quel endroit et n'importe quel moment. La connaissance de l'évolution du champ en fonction du temps permet également d'obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure.

Ce logiciel peut simuler des structures (limitées, infinies ou périodiques), formées par différents matériaux qui peuvent être métalliques ou diélectriques. L'utilisation de FullWAVE nécessite de définir les matériaux qui composent la structure à l'aide de la permittivité électrique. Il faut aussi définir l'environnement de la structure et donc les conditions aux limites. Pour cela il faut disposer de conditions absorbantes aux abords du domaine de discrétisation (calcul) qui permet d'éviter les réflexions parasites engendrées aux bords de la fenêtre du calcul FDTD afin de simuler un milieu ouvert.

2-a-1 Les étapes de simulation :

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

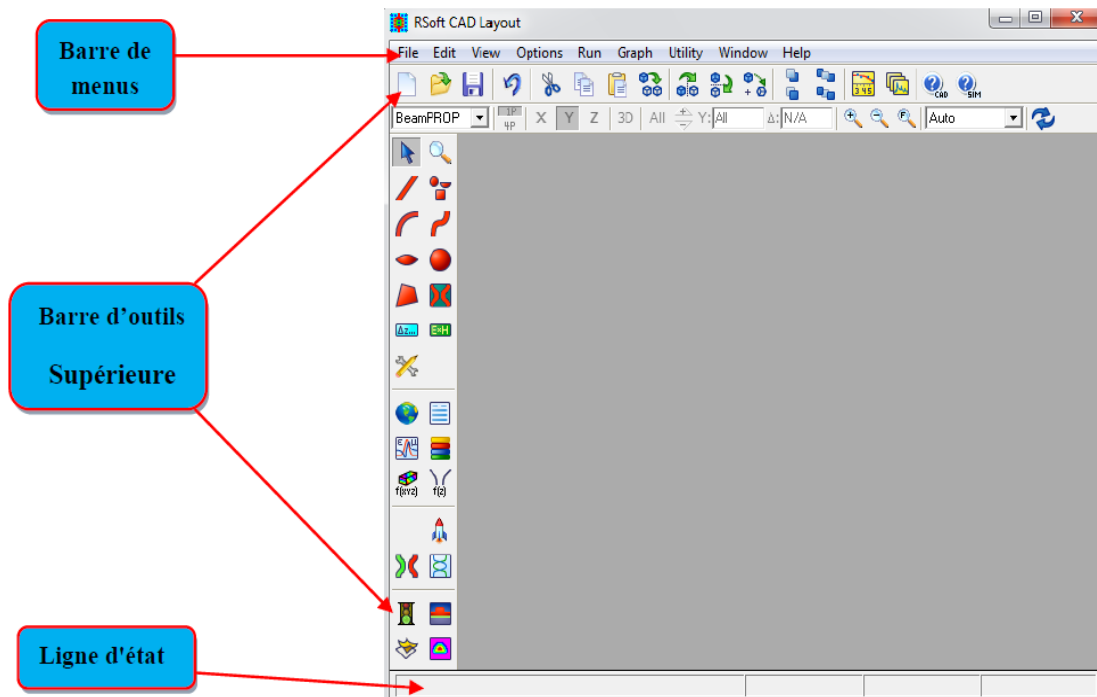


Figure -1: La fenêtre de programme de R Soft CAD, montrant la barre de menus au dessus, les barres des outils supérieurs et gauches, et la ligne d'état au fond .

Les menus permettent l'accès au divers dossier standard et les opérations d'édition. La ligne d'état fournit des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin.

2-a-2-Créer un nouveau circuit : Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône

New circuit  dans la barre d'outils supérieur. Alternativement, nous allons choisir **File /New** du menu. Le dialogue de démarrage de la figure III- 02 va apparaître.

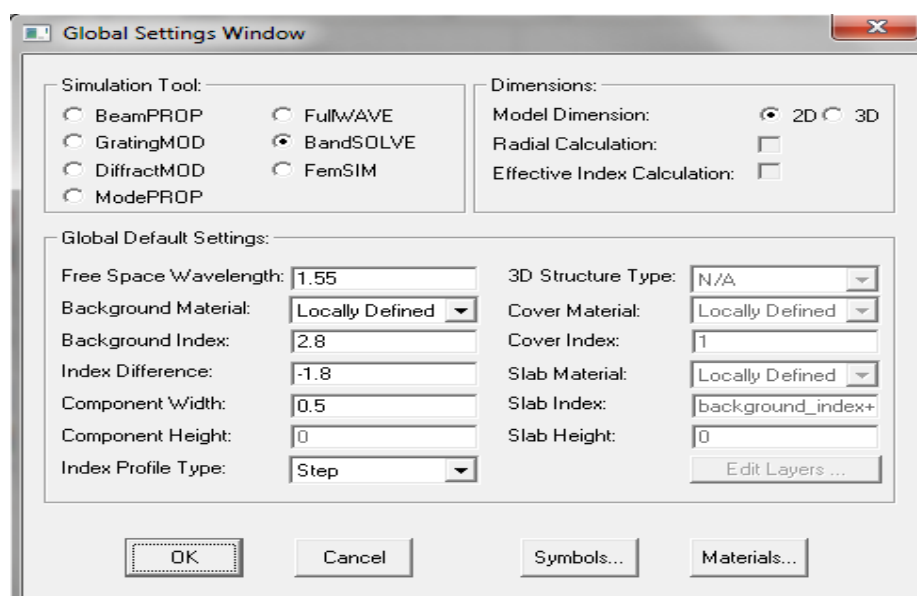


Figure 2 : Fenêtre de démarrage.

Il faut remplir la différence d'indice (Index différence), qui est la différence d'indice par défaut entre la couche guidant et l'indice de substrat (Background index), d'autre part, il faut choisir le type de la polarisation (Mode TE ou Mode TM). On peut aussi par cette option choisir le module de simulation parmi les six modules existants dans le logiciel RsoftBandSOLVE, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD. Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur **OK** pour obtenir la fenêtre de la figure-03.

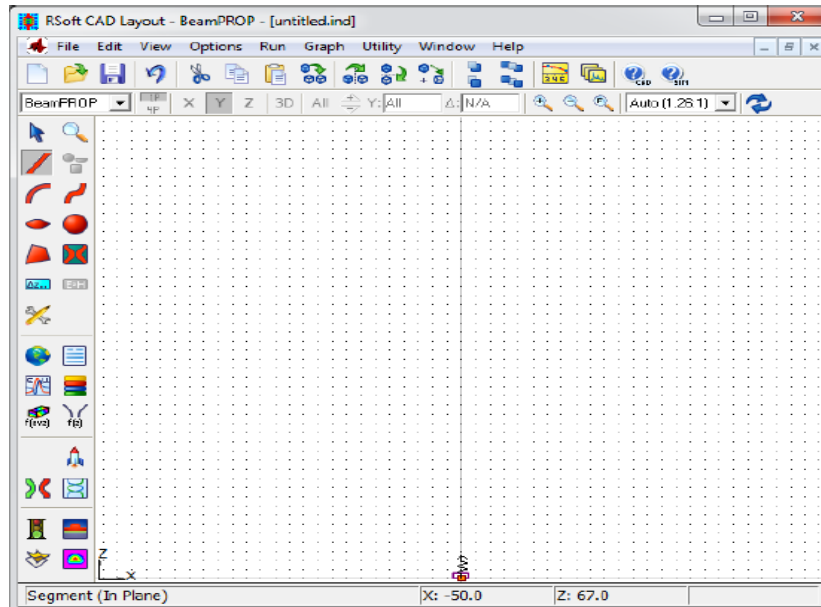


Figure -3: Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

2-a-3-Générer la structure de réseau

Dans cette partie on va montrer comment créer un réseau en cristaux photoniques dans l'interface de CAD. Généralement, il existe plusieurs manières pour créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. Cependant, la manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec Full WAVE afin d'expédier la création de ce réseau en utilisant Array Lay-out (figur-4).

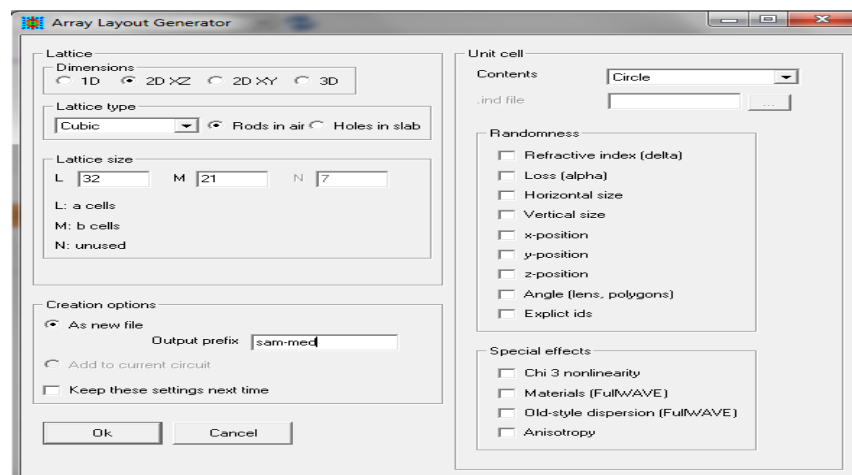


Figure -4: Arrangements de disposition de la rangée XZ

Après l'introduction des différentes données (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 -05.

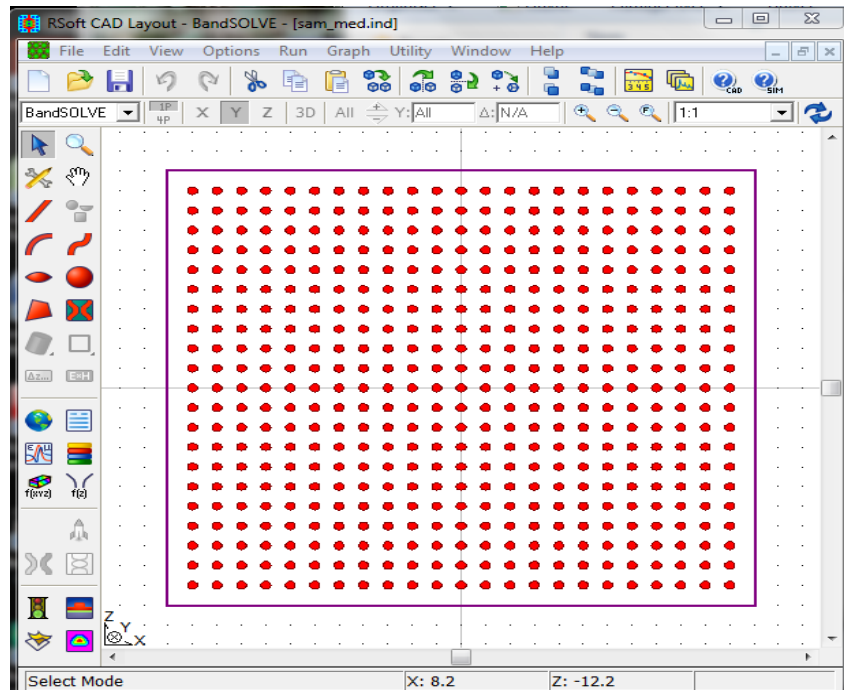


Figure -5:Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

2-a-3-Création d'un guide d'onde et calcule la transmittion :

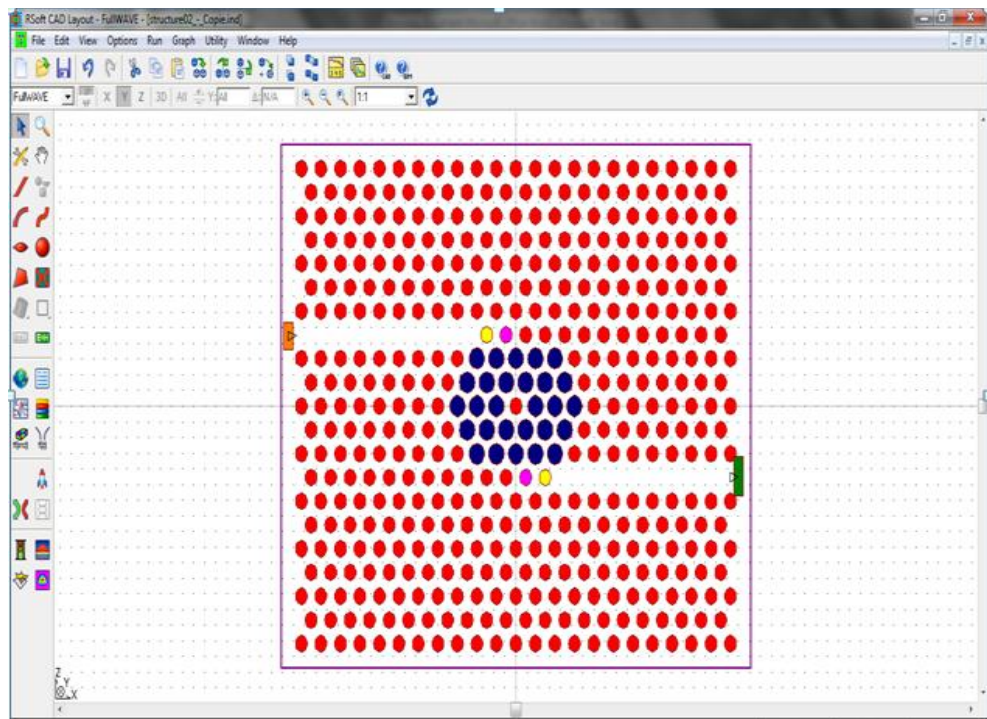


Figure -6:création d'un guide d'onde et calcule la transmission.

À ce stade du compte Transmission vous installez Lansch à l'entrée du cavité Manitur à sortie, puis appuyez sur l'icône.



2-a-3-Calculer facteur de qualité Q:

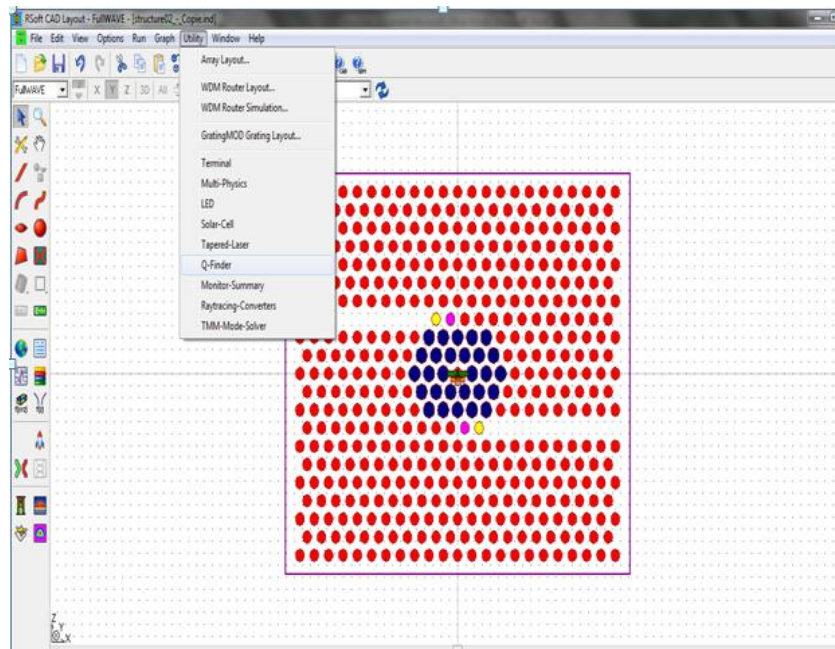


Figure -6: Calculer facteur de qualité Q.

3-Signification des icônes de l'interface graphique du logiciel RSoft:



Save Circuit : Cette option sauvegarde le circuit courant.



Index Profile: Cette option ouvre la zone de dialogue de profil d'indice de calcul où l'utilisateur peut calculer un profil d'indice du circuit.



Global Settings: Cette option ouvre la zone de dialogue d'arrangements globale par défaut. Elle est équivalente à la nouvelle zone de dialogue de circuit.



Launch Field : Cette option ouvre la zone de dialogue pour le lancement des paramètres où l'utilisateur peut spécifier le champ initial pour une simulation.



Symbol Table : Cette option ouvre la table des symboles où l'utilisateur crée de nouvelles variables pour modifier des variables existantes.



Form Simulation : Cette option ouvre la zone de dialogue de paramètres de simulation où l'utilisateur peut spécifier ces paramètres pour effectuer une simulation.

Résumé :

Les cristaux photoniques sont formés par l'empilement de couches de matériaux présentant une modulation périodique de leurs indices de réfractions. Cette périodicité est à l'origine de l'apparition d'une bande interdite photonique (GAP) analogue celle électronique qu'on trouve dans les solides. Ce GAP empêche les longueurs d'onde situées entre ses limites à se propagé au sein de de ces cristaux. Les cristaux photoniques ont eu un grand intérêt dans la recherche scientifique ce qui a mené à la découverte très rapide d'une multitude de leurs domaines d'applications, en entres autres ; dans le domaine de la métrologie et la mesure.

En effet, de nos jours les cristaux photoniques entrent dans la réalisation d'une large gamme de capteurs, balayant presque toutes les grandeurs physiques mesurables et en particulier la pression et les contraintes physiques, notre travail entre dans ce cadre,

Dans ce travail nous avons proposés une structure de capteur de pression destiné à la mesure des faibles pressions hydrostatiques c.-à-d. à des pressions de l'ordre de quelque dizaine à quelque centaine de mégapascal. L'hôte de ce capteur sera une structure à cristaux photonique à 2D. Ensuite une optimisation de cette structure sera faite dans le but d'obtenir une meilleure sensibilité et facteur de qualité possible.

Mots clés : Cristaux photoniques 2D, GAP photonique, capteur de pression, optimisation, sensibilité RI, sensibilité à la pression, facteur de qualité.

Abstract:

The photonic crystals are formed by the stack of layers of materials having a periodic modulation of their refractive index. This periodicity is at the origin of the appearance of a photonic band gap (GAP) similar to the electronics one found in solids. This GAP prevents the wavelengths between its limits from propagating within these crystals. Photonic crystals have a great intention in scientific research which led to the very rapid discovery of a multitude of their fields of application, among others; in the field of metrology and measurement.

Indeed, nowadays photonic crystals are involved in the realization of a wide range of sensors, scanning almost all measurable physical quantities and in particular the pressure and the physical constraints, our work enters in this frame,

In this work we have proposed a pressure sensor structure for the measurement of low hydrostatic pressures that are pressures of the order of some ten to some hundred mega pascals. The host of this sensor will be a 2D photonic crystal structure. Then an optimization of this structure will be done in order to obtain a better sensitivity and possible quality factor.

Keywords: 2D photonic crystals, photonic GAP, pressure sensor, optimization, RI sensitivity, pressure sensitivity, quality factor.

المخلص:

تتكون البلورات الفوتونية من حزمة طبقات من مواد لها تعديل دوري لمؤشرات انكسارها. هذا التواتر هو أصل ظهور فجوة عصبية فوتونية (GAP) مشابهة للثغرة الإلكترونية الموجودة في المواد الصلبة. هذه العصبية الفوتونية GAP تمنع الأطوال الموجية بين حدودها من الانتشار داخل هذه البلورات. كان للبلورات الفوتونية اهتماما كبيرا في البحث العلمي الذي أدى إلى اكتشاف سريع جدا لعدد كبير من مجالات تطبيقها، من بينها ؛ مجال القياس . في الواقع، في الوقت الحاضر، تستعمل البلورات الضوئية في تركيبة مجموعة واسعة من أجهزة الاستشعار، ومسح جميع القيم الفيزيائية القابلة للقياس تقريبا، وبالأخص الضغط والظواهر الفيزيائية، ويدخل عملنا في هذا الإطار. في هذا العمل، اقترحنا بنية استشعار لقياس الضغط الهيدروستاتيكي المنخفض. من عشرة إلى مائة ميغاباسكال. سيكون هذا المستشعر عبارة عن بنية بلورية فوتونية ثنائية الأبعاد. ثم سيتم تحسين هذا الهيكل من أجل الحصول على حساسية أفضل وعامل جودة جيد.

الكلمات المفتاحية: البلورات الفوتونية 2D ، العصبية الضوئية الممنوعة (GAP)، استشعار الضغط، التحسين، الحساسية RI ، حساسية الضغط، عامل الجودة.