

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

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**  
N° :



**DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE**  
**FILIERE : ELECTRONIQUE**  
**OPTION : MICROELECTRONIQUE**

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

**Par: ABED Khawla**

**BENMOKHTAR Widad Chaima**

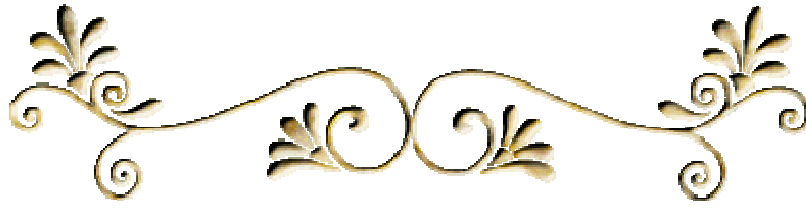
**Intitulé**

**Optimisation d'une structure à cristaux photonique  
bidimensionnels pour son utilisation en capteur de micro  
déplacement à haute performance**

**Soutenu devant le jury composé de :**

HOCINI Abdselam...	Université M'sila	Président
ZOUACHE Tarek ...	Université M'sila	Rapporteur
HERHOUZ Ahlem...	Université M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2020 /2021**



## Remerciement

*Nous remercions Allah tout puissant qui nous a donné la force et  
la volonté pour pouvoir finir ce mémoire de fin d'étude*

*Nous tenons à remercier vivement et très respectueusement notre  
Promoteur de mémoire, docteur ZOUACHE TAREK, pour le choix  
du sujet,*

*D'avoir dirigé ce travail avec professionnalisme, pour tous ces  
conseils précieux*

*Et sa critique constructive qui ont été très positifs.*

*Nous exprimons notre gratitude envers*

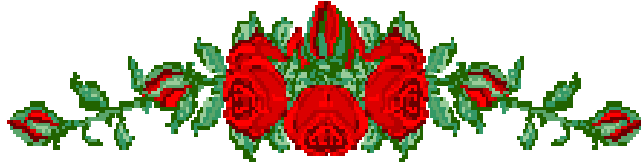
*Mrs les membres de jury de*

*Nous avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner*

*Notre travail*

*Enfin nous ne pourrions terminer ces remerciement sans une  
pensée à l'ensemble des notre enseignants qui sont à l'origine de  
tout mon savoir et en particulier mes enseignants à l'université de*

*M'sila*



## Dédicace

*Avec l'aide du Dieu ce Modeste travail a été achevé, lequel je le dédie à toutes personnes qui me sont chères :*

*A vous mes parents les meilleurs parents du monde pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes études et pour leur sacrifices et soutien durant tout mon parcours, je prie Dieu le tout puissant de les garder en bonne santé et de les récompenser de toutes les peines et sacrifices donnés aux quels je ne rendrais jamais assez.*

**✚ A mes chères sœurs : Meriem, Amira et leurs maries Hamza et Mohamed**

***Et à ma petite sœur Aicha***

**✚ A mon directeur HAMRIT zohir qui m'a beaucoup aidé et m'encourager**

**✚ A ma chère grand-mère Aicha serir qui a tout le temps prié pour moi.**

**✚ A mes tantes et mes oncles et leurs enfants.**

**✚ A mes deuxièmes parents Mama NADJIYA et Papa MOHAMED.**

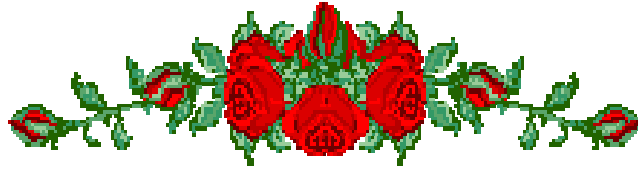
**✚ A ma binômes Widad et à toute sa famille.**

**✚ A mes enseignants de Primaire, Collège, Secondaire et Universitaire.**

**✚ A tous mes amis de la promo Master II électronique 2020/2021.**

**✚ Et à mon très cher ange adorable Wassim .**

*ABED Khawla*



## *Dédicace*

*Du plus profond de mon cœur et avec l'intensité de mes  
émotions,*

*Je dédie ce travail :*

*A ma mère et mon père*

*Qui m'ont permis d'atteindre mon objectif par leur soutien moral  
et matériel, qu'ils reçoivent en retour toute ma reconnaissance et  
l'expression de ma profonde affection.*

*A mes chères frères salah eddin et amine*

*A mes chères sœurs asma et son epoux faycel, randa et malak*

*A mon petit prince anes*

*A ma binôme khawla et sa famille*

*A tous mes collègues et amis*

*A toutes les personnes qui me respectent et m'aiment*

**BENMOKHTAR  
Widad Chaima**

**Résumé :**

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiellement structurés qui possèdent une constante diélectrique variable périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde. Cela suivant une ou plusieurs directions de l'espace avec un contraste d'indice suffisamment élevé. La fabrication de cristaux photoniques 1D et 2D est de nos jours bien maîtrisée et des composants à base de ces structures commencent à voir le jour. Par contre la fabrication de cristaux photoniques à 3D continue de poser plusieurs difficultés expérimentales.

Quand ces structures sont munies de défauts volontairement incorporés dans leurs matrices ; des défauts du type microcavités ou du type linéiques ou même de leurs combinaisons, elles sont le sièges de plusieurs applications très importante entre autres dans la détection.

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 les grandeurs et ou desurandes mécaniques. Cela a été rendu possible grâce à leurs à leurs forts confinements des photons dans ces défauts.

Dans ce travail nous avons proposés une structure de capteur de déplacement. 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 la meilleure sensibilité possible..

Mots clé : Cristaux photonique 2D, capteur de micro-déplacement, microcavité résonante ,  
détection de micro-déplacement., sensibilité.

## Sommaire :

Listes des figures.....	I
Liste des tableaux .....	III
Introduction Générale .....	1

## Chapitre 1. Introduction aux Cristaux photoniques

1. Introduction .....	4
2. Cristaux photoniques .....	4
2.1. Cristaux photoniques à une dimension (réseau de Bragg).....	5
2.2. Cristaux photoniques bidimensionnels .....	6
2.3. Cristaux photoniques tridimensionnels .....	7
3. Théorie des cristaux Photoniques .....	7
3.1. Equations de Maxwell .....	7
3.2. Théorème de Bloch-Floquet. ....	10
3.3. Rappels sur le réseau réciproque et la zone de Brillouin .....	11
3.4. Méthodes de modélisation des cristaux photoniques .....	15
3.4.1. Méthode de décomposition en ondes planes .....	16
3.4.2. Méthode des différences finies temporelles .....	17
4. Matériaux .....	18
4.1. Cristaux photonique dans les matériaux semi-conducteurs .....	18
4.2. Cristaux photoniques dans les polymères .....	20
4.3. Cristaux Photoniques dans les matériaux diélectriques .....	20
5. Application des cristaux photoniques.....	20
5.12. Défauts ponctuels et défauts étendus :.....	22
5.12.1. Défauts ponctuels-Mode résonnant de cavité :.....	22
2-7-3-Les cavités à cristaux photoniques.....	23
5.12.2. Défauts étendus et guides d'onde.....	25
5.12.2.1. Couplage de défauts ponctuels.....	25
5.12.2.2. Guides d'ondes dans les cristaux photoniques.....	26
5.12.3. Influence du défaut sur le diagramme de dispersion :.....	27
6. Conclusion :.....	28

## **Chapitre 2 : Capteur de dépassement et de position**

2.1 Introduction :	30
2.2- Éléments constituant une chaine de mesure :	30
2-3-Classification des capteurs.....	31
2-3-1-Capteurs passifs :	31
2-3-2-Capteurs actifs :	32
2.4- Les différents types de déplacement et leur mesure .....	33
2.5- Classement des capteurs selon le principe de transduction utilisé :.....	33
2.5.1 Types de classements possibles .....	33
2.5.2Classement suivant le type de transduction utilisé .....	34
2.6. Type des capteurs de déplacement :.....	34
2.6.1. Capteurs de déplacement à potentiomètre résistif :.....	34
2.6.2. Capteurs inductifs :.....	38
2.6.3. Capteurs capacitifs :.....	43
2.6.4. Capteur de déplacement à cristaux photoniques :.....	45
2.7 Conclusion :	50

## **Chapitre 3 : Réalisation du Capteur de micro-déplacements grace aux cristaux photoniques 2D**

3.1 Introduction :	52
3.2 Structure propose pour le capteur :	53
3.3 Principe de la détection et de la simulation :.....	54
3.3.1 Principe de la détection:.....	54
3.3.2 Simulation du capteur :.....	55
3.4 Spectre de réponses du capteur :.....	57
3.5 Sensibilité du capteur .....	59
3.6 Discussions des résultats obtenues :.....	59
3.7 Conclusion :.....	61
Référence .....	62
Conclusion générale .....	67

# Liste des figures

## Chapitre 1 :

**Figure 1.1.** Représentation des cristaux photonique 1D, 2D et 3D.

**Figure 1.2.** a) Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini. b) Spectre de réflectivité d'un miroir de Bragg avec bande interdite.

**Figure 1.3.** Structure de bande à 1 dimension : miroir de Bragg.

**Figure 1.4.** Image MEB d'une structure photonique à 2D réalisée sur le GaAs .

**Figure 1.5.** Image MEB d'une structure tas de bois fabriquée par lithographie UV sur du silicium poly cristallin (d'après Lin et al.).

**Figure 1.6.** Structure de bande interdite photonique d'une structure 1D

**Figure 1.7.** Réseau direct.

**Figure 1.8.** Maille élémentaire Wigner - Seitz du réseau direct.

**Figure 1.9.** Réseau direct et réseau réciproque. Les points de hautes symétries de la première zone de Brillouin.

**Figure 1.10.** Représentation des plus petites zones irréductibles des réseaux carrés (a), triangulaire (b) et hexagonal (c).

**Figure 1.11.** Principe de réduction de la zone de Brillouin

**Figure 1.12.** Structure des bandes pour le silicium poreux.

**Figure 1.13.** Etape de réalisation d'une structure 2D dans le GaAs.

**Figure 1.14.** Photo MEB d'une structure graphite réalisée sur le InP [9]

**Figure 1.15.** Exemple des possibles applications des cristaux photoniques à deux dimensions : (a) guide d'onde à virage, (b) filtre basé sur les modes de cavité à fréquence de résonance, (c) diffraction d'un cristal photonique à différentes longueurs d'ondes, (d) Filtre add/drop (guides d'ondes couplés avec une ou deux structures résonantes)

**Figure 1.16.** Schéma d'un guide (standard) W3 avec trois rangées manquantes selon la direction  $\Gamma M$ .

**Figure 1.17 :** Transmission d'un cristal photonique hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire. Le peak de transmission correspond au mode résonant de la cavité introduite avec le défaut.

**Figure 1.18- :** Défauts ponctuels : (a)Défaut lacunaire, (b) et (c)Défauts de substitutions

**Figure 1.19- :** Les différents types de cavités

**Figure 1.20- :** Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm

**Figure 1-21-:** Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm

**Figure 1.22-** : Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm.

**Figure 1.23** : Guide d'onde de différentes configurations réalisé dans un Cristal photonique hexagonal.

**Figure 1.24** : Guide d'onde de différentes configurations réalisé dans un cristal photonique hexagonal. [1]

- a- Guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma M$ .
- b- Guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma K$ .

**Figure 1.25** : Impact de la largeur du défaut linéique sur le diagramme dispersion d'un cristal photonique à réseau hexagonal en orientation  $\Gamma K$  [30].

- a- Cristal photonique sans défaut.
- b- Cristal photonique avec guide d'onde  $W_3$ .
- c- Cristal photonique avec guide d'onde  $W_5$

## Chapitre 2 :

**Figure 2.1:** Définition d'un capteur.

**Figure 2.2:** Structure d'un capteur.

**Figure 2.3** : Diverses formes de potentiomètres : schémas de principe et réalisations :a) potentiomètre rectiligne ; b) potentiomètre circulaire ;c) potentiomètre hélicoïdal.

**Figure 2.4** :-Schéma de principe d'un capteur à entrefer variable.

**Figure 2.5** :-Transformateur différentiel. Principe de constitution : pour déplacement rectiligne ;b) pour déplacement angulaire ; c) schéma électrique équivalent Simplifié.

**Figure 2.6**-principe de la constitution du microslyn.

**Figure 2.7** : recueil d'applications à base de cristaux.

**Figure 2.8** : Capteur de déplacement proposé par O.Levy et al.

**Figure 2.9** : Capteur de déplacement proposé par Zhenfeng et al.

**Figure 2.10** : Capteur de déplacement proposé par D. Yang t al.

**Figure 2.11** : Capteur de déplacement proposé par Saeed OLYAEE et Morteza AZIZI

**Figure 2.12** : Capteur de déplacement proposé par P. Raniet al.

## Chapitre 3 :

**Figure 3.1** : Bande interdite photonique de la structure proposée.

**Figure 3.2** : Structure du capteur propose.

**Figure 3.3.** Processus d'optimisation du capteur de micro déplacement.

**Figure 3.4.** Réponse du capteur en fonction des longueurs et pour différents déplacements.

**Figure 3.5.** Réponses du capteur pour différents déplacements avec  $S_x=0.3D$ .

**Figure 3.6.** Spectres de sorties du capteur pour différents déplacements avec  $S_x=0.3D$ .

**Figure 3.7.** Sensibilité du capteur pour  $S_x=0.3D$ .

## Liste des tableaux

### Chapitre 1 :

**Tableau 1.1.** Récapitulatif Analogie électron-photon.

**Tableau 1.2.** Propriétés élémentaires des réseaux carrés, triangulaire et hexagonal.

**Tableau 1.3.** Quelques méthodes les plus utilisées pour la simulation des cristaux photoniques.

### Chapitre 2 :

**Tableau 2-1-** : Les effets utilisés pour réaliser la mesure.

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

**Tableau 2.3** : Sensibilité du capteur proposé par Zhenfeng Xu et al dans chaque segment de déplacement considéré.

### Chapitre 3 :

**Tableau 3.1** : Les sensibilités calculées en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

**Tableau 3.2.** Comparaison de nos résultats avec d'autres obtenus par d'autres auteurs.

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

Depuis quelques années l'avancement de la technologie dans le domaine des semi-conducteurs a permis de contrôler les propriétés conductrices de certains matériaux et parmi ces matériaux on a les cristaux photoniques ou matériaux à bandes interdites photoniques (BIP) dont il existe trois types de cristaux photoniques, unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels. Le cristal photonique présente plusieurs phénomènes intéressants dans le domaine de l'optoélectronique. Par exemple, l'émission spontanée peut être contrôlée puisqu'un atome excité dans un cristal photonique ne pourra passer à un état énergétique inférieur si la fréquence du photon émis se trouve dans la bande interdite. Ils sont des structures dont l'indice diélectrique est modulé de façon périodique. Ces matériaux sont apparus relativement récemment dans la littérature scientifique et ils ont ainsi été baptisés par analogie avec les structures électroniques et leur bande électronique interdite. Dans un cristal atomique, l'énergie des électrons ne peut pas prendre des valeurs comprises dans la bande interdite électronique (ou gap). Dans un cristal photonique, ce sont les photons dont l'énergie (ou de manière équivalente la fréquence) ne peut être dans la bande interdite photonique [1].

Les cristaux photoniques existent également à l'état naturel à l'intérieur de complexes minéraux tels que les opales et à l'intérieur de systèmes biologiques tels que les yeux de certains céphalopodes sous forme de réseaux périodiques de bâtonnets, les plumes de paon faites de cristaux de kératines ou encore les ailes de certains papillons. La recherche sur les cristaux photoniques s'est principalement focalisée sur le proche infrarouge (1,3-1,6  $\mu\text{m}$ ) en raison des applications dans le domaine des télécommunications, et a porté sur les matériaux des colonnes III, IV et V, à savoir le silicium, le germanium et les composés III-V (InP, GaAs, . . . ), même si récemment des travaux s'intéressent aux semi-conducteurs à large bande interdite (SiN, AlN, GaN, ZnO).[2]

Les cristaux photoniques 2D sont compatibles avec la filière de l'optique intégrée et donc réalisables à plus faible coût et plus grand volume. De par leurs dimensions très réduites, la versatilité des fonctions réalisables (filtres optiques, démultiplexeurs, buffers, . . . ) et le confinement de la lumière pouvant amplifier le gain, les cristaux photoniques pourraient être un moyen d'atteindre une grande densité d'intégration de composants optiques dans la filière CMOS . Le très fort confinement de la lumière régnant dans les cristaux photoniques offre des opportunités pour le traitement optique de l'information, au-delà du simple routage de signaux optiques. [3]

Les progrès récents de la technologie de la micro-structuration offrent une flexibilité énorme dans le choix de la composition du matériau, de la périodicité du réseau et de la symétrie de

ces arrangements, permettant ainsi de fabriquer des cristaux photoniques avec des structures incorporant des défauts volontairement placés aux seins de leurs réseaux. En conséquence, la relation de dispersion et la structure de modes associées de ces cristaux photoniques, peuvent être adaptées à presque tous les besoins et en particulier la détection.

Grâce à ces défauts incorporés, les bandes interdites photoniques (PBG : Photonique Bande Gaps) [3,4] se prêtent à de nombreuses applications en optique linéaire, non linéaire et quantique. Par exemple, dans le régime linéaire, de nouvelles caractéristiques de guidage optique via l'ingénierie de défauts tels que des microcavités, des guides d'ondes et leurs combinaisons en éléments fonctionnels, tels que des filtres anti-gouttes en longueur d'onde [3,5] peuvent être réalisées.

L'objet de ce travail est de proposer des nouvelles structures des DEMUX en cristaux photonique bidimensionnels pour des applications de très haut débit en utilisant la méthode FDTD-2D. Ce mémoire se compose par trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la théorie des cristaux photoniques. En premier lieu nous allons parler de l'analogie qui existe entre ces cristaux et les semi-conducteurs ordinaires connus, cette analogie est traduite d'un côté, par la vraisemblance entre les équations de Schrödinger (traduisant le mouvement de l'électron dans le semi-conducteur) et l'équation de Maxwell (traduisant la propagation des ondes électromagnétiques) et d'un autre côté par l'existence de bande d'énergie interdite exempte de tous états coupables par les électrons et les photons interdisant tous mode de propagation respectivement dans les deux cas. Puis nous donneront les différents types de cristaux photoniques existant suivant leur degré géométrique de réalisation (1D, 2D, 3D), la géométrie de leur réseau de base (carré, triangulaire, hexagonal). A la fin du chapitre nous parlerons des différents type de défauts pouvant être créés dans la structure périodique du cristal photonique et son effet sur sa bande interdite. Cette dernière partie est d'une importance majeure, car constitue une base pour les études qui suivront dans le reste de la thèse Le second chapitre portera en totalité sur capteurs de déplacements de différents types. En partant par les capteurs de déplacement traditionnel généralement de principe de fonctionnement électromécanique (résistif, inductif et capacitif) jusqu'à ceux modernes et hyper sensibles à principe de fonctionnement opto-mécanique c.-à-d. à base de cristaux photoniques. En fin, et dans le troisième chapitre nous donnerons une structure de capteur de déplacement en silicium que nous avons développé nous-mêmes. Dans cette dernière étude, on vise à concevoir un capteur de déplacement micrométriques de bonne sensibilité et ayant une réponse linéaire. Ces deux paramètres étant très importants comme nous l'avons déjà souligné précédemment.

# Chapitre 1 : Introduction aux Cristaux Photoniques

## 1. Introduction

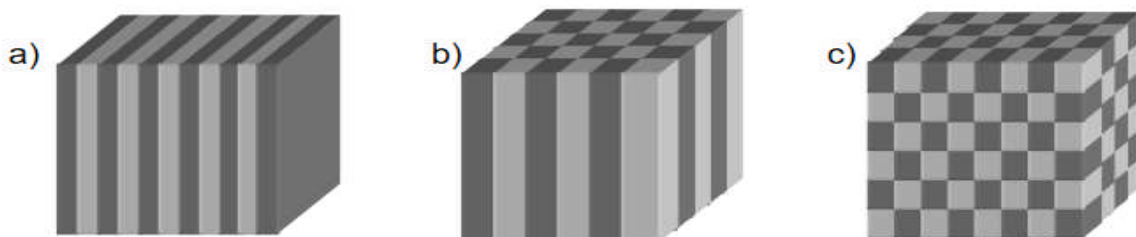
Pendant la dernière décennie, les cristaux photoniques (CP), également connus sous le nom de structures à bandes interdites photoniques avec l'abréviation BIP (en anglais, Photonic Band Gap, PBG), ont été sujets à plusieurs travaux de recherches. Les CP sont des systèmes très prometteurs pour des applications dans le domaine des ondes électromagnétiques pour de réelles réalisations dans le domaine des micro-ondes, l'optoélectronique et les télécommunications optiques. Plusieurs travaux ont été réalisés sur les semi-conducteurs profitant des avancées technologiques en microélectronique. Dans ce chapitre, il sera présenté les principes de base et la théorie fondamentale des cristaux photoniques ainsi que les différentes techniques utilisées qui conduisent à leurs réalisations sur des matériaux semi-conducteurs, diélectriques et polymères.[6,7]

## 2. Cristaux photoniques

Les matériaux à bandes interdites photoniques sont des matériaux semi-conducteurs, diélectriques ou métalliques dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde selon une ou plusieurs directions de l'espace [8]. Les cristaux photoniques sont caractérisés par l'interdiction et le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques pour certaines gammes de fréquences. Cette propriété les rend intéressants pour de nombreuses applications en optique intégrée. Des lois d'échelles permettent de simplifier l'étude des cristaux photoniques qui rendent les propriétés optiques non dépendantes de la taille des structures à BIP [9]. Ainsi lors de l'étude des cristaux photoniques l'énergie des bandes est généralement exprimée en fonction du facteur sans dimension normalisé  $u$  défini par :

$$u = \frac{a}{\lambda} = \frac{a\omega}{2\pi c}$$

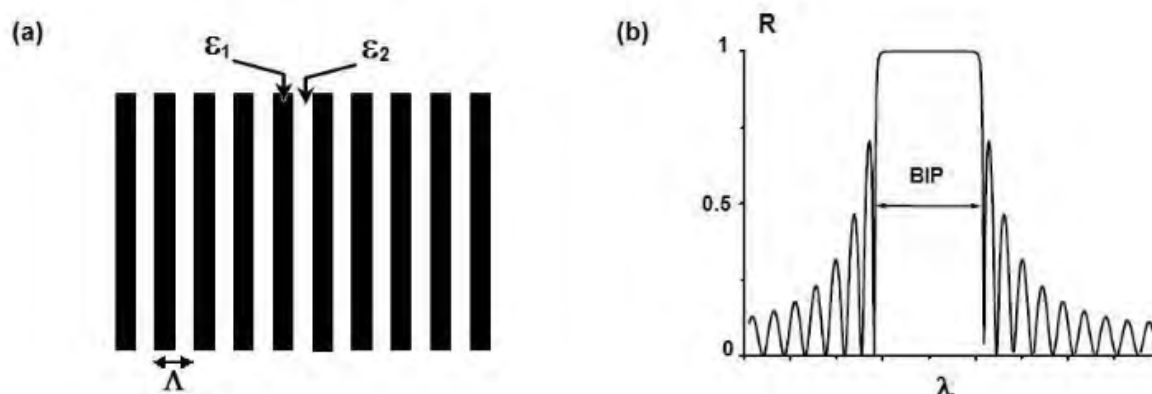
Avec  $a$  grandeur caractéristique du cristal photonique (paramètre de maille du cristal),  $\lambda$  la longueur d'onde.



**Figure 1.1.** Représentation des cristaux photonique 1D, 2D et 3D

## 2.1. Cristaux photoniques à une dimension (réseau de Bragg)

Un cristal photonique unidimensionnel (1D) est un milieu composé de l'alternance périodique dans une seule direction de l'espace de deux milieux diélectriques de constantes diélectriques respectives  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ . Le miroir de Bragg constitué d'un empilement successif de couches de deux indices de réfractifs différents forme un cristal photonique à une dimension. Un schéma de cette structure est représenté sur la figure 1. 2. avec une période d'empilement  $\Lambda$ . [10]



**Figure 1.2.** a) Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini. b) Spectre de réflectivité d'un miroir de Bragg avec bande interdite.

Les cristaux photoniques à 1D peuvent être utilisés comme filtres. La fabrication de CPs à une dimension peut être réalisée par différentes techniques de croissance de couches minces : par épitaxie par jets moléculaires (MBE), déposition par phase chimique gazeuse (MOCVD), ou grâce aux techniques de structuration des matériaux massifs (Laser, FIB, RIE, lithographie...) [11]. La courbe de dispersion 1D d'un miroir de Bragg est représentée sur figure 1.3.

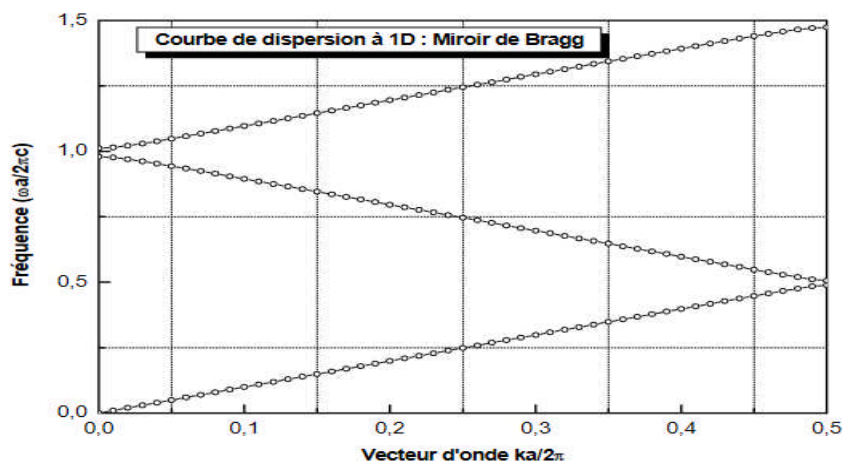


Figure 1.3. Structure de bande à 1 dimension : miroir de Bragg.

## 2.2. Cristaux photoniques bidimensionnels

La fabrication des matériaux à bande interdite photonique 2D dans les semi-conducteurs III-V ou le silicium tire profit des techniques issues de la microélectronique, permettant la réalisation de structures de taille sub-micrométriques [11]. Les cristaux photoniques 2D sont les plus cités dans la littérature, diverses configurations de réseaux de trous ont été rapportées (triangulaire, carré ou hexagonal) sur différents types de matériaux [11, 12]. L'étude des matériaux à BIP 2D est réalisée à partir du calcul des paramètres des structures (période et diamètre des trous) grâce aux diagrammes des bandes photoniques 2D. Les figures 1.4. (a) et (b) représentent une structure photonique 2D réalisée sur un guide d'onde GaAs ( $n = 3,6$ ) déposé sur une couche de AlGaAs ( $n = 2,9$ ) [13].

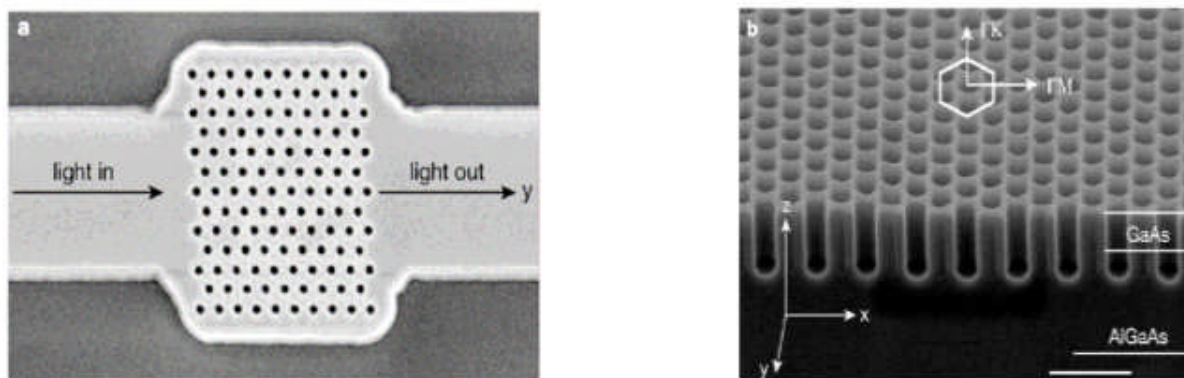


Figure 1.4. Image MEB d'une structure photonique à 2D réalisée sur le GaAs [5].

En outre, les cristaux photoniques 2D sur semi-conducteurs III-V trouvent de nombreuses applications notamment pour réaliser des sources lasers et des amplificateurs,...

### 2.3. Cristaux photoniques tridimensionnel

La réalisation technologique des structures à bandes interdites photoniques tridimensionnelles est particulièrement difficile à l'échelle nanométrique et les techniques utilisées sont particulièrement lourdes. Cela limite pour l'instant les applications des cristaux photoniques tridimensionnels. K.M.Ho a théoriquement montré que la structure diamant était un bon candidat pour les cristaux photoniques 3D [11]. E.Yablonovitch a donné le nom de la Yablonovite à une structure cubique à faces centrées obtenue par des séries de perçages bien orientés dans les 3 dimensions de l'espace [14]. Quelques structures auto-organisées de billes de silice comme les opales semblent très prometteuses pour les applications photoniques 3D [14]. La figure 1.5. Présente une structure 3D "tas de bois" réalisée sur silicium poly cristallin. La réalisation de cette structure consiste à déposer des rubans de silicium poly cristallin dans des tranchées de SiO<sub>2</sub> qui sera par la suite éliminé pour ne conserver qu'un cristal photonique Si/air [14].

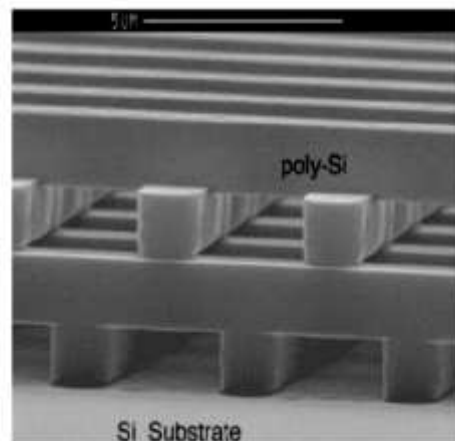


Figure 1.5. Image MEB d'une structure tas de bois fabriquée par lithographie UV sur du silicium poly cristallin (d'après Lin et al.) [14].

## 3. Théorie des cristaux photoniques

### 3.1. Equations de Maxwell

La théorie des cristaux photoniques est basée sur la combinaison des équations de Maxwell pour les champs électromagnétiques dans une structure diélectrique avec le théorème de Bloch pour des potentiels périodiques en physique du solide. La compréhension de la théorie

des cristaux photoniques consiste principalement à saisir la façon avec laquelle ces deux principes agissent l'un sur l'autre dans un diélectrique périodiquement structuré. Dans ce contexte, il est possible d'exploiter l'analogie formelle qui existe entre l'électron et le photon, pour concevoir puis réaliser des cristaux à bandes interdites photonique [15]. Les équations gouvernant la propagation de la lumière dans un cristal photonique sont les équations de Maxwell. Considérons un matériau non magnétique ( $\mu = \mu_0$ ) et de permittivité diélectrique  $\epsilon_r(\vec{r})$  (nombre réel car le milieu est non absorbant), (le matériau est non absorbant), les quatre équations de Maxwell s'écrivent :

$$\vec{\nabla}(\epsilon_r(\vec{r}) \cdot \vec{E}(\vec{r}, t)) = 0 \quad 1.1$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) = 0 \quad 1.2$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad 1.3$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \epsilon_r(\vec{r}) \cdot \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad 1.4$$

Ou,

$\vec{E}$  et  $\vec{H}$  : sont respectivement les champs électriques et magnétiques,

$\epsilon_0$  et  $\mu_0$  : sont la permittivité électrique et la perméabilité magnétique du vide

t et  $\vec{r}$  : sont les dépendances temporelles et spatiales respectivement.

Ainsi, si  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  est la solution du problème en considérant  $\epsilon_r(\vec{r})$  (la permittivité relative du milieu) à la fréquence  $\omega$ , alors,  $\vec{E}(\vec{r}/s, t)$  représente la solution du problème pour une permittivité relative du milieu  $\epsilon_r'(\vec{r}/s)$  à la fréquence  $\omega/s$  [3,16]. Cela veut dire que le même comportement physique sera obtenu si l'on change simultanément la longueur d'onde et les dimensions du système dans les mêmes proportions et d'ailleurs c'est pourquoi il est recommandé, d'introduire une fréquence normalisée  $u = a/\lambda$  ( $a$  est la période caractéristique du cristal et  $\lambda$  la longueur d'onde), pour étudier les cristaux photoniques.[3]

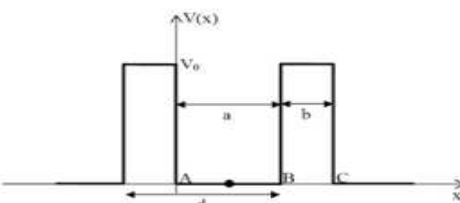
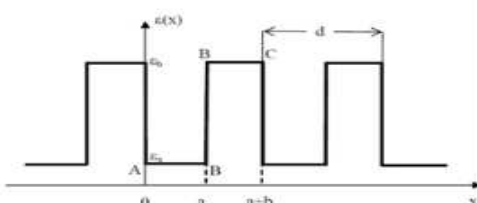
Les champs  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  et  $\vec{H}(\vec{r}, t)$ , sont des champs transverses à la direction de propagation et qu'ils vérifient les équations d'onde suivantes [3]:

$$\vec{\nabla} \left( \frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) \right) + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad 1.5$$

$$\left( \frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \cdot \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \vec{E}(\vec{r}, t)) + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \right) = 0 \quad 1.6$$

Par cette analogie, les concepts de la physique du solide, tels que les notions de réseau réciproque, zone de Brillouin et le théorème de Bloch sont applicables pour la résolution de l'équation d'onde. De cette manière nous pouvons obtenir des bandes interdites photoniques (par analogie aux bandes interdites électroniques). Le tableau 1.1 donne un résumé de cette analogie à un système unidimensionnel qui peut être étendu aux cristaux bi ou tridimensionnels.[17]

**Tableau 1.1. Récapitulatif Analogie électron-photon.**

	Electron (Schrödinger)	Photon (Maxwell)
Périodicité	<p>Puits de potentiel électrique carré périodique</p>  <p><math>U(x+d) = U(x)</math></p>	<p>Constant diélectrique périodique</p> 
Champ	$\psi(r, t) = \psi(r) \exp(-i\omega t)$	$H(r, t) = H(r) \exp(-i\omega t)$
Grandeur caractéristique	$V(r)$	$E(r)$
Opérateur Hermitien	$H = \frac{-\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(r)$	$\Theta = \nabla \times \left( \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times \right)$
Equation aux valeurs propres	$H\psi = E\psi$	$\Theta H = \left( \frac{\omega^2}{c^2} \right) H$

A titre d'exemple, la figure 1.6. Représente le diagramme des bandes dans le cas d'un cristal photonique unidimensionnel (cas d'un réseau de Bragg) obtenu à partir de l'équation de dispersion à une dimension.[11]

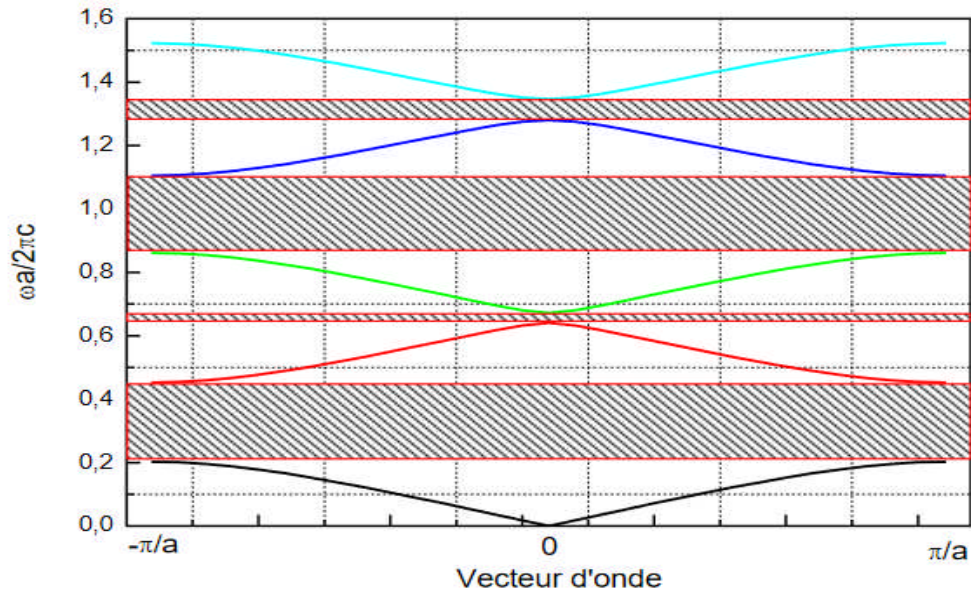


Figure 1.6. Structure de bande interdite photonique d'une structure 1D.

### 3.2. Théorème de Bloch-Floquet.

L'équation de propagation des photons dans les cristaux photoniques est donnée par la relation suivante en isolant le champ magnétique :

$$\vec{\nabla} \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \vec{\nabla} H(\vec{r}) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H(\vec{r}) \quad 1.7$$

Où  $\epsilon_r$ ,  $c$  et  $H$  représentent la fonction diélectrique du milieu, la vitesse de la lumière dans le vide et le champ magnétique respectivement. Lorsque  $\epsilon_r$  est périodique on peut utiliser le théorème de Bloch- Floquet. Le théorème de Bloch-Floquet permet de réécrire les solutions du champ  $H$  sous la forme [18] :

$$\vec{H}(\vec{r}) = u_{\vec{k}}(\vec{r}) \cdot e^{i\vec{k}\vec{r}} \quad 1.8$$

$r$  et  $u(r)$  sont les coordonnées et une fonction périodique dans l'espace tandis que  $k$  représente le vecteur d'onde. Equation (1.7) devient:

$$\vec{\nabla} \left( \frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \vec{\nabla} \cdot u_{\vec{k}} \cdot e^{i\vec{k}\vec{r}} \right) = \frac{\omega^2}{c^2} u_{\vec{k}} \cdot e^{i\vec{k}\vec{r}} \quad 1.9$$

Les solutions de cette équation aux valeurs propres sont eux-mêmes périodiques et correspondent aux valeurs de  $\omega(k)$  qui représentent les courbes de dispersion dans le cristal., il est donc possible de simplifier la représentation de la totalité des solutions en les représentant sur un même graphe réduit à la zone de Brillouin dans l'espace réciproque. Le même raisonnement reste valable pour le champ électrique.[3,4].

### 3.3. Rappels sur le réseau réciproque et la zone de Brillouin

La représentation des diagrammes de bandes se fait pour des composantes du vecteur d'onde variant le long des directions de haute symétrie. Ces points de haute symétrie se trouvent dans la première zone de Brillouin qui fait partie du réseau réciproque. Dans la suite de ce paragraphe, nous allons rappeler ces deux notions à savoir le réseau réciproque et la zone de Brillouin.[19,20]

#### • Réseau réciproque

Considérons une structure périodique à deux dimensions représentée sur la figure 1.7 :

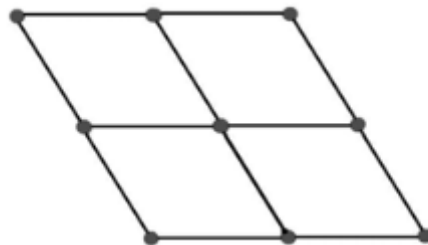


Figure 1.7. Réseau direct.

Sur cette figure apparaissent quatre mailles élémentaires, l'ensemble de ces mailles constitue un réseau dit direct. Nous pouvons aussi obtenir une maille élémentaire de même surface en traçant les lignes qui relient un nœud donné à tous ses voisins, puis on trace les médiatrices de ces segments. Le plus petit volume enclos de cette façon, comme le montre la figure 1.8, est la maille élémentaire de Wigner - Seitz [21],

De cette manière nous pouvons obtenir le réseau réciproque de chaque structure et à tout le réseau direct on peut faire correspondre un réseau réciproque.

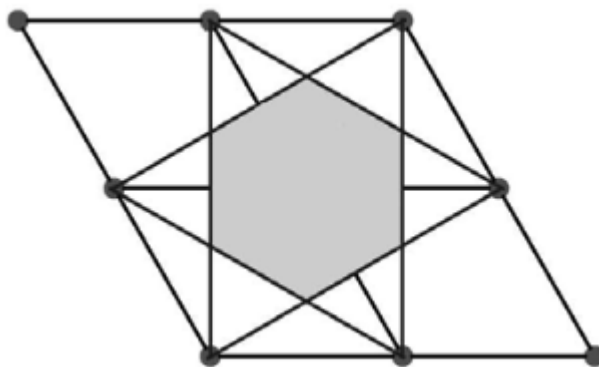


Figure 1.8. Maille élémentaire Wigner - Seitz du réseau direct.

• Zone de Brillouin Des études théoriques sur des ondes planes se propageant dans un milieu à deux dimensions ont pu montrer que la fréquence de ces ondes forme une fonction périodique du vecteur, qui définit la direction de propagation, dans le réseau réciproque.

La plus petite aire issue de ces vecteurs est une zone fondamentale qui s'appelle la première zone de Brillouin.

Pour illustrer cette zone, nous tracerons d'abord le réseau réciproque pour une maille d'un réseau direct par la procédure présentée précédemment, puis, nous nous plaçons au centre de la cellule d'origine  $\Gamma$  du réseau réciproque pour tracer un nombre suffisant de vecteurs joignant l'origine aux nœuds voisins de ce même réseau. Nous construisons ensuite les médiatrices de ces vecteurs.

La plus petite aire interceptée par ces médiatrices est la première zone de Brillouin (voir la figure 1.9). Il est prouvé que parcourir cette zone par les points de haute symétrie équivaut à se déplacer dans toute la structure périodique et dans toutes les directions.

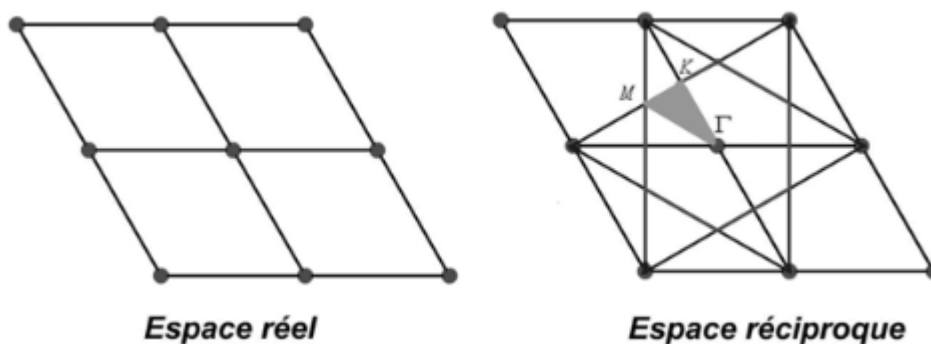


Figure 1.9. Réseau direct et réseau réciproque. Les points de hautes symétries de la première zone de Brillouin

En utilisant les points de haute symétrie pour le calcul des valeurs propres pour chaque valeur de  $k$ . Il n'est pas nécessaire de calculer ces grandeurs pour tout l'espace réciproque, et non plus pour toute la zone de Brillouin. Comme dans la théorie des semi-conducteurs, on peut limiter ce calcul à une petite partie de la zone comme indiqué sur la figure 1.10.

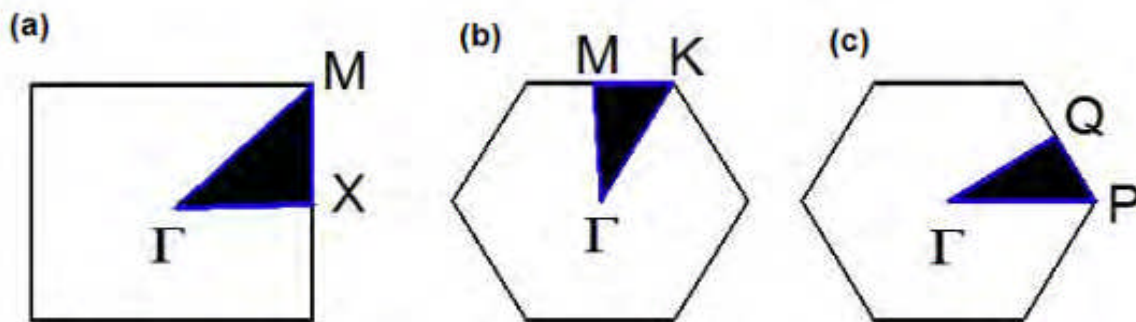


Figure 1.10. Représentation des plus petites zones irréductibles des réseaux carrés (a), triangulaire (b) et hexagonal (c).

Les zones en noir sont suffisantes pour représenter toutes les possibilités de déplacement de l'onde. En effet, d'après le théorème de Bloch, toutes les solutions à l'intérieur de la zone sont équivalentes à toutes les autres solutions à un vecteur de translation près. Il n'est pas non plus nécessaire de faire toute la zone grâce à la symétrie angulaire (figure 1.11.). Dans le cas du réseau carré par exemple, le vecteur d'onde "verra" la même périodicité en pointant vers le point X qu'à 90, 180 ou 240° de celui-ci. Cela est également valable pour le point M ; la zone utile se limite donc au trajet  $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M$ .

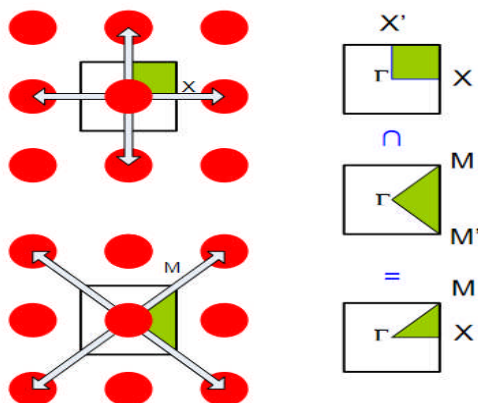


Figure 1.11. Principe de réduction de la zone de Brillouin

Ainsi pour obtenir les fréquences autorisées à se propager dans le cristal photonique, nous faisons balayer au vecteur d'onde  $(k_x, k_y)$  le contour défini par les points de haute symétrie de la première zone de Brillouin pour chaque type de réseau (figure 1.10). Le tableau 1.2. Présente les valeurs des vecteurs directs et réciproques de chaque type de réseau.

**Tableau 1.2. Propriétés élémentaires des réseaux carrés, triangulaire et hexagonal.**

	Réseau carré	Réseau triangulaire	Réseau hexagonal
<b>Vecteurs directs</b>	$a_1 = a(1,0)$ ; $a_2 = a(0,1)$	$a_1 = a(1,0)$ ; $a_2 = a\left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	$a_1 = a\left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)$ ; $a_2 = a\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)$
<b>Vecteurs réciproques</b>	$b_1 = \frac{2\pi}{a}(1,0)$ ; $b_2 = \frac{2\pi}{a}(0,1)$	$b_1 = \frac{2\pi}{a}\left(1, -\frac{1}{3}\sqrt{3}\right)$ ; $b_2 = \frac{2\pi}{a}\left(0, \frac{2}{3}\sqrt{3}\right)$	$b_1 = \frac{4\pi}{a\sqrt{3}}\left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ ; $b_2 = \frac{4\pi}{a\sqrt{3}}\left(-\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$

D'une manière générale, la modélisation numérique ou analytique des cristaux photoniques passe par le calcul des structures de bandes interdites, de la transmission et de la réflexion en fonction de la taille finie ou infinie de la structure.

Plusieurs méthodes de modélisation de cristaux photoniques sont utilisées pour déterminer les paramètres des structures et d'analyser la propagation du champ électromagnétique pour le calcul de la transmission et de la réflexion. Les propriétés des matériaux à BIP sont théoriquement décrites par des structures de bandes et la densité des états. La structure de bandes montre toutes les fréquences (permises) pour divers vecteurs  $k$  et la densité des états (Density of states DOS) indique le nombre d'états photoniques possédant une énergie donnée dans un matériau comprenant une structure photonique, également dites densité photonique d'états. Les méthodes les plus citées dans la littérature pour l'étude des cristaux photonique sont [22,23,24] :

1. Méthode décomposition en ondes planes.
2. Méthode des différences finies temporelles (FDTD).
3. Méthode des matrices de transfert.
4. Méthode des réseaux de diffraction.
5. Méthode des modes couplés

Dans cette partie seront décrites les méthodes (tableau 1.3) les plus utilisées pour étudier les cristaux à bande interdite photonique à une, deux et trois dimensions (1D, 2D et 3D).

**Tableau 1.3. Quelques méthodes les plus utilisées pour la simulation des cristaux photoniques.**

Cristaux photoniques										
Infinis						Finis				
Décomposition en ondes planes			Matrices de transfert			Différences finies dans le domaine temporel			Théorie des modes couplés	
1D	2D		3D	1D	2D	3D	1D	2D		3D
	Avec ou sans défaut de périodicité	2.5D guidage par l'indice dans la 3 <sup>ème</sup> direction						Avec ou sans défaut	2.5D propagation dans le plan	
										1.5 - 2.5D propagation hors plan

Notons que dans notre travail, nous avons utilisé la méthode de décomposition en ondes planes (PWM) et les différences finies dans le domaine temporel (FDTD) que nous détaillerons dans la suite de ce chapitre.

**• Méthode des matrices de transfert**

Cette méthode est utilisée pour déterminer les coefficients de réflexion et de transmission des structures unidimensionnelles, une adaptation au cas bidimensionnel a été réalisée par Pendry [25]. La structure est divisée en une succession de couches, et une matrice de transfert permet de relier les champs dans une couche à ceux de la couche précédente. La fréquence étant variable, cette méthode permet de remonter à la structure de bandes puisque le calcul des éventuels vecteurs d'onde de propagation se fait en fonction de la fréquence, avec une prise en compte de la dépendance en fréquence de la constante diélectrique. [26]

**• Méthode des réseaux de diffraction**

Le cristal photonique est considéré comme un ensemble de réseaux de diffraction successifs. Cette méthode permet de décomposer les champs dans chaque région séparant ces réseaux et applique la théorie des réseaux pour relier les coefficients de cette décomposition d'une

région à l'autre. Le système matriciel obtenu permet d'établir la matrice de diffusion qui caractérise le milieu [23,11,15]. L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet de calculer les modes guidés et leurs pertes intrinsèques.

• **Méthode des modes couplés**

Cette méthode permet la simulation de la propagation de l'onde guidée à travers une perturbation périodique de l'indice effectuée le long de la direction de propagation (cas d'un cristal photonique). Elle permet également d'évaluer l'influence des paramètres géométriques (pas du réseau, dimension de la structure ...) sur la transmission et la réflexion. L'intérêt de cette méthode est l'étude de la propagation de la lumière dans les hétéro structures et les structures à guides combinées aux cristaux photoniques (CPs 2.5D). La théorie des modes couplés permet une description intuitive des échanges d'énergie dans les hétéro structures guidances mais la résolution analytique du problème est complexe. [11].

**3.4.1. Méthode de décomposition en ondes planes**

La méthode des ondes planes est la première méthode de modélisation utilisée pour le calcul de la dispersion des modes photoniques [23]. Tout phénomène électromagnétique est gouverné par les équations des Maxwell. Ces dernières amènent à une équation d'onde qui, dans un milieu linéaire, isotrope, non magnétique (perméabilité magnétique relative égal à 1) de constante diélectrique complexe  $\epsilon$  et en absence de sources, s'écrit (pour les champs électrique et magnétique) de la manière suivante :

$$\vec{\nabla} \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) \right) + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \tag{1.10}$$

$$\left( \frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \cdot \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t)) \right) + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \tag{1.11}$$

L'intérêt de la méthode des ondes planes est qu'elle facilite la résolution des équations d'onde pour les structures périodiques supposées infinies de manière rigoureuse. Elle permet le calcul des bandes de fréquences autorisées ou interdites des ondes électromagnétiques susceptibles de se propager dans la structure considérée [22,7]. Compte tenu de la périodicité de  $\epsilon(r)$ , les équations (1-9 et 1.10) se résolvent en décomposant la norme complexe  $E(r)$  et  $\epsilon(r)$  en ondes planes (série de Fourier spatiale) de la forme [22,7]:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) \cdot e^{j\omega t} \quad 1.12$$

Et

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}) \cdot e^{j\omega t} \quad 1.13$$

De longueur d'onde dans le vide  $\lambda = 2\pi c/\omega$  et  $k$  le vecteur d'onde tel que :

$$k^2 = n^2 \omega^2 / c^2 \quad 1.14$$

$c$  étant la célérité de la lumière dans le vide et  $n$  est le l'indice de réfraction du milieu [13] :

$$n = \sqrt{\epsilon_r(\vec{r})} \quad 1.15$$

Les équations de Maxwell étant linéaires, il est possible alors par analyse de Fourier, de construire toute solution du problème à partir d'une combinaison linéaire de solution harmoniques. Alors, la résolution du problème se réduit aux deux équations suivantes [17,27]:

$$\nabla \left( \frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \cdot \nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}) \right) - \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(\vec{r}) = 0 \quad 1.16$$

$$\nabla \left( \nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}) \right) - \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \epsilon_r(\vec{r}) \cdot \vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad 1.17$$

### 3.4.2. Méthode des différences finies temporelles

La méthode des différences finies temporelles, en anglais FDTD (Finite Difference in the Time Domain) est une méthode qui permet la résolution directe des équations de Maxwell. Elle donne des résultats précis même sur des structures à fort contraste d'indice comme les cristaux photoniques. Cette méthode possède de nombreux avantages

- La résolution des équations est réalisée dans le domaine temporel. Cela qui permet d'étudier l'évolution de la transmission et de la réflexion d'une onde électromagnétique dans un cristal photonique.
- La possibilité d'intégrer dans l'algorithme de résolution de nombreuses sources (ondes planes, modes guidés, dipôles oscillants,...).
- Le calcul de toutes les composantes du champ à tous les instants et sur tous les domaines permet d'obtenir des spectres en fréquence en divers points de la structure grâce à l'utilisation

de la transformée de Fourier. Pour effectuer le calcul de toutes les composantes du champ en tout point de la structure, la méthode des différences finies temporelles exige des calculateurs performants en termes de rapidité et de capacité de mémoire.

#### 4. Matériaux

##### 4.1. Cristaux photoniques dans les matériaux semi-conducteurs

Plusieurs travaux pour la réalisation de structures photoniques sur les semi-conducteurs et leur intégration avec les dispositifs optoélectroniques actifs ont été réalisés pour le contrôle et la propagation de la lumière [28].

L'obtention d'une bande interdite dans un réseau triangulaire par exemple sur semi-conducteurs peut être obtenue avec des motifs circulaires si le contraste d'indice est au moins de 2.6 . L'association semi-conducteur/air (avec un contraste d'indice de l'ordre de 3-3,5) est parfaitement indiquée pour la réalisation des cristaux photoniques. Sur ce type de matériaux. Une première mise en évidence d'une bande interdite totale à 2D aux fréquences optiques a été possible grâce à la technologie "macroporeux" . La figure 1.42. Représente le diagramme de dispersion d'un cristal photonique triangulaire 2D de période  $a$  composé de motifs circulaires d'air (rayon  $r = 0.45a$ ) dans une matrice de silicium poreux ( $n=3.4$ ). Les deux polarisations ont été représentées. La bande interdite totale correspond à la zone noircie.

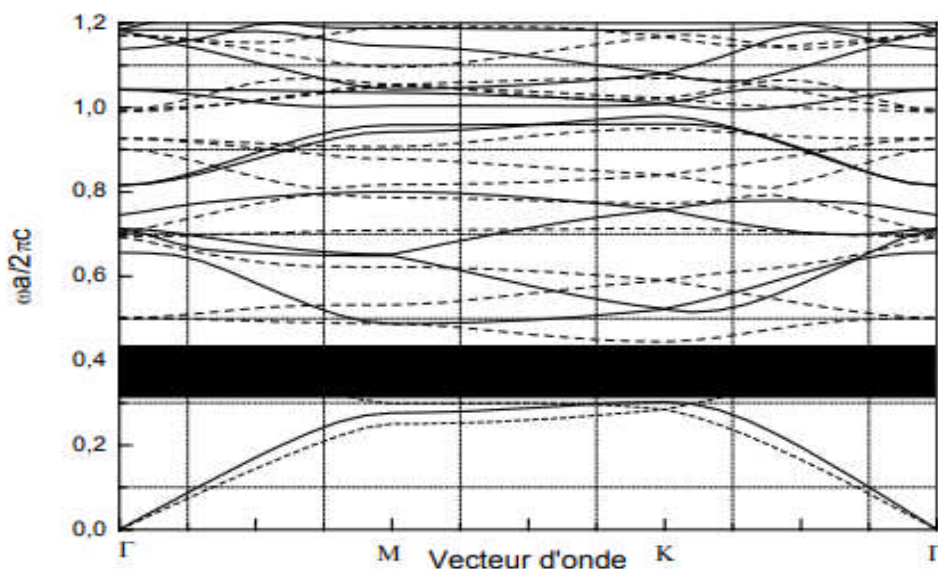


Figure 1.12. Structure des bandes pour le silicium poreux [29].

Des études sur le contrôle de la propagation guidée par effet de bande interdite photonique ont été réalisées sur du silicium nano poreux [30]. Des structures à deux dimensions (2D) de période 300 nm ont été fabriquées par gravure sèche dans le GaAs. La figure 1.43. Montre le processus de fabrication d'une structure triangulaire de trous dans le GaAs. Le même procédé est utilisé aussi pour la réalisation de structure photonique sur l'InP.

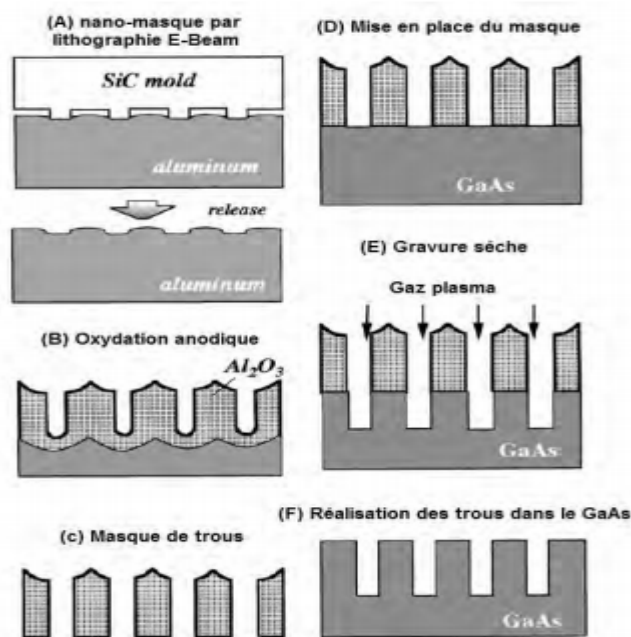


Figure 1.13. Etape de réalisation d'une structure 2D dans le GaAs .

Des cristaux photoniques bidimensionnels ont été fabriquées dans des hétéro structures (GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$  et InP/ $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ ) déposées sur substrats de GaAs ou InP. Le procédé consiste à réaliser une croissance de couches minces de composés III-V par épitaxie jets moléculaires. Ensuite, l'écriture des structures est réalisée par lithographie électronique et enfin les trous sont obtenus par gravure sèche par plasma réactif (RIE). Une structure de type graphite a été réalisée sur une couche d'InP d'épaisseur 237 nm en utilisant le même procédé que pour les hétéro structures : lithographie suivie de gravure ionique réactive. UN exemple de structure est représenté sur la figure 1.14

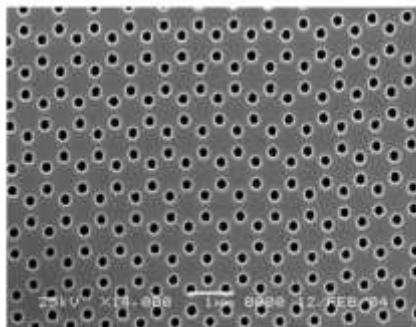


Figure 1.14. Photo MEB d'une structure graphite réalisée sur le InP .

#### 4.2. Cristaux photoniques dans les polymères

L'utilisation de polymères dans les dispositifs optoélectroniques, l'intégration de guides d'ondes sur des substrats de silicium pour l'optique intégrée et la commutation électrooptique dans les guides d'ondes au SiGe, sont d'actualité. Les polymères offrent un avantage certain pour la réalisation de composants à cristaux photoniques du fait de leur facilité d'usinage. Des structures photoniques sur des guides d'ondes polymères ont été réalisées avec des trous de diamètre 300 nm et période de 500 nm et une profondeur de 4 µm .

D'autres travaux sur les polymères ont permis de réaliser des structures avec une période de 430 nm et des diamètres de 190 nm à la longueur d'onde télécoms de 1.55 µm.

#### 4.3. Cristaux Photoniques dans les matériaux diélectriques

Le niobate de lithium est parmi les matériaux optiques les plus importants de par ses propriétés et de ses applications en optique intégrée. Certaines techniques utilisées pour structurer les semi-conducteurs comme le laser pulsé UV, le laser femto seconde, FIB, et la lithographie électronique sont en cours d'études afin de les adapter à la réalisation de structures photoniques sur le niobate de lithium et tantalate de lithium.

D'autres diélectriques font aussi l'objet de travaux pour la réalisation de cristaux photoniques par l'adaptation de la gravure plasma par exemple sur le Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, le SiO<sub>2</sub> et le Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> . Cependant, la mise en œuvre est longue et compliquée et il faut maîtriser parfaitement chaque étape du procédé technologique. D'où l'intérêt de notre travail qui consiste à structurer le niobate de lithium et le tantalate de lithium dans l'objectif d'applications aux télécommunications optiques.

#### 5. Application des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière dans le matériau, sur des dimensions dont l'ordre de grandeur est celui de la longueur d'onde.

Cette propriété les rend intéressants pour de nombreuses applications dans le domaine de l'optique intégrée. La miniaturisation des composants et la recherche de systèmes plus rapides pour les télécommunications pour le contrôle, guidage de la lumière dans les microstructures optiques a été la motivation première pour élaborer de nouveaux composants optiques à partir des cristaux photoniques. L'insertion de défauts ou cavités est la manière la plus simple de modifier les propriétés des cristaux photoniques et de les exploiter pour la réalisation de composants photonique pour l'optique intégrée comme les guide W1 ou W3.

A titre indicatif, différentes applications des cristaux photoniques 2D sont représentée sur la figure 1.15 : les guides d'onde coudé, les filtres optiques, les filtres add/drop, multiplexeurs et cavités.

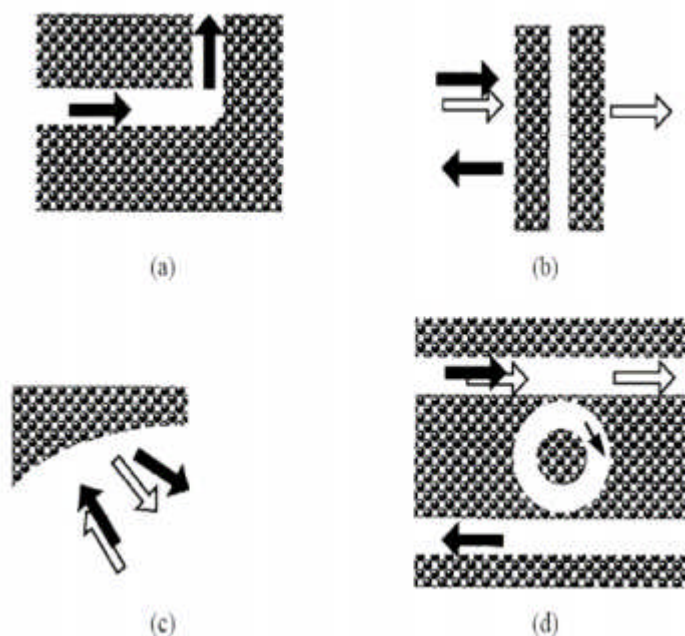


Figure 1.15. Exemple des possibles applications des cristaux photoniques à deux dimensions : (a) guide d'onde à virage, (b) filtre basé sur les modes de cavité à fréquence de résonance, (c) diffraction d'un cristal photonique à différentes longueurs d'ondes, (d) Filtre add/drop (guides d'ondes couplés avec une ou deux structures résonantes) .

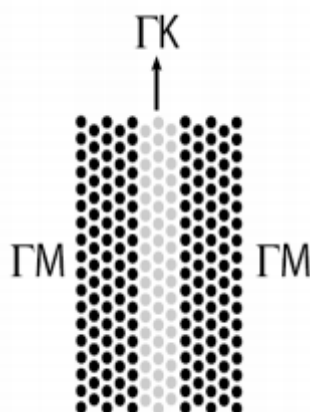


Figure 1.16. Schéma d'un guide (standard) W3 avec trois rangées manquantes selon la direction  $\Gamma M$ .

Grâce aux cristaux photoniques, l'optique non linéaire pourra également jouer un rôle très important dans le traitement du signal optique. D'où l'intérêt d'utiliser des matériaux comme le niobate de lithium et le tantalate de lithium pour exploiter leurs propriétés optiques non linéaires à la réalisation de composants optoélectroniques. La réalisation d'un circuit photonique pouvant diriger la lumière dans telle ou telle direction est l'un des objectifs dans un futur proche. Des guides optiques couplés avec une microcavité peuvent créer un phénomène d'orientation du signal lumineux sous forme d'un routeur optique. Néanmoins, si on veut utiliser les cristaux photoniques comme des composants d'optique intégrée, leurs propriétés optiques doivent remplir certaines conditions précises. Par exemple, dans le domaine de la télécommunication, des filtres démultiplexeurs de longueur d'onde doivent avoir une séparation entre canaux de 0.8 nm ou 0.4 nm selon le type de réseau utilisé pour des communications à longue ou à courte distance [31].

## 5.12. Défauts ponctuels et défauts étendus :

### 5.12.1. Défauts ponctuels-Mode résonnant de cavité :

Plusieurs méthodes sont utilisées pour créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. On peut ajouter ou à modifier un ou plusieurs motifs du cristal et cela revient à réaliser des défauts lacunaires ou interstitiels appelées cavités. Les cavités optiques ainsi créées introduisent des énergies correspondant à leurs modes de résonance au sein des bandes interdites du cristal.

La figure 1.17 présente le spectre de transmission calculé d'un cristal bidimensionnel de géométrie hexagonale et formé de tiges diélectriques muni d'un défaut, créé par une tige

manquante dans le réseau. Cette figure donne le spectre de transmission du cristal sans défaut présentant une bande interdite de longueur d'onde comprise entre 0,9 et 1,3  $\mu\text{m}$ . La présence du défaut se traduit par un pic de transmission étroit et unique à 1,1  $\mu\text{m}$ . On a donc affaire, dans ce cas, à une cavité monomode [32,3].

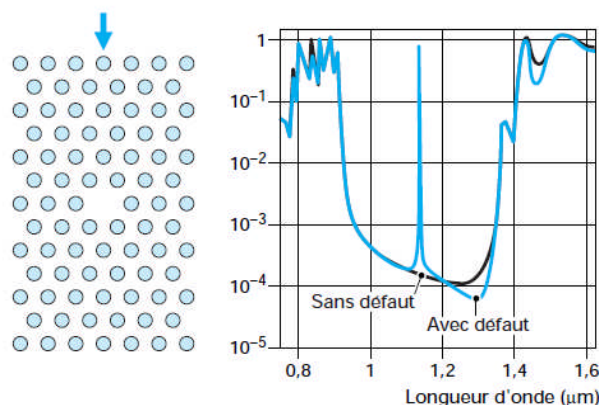


Figure 1.17 : Transmission d'un cristal photonique hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire. Le peak de transmission correspond au mode résonant de la cavité introduite avec le défaut [1]

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 1.18-).

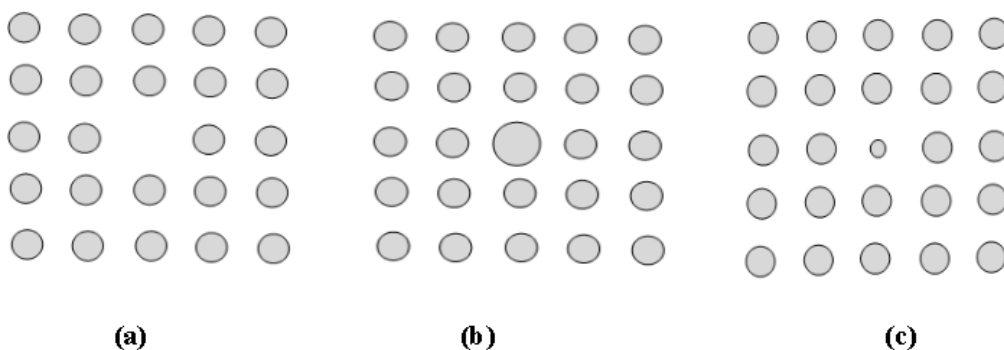


Figure 1.18- : Défauts ponctuels : (a)Défaut lacunaire, (b)et (c)Défauts de substitutions

### 2-7-3-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 H1, sept trous manquants à H2, etc. (Figure 1.19-). Les cavités de type Hn, de forme hexagonale, n'étant le nomb

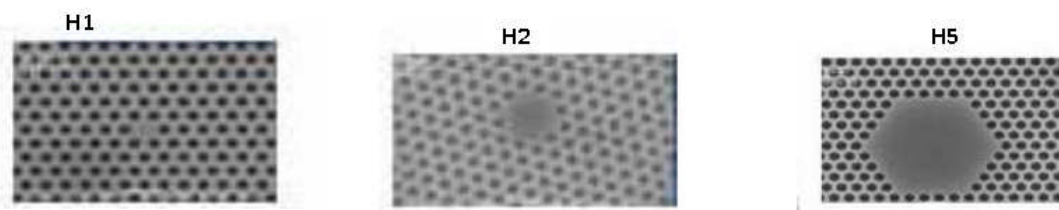


Figure 1.19-: Les différents types de cavités

**b) Cavité carrée :**

Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités sont de type Sn, de forme carrée, n'étant le nombre de lignes et de rangées manquantes du carré. Par exemple la cavité S1 est constituée en omettant une ligne et une rangée.

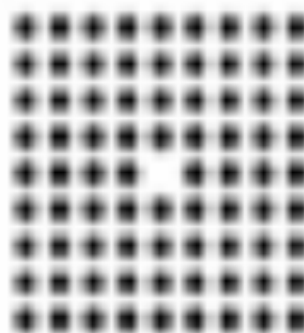


Figure 1.20-: Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de Maille 600nm.

**c) Cavité triangulaire**

La Figure 1.21-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 ( $\epsilon=8.12$ )

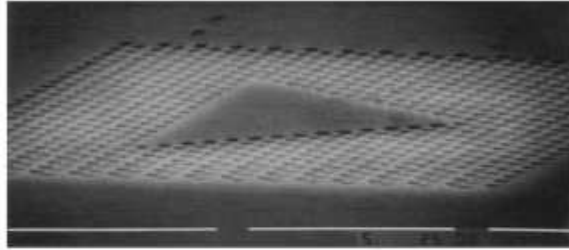


Figure 1.21-: Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm[26].

**d) Cavité rectangulaire**

Le réseau CP2D triangulaire est défini par les paramètres suivant : paramètre de maille  $a=560\text{nm}$ , La Figure 2-17-représente une cavité rectangulaire correspondant à l'omission de 3 rangées finies de trous dans le CP.

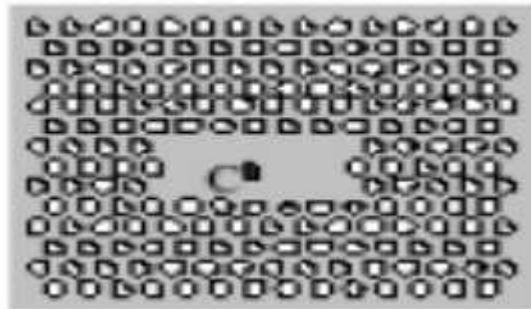


Figure 1.22-: Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm.

## 5.12.2. Défauts étendus et guides d'onde

### 5.12.2.1. Couplage de défauts ponctuels

Plusieurs défauts ponctuels peuvent pratiquement être rapprochés délibérément de façon à obtenir des effets de couplage dans un cristal photonique. Un exemple en est donné en figure 1.22, où un cristal photonique hexagonal est transformé en une chaîne de cavités

Ce design assure un couplage des modes de résonance de cavités voisines. Les modes couplés se dédoublent et le dédoublement se reproduit de cavité à cavité. On finit alors par obtenir une bande de transmission contenant une série de peak de transmission au contraire du premier cas. La direction d'alignement des cavités fixe la direction de propagation permise pour les ondes électromagnétiques. La chaîne de cavités forme donc un guide optique que l'on désigne sous l'acronyme CROW (de l'anglais, « Coupled Resonator Optical Waveguide » [7])

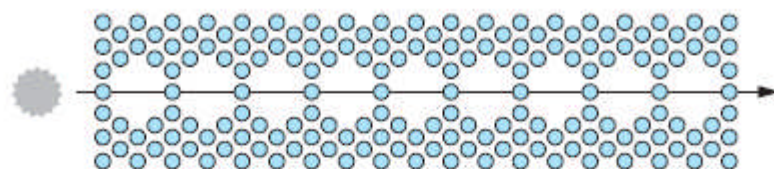


Figure 1.23 : Guide d'onde de différentes configurations réalisé dans un cristal photonique hexagonal.

### 5.12.2.2. Guides d'ondes dans les cristaux photoniques

Un défaut étendu est un ensemble de défauts ponctuels couplés réalisé en retirant (ou modifiant) directement une ou plusieurs rangées de motifs du cristal photonique original. Dans la figure 1.23 on peut voir deux exemples de cristal bidimensionnels hexagonal, le premier exemple (figure 1.24-a) représente un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma M$  alors que le second (figure 1.23-b) est un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma K$ . De ces figures on constate que les architectures des deux défauts sont très différentes et certainement ce sera le même cas pour leurs propriétés optiques. Les défauts étendus des figures 1.23-a et 1.23-b constituent aussi des guides d'onde optiques au sein du cristal photonique semblablement au cas de la chaîne de cavités couplées présentées au paragraphe précédent.

Dans le cas des guides des figures 1.23-a et 1.23-b, la lumière est guidée dans le cœur, car elle ne peut pas se propager dans les gaines qui présentent une bande interdite

photonique ; Le guidage s'effectue donc par réflexion et on peut alors imaginer des guides coudés ou courbés avec de très faibles rayons de courbure. En fait, on peut réaliser une grande variété de guides à cristal photonique bidimensionnels en mixant à la fois leurs formes géométriques et aussi leurs constitutions que ce soit connectés ou déconnectés [3,4].

Les cristaux photoniques bidimensionnels à réseaux de trous sont plus préférés par rapport à ceux constitués par des tiges diélectriques, cela est en raison non seulement de leurs capacité à fournir une bande interdite complète, mais aussi et surtout parce que les pertes par diffraction hors du plan de propagation y sont moins importantes. Le principe de fonctionnement de ces guides optiques diffèrent sensiblement de celui des guides d'onde classiques de l'optique guidée où le guidage est assuré par réflexion totale à l'intérieur d'une couche diélectrique (le cœur), prise en sandwich entre deux autres couches diélectriques (les gaines) d'indice de réfraction plus faible.

La réflexion totale à l'interface entre deux couches d'indices respectifs  $n_1$  et  $n_2$  est obtenue pour tous les angles d'incidence supérieurs à l'angle critique  $\theta_c$  donné par : [3].

$$\theta_c = \arcsin(n_2/n_1) \tag{1.18}$$

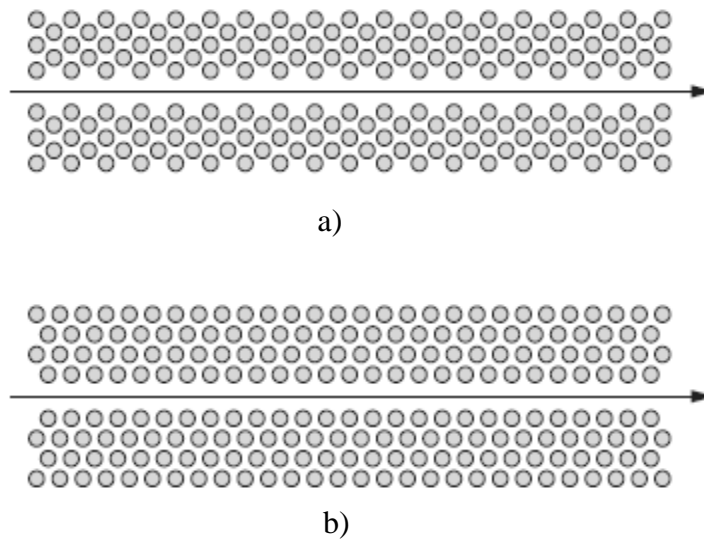


Figure 1.24 : Guide d'onde de différentes configurations réalisé dans un cristal photonique hexagonal. [1]  
 a- Guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma M$ .  
 b- Guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma K$ .

### 5.12.3. Influence du défaut sur le diagramme de dispersion :

L'insertion du défaut dans la structure influe fortement sur le diagramme de dispersion [30,64]. Un diagramme de bandes en orientation  $\Gamma K$  est tracé pour un cristal photonique à maille triangulaire sans défaut (indice du matériau égal à 3.21 et facteur de remplissage en air égal à 30%) ainsi que pour deux structure à guide de types  $W_3$  et  $W_5$  respectivement (figure 1.25). En comparant ces diagrammes, on constate que les structures avec défauts font apparaître des modes de propagations induit au sein de la bande interdite photonique du cristal parfait. En augmentant les largeurs des défauts on constate que nombre de modes augmente dans le guide (figure 1.25).

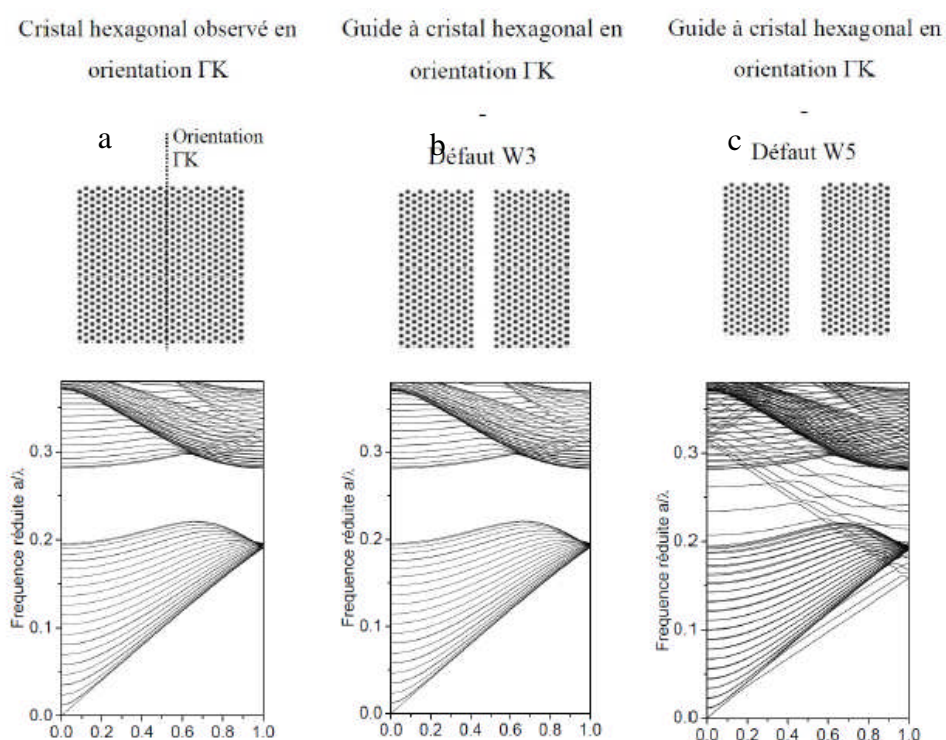


Figure 1.25 : Impact de la largeur du défaut linéique sur le diagramme dispersion d'un cristal photonique à réseau hexagonal en orientation  $\Gamma K$  [30].

- a- Cristal photonique sans défaut.
- b- Cristal photonique avec guide d'onde  $W_3$ .
- c- Cristal photonique avec guide d'onde  $W_5$

**6. Conclusion :**

Ce premier chapitre été dédié à l'étude des concepts de base des cristaux photoniques. Parmi ces concepts, est leurs possessions de bandes interdites photonique induite par leurs propres architectures. Cette bande interdite est générée par la variation périodique de la constante diélectrique des matériaux constituant ce cristal photonique (à l'échelle de la longueur d'onde) sur une ou plusieurs directions.

Cette bande interdite associé à des défauts de tous types (microcavité, guide d'onde, couplage microcavité-guide d'onde..etc.) créés volontairement dans la structure périodique originale de ce cristal est à la base de toutes les applications conçus au tours de ce type de structure. D'un autre côté, leurs grande flexibilité les rends très prometteuses pour la réalisation de composants optiques planaires compacts et originaux et plus particulièrement les capteurs optiques.

## **Chapitre 2 : Capteur de dépassement et de position**

## 2.1 INTRODUCTION :

On peut définir un capteur comme une partie de la chaîne de mesure ou il reçoit la grandeur à mesurer (physique en général) et fournit une information (logique, numérique ou analogique) directement liée à cette grandeur. Dans un capteur on aura donc deux éléments indispensables (parfois confondus). - Le corps d'épreuve qui sera mis en présence de la grandeur à mesurer et qui réagit selon une loi connue aux variations de cette grandeur. - Le transducteur il traduira ces variations en un signal électrique facile à exploiter dans les équipements modernes. D'un autre coté un capteur peut être défini comme 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 [33].

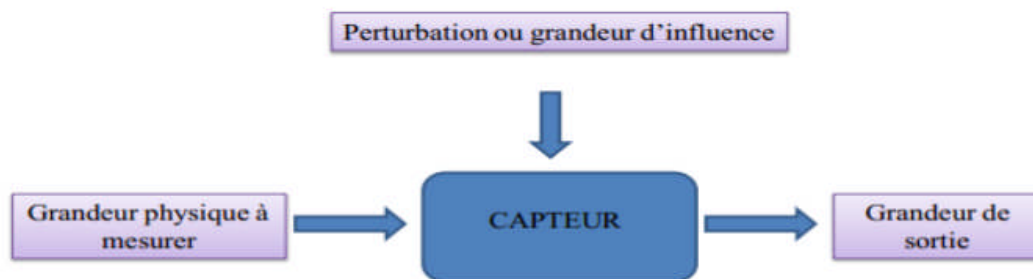


Figure 2. 1 : Définition d'un capteur.

## 2.2- Éléments constituant une chaîne de mesure :

La fonction globale d'un capteur est de convertir une grandeur physique à mesurer (mesurande) en une autre grandeur physique, accessible aux sens humains ou adaptée pour être transmise par un réseau à un système de traitement de l'information (grandeur électrique). La tendance actuelle est d'associer directement au niveau du capteur des éléments assurant l'adaptation de la grandeur physique de sortie (image de l'information mesurée). On parle alors d'intégration ou de « capteur intelligent ».

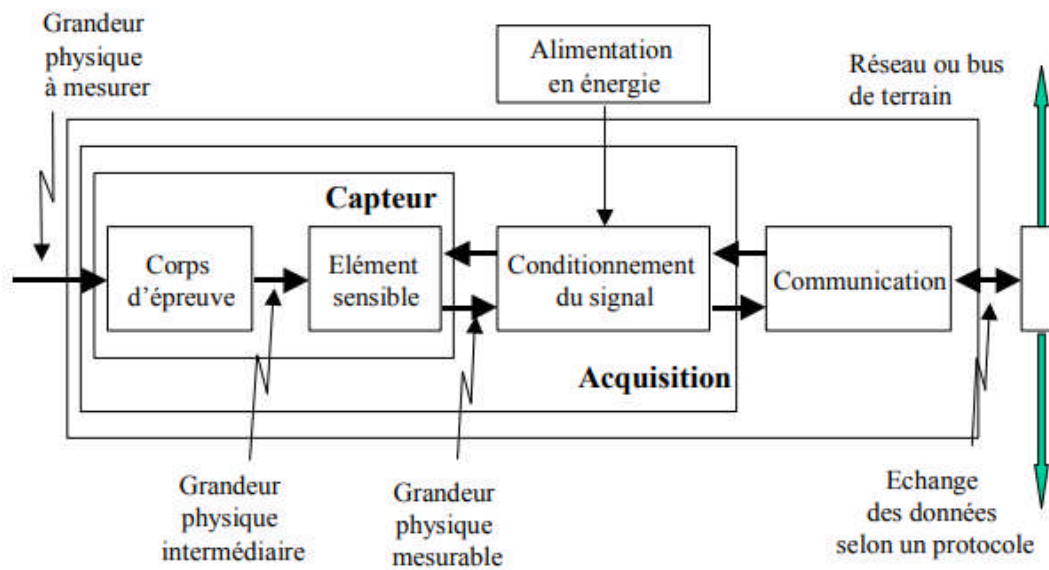


Figure 2.2 : Structure d'un capteur

Le corps d'épreuve est l'élément influencé par la grandeur physique à mesurer. Il convertit cette grandeur en une autre grandeur physique intermédiaire, très souvent un déplacement. L'élément sensible convertit cette grandeur en une grandeur mesurable, le plus souvent une grandeur électrique.

Le circuit qui assure le conditionnement du signal, sert à traiter la grandeur mesurable pour délivrer un signal de sortie ayant des caractéristiques spécifiées. Les fonctions assurées peuvent être multiples de la simple mise en forme et adaptation du signal à un traitement élaboré de corrections des grandeurs d'influence.

Les fonctions principales d'un capteur se déduisent de sa structure :

- ♣ FS1 : recevoir la grandeur source
- ♣ FS2 : convertir la grandeur source en une grandeur mesurable
- ♣ FS3 : être alimenté en énergie
- ♣ FS4 : être lié à un support Exemple : Etude fonctionnelle d'un anémomètre.

### 2-3-Classification des capteurs

On classe 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.[35]

### 2-3-1-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  $\rho$ , perméabilité Magnétique  $\mu$ , constante diélectrique  $\epsilon$ .

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 [34].

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 2-1- : Les effets utilisés pour réaliser la mesure.

### 2-3-2-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.[34]

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

Dans ce mémoire nous allons abordés exclusivement un seul types de capteur qui sont les capteurs de déplacements. Ce choix est du à leurs grandes importances et utilisation dans les différents domaines de la vie quotidienne ; dans l'industrie, dans le domaine médical, dans la recherche scientifique ... etc .

#### 2.4- Les différents types de déplacement et leur mesure

Un déplacement pouvant être défini comme la variation, en fonction du temps, d'une position, la dérivée première par rapport au temps du déplacement donne la vitesse, la dérivée seconde donne l'accélération. Ces deux grandeurs sont certes accessibles à partir du signal fourni par un capteur de déplacement ; il est toutefois à noter [36] que le rapport signal sur bruit est diminué lors d'une dérivation par rapport au temps. Il est donc plus intéressant d'utiliser les capteurs spécifiques au mesurage de ces grandeurs : tachymètres linéaires ou angulaires pour les vitesses [37], accéléromètres ou gyromètres pour les accélérations [38].

## **2.5- Classement des capteurs selon le principe de transduction utilisé :**

### **2.5.1 Types de classements possibles**

Les capteurs en général, et les capteurs de déplacement en particulier, peuvent être classés de multiples manières. L'une d'elles consiste par exemple à discerner ceux des capteurs qui se contentent de modifier la grandeur électrique qui leur est appliquée (capteurs passifs) de ceux qui sont capables de générer une grandeur électrique (capteurs actifs). Un autre mode de classement consiste à considérer le type de sortie délivrée par le capteur : numérique ou analogique. La nature de la liaison entre la partie fixe et la partie mobile peut également servir de critère, c'est alors le principe de mesure (avec ou sans contact) qui est considéré. L'étendue de mesure ou la résolution du capteur ne sont généralement pas admissibles comme critères de classification, bien que ce soient généralement les premiers critères de choix pour un capteur, car ces paramètres peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur pour une même gamme de capteurs.

### **2.5.2 Classement suivant le type de transduction utilisé**

Ce classement est basé sur le principe physique mis en œuvre pour convertir le mesurande (ici le déplacement) en grandeur électrique. Il présente l'avantage de prendre en compte directement les grandeurs d'influence susceptibles de perturber la mesure, ce qui constitue un des principaux critères lors du choix d'un capteur. Une telle classification est en outre directement liée à la technologie utilisée ; il est alors possible de décrire le fonctionnement d'une famille entière de capteurs.

Dans ce qui suit, elle a été retenue pour la présentation des capteurs de déplacement. Parmi les capteurs (passifs) à impédance électrique variable, les trois types d'impédances sont successivement présentés : résistance, inductance et capacité. Le couplage inductif variable est le principe utilisé par toute une famille de capteurs : transformateur différentiel, microsynchronisme, potentiomètre inductif, synchro détecteur, résolveur et induction. Enfin, les codeurs numériques optiques forment une famille à part entière de capteurs de déplacement.

## **2.6. Type des capteurs de déplacement :**

### **2.6.1. Capteurs de déplacement à potentiomètre résistif :**

Il s'agit d'un capteur dont la simplicité du principe conduit à des réalisations de coût modéré; le signal de mesure qu'il permet d'obtenir peut être d'un niveau relativement important et il n'exige pas de circuit de traitement spécifique. Cependant il est le siège de frottements internes qui affectent sa finesse, sont une source de bruit et la cause d'une usure qui entraîne

la dégradation de ses performances (linéarité, précision) et fixe une limite au nombre de manœuvres qu'il peut subir. En outre, son fonctionnement peut être affecté par l'atmosphère ambiante (humidité, poussières) [39,40,34].

### **a-Diverses formes géométriques**

Un potentiomètre est constitué d'une résistance fixe  $R_n$  sur laquelle peut se déplacer un contact électrique, le curseur. Celui-ci est solidaire mécaniquement de la pièce dont on veut traduire le déplacement ; il en est isolé électriquement.[34]

La valeur de la résistance  $R$  entre le curseur et l'une des extrémités fixes est fonction, d'une part de la position du curseur, et donc de la pièce mobile dont on veut traduire électriquement la position ; d'autre part de la réalisation de la résistance fixe. Lorsque celle-ci est constituée de façon uniforme, le potentiomètre est linéaire car il établit une relation de proportionnalité entre  $R$  et la position du curseur. Selon la forme géométrique de la résistance fixe et donc du mouvement du curseur on distingue :

- le potentiomètre de déplacement rectiligne (figure 2. 1 a)
- le potentiomètre de déplacement angulaire et plus précisément,
- le potentiomètre circulaire :  $[J.,M < 360^\circ]$  (figure 2. 1 b)
- le potentiomètre hélicoïdal :  $[J.,M > 360^\circ]$  (figure 2. 1 c)

De façon générale, on désignera dans la suite le déplacement du curseur par  $x$ , qu'il soit linéaire ( $x = C$ ) ou angulaire ( $x = a$ ) et par  $X$  sa valeur maximale ( $L$  ou  $aM$ ) .

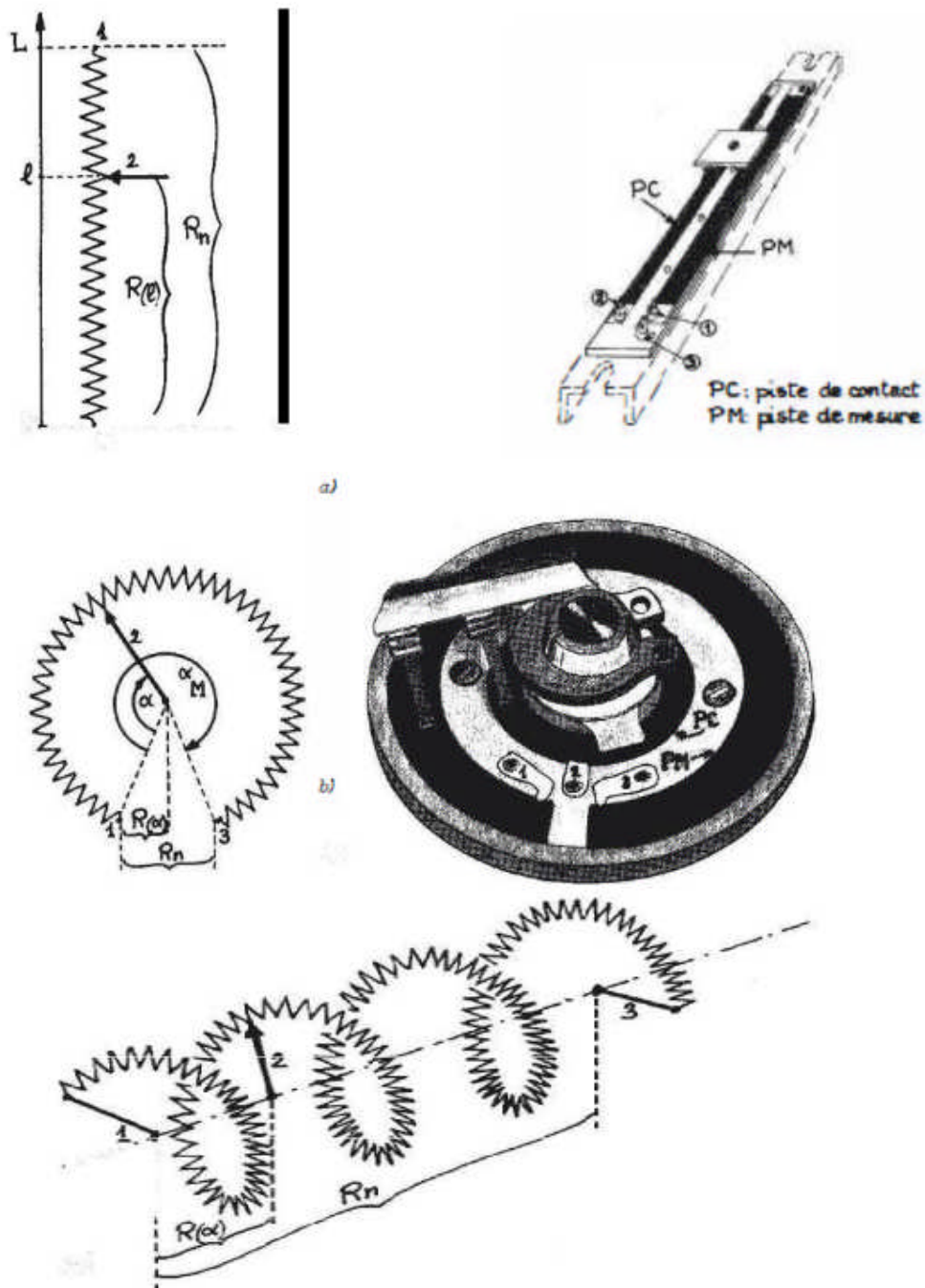


Figure 2.3 Diverses formes de potentiomètres : schémas de principe et réalisations : a) potentiomètre rectiligne ; b) potentiomètre circulaire ; c) potentiomètre hélicoïdal

**b-Paramètre caractérisant les capteurs de déplacement résistifs :**

**•Tolérance sur la valeur de la résistance**

Pour les potentiomètres standards la tolérance sur la valeur de Rn est selon les cas de ±20 % ou ± 10 % ; elle peut être ramenée à ± 5 %. En fait, une grande précision sur la valeur de la résistance n'est en général pas nécessaire dans les montages de mesure où le signal résulte du rapport de résistances R(x)/ Rn [3].

**•Coefficient de température de la résistance**

Il est en général plus élevé pour les résistances à piste (de l'ordre de - 3 . 10- 4 /° C) ; il est d'importance secondaire si la température du potentiomètre est homogène et si le signal n'est fonction que du rapport R(x)/ Rn. [3].

**•Linéarité propre**

De faibles inhomogénéités dans la structure ou la composition des matériaux, de légères irrégularités dans les dimensions peuvent entraîner un défaut de linéarité de la résistance qui se traduit par une variation, au cours du déplacement, de l'accroissement unitaire dR(x)/ d l'ordre de grandeur de l'écart entre la courbe réelle R(x) et la meilleure droite est selon les types de 0,01 % à 1 % de Rn. C-Détermination d'une position grâce à ce type de capteurs :L'information est fournie par la tension Vm entre le curseur et une extrémité du potentiomètre : elle doit être mesurée ou acquise à l'aide d'un dispositif à grande impédance d'entrée : voltmètre ; amplificateur en montage suiveur : la tension de mode commun maximale admissible par l'amplificateur doit être supérieure à la tension d'alimentation du potentiomètre ; amplificateur en montage inverseur : la résistance d'entrée du montage, R1, doit être très supérieure à Rn.

L'utilisation d'un convertisseur analogique - numérique qui a pour tension de référence la tension d'alimentation Es du potentiomètre permet d'éliminer l'erreur due à l'incertitude sur la valeur de cette tension, résultant par exemple d'une dérive ; en effet, le nombre N en sortie du convertisseur, de résolution n bits, ayant pour valeur [3]:

$$N = \frac{V_m}{E_{ref}} * 2^n$$

On a dans ce cas :

$$V_m = \frac{x}{X} E_r ; E_{ref} = E_r \text{ D'où } N = \frac{x}{X} 2^n$$

L'information déterminant le déplacement est ici liée à la variation  $\Delta V_m$  de la tension du curseur qu'entraîne son déplacement  $\Delta x$  autour d'une position  $x_0$  donnée.

$$V_m(x_0 + \Delta x) = V_{m0} + \Delta v_m$$

Ou

$$V_{m0} = \frac{x_0}{x} E_r \text{ et } \Delta v_m = \frac{\Delta x}{x} E_r \quad [1]$$

Une détermination précise de  $\Delta x$  s'effectue en éliminant le terme constant  $V_{m0}$  par une mesure différentielle ; celle-ci nécessite un potentiomètre de compensation, identique au potentiomètre de mesure, alimenté par la même source et dont le curseur fixé à la position  $x_0$  délivre la tension constante  $V_{m0}$ . Lorsque le déplacement  $\Delta x$  est rapidement variable, de fréquence minimale  $f_m$ , la composante continue  $V_{m0}$  peut être éliminée par un couplage capacitif réalisant un filtre passe-haut dont la fréquence de coupure est inférieure à  $f_m$ .

## 2.6.2. Capteurs inductifs

### a-Capteurs inductifs à entrefer variable

#### •Principe de base

Le déplacement que l'on veut traduire électriquement est imposé à l'un des éléments d'un circuit magnétique, entraînant une variation du flux dans un enroulement de mesure. Lorsque l'élément mobile est un noyau ferromagnétique, en translation ou en rotation, son déplacement peut être mis en évidence :

- ♣ Soit par la modification du coefficient d'auto-induction d'une bobine (inductance variable) ;
- ♣ Soit par le changement du couplage entre les enroulements primaire et secondaire d'un transformateur (transformateur différentiel, Microsyn) provoquant une variation de la tension secondaire.

Les variations du coefficient d'auto-induction  $L$  ou de mutuelle induction  $M$  en fonction du déplacement d'un noyau sont en général d'une linéarité médiocre ; celle-ci peut être notablement améliorée par l'association en opposition de deux bobines dont les coefficients  $L$  ou  $M$  varient en sens contraire pour un même déplacement, réalisant ainsi une compensation partielle des non-linéarités (fonctionnement en push-pull). Le capteur inductif est placé dans un circuit alimenté par une source de tension sinusoïdale dont la fréquence est, en général, limitée à quelques dizaines de kilohertz afin que soient réduites les pertes magnétiques et par courants de Foucault ainsi que l'influence des capacités parasites. La figure 2.2 donne un exemple de capteur de déplacement inductif. [3]

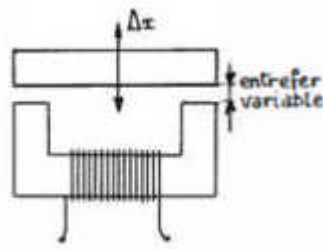


Figure 2.4-Schéma de principe d'un capteur à entrefer variable

L'expression du coefficient d'auto-induction L est donnée par :

$$L = \mu_0 N^2 S \cdot \frac{1}{l + \frac{l_f}{\mu_f}}$$

$l_f$  et  $l_0$  sont respectivement la longueur moyenne d'une ligne de force dans le matériau ferromagnétique et dans l'air ;  $S_f$  et  $S_0$  sont les sections droites du circuit magnétique et de l'entrefer,  $\mu_f$  la perméabilité magnétique relative du matériau ferromagnétique (de l'ordre de  $10^3$  à  $10^4$ ) et  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (MKSA). Pour que L'inductance soit être sensible à la variation d'entrefer, il faut choisir :  $l_0 \gg l_f / \mu_f$ .

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S \cdot S_f}{l_0}$$

**•Sensibilité de ce type capteur :**

Moyennant quelque considération et approximation ; la sensibilité S d'un tel dispositif de mesure de déplacement  $\Delta x$  est donnée par la relation suivante : [3]

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta x} = -2 \frac{\mu_0 N^2 S \cdot S_f}{l_0} \cdot \Delta x = \left( 1 - \frac{2\Delta x}{l_0} + \left( \frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right)$$

La sensibilité dépend de la position initiale  $l_0$  de l'armature : elle est d'autant plus élevée que  $l_0$  est plus petit ; en outre, elle ne peut être considérée comme constante que si le déplacement est très petit par rapport à  $l_0$ . Ceci limite l'emploi de ce type de capteur à des déplacements faibles, de l'ordre du mm.

**b-Transformateur différentiel :**

Il s'agit d'un capteur remarquable pour ses qualités de linéarité, de résolution et de discrétion ; il se prête en outre à des réalisations susceptibles de fonctionner en atmosphères très hostiles

Comparé à l'association en push-pull de deux capteurs inductifs à noyau plongeur avec laquelle il présente une certaine similitude, il a l'avantage : d'une plus grande simplicité de montage, puisqu'il n'exige pas la réalisation et l'équilibrage d'un pont ; d'une indépendance du circuit d'excitation et du circuit de mesure procurant entre eux un isolement galvanique simplifiant la réjection des tensions de mode commun et évitant dans certains cas l'emploi d'un amplificateur d'isolement.

**•Principe de base**

Le transformateur différentiel est constitué d'un enroulement primaire et de deux enroulements secondaires placés symétriquement par rapport au primaire ; celui-ci est alimenté par une f.é.m. sinusoïdale  $e_1 = E_1 \cos(\omega t)$ . Le déplacement d'un noyau ferromagnétique modifie le couplage entre le primaire et chacun des secondaires (figure 2.3-a et b). Les secondaires sont reliés en opposition de façon que les f.é.m. qui y sont induites par mutuelle induction avec le primaire se soustraient. Un schéma électrique simplifié, dans lequel sont négligées les capacités parasites (entre spires d'un enroulement et entre enroulements) ainsi que les inductances de fuite, est représenté figure 2.3-c avec les notations utilisées dans les calculs.

**•Caractéristiques métrologiques**

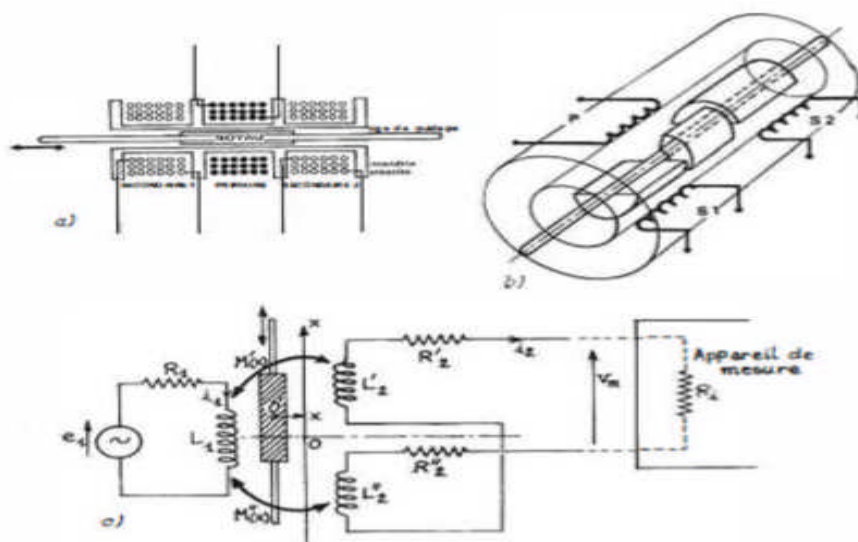
De l'expression précédente de la tension de mesure on déduit la sensibilité [1]

$$S = -\frac{\Delta V_M}{\Delta x} = \frac{2\omega a E_1}{\sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}}$$

$V_M$  étant l'amplitude de  $v_M$ .

Pour les fréquences d'excitation basses [3]

$$(f < R_1 / 2\pi L_1) \quad S = \frac{2\omega a E_1}{R_1}$$



[1]

Figure 2.5-Transformateur différentiel. Principe de constitution : pour déplacement rectiligne ;b) pour déplacement angulaire ; c) schéma électrique équivalent Simplifié

La sensibilité est dans ce cas proportionnelle à la fréquence de la tension au primaire :elle peut être affectée par les variations thermiques de  $R_1$ ; cependant ces dernières peuvent être convenablement compensées en plaçant en série avec  $R_1$  une résistance  $r_1$  dont les variations thermiques s'opposent à celles de  $R_1$  ou en alimentant le primaire par une source de courant Pour les fréquences d'excitation élevées [3]

$$(f < R_1 / 2\pi L_1) \quad S = \frac{2w\alpha E_1}{R_1} \quad 2.12$$

La sensibilité est indépendante de la fréquence de l'alimentation et l'influence de la température est considérablement réduite.

•Ordre de grandeur des caractéristiques [1]:

1.Étendue de mesure :

♣Déplacements linéaires :  $\pm 1$  mm à  $\pm 500$  mm,

♣Déplacements angulaires :  $\pm 45^\circ$  ; 2.Sensibilité :

♣Déplacements linéaires : 1 à 500 m V par V primaire et par mm,

♣Déplacements angulaires : 1 à 10 m V par V primaire et par degré d'angle ;

♣Écart de linéarité : 0,05 % à 1 % de l'étendue de mesure (E.M.) ;

3. Précision :

♣Erreur de mobilité : 0,002 % à 0,05 % E.M.,

♣ Erreur d'hystérésis : 0,002 % E.M. ;

4. **Finesse** : masse mobile de 0,5 g à quelques dizaines de g.

5. **Tension d'alimentation** : 1 à 50 V<sub>eff</sub>.

6. **Fréquence de l'alimentation** : 50 Hz à 25 000 Hz.

**c-Microsyn**

Cette petite machine est formée d'un stator à quatre pôles et d'un rotor, tous deux ferromagnétiques. Sur chaque pôle du stator sont bobinés deux enroulements : un primaire et un secondaire ; le rotor n'est pas bobiné et il subit la rotation qu'il s'agit de traduire (figure 2.6[3])

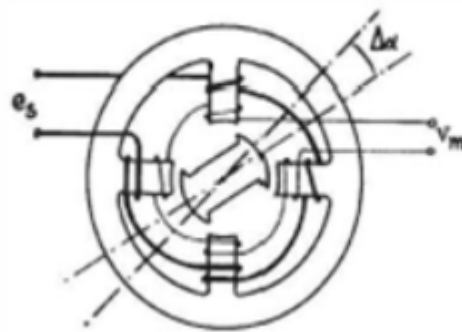


Figure 2.6-principe de la constitution du microsyn [3]

Les enroulements primaires sont en série et l'ensemble est alimenté par une tension sinusoïdale de quelques dizaines de volts au maximum et de fréquence généralement inférieure à 10 kHz. Le flux d'induction dans chaque enroulement secondaire ainsi que la fé.m. Dont il est le siège sont de la forme :

$$\varphi_i = \varphi_i \cos \omega t \quad e_i = - \frac{d\varphi_i}{dt} = \omega \sin \omega t$$

Les enroulements secondaires sont montés en série de façon que e1 et e3 soient en opposition avec e2 et e4; la tension secondaire a donc pour expression :

$$v_m = e_1 + e_3 - e_2 - e_4$$

Soit

$$v_m = \omega(\varphi_1 + \varphi_3 - \varphi_2 - \varphi_4) \sin \omega t$$

La position angulaire du rotor fixe la réluctance des circuits magnétiques et donc les flux maximaux dans les enroulements ; lorsque le rotor est dans une position symétrique par rapport aux 2 paires de pôles, les flux dans les 4 enroulements secondaires sont égaux, soit  $\Phi_0$  leur valeurs, et la tension  $v_m$  est nulle : c'est le zéro du capteur. Lorsque le rotor tourne par rapport à cette dernière position, il y a une variation de réluctance et donc de flux dans les enroulements secondaires : La f.é.m. résultante a pour expression :

$$v_m = 2\omega(\Delta\varphi - \Delta\varphi')\sin\omega t$$

Le montage qui est du type push-pull, assure donc une compensation des non linéarités des variations de flux

$$v_m = 4a\omega \cdot \Delta\alpha \sin\omega t$$

L'amplitude de la tension secondaire est, dans une plage limitée autour du zéro, proportionnelle au déplacement angulaire  $\Delta\alpha$ . Pour la position zéro, la tension  $v_m$  résiduelle (due aux harmoniques, aux capacités parasites et aux dissymétries de la réalisation) peut être extrêmement réduite si les précautions adéquates sont prises lors de la fabrication. Il en résulte la possibilité de mesurer au voisinage du zéro des déplacements angulaires très faibles, de l'ordre de 1 minute d'angle. L'absence de bague au rotor, qui n'est pas alimenté, est un élément favorable pour la réduction du bruit et l'accroissement de la durée de vie. Ordre de grandeur de caractéristiques métrologiques :

- **Étendue de mesure** :  $\pm 10^\circ$  ;
- **Sensibilité** : 0,1 V par V primaire et par degré d'angle ;
- **Écart de linéarité** : 0,5 % à 1 % de l'étendue de mesure.

### 2.6.3. Capteurs capacitifs

Il s'agit soit de condensateurs plans soit de condensateurs cylindriques dont l'une des armatures subites le déplacement à traduire, entraînant une variation de la capacité. En négligeant les effets de bord, celle-ci a pour expression :

Pour le condensateur plan: [3]

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{D}$$

$\epsilon_r$  étant la permittivité relative du milieu placé entre les armatures, A et D étant respectivement leur surface en regard et leur distance ;

Pour le condensateur cylindrique: [3]

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\log \frac{r_2}{r_1}}$$

l étant l'enfoncement du cylindre intérieur de rayon  $r_1$  dans le cylindre creux de rayon  $r_2$ .

Dans le système M.K.S.A., les longueurs sont exprimées en mètre,  $\epsilon_0 = 8,8510 \cdot 10^{-12}$ , et l'unité de capacité est le Farad.

L'effet de bord devient important lorsque la distance des armatures n'est pas très faible par rapport aux dimensions linéaires des surfaces en regard. Il peut, dans certains cas, être éliminé de la mesure par l'emploi d'un anneau de garde qui permet de reporter la perturbation au-delà de la surface des armatures effectivement utilisée dans la mesure. Le déplacement de l'armature peut s'effectuer :

- Dans le cas d'un condensateur plan,
- Soit dans son propre plan : A variable, D constant,
- Soit perpendiculairement à son plan : A constant, D variable ;

Dans le cas d'un condensateur cylindrique uniquement parallèlement à l'axe : l variable.

Les capteurs capacitifs sont remarquables par la simplicité de leur constitution qui permet des réalisations robustes et fiables. Le diélectrique est généralement l'air si bien que les performances ne dépendent que des caractéristiques géométriques et sont indépendantes des propriétés des matériaux utilisés, à condition qu'ils soient bien choisis.

Le principe de mesure le plus adéquat est celui qui assure la meilleure linéarité entre déplacement et signal de mesure. Selon le conditionneur associé au capteur, ce signal peut être fonction linéaire : [3]

- ♣ De la variation de capacité  $\Delta C$  ;
- ♣ De la variation d'impédance  $\Delta Z$  ;
- ♣ Ou enfin de la variation relative  $\Delta Z/Z$ , ( $\Delta Z/Z = -\Delta C/C$ ).

Afin d'utiliser le dispositif de mesure le plus approprié, il faut déterminer pour chaque type de capteur capacitif les différentes sensibilités au déplacement  $x$ , à savoir :

- ♣ La sensibilité de la capacité :  $S_c = \Delta C / \Delta x$  ;
- ♣ la sensibilité de l'impédance :  $S_z = \Delta Z / \Delta x$  ;
- ♣ la sensibilité relative :  $S_r = 1/c \times S_c = -1/Z \times S_z$

Ainsi par exemple, si la sensibilité  $S_c$  de la capacité est constante, on choisira de préférence un conditionneur dont la tension de sortie  $V_m$  varie comme  $\Delta C$  :  $V_m = k \Delta C = k S_c \Delta x$ ,  $k$  étant une constante caractéristique du conditionneur utilisé. Maintenant, si c'est  $S_z$  qui est constante,

on associera au capteur un montage tel que :  $V_m = k\Delta Z = kSZ\Delta x$ ; dans chacun de ces cas, on obtient alors un signal proportionnel au déplacement  $\Delta x$ .

#### 2.6.4. Capteur de déplacement à cristaux photoniques :

##### a- Définition :

Les cristaux photoniques (CPH) sont des structures périodiques artificielles avec un matériau dont la perméabilité diélectrique est modulée périodiquement dans une, deux ou trois directions dans l'espace [3,20,]. Cette variation périodique produit une région de longueur d'onde interdite appelée intervalle de bande photonique (PBG) qui interdit la propagation de la lumière dans le matériau en raison de l'inexistence des modes de propagation optique autorisés dans cette région. Les cristaux photoniques deviennent vraiment exploitables en introduisant certains défauts tels que des défauts ponctuels comme des cavités ou des défauts de ligne comme des guides d'ondes, et leurs éléments couplés dans la structure peuvent ajuster le diagramme de dispersion permettant ainsi à des modes particuliers de se propager dans l'intervalle de bande [3]. L'interaction entre un résonateur de cavité et un guide d'ondes déjà été utilisée dans d'énormes travaux de recherche dans différents domaines tels que le biosensing [3], la détection chimique et gazeuse, la détection de température, la détection de tension et/ou de pression, mesure et détection du déplacement. Cette dernière application a toujours été très importante en ingénierie pour de nombreuses applications. En effet, La mesure et le contrôle des micro-déplacements a une grande importance pour les applications, tels que dans l'aérospatiale, les dispositifs de contrôle de la santé (scanner et imagerie médicale), les systèmes micro-électromécaniques (NEMS), etc.

Ce type de capteur est un élément clé dans la mesure et aussi pour le contrôle précis du déplacement microscopique. Par conséquent, il est potentiellement important pour des applications telles que la microscopie à force atomique (AFM) ainsi que pour la détection biochimique [42].

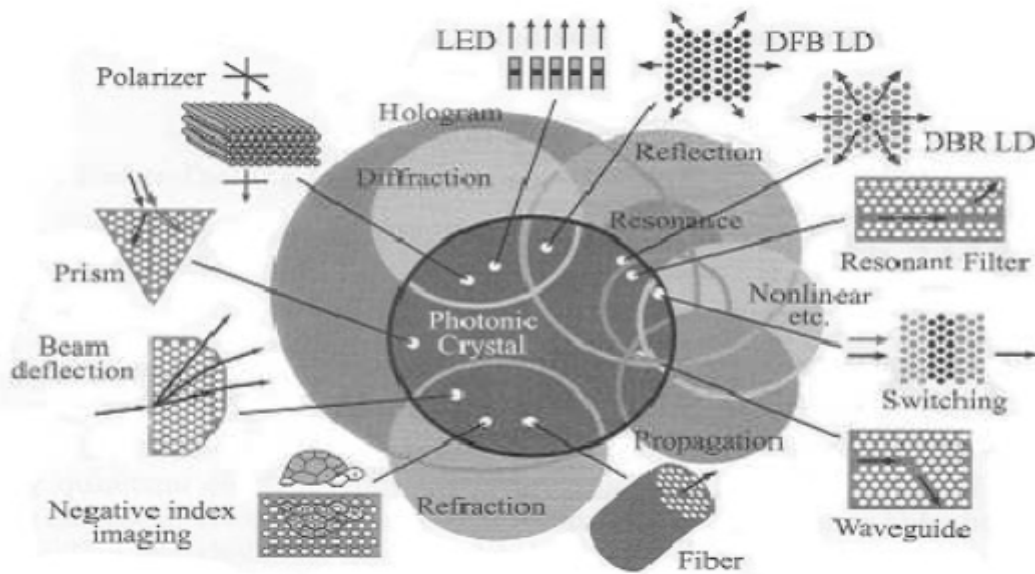


Figure 2.7: recueil d'applications à base de cristaux

De nombreux efforts scientifiques ont été consacrés dans le but de faire des mesures le micro voire de nano déplacement avec grande précision en utilisant des capteurs à base de cristaux photoniques et des interféromètres laser [3,4], en raison de leurs précision de mesure des micro-déplacements tout en ayant des tailles ultracompactes.

**b-Recueil d'exemple de réalisation existante en linéature :**

Les premières conceptions ultrasensible qui ont été proposés par O. Levy et al [27], pour la détection de déplacement utilisaient des guides d'ondes à cristaux photoniques (figure2.8). Ces dans leurs temps, avaient démontrés que de tels dispositifs pouvaient fournir une sensibilité de proche de  $1\mu\text{m}^{-1}$  avec une source lumineuse de  $9,02\mu\text{m}$ .

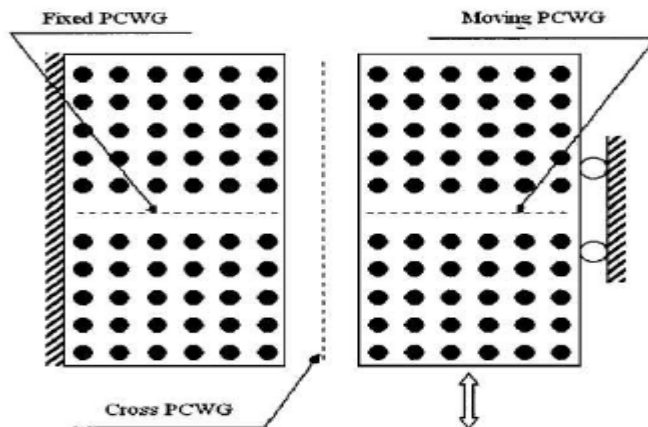


Figure 2.8 : Capteur de déplacement proposé par O.Levy et al

Puis Z. Xu et al, ont présentés un capteur de micro-déplacement utilisant un cristal photonique bidimensionnels déconnecté (le matériau utilisé été d'indice de réfraction de 3.4) de réseau carré muni d'un défaut sous forme de cavité résonante linéique.

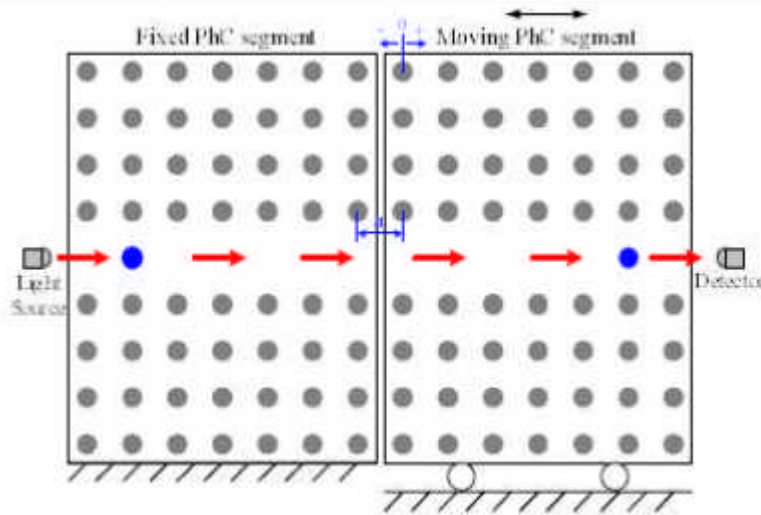


Figure 2.9 : Capteur de déplacement proposé par Zhenfeng et al

Le cristal photonique formant le capteur été divisé en deux segments, un segment fixe et l'autre mobile, cela est illustré en figure 2.9. Ce capteur pouvait mesurer le déplacement dans une plage de  $-0,55a$  à  $0,60a$ . Pour l'étude du comportement de ce capteur cette plage a été segmentée en 6 sous-pages et chaque plage de déplacement ayant sa propre longueur d'onde d'excitation les résultats obtenus par Zhenfeng Xu et al sont regroupé dans le tableau 2.1.

Replacement (a)	Frequency de travail ( $2\pi c/a$ )	Sensibilité ( $a^{-1}$ )
-0.55 à -0.4	0.343	1.90
-0.4 à -0.2	0.341	1.62
-0.2 à 0.0	0.339	1.46
0.0 à 0.2	0.332	1.15
0.02 à 0.4	0.330	1.01
0.4 à 0.6	0.328	0.781

Tableau 2.3 : Sensibilité du capteur proposé par Zhenfeng Xu et al dans chaque segment de déplacement considéré [29].

Une autre structure de capteur a été introduite en 2007 par ces mêmes auteurs. Ces derniers ont proposés un capteur de micro-déplacement avec une large plage de mesure dynamique et sa technique de détection est basée sur un coupleur co-directionnel en cristaux photoniques.

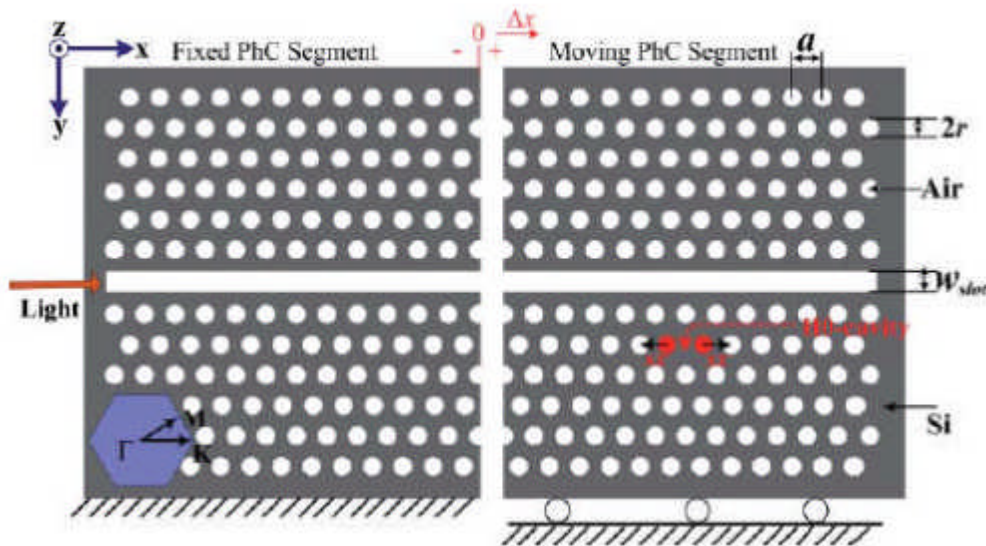


Figure 2.10 : Capteur de déplacement proposé par D. Yang et al

En 2011 par D. Yang et al. ont fourni le capteur de déplacement en silicium représenté en figure 2.9. Ce capteur été constitué d'un slab de silicium bidimensionnel avec un réseau de trous d'air en configuration triangulaire. Ce substrat de silicium contient une fente et une micro cavité  $H_0$  réalisé par l'enlèvement d'un seul trou (figure 2.10). Les deux trous horizontaux adjacents à la  $H_0$  seront déplacés d'une quantité  $s_x$  suivant les axes  $+X$  et  $-X$  respectivement pour contrôler les paramètres du capteur comme l'intensité du signal de la microcavité et sa sensibilité. Finalement le capteur final est obtenu en divisant la structure globale en deux segments, celui de gauche fixe et celui de droite mobile. En choisissant une fréquence d'excitation normalisée convenable  $\omega_0 = 0.2492 (2\pi c/a)$  et pour  $s_x = 0.2a$ , D. Yang et al, ont pu avoir un capteur de réponse linéaire avec une sensibilité de l'ordre de  $1.a^{-1}$  et un facteur de qualité de la cavité  $Q$  de 6000 dans l'intervalle de déplacement de  $0.00a$  à  $0.20a$ . En 2014, S. Olyee et al, ont levé le rideau sur une autre structure de capteur doté de haute sensibilité par rapport à la littérature précédente. Ce capteur été réalisé avec un matériau d'indice de réfraction  $n = 3.4$  dans le quel est creusée une matrice de trous d'air suivant un réseau carré comme montré en figure suivante (figure 2.11).

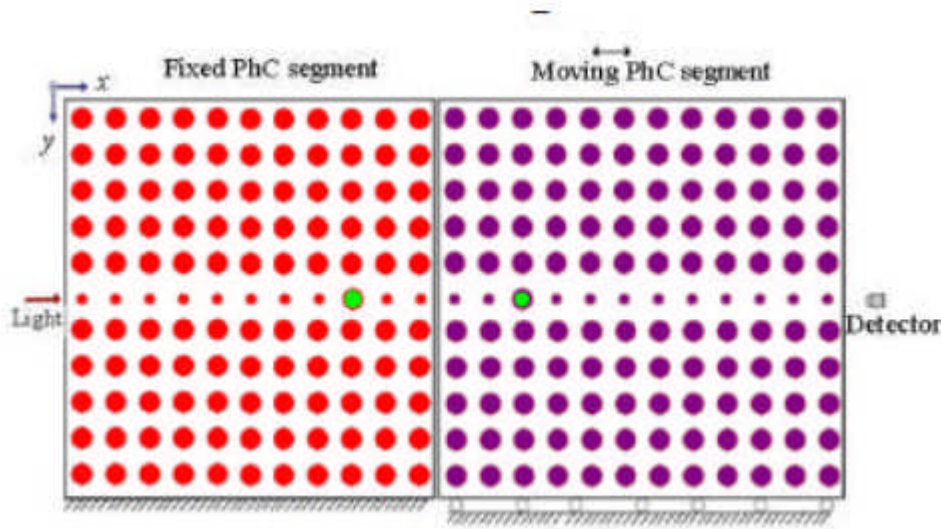


Figure 2.11 : Capteur de déplacement proposé par Saeed OLYAEE et Morteza AZIZI

En choisissant une longueur d'onde convenable de  $2.7 \mu\text{m}$ , la sensibilité qu'ils ont pu avoir est de  $3.6 \mu\text{m}^{-1}$ - $3.8 \mu\text{m}^{-1}$  selon le rayon des trous choisi (en choisissant un rayon de trous entre  $0.49 \mu\text{m}$  et  $0.51 \mu\text{m}$ , la sensibilité et la régression ont des valeurs optimales) avec un facteur de qualité proche de 180. La linéarité de ce capteur est assurée dans l'intervalle de  $0.0 \mu\text{m}$  à  $0.5 \mu\text{m}$ . Dans la même année P. Raniet al, ont proposés un capteur de nano-déplacement utilisant un réseau de trous de forme hexagonale creusés dans un slab en silicium (Si) divisé en deux segments l'une fixe et l'autre (voir figure en bas). Un guide d'ondes est réalisé dans les deux segments en enlevant la rangée de trous centrale complète de chaque côté. La structure est conçue de façon à ce que le segment mobile ait deux degrés de liberté, cela veut dire qu'il peut se déplacer dans la direction horizontale ou verticale comme présentée en figure 2.12. Cette structure a fourni une grande sensibilité de  $0,00461 \text{ nm}^{-1}$  pour un déplacement horizontal du guide d'onde en mouvement de  $40 \text{ nm}$  à  $120 \text{ nm}$ . Pour le déplacement vertical du guide d'onde de la partie en mouvement, la structure est très sensible dans la région  $150 \text{ nm}$  à  $200 \text{ nm}$  avec une sensibilité de  $0,00684 \text{ nm}^{-1}$  pour un déplacement horizontal nul, de  $130 \text{ nm}$  à  $200 \text{ nm}$  avec une sensibilité de  $0,00523 \text{ nm}^{-1}$  pour un déplacement horizontal de  $10 \text{ nm}$ , de  $130 \text{ nm}$  à  $200 \text{ nm}$  avec une sensibilité de  $0,00418 \text{ nm}^{-1}$  pour un déplacement horizontal de  $20 \text{ nm}$ , de  $130 \text{ nm}$  à  $200 \text{ nm}$  avec une sensibilité de  $0,00461 \text{ nm}^{-1}$  pour un déplacement horizontal de  $30 \text{ nm}$ , de  $100 \text{ nm}$  à  $130 \text{ nm}$  avec une sensibilité de  $0,00466 \text{ nm}^{-1}$  pour un déplacement horizontal de  $40 \text{ nm}$ . D'après les résultats qu'ils ont obtenus grâce à ce design,

Ils ont conclu que cette structure peut être utilisée comme capteur de Nano-Déplacement pour les déplacements horizontaux et verticaux.

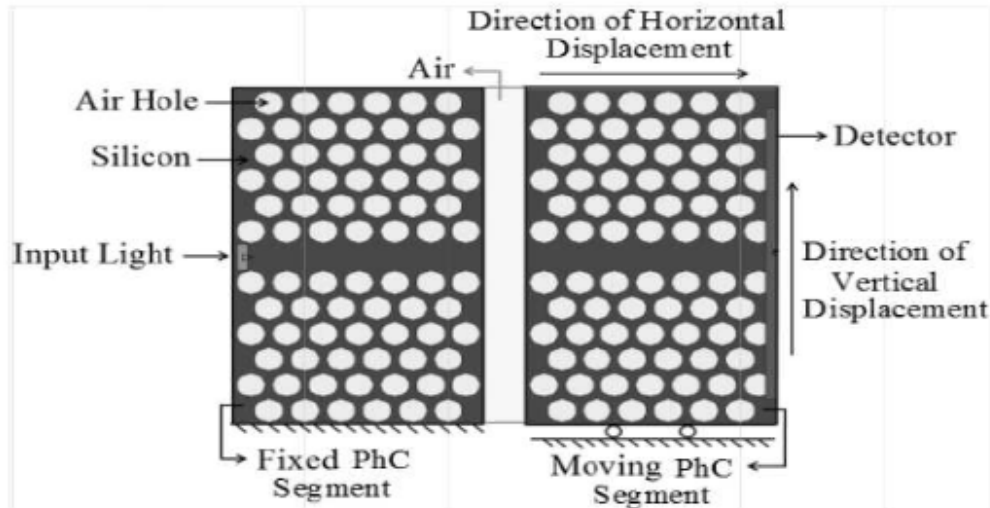


Figure 2.12 : Capteur de déplacement proposé par P. Raniet.

## 2.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons parlé exclusivement des capteurs de déplacement mécanique et optique. En premier lieu nous avons parlé des capteurs de déplacement mécanique simple passif (résistif inductif ou capacitif) puis a on a focalisé l'étude sur l'utilisation des cristaux photoniques dans la mesure de micro-déplacement ; une mesurande qui est très importante dans tous les domaines de la vie. Dans ce contexte nous avons fait le tour d'horizon des capteurs déjà proposés dans la littérature du domaine tout en montrant les sensibilités obtenues pour chaque capteur abordé.

## **Chapitre 3 : Réalisation du Capteur de micro-déplacements grace aux cristaux photoniques 2D**

### 3.1 Introduction :

L'interaction entre un résonateur de cavité et un guide d'ondes a déjà été utilisée dans d'énormes travaux de recherche dans le domaine de la détection et en particuliers à la mesure et la détection de micro voire de nano déplacement [43-46]. Cette application a toujours été très importante en ingénierie ou la mesure et le contrôle du micro-déplacement ont une grande importance pour le bon fonctionnement de grand nombre de dispositif de mesure, tel que l'aérospatial, les dispositifs de contrôle de la santé (scanner et imagerie médicale) et les systèmes micro-électromécaniques (NEMS).

Les premiers modèles ultra-sensibles ont été proposés par Levy et al. [43] pour la détection de micro déplacement ; Ces modèles utilisaient des guides d'ondes à cristaux photoniques. Levy et al. ont démontrés que de tels dispositifs pouvaient fournir une sensibilité proche de  $1,0 \mu\text{m}^{-1}$  avec une source lumineuse de  $9,02 \mu\text{m}$ . Ensuite, Xu et al. [44] ont présenté un capteur de micro-déplacement utilisant un cristal photonique bidimensionnel déconnecté (le matériau utilisé avait un indice de réfraction de 3,4) avec un réseau carré et un défaut en forme de cavité résonnante linéaire. Ce capteur pourrait mesurer le déplacement dans une plage de  $0,55a$  à  $0,60a$ . Pour l'étude du comportement de ce capteur, cette gamme a été segmentée en 6 sous-intervalles de déplacement. Dans chaque sous intervalle le capteur possède sa propre excitation longueur d'onde. Les meilleures sensibilités obtenues par ces deux auteurs étaient de  $1,90a^{-1}$  pour la plage de  $0,55a$  à  $0,4a$  (la fréquence de travail normalisée est de 0,343) et de  $1,62a^{-1}$  pour la plage de déplacement de  $0,4a$  à  $0,2a$  (la charge de travail normalisée est de 0,341). En 2011, Yang et al. [45] ont fourni un capteur constitué d'un slab bidimensionnelle en silicium connectée avec un réseau triangulaire de trous d'air. Ce substrat de silicium contenait une fente et une microcavité faites en enlevant un seul trou. Les deux trous horizontaux adjacents à la microcavité seraient déplacés par une quantité de  $S_x$  le long des axes  $+X$  et  $X$  respectivement pour contrôler la transmission de la microcavité et de sa sensibilité. Ce capteur était composé de deux segments, le premier segment de gauche été fixe alors que le deuxièmes de droite mobile. En choisissant une fréquence d'excitation normalisée  $\omega_0 = 0,2492 (2\pi c/a)$  et pour  $S_x = 0,2a$ , Yang et al. ont acquis une réponse de capteur linéaire avec une sensibilité de  $1,0a^{-1}$  et un facteur de qualité  $Q$  de cavité de 6000 dans la plage de déplacement de  $0,0a$  à  $0,20a$ . En 2014, Olyee et Azizi [46] ont fourni un capteur à haute sensibilité. Ce capteur été réalisé avec un matériau indice de réfraction de 3,4, une matrice de trous d'air creusée dans ce matériau suivant un réseau carré. En choisissant une longueur d'onde de  $2,7 \mu\text{m}$ , la sensibilité qu'ils pouvaient atteindre était de  $3,6 \mu\text{m}^{-1}$  à  $3,8 \mu\text{m}^{-1}$  selon le rayon des trous choisis (en choisissant un rayon de trous entre  $0,49 \mu\text{m}$  et  $0,51 \mu\text{m}$ ,

la sensibilité et la régression ont des valeurs optimales) avec un facteur de qualité proche de 180. La linéarité de ce capteur a été obtenue entre 0,0  $\mu\text{m}$  et 0,5  $\mu\text{m}$ .

### **3.2 Structure propose pour le capteur :**

La structure que nous allons proposer pour le capteur de déplacement utilise un réseau triangulaire composé d'une matrice de trous d'air avec un rayon  $r$  creusés dans un substrat de silicium. L'indice de réfraction du silicium est  $n_{\text{Si}}$  est de 3,48 [44], et l'épaisseur  $h$  du slab est de 490 nm. Cette plaque en silicium est déposée sur une couche de  $\text{SiO}_2$  avec d'indice de réfraction de 1,45 [44], et une épaisseur de  $h_{\text{SiO}_2}$  est de 1,5  $\mu\text{m}$ . La source incidente est une impulsion gaussienne de longueur d'onde de 3,6  $\mu\text{m}$ .

Le calcul de l'indice de réfraction effective du silicium ( $n_{\text{eff}}$ ) à cette longueur d'onde donne la valeur de 2,654 URI. Nous avons utilisé l'indice de réfraction effectif dans nos simulations car l'utilisation de ce dernier donne une bonne approximation 3D à nos simulations effectuées en 2D, et réduit considérablement le temps de simulation [47, 48].

Le diagramme de dispersion en fréquence normalisé et/ou de longueurs d'onde de la matrice du cristal photonique originale sans défauts est le même que celui déjà obtenu dans le paragraphe 3.2 de l'étude précédente. La structure initiale possède une bande interdite photonique située entre 3.0001  $\mu\text{m}$  et 3.9550  $\mu\text{m}$  et centrée à 3.4775  $\mu\text{m}$ . Cette bande existe seulement pour la polarisation TM et dans les directions  $\Gamma$ -K-M- $\Gamma$  de la zone Brillouin. Cet intervalle de bande correspondant à la polarisation TM sera utilisé comme plage de fonctionnement du capteur dans ce qui suivra. Ces résultats sont obtenus en utilisant la méthode PWE bidimensionnelle intégrée dans le module Band Solve au logiciel RSoft..

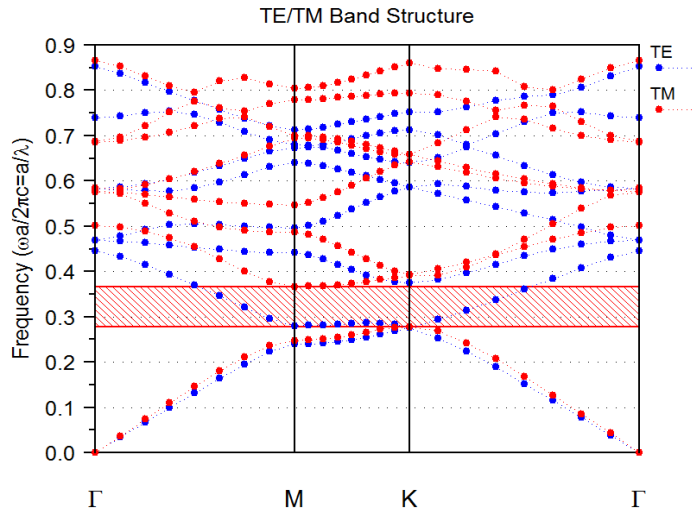


Figure 3.1: Bande interdite photonique de la structure proposée

### 3.3 Principe de la détection et de la simulation :

#### 3.3. 1 Principe de la détection:

Le changement de la distance entre la partie fixet et la partie mobile du capteur changera la transmission du signal optique de sortie au nivrau du recepteur. En conséquence et dans le cas où les paramètres du capteur sont correctement optimisés, il doit y avoir une plage de déplacement dans laquelle la fonction de transfert du capteur (la relation entre l'entrée du système qui est le déplacement et la transmission qui represente sa grandeurs de sortie) sera linéaire. À une fréquence de fonctionnement appropriée, la structure proposée peut être utilisée comme capteur de micro déplacement de bonne sensibilité et linearité.

Les coefficients de transmission pour les différentes fréquences peuvent être exprimés approximativement par la fonction Lorentz suivante donnée dans Eq. (1) [45, 46] :

$$T(\omega, \omega_1) = \frac{\left(\frac{\omega_0}{2 \times Q}\right)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{\omega_0}{2 \times Q}\right)^2} \quad (1)$$

$\omega_0$  et  $Q$  sont respectivement, la fréquence de résonance, et le facteur de qualité de la cavité de résonante de la structure. Lorsque le segment en mouvement est décalé le long de l'axe de déplacement avec une fréquence de fonctionnement  $\omega_0$ , on peut alors écrire la variation de la transmission en fonction de la variation du déplacement  $\Delta x$  comme donnée en Eq. (2).

$$\Delta T(x) = T(x + \Delta x) - T(x) \quad (2)$$

Et en utilisant un développement en série de Taylor, nous aurons [45, 46] :

$$T(\Delta x) = T(x)' \times \Delta x + \frac{T(x)''}{2} \times \Delta x^2 + O(\Delta x) \quad (3)$$

Dans la pratique et lors de la conception de ce type de capteur, nous devons définir une pulsation  $\omega_1$  (ou une longueur d'onde  $\lambda_1$ ) qui assure son fonctionnement linéaire dans sa plage de fonctionnement [44]. Une fois que cette longueur d'onde est dénie, la relation donnée par Eq. (3) devient linéaire, ce qui implique que [43] :

$$T(\omega_0, \omega_1)'' \approx 0 \quad (4)$$

et

$$\Delta T(\Delta x) = T(x)' \times \Delta x \quad (5)$$

Enfin, la sensibilité de ce type de capteur est donnée par (4) [43] :

$$S = \frac{\Delta T(\Delta x)}{\Delta x} \quad (6)$$

### 3.3.2 Simulation du capteur :

La structure du capteur de micro-déplacement que nous avons proposé se compose de deux parties, l'une fixe (partie gauche) et l'autre mobile (partie droite). Les deux parties sont situées de part et d'autre de l'axe vertical central OZ. La partie mobile du capteur se déplace selon des pas de déplacements dont les dimensions sont des fractions de la période  $a$  du réseau. Dans nos simulation, le pas de déplacement considéré est de  $0.05a$ , et la plage de déplacement totale de la partie mobile est de  $0$  à  $0.2a$ ; cette plage de déplacement est utilisée dans plusieurs travaux existants dans la littérature [45, 46]. Le design que nous avons proposé est constitué d'un guide d'ondes central et deux cavités  $H_0$ , ces dernières sont réalisés de chaque côté des axes  $X'OX^+$  et  $Z'OZ^+$ , comme indiqué sur la figure 3.2.

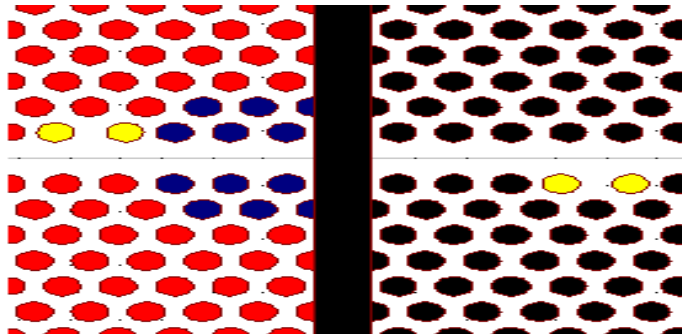


Figure 3.2 : Structure du capteur proposé

Les deux microcavités  $H_0$  sont obtenues en déplaçant les trous jaunes d'un shift  $S_x$  de  $0.5D$  ( $D$  est la distance entre deux trous adjacents) dans les deux directions opposées  $OX^-$  et  $X'O$  en même temps. La valeur  $0.5D$  du shift  $S_x$  est obtenue après plusieurs processus d'optimisations (figure 3.3).

L'excitation lumineuse utilisée dans cette simulation est un laser de longueur d'onde =  $3,6 \mu\text{m}$  avec une distribution gaussienne, et les simulations sont réalisées à l'aide de l'algorithme finite-différence time-Domain (FDTD) [49] et la méthode des ondes plane (PWE) intégrée dans le module FullWave du logiciel RSoft.

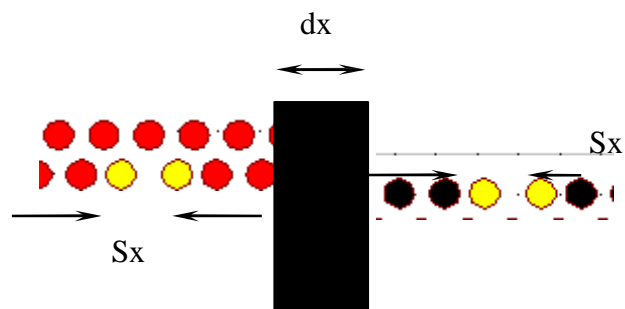


Figure 3.3. Processus d'optimisation du capteur de micro déplacement

### 3.4 Spectre de réponses du capteur :

La figure 3.4 présente la partie utile du spectre de sortie du capteur en fonction des longueurs d'ondes et pour les différentes distances parcourues par sa partie mobile. Le choix de la partie utile du spectre revient à détecter parmi d'autres régions du spectre, celle pour la quel le phénomène de détection est assuré et/ou apparent.

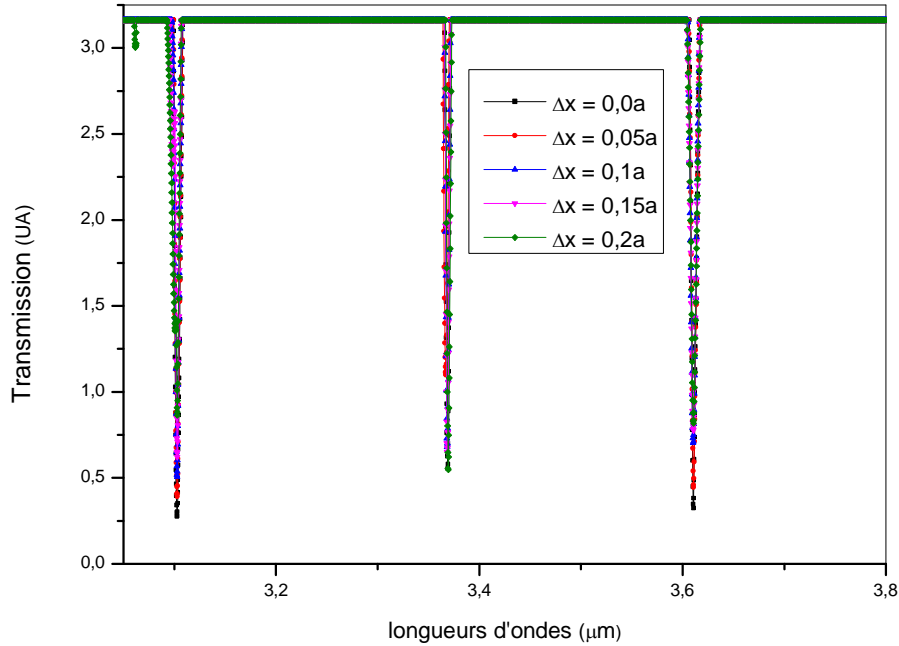


Figure 3.4. Réponse du capteur en fonction des longueurs et pour différents déplacements.

Le spectre de réponse du capteur montre trois groupes d'impulsions. Dans l'étude qui suivra, nous allons considérer seulement premiers groupes d'impulsions, car ils offrent de meilleures caractéristiques pour le capteur réalisé. Les groupes d'impulsions sont situés autour de la longueur d'onde 3.1178 μm. La Figure 4 donne le zoom de ce groupe d'impulsions. Chaque région, comme nous pouvons le voir, peut être divisée en plusieurs régions de fonctionnements où chaque région est définie pour une longueur d'onde explicite, comme le montrent les deux figures 3.5.

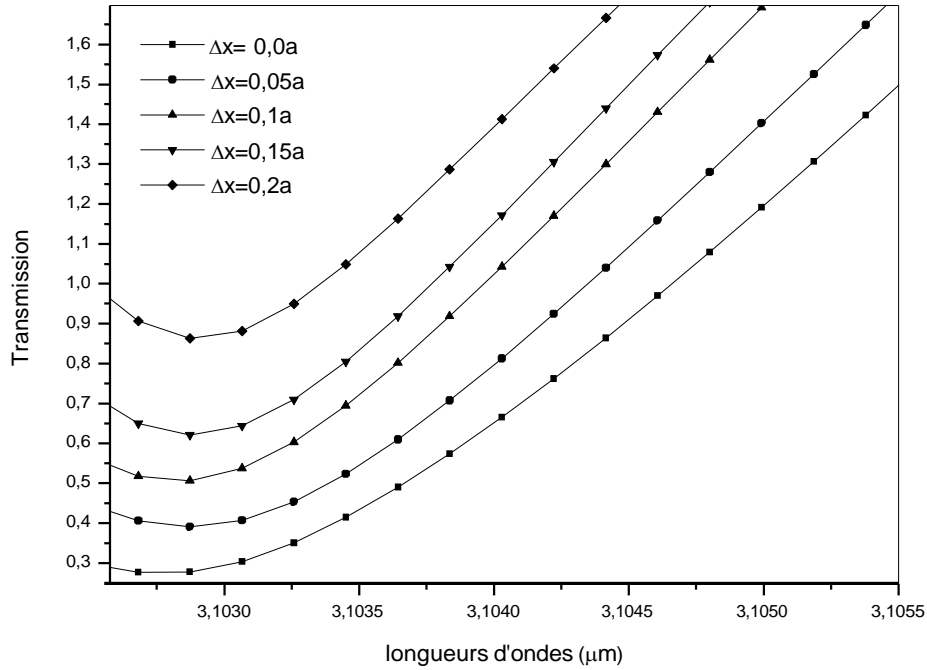


Figure 3.5. Réponses du capteur pour différents déplacements avec  $S_x=0.5D$

Le spectre présentés en Figure 3.6 sont les même que ceux de la Figure. 3.5, sauf que les spectres présentés en la Figure. 3.5 donnent les transmissions par rapport au maximum du spectre global et qui est 3.1630 (AU) et non par rapport à l'origine de transmission comme pour le cas des spectres de la figure 3.6 (Transmission égale à zéro).

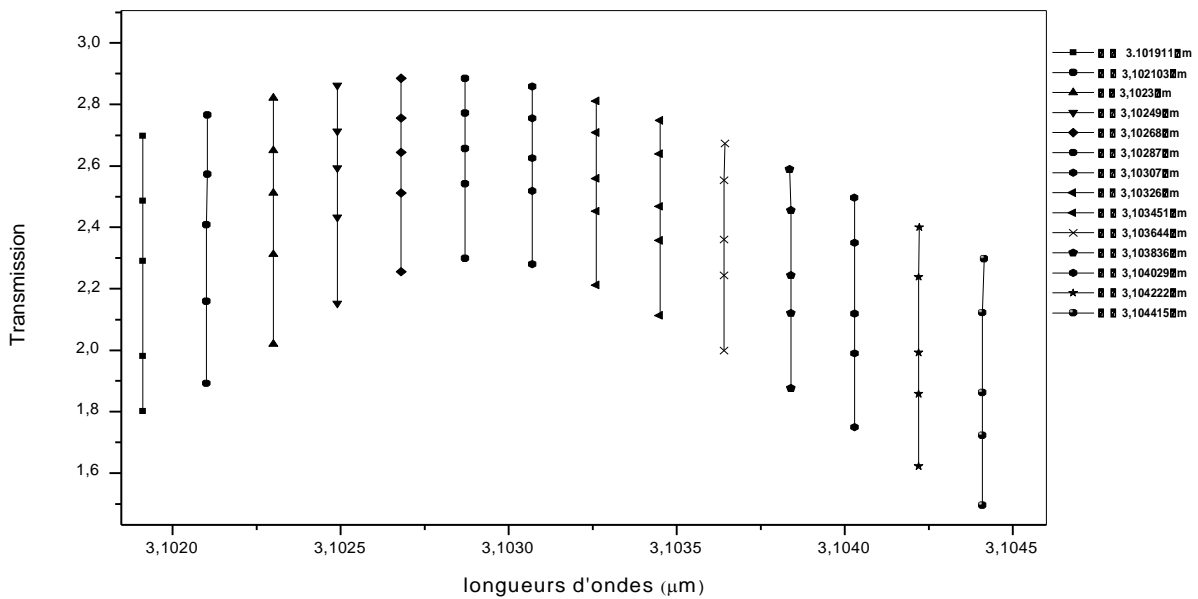


Figure 3.6. Spectres de sorties du capteur pour différents déplacements avec  $S_x=0.5D$

### 3.5 Sensibilité du capteur

Le calcul de la sensibilité du capteur se fera en utilisant la relation (4). Il est à noter qu'il est très important que la structure proposée fournit une grande différence de transmission de sortie pour une petite distance de déplacement  $\Delta x$ , ça revient d'ailleurs à avoir un capteur très sensible. Les sensibilités calculées sont rassemblés dans le tableau 1.

$\Delta x(a)$	0.0–0.05	0.05–0.1	0.1–0.15	0.15–0.2
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Sensitivity ( $a^{-1}$ )			
3.10268	2.56	2.23	2.65	5.14
3.10287	2.26	2.32	2.3	4.83
3.10307	2.07	2.6	2.14	4.75
3.10384	2.67	4.23	2.47	4.9
3.10403	2.95	4.6	2.60	4.81

Tableau 3.1 : Les sensibilités calculées en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

### 3.6 Discussions des résultats obtenues :

Le tableau 1 donne les meilleures sensibilités atteintes par la structure que nous avons proposée. Nous pouvons voir d'après le tableau 1, que la sensibilité peut être considérée comme quasi-constante sur la plage  $0a - 0,15a$  pour la longueur d'onde comprise entre  $3,10268\mu\text{m}$  et  $3,10307\mu\text{m}$ , comme le montre la figure 5. Toujours dans le même tableau, nous pouvons voir que la sensibilité trouvée est située entre  $2.07a^{-1}$  et  $5.14a^{-1}$  pour le premier groupe d'impulsions de sortie qui représente de très bons résultats, La sensibilité maximale atteinte par notre structure pour les deux cas est respectivement de  $5.14a^{-1}$  pour une longueur d'onde de  $3.10268\mu\text{m}$  et une plage de déplacement de  $0,15a$  à  $0.2a$ .

D'un autre coté on peut constater d'après les figures 4 et 5 ainsi que du tableau 1 que cette structure présente une région quasi-linéaire ou la sensibilité est au alentour de  $2a^{-1}$  pour certaine longueur d'onde (voir figure 3.7) et pour des déplacements inférieur ou égal à  $0.15a$ .

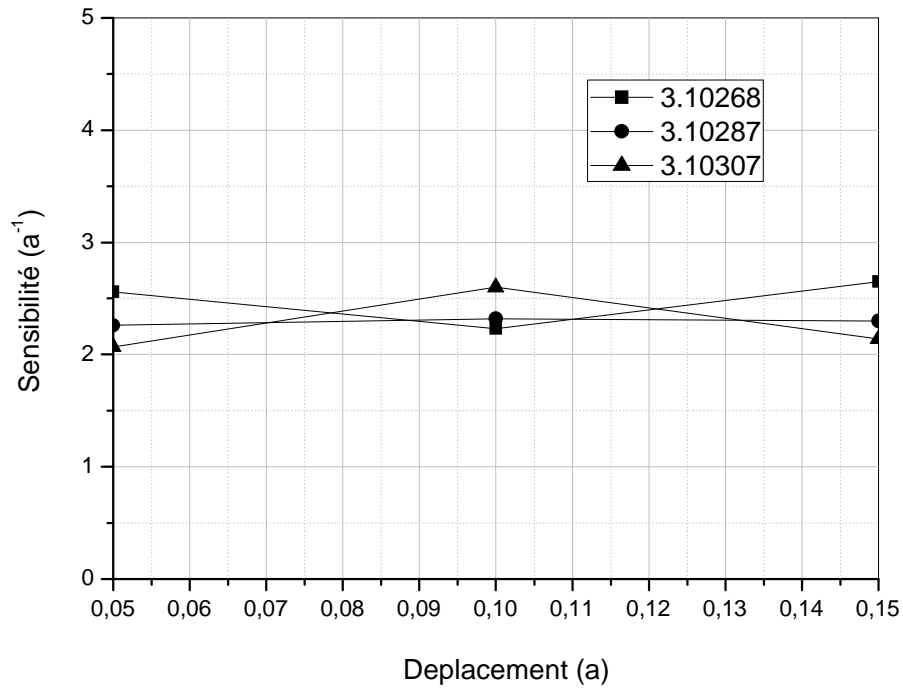


Figure 3.7. Sensibilité du capteur pour  $S_x=0.5D$

Ce qui donne de très bonnes performances pour la structure que nous avons proposé.

Le tableau 2 donne une comparaison entre nos résultats et ceux obtenus par d'autres auteurs.

<b>Authors</b>	<b>Year</b>	<b>Sensitivity (a<sup>-1</sup>)</b>	<b>Sensitivity (<math>\mu\text{m}^{-1}</math>)</b>
Z. Xu et al [21]	2006	1.15	-
D.Yang et al [19]	2011	1.0	-
S.Olyee al [20]	2014	-	3.6 - 3.8
nos resultants		5.14	

Tableau 3.2. Comparaison de nos résultats avec d'autres obtenus par d'autres auteurs

En comparant nos résultats à d'autres, trouvés dans la littérature, nous pouvons dire que les nôtres sont très acceptables dans la plupart des cas et aussi, nous avons atteint un maximum de  $5,14a^{-1}$  .qui est très important par rapport aux résultats obtenus par d'autres auteurs.

### **3.7 Conclusion :**

Un système (capteur) de détection de variation de la transmission basée sur un guide d'ondes photonique à cristaux couplés à double microcavité  $H_0$  est proposé pour la détection de micro-déplacement. L'analyse de ce capteur est effectuée pour différents déplacements en utilisant la méthode FDTD. La variation de transmission engendrée par la partie mobile du capteur par rapport à sa partie fixe est détectée en mesurant les changements sur les spectres de transmission des signaux émis par les microcavités  $H_0$  couplées au guide d'ondes à cristaux photoniques. Lors de la réalisation de notre design nous avons appliqués un double processus d'optimisation efficace à la structure et qui a menée à l'obtention de sensibilité très élevée. Ce processus est réalisé en faisant varier à la fois les décalages  $S_x$  des deux microcavités jusqu'à l'obtention de leurs valeurs optimales. En fin on peut dire que la conception que nous avons proposée offre une très bonne sensibilité au déplacement et nous avons atteint une très bonne sensibilité de  $5,14 a^{-1}$  en utilisant ce design.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale:

Le travail que nous avons effectué dans ce mémoire été orienté principalement vers l'étude et la synthèse de capteur de grandeurs mécaniques ; et plus précisément les capteurs de déplacement et/ou de micro-déplacement.

La structure du capteur de déplacement à cristaux photonique que nous avons proposé et également que nous avons développé nous-même est un substrat en silicium d'indice de réfraction effectif de 2.654 UIR dans lequel on a crée une matrice de trous d'air (structure connectée).

Les résultats que nous avons obtenus grâce à cette structure sont très bons et très satisfaisantes puisque on a obtenus des sensibilités sont entre  $2.07a^{-1}$  et  $5.14a^{-1}$  pour le premier groupe d'impulsions de sortie.

D'un autre coté la sensibilité maximale atteinte par notre structure est respectivement de  $5.14a^{-1}$  pour une longueur d'onde de  $3.10268\mu\text{m}$  et une plage de déplacement de  $0,15a$  à  $0.2a$ .

Enfin, et grâce a ce design on peut être considérée un fonctionnement quasi-linéaire sur la plage  $0a - 0,15a$  pour les longueurs d'ondes comprise entre  $3,10268\mu\text{m}$  et  $3,10307\mu\text{m}$

## **Références :**

## Références :

- [1] MALACHE, H., & MAHI, A. (2018). Nouvelles Structures Des Démultiplexeurs En Cristaux Photoniques 2D Pour Les systèmes Très Hauts Débits (Doctoral dissertation).
- [2] Samir, B. (2017). Conception de diviseur de faisceau à base des cristaux photoniques bidimensionnels (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [3] Ferhati, C., & Hadji, S. (2020). Etude et simulation d'un capteur de micro déplacement à base de cristaux photonique bidimensionnels (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [4] Zouache, T. (2019). ETUDE ET CONCEPTION DE CAPTEURS MECANQUES A BASE DE CRISTAUX PHOTONIQUES (Doctoral dissertation, Université de M'sila).
- [5] Nedel, P. (2010). Nanostructures photoniques ultimes pour l'information quantique (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lyon).
- [6] Badaoui, H. A., ABRI, M., & Feham, M. Contribution à la Conception d'un Nouveau filtre Sélectif à base des CP-2D par la Méthode FDTD'. In Conférence national sur les Technologies de l'information et des Télécommunications CNTIT (Vol. 13, pp. 10-11).
- [7] Benmerkhi, A. (2012). Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités à cristaux photoniques.
- [8] LOURTIOZ, J. M. (1997). Les matériaux à bandes interdites photoniques. In JNM 97: 10èmes journées nationales microondes (Saint Malo, 21-23 mai 1997) (pp. 22-27).
- [9] Khaled, M., & Hamza, O. T. M. A. N. I. Étude et Simulation de la Propagation des Ondes Électromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques.
- [10] LASRI, N. M. Modélisation et Simulation des Effets Non linéaires dans les Cristaux Photoniques (Doctoral dissertation, 14-04-2021).
- [11] Beghoul, M. R. (2008). Contribution à la réalisation de fonctions optoélectroniques à base de cristaux photoniques pour les télécommunications.

[12] Riad, B. M. (2017). Contribution à la réalisation de fonctions optoélectroniques à base de cristaux photoniques pour les télécommunications.

[13] LALLAM, F. (2019). Conception des Nouvelles Topologies des Démultiplexeurs Sélectifs à plusieurs canaux en Longueurs d'ondes à base de Cristaux Photoniques Bidimensionnels CPs-2D (Doctoral dissertation).

[14] AIDI, A. (2012). ETUDE ET MODÉLISATION DE LA BANDE INTERDITE PHOTONIQUE DANE LES CRISTAUX PHOTONIQUES BIDIMONSIONNEL: CASD'UNESTRUCTUREDECONNECTÉE (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila).

[15] Azzeddine, D. E. K. H. I. R. A. (2010). étude théorique et simulation des cristaux photoniques et leurs applications en chimie et biochimie. mémoire de magister, université USTHB d'Alger.

[16] Alastuey, A., Magro, M., & Pujol, P. (2021). Physique et outils mathématiques. EDP Sciences.

[17] BENAÏSSA, F. (2013). Etude et Simulation des Ondes Electromagnétiques dans les guides d'Ondes à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques (Doctoral dissertation).

[18] Lo, J. (2012). Étude de la reconfigurabilité d'une structure à bande interdite électromagnétique (BIE) métallique par plasmas de décharge (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).

[19] GHOUMAZI, M. (2020). Etudes des structures nano-photoniques pour des applications à la bio-détection (Doctoral dissertation, Université M'sila).

[20] Labbani, A. (2009). Matériaux BIP à base de nanoparticules métalliques et semiconductrices. Etude des propriétés optiques par FDTD.

- [21] LIVRE: Poulet, H., & Mathieu, J. P. (1970). Spectres de vibration et symétrie des cristaux. CRC Press.
- [22] BOUANATI, M., & BELLAREDJ, N. conception des filtres a base des cristaux photoniques bidimensionnels par l'analyse de la bip: modélisation par la FDTD-2D (Doctoral dissertation).
- [23] DRISS, I. E. (2014). Simulation et optimisation d'un diviseur 1x8 à base de cristaux photoniques bidimensionnels. Modélisation par la méthode FDTD-2D (Doctoral dissertation).
- [24] FEDAOUCHE, A. (2018). Application de la Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel FDTD-2D pour l'Analyse et l'Optimisation de Composants à base des Cristaux Photoniques Bidimensionnels CPs-2D pour l'Optique Intégrée (Doctoral dissertation).
- [25] AMAMOU, H., & MOKHTAR SLIMANE, Z. Filtre bi-bandes sélectifs en cristaux photoniques 2D pour les systèmes très hauts débits (Doctoral dissertation).
- [26] BOUHASSOUN, B., & KADOUCI, A. (2018). Etude et Simulation Numérique des Composants Photoniques Unidimensionnels (Doctoral dissertation).
- [27] Helluy, P. (1994). Résolution numérique des équations de Maxwell harmoniques par une méthode d'éléments finis discontinus (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace).
- [28] Vu, T. N. (2017). Composants optoélectroniques à faible consommation en III-V sur silicium (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay (ComUE)).
- [29] Daoudi, K. (2003). ÉLABORATION ET CARACTERISATION DE FILMS MINCES D'OXYDE D'INDIUM DOPE A L'ETAIN OBTENUS PAR VOIE SOL-GEL Potentialité pour la réalisation d'électrodes sur silicium poreux (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon I).
- [30] Ferrand, P. (2001). Structures guidantes à bande interdite photonique à base de silicium nanoporeux (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).

[31] BOUZIDI TANI, A. Effet de l'espace inter-canal et du débit binaire sur une liaison WDM (Doctoral dissertation).

[32] BOUDIAF, K. (2018). Etude et conception des capteurs à cristaux Photoniques pour des applications biomédicales (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).

[33] Adel, S. (2018). Conception et simulation d'une carte d'acquisition de données météorologique en temps réels à base d'un microcontrôleur 18F45K22 (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[34] BOUDOUAIA, M. M. Etude et réalisation d'un inclinomètre à base d'un microcontrôleur (PIC) (Doctoral dissertation).

[35] SAOUCHA, S. L. (2018). Cristaux photoniques pour la réalisation de capteur de basse pression (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).

[36] BENCHELOUI, M. (2011). Reconstruction Incrémentale de Cartes d'Environnement en Robotique Mobile (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

[37] TAYOUB, T., & ABDELAZIZE, I. (2020). Diagnostic des Cassures des barres rotorique d'un Moteur asynchrone à cage (Doctoral dissertation, Univ M'sila).

[38] Leduc, F., Canuel, B., Holleville, D., Dimarcq, N., Clairon, A., Fils, J., ... & Landragin, A. (2004, November). Interféromètre à atomes froids: vers un gyromètre-accéléromètre de grande sensibilité. In *Journal de Physique IV (Proceedings)* (Vol. 119, pp. 225-226). EDP sciences .

[39] Koffi, J. (2009). Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).

[40] BEN, C. F. (2006). ETUDE ET CONCEPTION D'UN DOSSIER TECHNIQUE D'UNE MACHINE INDUSTRIELLE «COUVOIR-PETERSIME (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila).

- [41] HADJ-KADDOUR, S., & TABET-DERRAZ, R. Contribution à la conception des nouvelles topologies de démultiplexeurs en cristaux photoniques à plusieurs canaux pour télécommunications optiques (Doctoral dissertation).
- [42] Jérôme, M. M. D. (2016). Étude de l'influence du récepteur LRP-1 sur le potentiel invasif de cellules tumorales : mesures nano mécaniques et d'adhérence par microscopie à force atomique (Doctoral dissertation, Reims).
- [43] Levy, O., B. Z. Steinberg, M. Nathan, and A. Boag, "Ultrasensitive displacement sensing using photonic crystal waveguides," *Applied Physics Letters*, Vol. 86, No. 10, 104102–104104, 2005.
- [44] Xu, Z., L. Cao, C. Gu, Q. He, and G. Jin, "Micro-displacement sensor based on line-defect resonant cavity in photonic crystal," *Optics Express*, Vol. 14, No. 1, 298–305, 2006.
- [45] Yang, D., H. Tian, and Y. Ji, "Micro displacement sensor based on high-Q nanocavity in slot photonic crystal," *Optical Engineering*, Vol. 50, No. 5, 054402, May 2011.
- [46] Olyaei, S. and M. Azizi, "Micro-displacement sensor based on high sensitivity photonic crystal," *Photonic Sensors*, Vol. 4, No. 3, 220–224, 2014.
- [47] Qiu, M., "Effective index method for heterostructure-slab-waveguide-based two dimensional photonic crystal," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 81, 1163, 2002.
- [48] Zouache, T., A. Hocini, and X. Wang, "Cavity-coupled photonic crystal waveguide as highly sensitive platform for pressure sensing," *Optik — International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 172, 97–106, 2018 .
- [49] Ho, D. Y. L., T. Cao, S. Pavel, M. J. I. Cryan, I. J. Craddock, C. J. Railton, and J. G. Rarity, "Three-dimensional FDTD simulation of micro-pillar microcavity geometries suitable for efficient single-photon sources," *IEEE J. Quantum Electronics (JQE)*, Vol. 43, 462, 2007.

### ملخص :

البلورات الفوتونية عبارة عن مواد اصطناعية تتميز بثابت العزل متغير بطريقة دورية في سلم اطوال الموجات. هذا التغير يمكن ان يكون أحادي الأبعاد  $1D$ ، أو ترتيبات ثنائية الأبعاد  $2D$  أو ثلاثية الأبعاد  $3D$ . في وقتنا الحاضر تعتبر صناعة البلورات الضوئية أحادية وكذلك ثنائية البعد مسيطر عليها تماما و نجد أيضا مركبات متعددة تستعمل هذه البلوار موجودة أيامنا هذه. و تبقى صناعة البلورات ثلاثية الابعاد تصرح الكثير المشاكل التجريبية.

عندما تكون هذه البلورات مزودة بعيوب ارادية مشكلة داخل شبكاتها الداخلية . عيوب مثل الميكرو-كافيتي و العيوب الخطية او حتى عيوب مركبة من كلتاها فان هذه المواد تكون مهد للعديد من التطبيقات و من بين أخرى نجد الكواشف.

في الوقت الحاضر البلورات الفوتونية تدخل في صناعة العديد من الكواشف ماسحة بذلك العديد تقريبا كل المقادير الفيزيائية القابلة للقياس و خاصة المقادير الميكانيكية. و قد صار ذلك ممكنا نظرا لقدرتهم الهائلة عتى تخزين الضوء.

في هذا اقتراحنا نموذج لكاشف مسافة و تنقل. حاضن هذا الكاشف عبارة عن بلورات فوتونية  $2D$ . ثم أجرينا عملية تحسين لهذا الكاشف من اجل الحصول على اعلا حساسية ممكنة

الكلمات المفتاحية : بلورات فوتونية ثنائية الأبعاد، مؤشر فعال لإعادة التفسير، كاشف تنقل ميكرو متري , ميكرو كافيتي رنانة , حساسية

**Summary:**

Photonic crystals are artificially materials with a dielectric constant that varies periodically at the wavelength scale. This variation can be in one or more directions of space with a sufficiently high index contrast. The manufacture of 1D and 2D photonic crystals is now well controlled and components based on these structures are beginning to emerge. On the other hand, the production of 3D photonic crystals continues to pose several experimental difficulties.

When these structures are equipped with defects voluntarily incorporated in their structures; microcavity defects or linear defects type or even of their combinations, they are the issue of several very important applications among others; the detection.

Nowadays, photonic crystals are used in the realization of a wide range of sensors, scanning almost all measurable physical quantities and in particular the mechanical quantities. This was made possible thanks to their strong photon confinements in these defects. In this work we have proposed a displacement sensor structure. 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 the best possible sensitivity..

Keywords: 2D photonic crystals, micro-displacement sensor, resonant microcavity , micro-displacement detection. , sensitivity

## : ملخص

البلورات الفوتونية عبارة عن مواد اصطناعية تتميز بثابت العزل متغير بطريقة دورية في سلم اطوال الموجات. هذا التغير يمكن ان يكون أحادي الأبعاد 1 D، أو ترتيبات ثنائية الأبعاد 2 D أو ثلاثية الأبعاد 3 D. في وقتنا الحاضر تعتبر صناعة البلورات الضوئية أحادية وكذلك ثنائية البعد مسيطر عليها تماما و نجد أيضا مركبات متعددة تستعمل هذه البلوار موجودة أيامنا هذه. و تبقى صناعة البلورات ثلاثية الأبعاد تصرح الكثير المشاكل التجريبية. عندما تكون هذه البلورات مزودة بعيوب ارادية مشكلة داخل شبكتها الداخلية . عيوب مثل الميكرو-كافيتي و العيوب الخطية او حتى عيوب مركبة من كلاهما فان هذه المواد تكون مهد للعديد من التطبيقات و من بين أخرى نجد الكواشف.

في الوقت الحاضر البلورات الفوتونية تدخل في صناعة العديد من الكواشف ماسحة بذلك العديد تقريبا كل المقادير الفيزيائية القابلة للقياس و خاصة المقادير الميكانيكية. و قد صار ذلك ممكنا نظرا لقدرتهم الهائلة عتى تخزين الضوء.

في هذا اقتراحنا نموذج لكاشف مسافة و تنقل. حاضن هذا الكاشف عبارة عن بلورات فوتونية 2D. ثم أجرينا عملية تحسين لهذا الكاشف من اجل الحصول على اعلا حساسية ممكنة

الكلمات المفتاحية: بلورات فوتونية ثنائية الأبعاد، مؤشر فعال لإعادة التفسير، كاشف تنقل ميكرو متري , ميكرو كافيتي رنانة , حساسية

## Summary:

Photonic crystals are artificially materials with a dielectric constant that varies periodically at the wavelength scale. This variation can be in one or more directions of space with a sufficiently high index contrast. The manufacture of 1D and 2D photonic crystals is now well controlled and components based on these structures are beginning to emerge. On the other hand, the production of 3D photonic crystals continues to pose several experimental difficulties.

When these structures are equipped with defects voluntarily incorporated in their structures; microcavity defects or linear defects type or even of their combinations, they are the issue of several very important applications among others; the detection.

Nowadays, photonic crystals are used in the realization of a wide range of sensors, scanning almost all measurable physical quantities and in particular the mechanical quantities. This was made possible thanks to their strong photon confinements in these defects.

In this work we have proposed a displacement sensor structure. 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 the best possible sensitivity..

Keywor: 2D photonic crystals, micro-displacement sensor, resonant microcavity , micro-displacement detection. , sensitivity