

FACULTE de TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° :2024/ INSTR//....



DOMAINE: Science et Technologie
FILIERE : Electronique
OPTION : Instrumentation

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

Présenté par :

SOUDANI ABDELAZIZ

GHOULAMI ABDELJALIL

Intitulé

**Etude et conception de capteurs à cristaux
Phononiques pour la détection des métaux
toxiques dans l'eau**

Soutenu devant le jury composé de:

Pr. OUDIRA HOUCINE	Université M'SILA	Président
Dr. KAHLOUCHE AHMED	Université M'SILA	Rapporteur
Dr. MEZAACHE HATEM	Université M'SILA	Examineur

Abstract

One-dimensional phononic crystals are multilayer structures consisting of two alternating repeating layers, characterized at least by different elastic properties. These phononic crystals can provide specific resonance properties under specific conditions. The introduction of any defect into a regularly periodic crystal creates a resonance mode that indicates the presence of contaminants in the water, also called defect modes, located within the bandgap of the defect-free phononic crystal. Resonant frequencies can provide useful information about the properties and composition of a liquid. Our work focuses on the theoretical study of the resonance frequencies of one-dimensional phononic structures and explores the possibility of these structures in the field of biosensors to detect toxic substances in freshwater.

Keywords: Heavy metal detectors, 1D phononic crystal, acoustic waves, TMM.

Résumé

Les cristaux phononiques unidimensionnels sont des structures multicouches constituées de deux couches répétitives alternées, caractérisées au moins par des propriétés élastiques différentes. Ces cristaux phononiques peuvent fournir des propriétés de résonance spécifiques dans des conditions spécifiques. L'introduction de tout défaut dans un cristal régulièrement périodique crée un mode de résonance qui indique la présence de contaminants dans l'eau, également appelés modes de défaut, situés dans la bande interdite du cristal phononique sans défaut. Les fréquences de résonance peuvent fournir des informations utiles sur les propriétés et la composition d'un liquide. Nos travaux se concentrent sur l'étude théorique des fréquences de résonance des structures phononiques unidimensionnelles et explorent la possibilité de ces structures dans le domaine des biocapteurs pour détecter les substances toxiques dans l'eau douce.

Mots clés : Détecteurs de métaux lourds, Cristal phononique 1D, ondes acoustiques, TMM.

ملخص

البلورات الصوتية أحادية البعد هي هياكل متعددة الطبقات تتكون من طبقتين متكررتين بالتناوب، تتميز على الأقل بخصائص مرنة مختلفة. يمكن لهذه البلورات الصوتية أن توفر خصائص رنين محددة في ظل ظروف محددة. يؤدي إدخال أي خلل في بلورة دورية منتظمة إلى إنشاء وضع رنين يشير إلى وجود ملوثات في الماء، وتسمى أيضًا أوضاع العيب، وتقع داخل فجوة نطاق البلورة الصوتية الخالية من العيوب. يمكن أن توفر ترددات الرنين معلومات مفيدة حول خصائص السائل وتكوينه. يركز عملنا على الدراسة النظرية لترددات الرنين للهياكل الصوتية أحادية البعد واستكشاف إمكانية استخدام هذه الهياكل في مجال أجهزة الاستشعار الحيوية للكشف عن المواد السامة في المياه العذبة.

الكلمات المفتاحية: أجهزة كشف المعادن الثقيلة، الكريستال الصوتي D1، الموجات الصوتية، TMM



Remerciements

*Avant tout, nos remerciements en premier lieu, à DIEU
qui nous a donné la foi, le courage et la patience de
parvenir à finir ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier particulièrement nos parents ; mon
succès demeurée loin le fruit de leurs longues années de
sacrifices et de patience.*

*Nous tenons à exprimer mes vifs remerciements et ma
gratitude à mon promoteur **Dr. Ahmed kahlouche**, je
le remercie pour ses conseils; ses précieux commentaires
qui m'ont permis de surmonter mes difficultés, et de
progresser dans cette présente étude.*

*Mes remerciements s'adressent également à tous les membres
du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*Nos remerciements vont aussi au **Dr. Tabbakh Moustafa**
pour la documentation, l'accompagnement tout au long de ce
travail et les conseils prodigués.*

*Nos remerciements s'étendent également à tous, nos
enseignants durant les années des études.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de
loin, pour leurs soutiens moraux ou matériels, dans la
réalisation de ce projet.*

إهداء

إلي كل من أضاء بعلمه عقل غيره وأهدى بالجواب
الصحيح حيرة سائلية فإظهر بمساحته تواضع العلماء
وبرحابته سماحة العارفين

أهدي هذا العمل المتواضع القليل من العلم الكثير أهديه
إلي أمهاتنا وإبائنا وأترحم كثير الترحم علي أبي الذي
فارقني الحياة منذ التعليم الابتدائي

أقول لهم : انتم وهبتمونا الحياة والأمل والنشأة على
شغف الاطلاع والمعرفة بكم إنارة طريقنا إلى العلم
وبالعلم تزداد شدتها

وكذلك أهدي إلى كل عائلتي الكريمة وإلى أصدقائي
عامة وأخوالي وأعمامي وكذا شيخي الحاج أحمد
أزيزاوي المحترم الذي حفظت القرءان على يديه وكان
لي بمثابة أبي الثاني بعد وفاة أبي رحمة الله عليه.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Sommaire

Remerciements	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale	02
Chapitre I : Généralités sur les cristaux phononiques	
I.1. Introduction	05
I.2. Cristaux phononiques	05
I.2.1. Historique et concept	06
I.2.2. Exemples de dispositifs	06
I.2.3. Cristaux phononiques et Cristaux photoniques	07
I.2.4. Création de défauts.....	09
I.3. différents types des cristaux phononiques.....	10
I.3.1. Structures périodiques unidimensionnel	10
I.3.2. Structures périodiques 2D.....	11
I.3.3. Structures périodiques tridimensionnelles	13
I.4. Bande interdite phononique	14
I.4.1. Influence de la topologie du réseau	14
I.4.2. Influence du facteur de remplissage	14
I.4.3. Influence de la masse volumique	14
I.4.4. Influence de la vitesse de propagation	15
I.5. ondes longitudinales et ondes transversales.....	15
I.5.1. Ondes longitudinales	15
I.5.2. Ondes transversales	16
I.6. Applications des cristaux phononiques	16
I.6.1. Guidage des ondes acoustiques ou élastiques.....	17
I.6.2. Cavités résonantes et résonateurs acoustiques.....	18
I.6.3. Couplage de Défauts	19
I.6.4. Filtrage et multiplexage des ondes acoustiques.....	20
I.7. Conclusion	20
Chapitre II : Notions et caractéristiques fondamentales sur les capteurs	
II.1. Introduction	22
II.2. Définitions et caractéristiques d'un capteur	23
II.2.1. Définitions	23
II.2.2. Caractéristiques métrologiques des capteurs	24
II.3. Caractéristiques statistiques d'un capteur.....	26
II.3.1. Fidélité.....	26
II.3.2. Justesse.....	27
II.3.3. Précision.....	27
II.3.4. La rapidité d'un capteur	27
II.4. Capteurs de liquide a cristaux phononiques 1D	27

II.4.1. Principe de détection	27
II.4.2. Structures à cristaux phononiques 1D finies.....	28
II.4.3. Structures à cristaux phononiques infinies.....	29
II.5. Méthode de la Matrice de Transfert.....	30
II.5.1. Super-réseaux unidimensionnels.....	31
II.5.2. Formalisme matriciel	31
II.5.2.4. Transmission via une bicouche.....	34
II.5.2.5. Transmission via N bicouches.....	35
II.6. Conclusion	38
Chapitre III : Méthodes de détection des métaux lourds dans l'eau	
III.1. Introduction.....	40
III.2. Différentes méthodes de détection des métaux lourds dans l'eau	41
III.2.1. Définition des métaux lourds.....	41
III.3. Classification des métaux lourds.....	42
III.4. Sources d'éléments lourds dans le milieu aquatique.....	43
III.4.1. Sources naturelles.....	43
III.4.2. Sources humaines.....	43
III.5. Aperçu sur quelques métaux lourds.....	44
III.5.1.1. Le plomb.....	44
III.5.2. Zinc	45
III.5.3. Nickel	46
III.5.4. Cuivre	47
III.5.5. Magnésium	48
III.5.6. Cadmium.....	49
III.5.7. Mercure	50
III.6. Effets des métaux lourds sur la santé humaine.....	51
III.7. Différentes méthodes de détection des métaux lourds dans l'eau.....	51
III.7.1. Spectroscopie d'absorption atomique (AAS).....	51
III.7.2. Spectroscopie d'émission atomique (AES)	51
III.7.3. Spectroscopie d'absorption atomique dans les domaines visible et proche infrarouge (UV-VIS).....	52
III.7.4. Spectre d'émission optique	52
III.7.5. Spectroscopie d'absorption atomique d'intensité	52
III.8. Utilisation des techniques spectroscopiques	52
III.8.1. Chromatographie liquide haute performance (HPLC)	52
III.8.2. Chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC-MS).....	52
III.8.3. Applications avancées de la chromatographie gazeuse (GC).....	52
III.8.4. Utilisation de la spectrométrie de masse à plasma induit par couplage inductif (ICP-MS).....	52
III. 9. Applications des techniques de spectrométrie de masse	53
III.9.1. Surveillance de la pollution de l'eau	53
III. 9.2. Contrôle de la qualité de l'eau.....	53

III.9.3. Étude des impacts des activités industrielles.....	53
III.9.4. Surveillance des métaux précieux.....	53
III.10. Différentes méthodes d'extraction des métaux lourds.....	53
III.10.1. Extraction par solvants organiques.....	54
III.10.2. Analyse par spectrométrie atomique.....	54
III.10.3. Utilisation de solvants organiques.....	54
III.11. Applications des techniques d'intelligence artificielle.....	54
III.11.1. Identification des modèles invisibles.....	54
III.11.2. Amélioration de la précision du diagnostic.....	54
III.12. Conclusion.....	55
Chapitre IV : Résultats de simulation et discussions	
IV.1. Introduction.....	57
IV.2. Etude de la structure périodique parfaite	57
IV.2.1. Structure étudiée.....	57
IV.2.2. Propriétés acoustiques des matériaux utilisés	58
IV.3. Etude de la bande interdite.....	58
IV.3.1. Spectre de transmission de la bande interdite.....	58
IV.3.2. Spectre de Réflexion de la bande interdite.....	59
IV.3.3. Evolution de la bande interdite en fonction le nombre de bicouches	60
IV.3.4. Evolution de la bande interdite en fonction le facteur de remplissage	61
IV.4. Conception du capteur a cristal phononique 1D.....	61
IV.4.1. Structure étudiée.....	62
IV.4.2. Application à la détection de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	62
a. Paramètres physiques et géométriques de la structure.....	62
b. Propriétés acoustiques de la solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	63
IV.5. Résultats de simulations.....	64
IV.5.1. Spectre de transmission.....	64
IV.5.2. Influence de la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	65
IV.5.3. Evolution du mode résonant en fonction la concentration.....	67
IV.5.4. Effet de l'épaisseur de la couche de cavité sur la fréquence de résonance ...	69
IV.6. Performances du capteur.....	70
IV.6.1. Sensibilité (S)	70
IV.6.2. Facteur de qualité (Q).....	71
IV.6.3 Figure de mérite (FOM)	72
IV.6.4. Limite de détection (DL)	73
IV.6.5. Influence de l'épaisseur de la couche de cavité sur la sensibilité.....	73
IV.7. Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	77
Bibliographie.....	79

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur cristaux phononiques

Figure I.1: Représentation schématique des cristaux photoniques unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D).....	06
Figure I.2: Schéma d'un réseau cristallin hexagonal parfait (a), puis comprenant une cavité (b), d'un défaut linéaire à deux coudes à 60° (c), d'un défaut linéaire scindé en branche Y à 60° (d), un guide d'onde avec quatre défauts (e-f), deux guides d'ondes séparés (g) et de deux guides d'onde comprenant deux cavités (h)...	10
Figure I.3: Structure périodique unidimensionnel.....	11
Figure I.4: Structure périodique 2D connectée.....	11
Figure I.5 : Structure périodique 2D déconnectée.....	12
Figure I.6: (a) Le réseau carré, (b) Le réseau triangulaire.....	12
Figure I.7 : (a) Structure graphite. (b) Structure Nitrure de Bore.....	13
Figure I.8: Représentation de quelques structures 3D : (1) tas de bois, (2) structure cubique, (3) et (4) opales ou opales inversées.....	13
Figure I.9: Représentation schématique d'un cristal phononiques à deux dimensions (a), Réseau carré et (b) Réseau triangulaire.....	14
Figure I.10: Une image montrant la polarisation des ondes sonores.....	15
Figure I.11: Représentation Schématique d'un solide traversé par une onde longitudinale.....	15
Figure I.12: Représentation schématique d'une onde transverse	15
Figure I.13: Guide d'ondes phononiques: (a) guide d'ondes linéaire W1 et (b) guide coudé Dans le cristal 2D, des guides droits W ont été créés en supprimant une rangée d'inclusions cylindriques colinéaires dans la direction de propagation.....	17
Figure I.14 : Transmission à travers un guide W1 dans un cristal phononiques constitué de tubes d'acier dans l'eau. (a) transmission calculée (pointillés) et mesurée (trait plein) et (b) pression simulée dans le dispositif	17
Figure I.15: L'émission se fait à travers un guide coudé créé par l'absence d'inclusions dans un cristal phononiques composé de tubes d'acier dans l'eau. (a) la mesure de la transmission calculée (pointillés) et mesurée (trait plein) et (b) la simulation de la pression dans le dispositif.	17
Figure I.16 : Mesure des transmissions (lignes pleines) et calcul des transmissions (lignes pointillées) en fonction de la fréquence pour (a) une cavité résonante, (b)	

deux cavités alignées dans la direction de propagation, (c) deux cavités alignées dans la direction perpendiculaire à la Une série de cavités formant un guide se propage et (d). selon [58], la pression est calculée dans une série de cavités qui forment un guide similaire à la figure(d).	18
---	----

Figure I.17 : Transmission mesurée (lignes pleines) et calculée (pointillés) pour (a) un guide d'ondes linéaire, (b) un guide couplé à une cavité, (c) un guide couplé à une ca vit longue à cheval sur le guide et (d) un guide bordé de cavités sur ces deux côtés[5].....	19
---	----

Figure I.18 : Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage.....	19
--	----

Chapitre II: Notions et caractéristiques fondamentales sur les capteurs

Figure II.1 : Schéma synoptique d'une structure de base d'un capteur.....	23
---	----

Figure II.2: Exemple de linéarisation de caractéristiques.....	25
--	----

Figure II.3: Caractéristiques statistiques d'un capteur.....	27
--	----

Figure II.4: Schéma de principe de la structure à cristal phononiques unidimensionnelle finie (1D-PnCs).....	29
--	----

Figure II.5: Structure infinie à cristal phononique unidimensionnel.....	30
--	----

Figure II.6: Un super-réseau 1D avec des couches alternées d'impédances Z_1 et Z_2 . 31	31
---	----

Figure II.7: Une bicouche 1D avec des impédances Z_1 et Z_2 avec des couches externes d'impédances Z_0 et Z_L	34
---	----

Figure II.8. Un système 1D composé de N bicouches et d'un défaut central de largeur d_C et d'impédance Z_C	35
--	----

Figure II.9: Coefficients de transmission et de réflexion des ondes longitudinale en fonction de fréquences réduites pour un cristal 1D pour 10 couches: (A) Transmission, (b) Réflexion.....	35
---	----

Figure II.10: Coefficients de transmission et de réflexion des ondes longitudinale en fonction de fréquences pour un cristal 1D pour 8 couches: (a) Réflexion (b) Transmission.....	38
---	----

Chapitre III : Méthodes de détection des métaux lourds dans l'eau

Figure III.1. Image montrant le capteur d'ondes sonores.....	41
--	----

Figure III.2.Image contenant certains métaux lourds.....	42
--	----

Figure III.3: Image illustrant le métal plomb.....	44
--	----

Figure III.4: Image illustrant le métal Zinc.....	46
---	----

Figure III.5 : Image illustrant le métal Nickel.....	47
Figure III.6: Image illustrant le Cuivre.....	48
Figure III.7: Image illustrant le métal« Magnésium	49
Figure III.8 : Image illustrant le métal Cadmium.....	49
Figure III.9: Image illustrant le métal Mercure	50
Figure III.10: Illustration de la détection de métaux lourds toxiques dans l'eau par un capteur utilisant des ultrasons.....	54

Chapitre IV : Résultats de simulation et discussions

Figure IV.1:Représentation schématique du cristal phononique parfait PnC-1D) [Plomb/Epoxy] ⁵	58
Figure. IV.2: Spectre de transmission :(a) en fonction de la fréquence normalisée, (b) fonction de la fréquence absolue pour un cristal 1D composé de [Plomb/Epoxy] ⁵	59
Figure. IV.3: Spectre de réflexion en fonction de la fréquences pour un cristal 1D composé de [Plomb/Epoxy] ⁵	60
Figure. IV.4: Spectre de transmission en fonction de la fréquences pour différentes valeurs de bicouches N dans le cas d'un cristal [Plomb/Epoxy] ^N	60
Figure. IV.5: Spectre de transmission en fonction de la fréquences pour différentes valeurs du facteur de remplissage dans le cas d'un cristal [Plomb/Epoxy] ⁴	61
Figure IV.6: Représentation schématique d'un cristal phononique PnC-1D (Plomb/Epoxy) ² /Cu(NO ₃) ₂ /(Epoxy/Plomb) ²) avec défaut au centre de largeur D.....	62
Figure. IV.7 : Propriétés acoustiques de la solution en fonction la concentration en ppm de Cu(NO ₃) ₂ à 25°C d'après les références	64
Figure IV.8: Spectre de transmission pour un cristal parfait (en noir), Spectre de transmission si la couche de cavité est remplie avec l'eau à 25°C (en rouge).....	64
Figure IV.9: Caractéristiques du pic de résonance pour une couche de cavité remplie par l'eau à 25°C (en rouge).....	65
Figure. IV.10: Spectres de transmission en valeurs normalisées pour différentes concentrations de la solution Cu(NO ₃) ₂ dans la couche de cavité à 25°C.....	66
Figure. IV.11: Spectres de transmission calculés en injectant différentes concentrations de Cu(NO ₃) ₂ dans la couche de cavité en ppm à 25°C.....	66
Figure IV.12:(a) Evolution de la fréquence de résonance (f _{rés}) avec la concentration de Cu(NO ₃) ₂ . (b) Evolution de la variation en fréquence de résonance (Δf) en fonction la concentration de Cu(NO ₃) ₂	68

Figure IV.14: Coefficient de transmission en fonction de la fréquence dans le cas du CnP-1D pour différentes valeurs de l'épaisseur D de la couche de cavité.....	68
Figure IV.15: Evolution de la fréquence de résonance du pic en fonction la largeur de la couche de cavité pour une concentration égale à 0 ppm.....	69
Figure IV.16: Evolution de la sensibilité en fonction la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en ppm.....	70
Figure IV.17: Evolution du facteur de qualité en fonction la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en ppm.....	71
Figure IV.18: Evolution du facteur de mérite en fonction de la concentration (en ppm).....	72
Figure IV.19: Evolution de la limite de détection en fonction la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (en ppm).....	73
Figure IV.20: L'effet du changement de l'épaisseur de la cavité sur la sensibilité du capteur pour deux concentrations de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (en ppm).....	74

Liste des Tableaux

Chapitre I: Généralités sur les cristaux phononiques

Tableau I.1: Propriétés clés pour l'étude des structures de bandes dans les matériaux tridimensionnels isotropes	08
--	----

Chapitre III : Méthodes de détection des métaux lourds dans l'eau

Tableau III.1: Tableau périodique des éléments.....	42
Tableau III.2:Classification des métaux lourds selon leur densité et leur toxicité	43
Tableau III.3:Valeurs moyennes d'émissions de certains métaux lourds dans le monde	44
Tableau III.4 : indique les concentrations maximales admissibles de métaux lourds dans l'eau recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation de protection de l'environnement.....	50
Tableau III.5:Effets des métaux lourds sur la santé humaine	51

Chapitre IV : Résultats de simulation et discussions

Tableau IV.1: Masse volumiques et vitesses de propagation des matériaux constituant le cristal phononiques unidimensionnel (Plomb..Epoxy) ^N	58
Tableau. IV.2: Propriétés acoustiques et géométriques si la couche de cavité est remplie par l'eau à 25 °C.....	63
Tableau.IV.3:Propriétés acoustiques de la solution Cu(NO ₃) ₂ -Données à 25 °C.....	63
Tableau. IV.4: Résultats de simulations obtenus pour différentes valeurs De concentration de la solution Cu(NO ₃) ₂	65
Tableau. IV.5: Résultats de simulations obtenus pour différentes valeurs Déconcentration de la solution Cu(NO ₃) ₂ en ppm. —.....	67
Tableau IV.6 : Résultats de simulations obtenus pour différentes valeurs Δd.....	69
Tableau IV.7:L'effet du changement de l'épaisseur de la cavité sur la sensibilité du capteur pour deux concentration de de Cu(NO ₃) ₂ (en ppm).....	75



Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les cristaux phononiques (PnC) sont des structures périodiques artificielles appliquées pour contrôler la propagation des ondes acoustiques ou élastiques. De telles structures suivent le chemin des cristaux photoniques qui ont introduit une performance distinctive dans le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques basée sur l'apparition de bande interdite photonique [1,2]. Comme les cristaux photoniques, la principale caractéristique de ces matériaux réside dans leur bande interdite qui empêche la propagation des ondes acoustiques à travers ces réseaux sous certaines conditions géométriques et physiques [3,4]. Ces structures périodiques à bandes interdites ont récemment attiré beaucoup d'attention en raison de leur capacité à contrôler non seulement les ondes sonores mais également tout le spectre des ondes mécaniques dans la plage audible (1–20 kHz) [5,6].

Dans notre vie quotidienne, l'eau est la source de la vie de tous les êtres vivants sur la terre, notamment l'être humain. Actuellement, l'homme connaît une pénurie d'eau potable et une augmentation des eaux usées. D'autre part, l'eau devient rare et plus polluée avec de faibles niveaux de métaux lourds et pleins de substances toxiques, ce qui nous incite à rechercher des solutions à ce problème. En effet, le défi ces dernières années est comment détecter puis, rendre l'eau polluée en eau potable pour assurer notre santé.

Ce travail est une contribution théorique dans le domaine des biocapteurs à base des cristaux phononiques unidimensionnels (1D-PnCs) avec un défaut central. La conception des capteurs acoustiques à cristaux phononiques est basée sur la transmission ou la réflexion des ondes acoustiques à travers la structure proposée. Ce type de structures présente un nouveau type de technologie acoustique résonnante et utile dans le domaine de détection. Ces capteurs sont très sensibles à la détection de la pollution de l'eau douce par les métaux lourds [7-9]. Au cours de ce travail, la méthode de la matrice de transfert (TMM) est considérée comme le meilleur outil de simulation pour décrire l'interaction de l'onde acoustique avec les structures multicouches à cristaux phononiques [10,11].

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est entièrement consacré aux cristaux phononiques, Nous allons d'abord donner un bref aperçu de l'histoire des structures cristallines ; électroniques, photoniques et phononiques par comparaison entre ces cristaux. Ensuite, nous nous intéressons à l'introduction de quelques concepts de base des ondes sonores. Enfin, nous citerons quelques applications des cristaux phononiques.

Le deuxième chapitre de ce manuscrit est consacré aux capteurs à cristaux phononiques. Tout d'abord, Nous couvrirons les points communs des capteurs, les différents types de capteurs et certaines caractéristiques et quelques performances.

Dans le troisième chapitre, nous décrivons les principaux métaux lourds qui peuvent exister dans l'eau douce ainsi que les différentes techniques de spectroscopie couramment utilisées pour la détection des métaux lourds et toxiques dans l'eau douce.

Dans le dernier chapitre, notre intérêt s'est porté sur l'étude de la structure phononique unidimensionnelle de type solide/solide constituée par l'empilement en alternance de deux matériaux ; le Plomb et l'Epoxy. La première partie est entièrement consacrée à l'étude de l'influence de certains paramètres géométriques sur l'évolution de la bande interdite phononique de la structure parfaite]Plomb/Epoxy]^N. Alors que dans la deuxième partie, nous nous intéresserons à l'étude d'une structure multicouches avec défaut introduit au centre de type [(Plomb/Epoxy)²/couche de cavité/(Epoxy/Plomb)²] dont l'objectif est de montrer la possibilité d'utiliser ce type de structures dans le domaine de détection des métaux lourds notamment la détection de nitrate de cuivre Cu(NO₃)₂.

Enfin, dans la conclusion générale de ce travail, tous les résultats de simulation obtenus par la méthode TMM seront résumés et quelques perspectives seront données.

CHAPITRE I

A decorative horizontal box with rounded corners and a scroll-like appearance on the left and right sides. The text is centered within the box.

Généralités sur les cristaux phononiques

I.1. Introduction

Les cristaux phononiques sont des structures périodiques qui manipulent les ondes sonores de la même manière que les cristaux photoniques manipulent la lumière. Leur introduction a ouvert de nouvelles voies pour contrôler et moduler les ondes acoustiques. Ces matériaux procèdent des applications potentielles dans les domaines divers domaines en particulier l'isolation phononique et le domaine des biocapteurs.

Dans ce chapitre nous allons présenter les concepts de base des cristaux phononiques, les différents types, les propriétés géométriques et quelques applications.

I.2. Cristaux phononiques

Définitions

Les cristaux phononiques sont des matériaux composites macroscopiques présentant une périodicité spatiale dans une, deux ou trois directions de l'espace (figure.I.1). Ces structures sont capables de bloquer la propagation acoustique dans certaines directions et gammes de fréquences, par le biais des réflexions de Bragg. On parle alors de bande de fréquences interdites, que l'on appelle des bandes interdites. Dans de telles structures (milieu à inclusions), si les longueurs d'onde des ondes acoustiques (λ) s'y propageant sont très supérieures aux dimensions inter-inclusions (a), l'onde ne peut être sensible à la présence individuelle de chaque inclusion et ne perçoit alors qu'un milieu global homogénéisable. En revanche, les propriétés intéressantes induites par l'organisation périodique des inclusions composant les cristaux phononiques apparaissent dès lors que les longueurs d'onde des ondes élastiques qui s'y propagent sont comparables à la périodicité du milieu, soit ($\lambda \approx a$). Ces milieux sont donc hétérogènes vis-à-vis de la longueur d'onde. L'ensemble des diffusions multiples, induites par la présence des hétérogénéités, conduit pour certaines fréquences à l'ouverture de gap de transmission. La position et la nature des inclusions modifient la propagation des ondes par rapport à une propagation au sein du milieu matriciel. Les cristaux phononiques (la matrice plus des inclusions) sont donc comparables, de par leur organisation spatiale, à des structures cristallines et agissent sur la propagation des phonons comme un potentiel périodique. Grace aux travaux de M.S. Kushwaha, en 1993, sur des structures périodiques à deux dimensions, le concept de cristal phononique et la bande interdite phononique apparaissent clairement [1].

Avant cette date, l'ensemble des travaux sur les milieux composites périodiques concernent des structures à une dimension, appelés super-réseaux ou milieux stratifiés périodiquement [12].

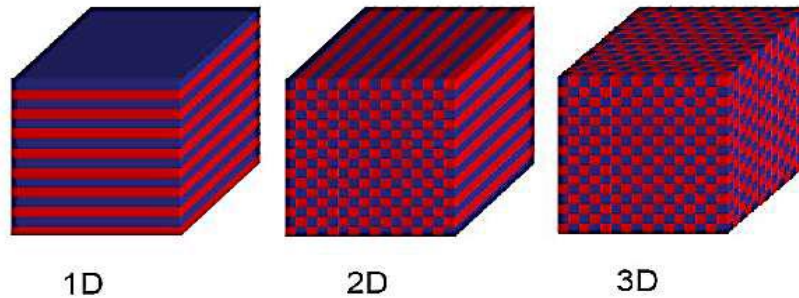


Figure I.1: Représentation schématique des cristaux phononiques unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D) [12].

I.2.1. Historique et concept

Les premiers travaux sur la propagation des ondes élastiques dans les structures périodiques remontèrent à l'étude de Fahmy-Adler en 1972 qui a conduit l'établissement formel pour réécrire la propagation du son dans les systèmes multicouche [13].

Alors que, les premiers travaux théoriques sur les cristaux 2D ont été effectués en 1987 [14]. Il étudia les coefficients de réflexion et de transmission des ondes élastiques sur un réseau de cylindres pour les basses fréquences. A partir de 1990, Julius a introduit le phonon dans les réseaux périodiques pour étudier expérimentalement la transmission d'une onde sonore dans un fluide à sphères solides. Ensuite, une étude théorique est menée par J. Liu et X. Jing pour établir le diagramme de bandes [15-17].

En 1992, Dutcher a entrepris des recherches sur le silicium et a mis en évidence l'existence d'une bande interdite due au mode de résonance du substrat. En 1993, on a expliqué la similitude entre les ondes élastiques, optiques et électroniques [18-19].

Les premiers diagrammes de dispersion des cristaux phononiques ont été étudiés de manière explicite. Durant cette période, la thématique des cristaux phononiques a émergé comme nous la connaissons aujourd'hui, et à partir de ce moment-là, le nombre d'articles traitant de ce sujet a connu une augmentation exponentielle [17-20].

I.2.2. Exemples de dispositifs

En se basant sur les dispositifs provenant des cristaux photoniques, de nombreuses configurations sont transformées dans le domaine des cristaux phononiques : des cavités, des guides d'onde ou des guides d'onde couplés avec des cavités. En même temps, les conséquences telles que la diffraction, la réfraction et la réfraction négative entrent en jeu.

Il est également possible d'utiliser la résonance pour des applications phononiques. Cependant, la nature de l'onde acoustique, qui diffère de l'onde optique, offre des domaines d'application spécifiques, tels que les structures antisismiques. Étant donné la multitude de sources disponibles sur les divers domaines déjà explorés, nous restreindrons nos recherches aux dispositifs clés.

Le domaine des cristaux phoXoniques, c'est-à-dire des structures périodiques qui se comportent à la fois comme un cristal photonique et phononique, est plus récent. Les premières recherches sur les cristaux phoXoniques portent sur les structures à une dimension. Certains d'entre eux, bien sûr, étant les plus simples à mettre en pratique expérimentalement et théoriquement, ont été étudiés dès 2002 [5]. En revanche, l'analyse des réseaux à deux dimensions débute à partir des années 2006 et représente le domaine d'étude le plus vaste jusqu'à présent. Les réseaux 3D, quant à eux, ont été peu explorés jusqu'à présent. Nous restons concentrés sur les principaux dispositifs.

L'importance des cristaux PhoXoniques réside dans leur capacité à confiner les ondes électromagnétiques et acoustiques au sein d'un seul appareil. Cela ouvre le potentiel d'interaction entre ces deux types d'ondes distincts. L'exploration d'un nouveau domaine de recherche a émergé, se concentrant sur l'interaction entre l'acoustique et l'optique dans les structures à fort confinement. Ce concept passionnant de cristaux phononiques introduit une nouvelle perspective et une nouvelle approche du domaine. En utilisant les concepts de confinement, de guidage et de phénomènes d'ondes lentes, on peut exploiter leur potentiel pour faciliter un couplage bénéfique. acousto-optique. Initialement, l'objectif principal de la recherche sur ces cristaux consistait à explorer le potentiel théorique de la réalisation de bandes interdites acoustiques et optiques simultanées au sein d'un seul réseau. Cette exigence initiale est essentielle pour y parvenir. Le confinement simultané des ondes optiques et acoustiques au sein de modes de cavité est un aspect important à explorer. De plus, il vaut la peine d'étudier le couplage acousto-optique qui se produit entre ces modes de résonance.

I.2.3. Cristaux phononiques et Cristaux photoniques

En effet, il existe une grande analogie entre la propagation des électrons dans les cristaux électroniques, la propagation des ondes optiques dans les cristaux photoniques et la propagation des ondes acoustiques/élastiques dans les cristaux photoniques [21].

Même si la bande phononique est semblable à la bande d'un cristal photonique, elle est aussi semblable à la bande électronique d'un semi-conducteur [22].

Le tableau I.1 résume les propriétés fondamentales régissant la propagation des ondes électroniques, électromagnétiques et élastiques dans les structures périodiques 3D isotropes [23].

Propriété	Cristal électronique	Cristal photonique	Cristal phononique
Matériaux	Cristallin (naturel ou obtenu par croissance)	Composé de deux matériaux diélectriques	Composé de deux matériaux élastiques
Paramètres	Constantes universelles, nombres atomiques	Constantes diélectriques des constituants	Densités, vitesse du son dans les constituants
Constante de maille	1 - 5Å (microscopique)	0.1 μm - 1 cm (mésoscopique ou macroscopique)	Mésoscopique ou macroscopique
Ondes	de Broglie (électrons) ψ	Electromagnétiques ou lumineuses (photons) E,B	Vibratoires ou sonores (phonons) u
Polarisations	Spin (haut et bas)	Transverse : $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$ ($\nabla \cdot \mathbf{E} \neq 0$)	Trans.-longit. ($\nabla \cdot \mathbf{u} \neq 0$, $\nabla \times \mathbf{u} \neq 0$)
Équation différentielle	$\nabla^2 \psi + V(r)\psi = \frac{\hbar}{2m} \frac{\partial \psi}{\partial t}$	$\nabla^2 \mathbf{E} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) = \frac{\epsilon(r)}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$	$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_i} \right) \right] \right\}$
Particules libres	$W = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ (électrons)	$\omega = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} k$ (photons)	$\omega = c_{ij} k$ (phonons)
Bande interdite	Augmente avec le potentiel dans le cristal ; pas d'état électronique possible	Augmente avec ; pas de $ \epsilon_a - \epsilon_b $ photons, pas de lumière	Augmente avec ; pas de $ \rho_a - \rho_b $ vibration, pas de son
Gamme spectrale	Ondes radio, micro-ondes, optique, rayons X	Micro-ondes, optique	≤ 10 GHz

Tableau I.1 Propriétés clés pour l'étude des structures de bandes dans les matériaux Tridimensionnels isotropes [23]

Le concept de la bande interdite, initialement élaborée dans le cadre de la théorie électronique des solides, peut être étendue à d'autres ondes transmises dans les composites. Les cristaux photoniques et phononiques sont très divers, qu'ils soient naturels ou artificiels. Leurs Caractéristiques physiques captivantes, à la fois pour la recherche fondamentale et appliquée [24]. En réalité, les propriétés des cristaux phononiques sont proches de celles des cristaux photoniques.

I.2.4. Création de défauts

Un grand nombre des dispositifs proposés reposent sur des défauts intentionnels de la structure. La conception du mode de défaut a presque été développée simultanément avec celle de bande interdite. En réalité, le défaut est une faiblesse du réseau. A intervalles réguliers, il agit comme une cavité (défaut temporaire) ou comme un guide d'onde (défaut horizontal). On sélectionne le défaut de façon à ce que la fréquence propre du mode associé soit dans la bande interdite. Dans le cas d'un cristal 1D, un défaut se génère par l'insertion d'une couche ayant des propriétés physiques différentes, ce qui entraîne un confinement. En ce qui concerne les cristaux 2D, un défaut peut se produire par l'omission d'un ou de plusieurs motifs. L'objectif est d'obtenir des structures qui présentent les meilleurs facteurs de qualité possibles (dispositifs qui permettent de localiser l'énergie optique avec une faible perte).

Examinons brièvement les ordres de grandeur d'une fibre optique par rapport aux guides d'onde traditionnels :

- souplesse: La taille des guides à cristaux photoniques est de 300 nm. Un cœur de 10 μ m est utilisé pour les fibres optiques.
 - rayon de courbure : en théorie, un coude à 90 ° entraîne peu de pertes de propagation (dans les fibres, ces pertes sont causées par la modification de l'angle d'incidence, ce qui nécessite de maintenir un rayon de courbure élevé avec les fibres, d'environ cm). [25] :
 - ondes lentes. On peut obtenir un facteur de ralentissement de 300 en utilisant la même grille de silicium ;
 - la dispersion [25] est de 250 ps/nm (20 ps/nm pour une fibre de 1 km).
- Les différentes caractéristiques des cristaux photoniques permettent de classer les domaines d'application en plusieurs catégories [26]: multiplexage et démultiplexage ; super prisme ; réfraction négative ; guide d'onde ; polariseur ; émission de lumière.

Les dispositifs sont classés en cristaux sans défaut et en cristaux comprenant des défauts.

La création des défauts occasionnels, linéaires ou combinant ces deux catégories de défauts. Provoquent plusieurs effets tels que la réfraction, la réflexion, la diffraction, la résonance des modes et la propagation des ondes dans les cristaux photoniques. Les différentes structures qui peuvent être utilisées sont illustrées dans la figure I.2, qui représente schématiquement des structures périodiques avec des défauts ponctuels (cavités) ou linéaires (guides d'onde).

Chacune de ces structures permet de fabriquer des appareils comme le super prisme (figure I.2.a), le micro-laser (figure I.2.b).

Le guide d'onde (fig. I.2.c-d), le résonateur (fig. I.2.e-g) ou le démultiplexage de longueur d'onde (fig. I.2.h). Nous nous limiterons à présenter succinctement ces diverses applications. Toutefois, nous examinerons de manière plus approfondie les catégories qui seront les plus adaptées pour être utilisées comme supports pour les dispositifs d'interaction visuelle.

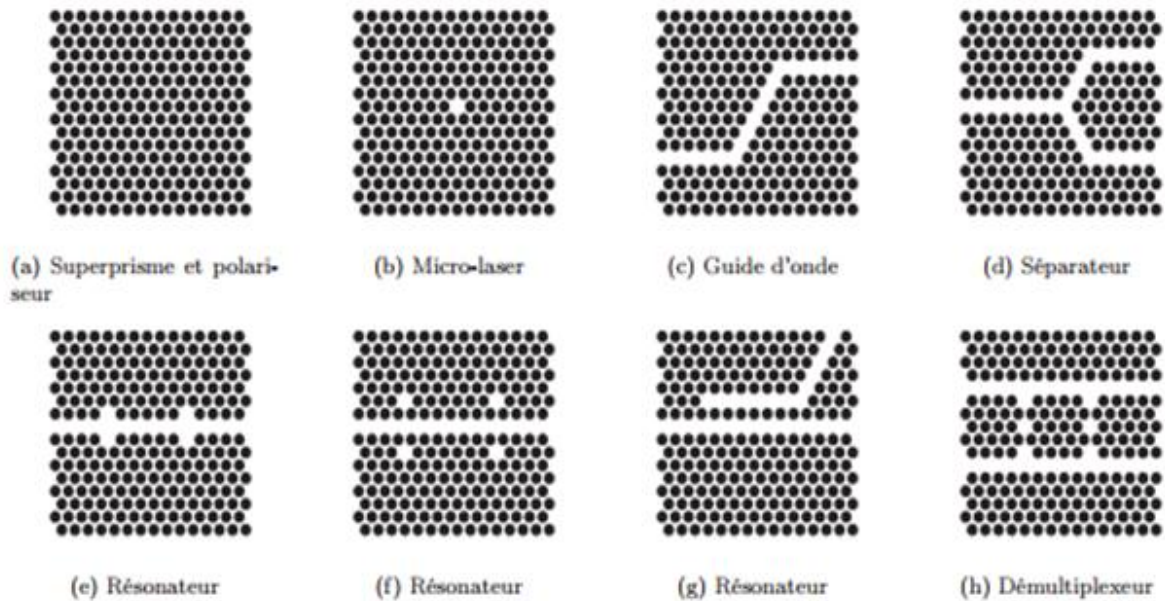


Figure I.2: Schéma d'un réseau cristallin hexagonal parfait (a), puis comprenant une cavité (b), d'un défaut linéaire à deux coudes à 60° (c), d'un défaut linéaire scindé en branche Y à 60° (d), un guide d'onde avec quatre défauts (e-f), deux guides d'ondes séparés (g) et de deux guides d'onde comprenant deux cavités (h).

I.3. Différents types des cristaux phononiques

Les cristaux phononiques sont classés en différentes catégories en fonction de leurs propriétés et structures. Les types de cristaux phononiques comprennent les cristaux phononiques 1D, 2D et 3D, chacun caractérisé par la dimensionnalité de sa structure périodique. Ces cristaux sont conçus pour manipuler les phonons, les quanta d'énergie vibratoire dans les matériaux.

I.3.1. Structures périodiques unidimensionnel

On appelle généralement ces structures le réseau de Bragg [27]. En général, elles sont effectuées en empilant des couches ayant un indice de réfraction différent et une épaisseur optique de $l/4$, l étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau est orienté. Il est nécessaire d'empêcher la propagation des ondes électromagnétiques dans un

environnement normal. Les réseaux Bragg ont démontré leur utilité dans de multiples domaines : Convertisseurs démodés pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs [28]

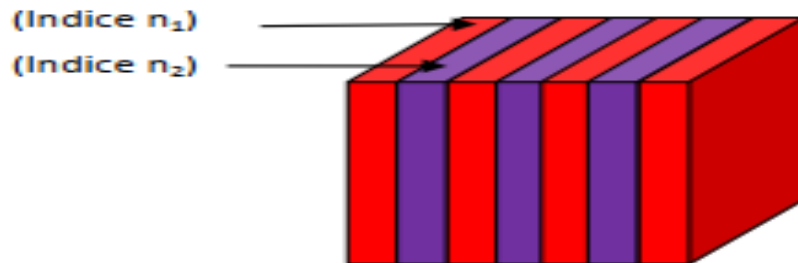


Figure I.3: Structure périodique unidimensionnel

I.3.2. Structures périodiques 2D

Les structures périodiques bidimensionnelles [29,30] sont des structures qui se présentent de la manière suivante. L'espace est divisé en deux directions et infinies en suivant la troisième. Deux catégories de ces structures existent : Les structures connues sous le nom de "connectées" (Figure I.4) : les motifs fondamentaux sont L'indice n_1 de la matrice diélectrique est inférieur à l'indice n_2 .

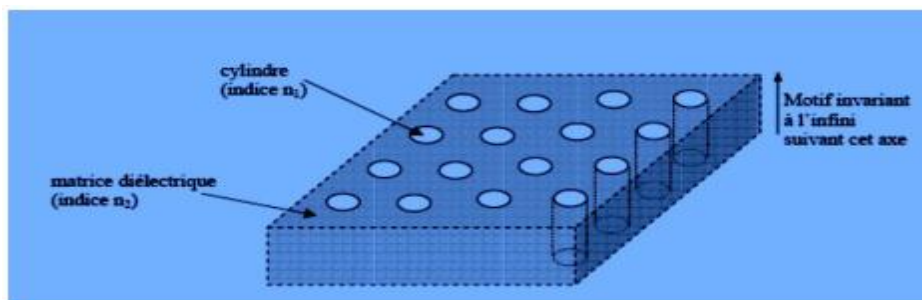


Figure I.4: Structure périodique 2D connectée [31].

- Les structures appelées « déconnectées » (Figure I.5) sont caractérisées par le fait que les motifs élémentaires ont un indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace entre les motifs. Ce sont des tiges diélectriques ou métalliques qui les composent.

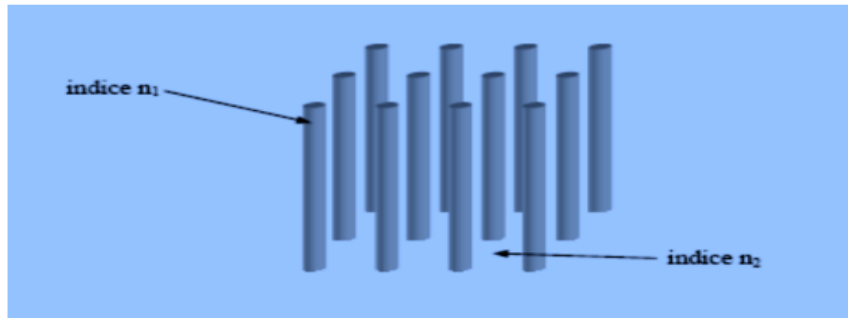


Figure I.5 : Structure périodique 2D déconnectée

Les structures périodiques à deux dimensions se regroupent principalement suivant trois familles :

a. Le réseau carré:

Les points de connexion du réseau se trouvent sur un carré de côté « a » (Figure I.6(a)). Selon [32], il a été démontré que ce genre de réseau est extrêmement sensible à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde numérique. Il est donc ardu d'obtenir une bande interdite complète, c'est-à-dire une bande interdite totale. Une bande empêchant la propagation, peu importe la polarisation.

b. Le réseau triangulaire:

La symétrie du réseau triangulaire est la plus élevée lorsque l'on se contente d'usuel « atome » par maille. Brillouin est une zone en hexagone. Chaque nœud du réseau est séparé d'une distance égale à « a » de son voisin proche (Figure I.6(b)). Cette structure est moins sensible à l'angle d'incidence que le réseau carré, mais il reste difficile d'obtenir une bande interdite complète.

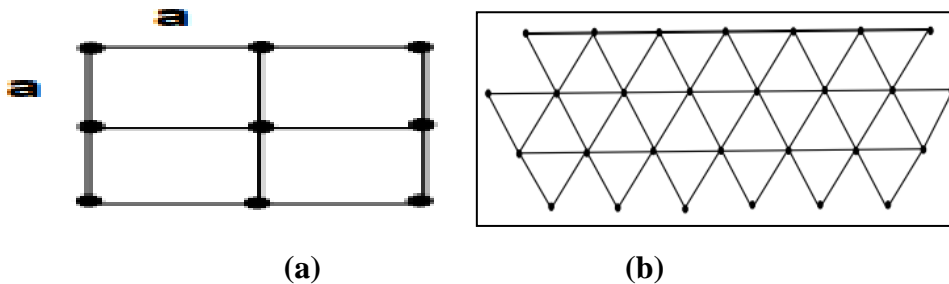


Figure I.6: (a) Le réseau carré, (b) Le réseau triangulaire [32]

c. Le réseau hexagonal

• **La structure graphite:** Si tous les nœuds du réseau hexagonal sont identiques et séparés de « a », la structure est dite du graphite (Figure I.8(a)). Contrairement au réseau

triangulaire, ce réseau est constitué de deux « atomes » par maille. Le réseau réciproque est également un réseau hexagonal et la zone irréductible de Brillouin est identique à celle du réseau triangulaire, avec les directions principales indiquées TM et TE. Pour la première fois, on avait anticipé la possibilité d'une bande interdite complète dans le cas d'un réseau de tiges diélectriques cylindriques [32].

•**La structure nitrure de Bore:** La structure cristalline du Nitrure de Bore est obtenue lorsque l'un des nœuds diffère de son suivant en raison de sa nature ou de sa dimension (Figure I.7(b)). Cela offre la possibilité d'obtenir de grandes bandes interdites.

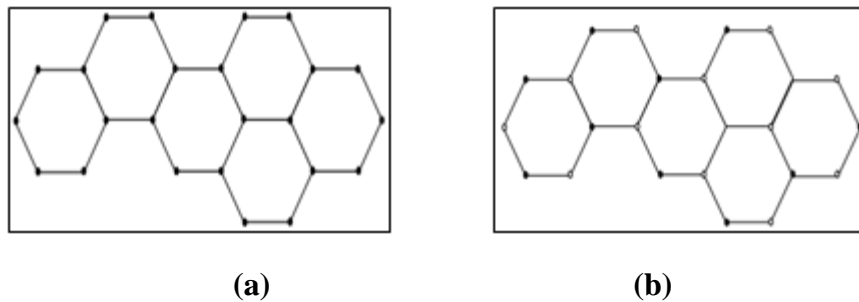


Figure I.7 : (a) Structure graphite. (b) Structure Nitrure de Bore

I.3.3. Structures périodiques tridimensionnelles

Les cristaux phononiques tridimensionnels sont souvent des structures artificielles qui se produisent de manière périodique dans les trois directions de l'espace (Figure I.8). Dans les cristaux phononiques tridimensionnels, des bandes interdites peuvent être obtenues. Absolues, c'est-à-dire qu'une onde de fréquence incidente se propageant dans une telle bande interdite, peu importe son angle d'incidence. Les structures tridimensionnelles (3D) présentent cependant un inconvénient : elles sont difficiles à réaliser expérimentalement, la figure (I.8) montre quelques structures 3D.

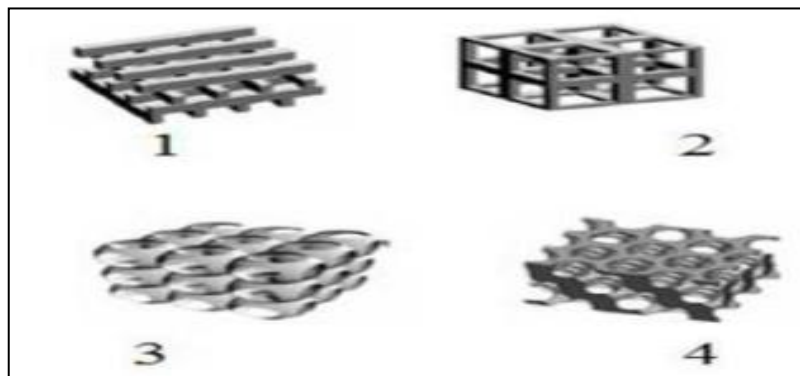


figure I.8: Représentation de quelques structures 3D : (1) tas de bois, (2) structure cubique, (3) et (4) opales ou opales inversées [16].

I.4. Bande interdite phononique

Comme les cristaux photoniques, plusieurs paramètres géométriques ou physiques permettent à l'ouverture des bandes interdites ou permises et déterminent leurs caractéristiques.

I.4.1. Influence de la nature du réseau

Les caractéristiques acoustiques des cristaux sont influencées par le type du réseau cristallin. Par exemple, dans un réseau cristallin 3D, les ondes acoustiques peuvent se propager de manière différente selon la direction, ce qui entraîne la création de modes de vibration spécifiques. La distribution symétrique du réseau peut aussi avoir un impact sur la façon dont les phonons se propagent à travers le matériau, ce qui a un impact sur ses caractéristiques thermiques et mécaniques.

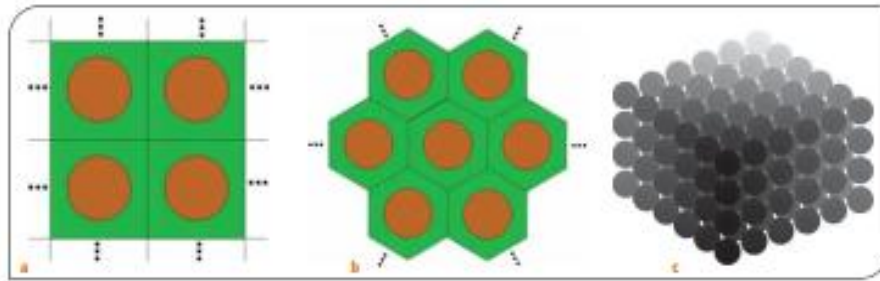


Figure I.9: Représentation schématique d'un cristal phononiques à deux dimensions (a), Réseau carré et (b) Réseau triangulaire [15]

I.4.2. Influence du facteur de remplissage

Les bandes interdites sont également influencées par le taux de remplissage, c'est-à-dire la proportion volumique des inclusions dans le cristal phononiques. On observe une bande d'arrêt la plus basse lorsque les facteurs de remplissage sont adéquats puis, disparaissent lorsque les taux de remplissage sont trop élevés ou très faibles. On peut expliquer cela par le fait que si le remplissage est nul, on obtient un matériau homogène, ce qui empêche donc l'obtention de bandes interdites [33].

I.4.3. Influence de la masse volumique

Il est plus aisé d'observer des bandes interdites lorsque les matériaux en présence présentent un contraste de densités et de constantes élastiques élevés. Effectivement, on observe une bande d'arrêt plus étendue dans la courbe lorsque l'on augmente. La différence de densités ou celle des constantes élastiques, avec une largeur maximale lorsque ces deux différences sont au maximum.

Ce résultat s'applique à des miroirs de Bragg monodimensionnels où la largeur du miroir augmente lorsque le contraste d'impédances acoustiques entre les matériaux composant le miroir augmente. En cas de configuration monodimensionnelle, cela est dû à une hausse du coefficient de réflexion des ondes à chaque interface. L'effet obtenu pour un cristal phononique est une réflexion plus intense des ondes à l'interface entre les deux. Les inclusions et la matrice, ce qui accroît leur capacité à se diffuser et réduit la transmission directe des ondes à travers elles [33].

I.4.4. Influence de la vitesse de propagation

Les cristaux phononiques sont des matériaux qui manipulent le mouvement des phonons, qui sont des quanta d'énergie associés aux vibrations dans un matériau cristallin. La vitesse de propagation des phonons dans ces cristaux est influencée par plusieurs facteurs, notamment la structure du matériau et les interactions entre les atomes.

Lorsque la vitesse de propagation des phonons est modifiée dans un cristal phononique, cela peut avoir divers effets, tels que la modification des propriétés de transmission, de réflexion et d'absorption des ondes acoustiques. Par exemple, en ajustant la vitesse de propagation, il est possible de créer des bandes interdites pour certaines fréquences de phonons, ce qui peut être exploité pour contrôler et manipuler le flux d'énergie acoustique à travers le matériau.

I.5. Ondes longitudinales et ondes transversales

Selon la nature de propagation des ondes, on peut distinguer deux types d'ondes acoustiques.

I .5.1. Ondes longitudinales

Les ondes élastiques et acoustiques sont dites longitudinales ou également appelées ondes de compression, lorsque le mouvement des particules est faite en parallèle à la direction de propagation c'est-à-dire par une polarisation colinéaire au vecteur d'onde (figure(I.11)). Le passage d'une onde longitudinale plane entraîne une variation de la distance entre les plans parallèles contenant les particules si bien que le volume occupé par un nombre donné de particules varie. Les ondes longitudinales se propagent normalement dans les solides, les liquides et les gaz. Cependant, compte tenu des fréquences très élevées utilisées dans le contrôle non destructif, l'atténuation de ces ondes est extrêmement élevée dans les gaz. Ainsi, les ondes longitudinales ne se propagent réellement que dans les solides et les liquides [34-35].

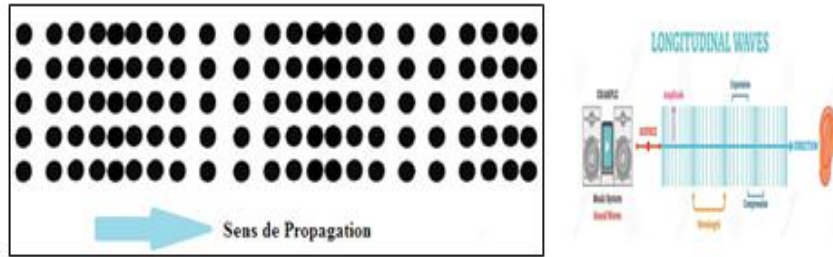


Figure I.11: Schéma d'un solide traversé par une onde longitudinale [35]

I.5.2. Ondes transversales

Les ondes transversales désignent des ondes où les vibrations se déroulent en perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Il s'agit de l'oscillation des particules du milieu dans une direction perpendiculaire à la direction de déplacement de l'onde. Une onde transversale est considérée comme une onde E/M, telle que la lumière, où les champs électriques et magnétiques oscillent en perpendiculaire à la direction.



Figure I.12: Représentation schématique d'une onde transverse [36]

Lorsque ces vibrations de l'onde se propagent de manière infinie dans toutes les directions contenues dans ce plan, on parle d'onde transversale polarisée. En d'autres termes, elles se distinguent par une polarisation perpendiculaire au vecteur d'onde ou à tout autre vecteur d'onde. Les particules se déplacent tout simplement de part et d'autre de la droite de leur position initiale. Les ondes transversales se propagent seulement dans les solides ou dans les liquides visqueux. La figure I.12, illustre le schéma d'un solide traversé par une onde transversale.

I.6. Applications des cristaux phononiques

Les applications des cristaux phononiques se distinguent par la nature et la formes des défauts introduits dans le cristal. Parmi ces applications, on peut trouver citer les suivantes.

I.6.1. Guidage des ondes acoustiques

On peut créer des guides d'ondes simples ou complexes à partir d'un cristal phononiques 2D en supprimant ou en modifiant une simple rangée d'inclusions cylindriques en fonction de la direction de propagation.

Effectivement, si une ligne d'inclusions est enlevée ou modifiée dans le sens de la propagation, on peut s'attendre à ce que les ondes, bloquées dans le cristal parfait, soient guidées par ce défaut, ce qui leur permet de se propager. Khélif nous confirme que c'est bien le cas [37], en se basant sur le bilan établi par Miyashita [5]. Avec un montage composé de cylindres d'acier plongés dans l'eau et disposés en réseau carré, il démontre que l'absence d'une ligne de cylindres entraîne, dans la bande d'arrêt, une remontée de la transmission à certaines fréquences. L'expérience correspond au calcul théorique (effectué en FDTD) qui prévoyait l'émergence d'un mode guidé dans le défaut, situé à l'intérieur de la bande d'arrêt. Cependant, elle doit se propager de manière adéquate dans la ligne de défauts créée. Les spectres de transmission et une image des champs de pression dans l'eau obtenus pour cette configuration sont présentés dans la Figure (I-13).

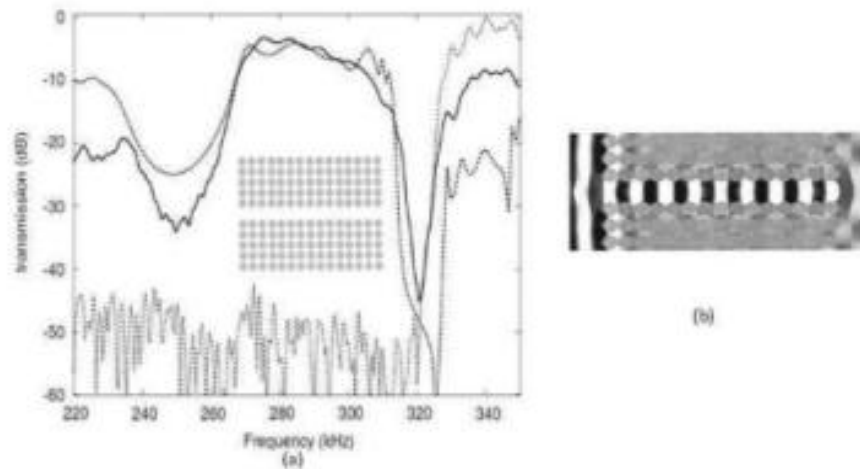


Figure I.13 : Transmission à travers un guide W1 dans un cristal phononique constitué de tubes d'acier dans l'eau. (a) calculée (pointillés) et mesurée (trait plein) et (b) pression simulée dans le dispositif [38]

Pour s'assurer que l'onde est bien guidée, Khélif crée des coudes dans le guide, comme illustré dans la Figure (I.14). En cas de creux de transmission dans l'onde guidée pour certaines fréquences, on constate néanmoins des anomalies. Malgré son orientation correcte vers d'autres fréquences. Il y a peu de pertes liées aux coudes, même avec des coudes droits.

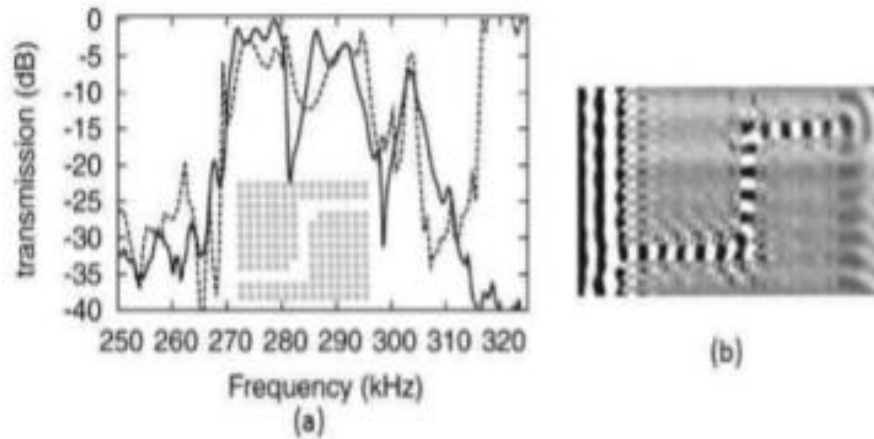


Figure I.14: Un guide coudé créé par l'absence d'inclusions dans un cristal phononiques composé de tubes d'acier dans l'eau. (a) la mesure de la transmission calculée (pointillés) et mesurée (trait plein) et (b) la simulation de la pression dans le dispositif [5].

I.6.2. Cavités Résonantes et Résonateurs Acoustiques

La nature du matériau peut être modifiée localement en modifiant la valeur des propriétés élastiques du matériau. Plutôt que d'enlever une ligne d'inclusion, il est facile d'enlever ou de modifier une seule inclusion. La résonance qui se trouve dans ce défaut se reflète sur le cristal phononiques qui l'entoure et est donc renfermée dans la cavité, en tant que résonante. L'expérience réalisée par Khelif, qui implique des cylindres d'acier plongés dans l'eau, confirme une fois de plus ce phénomène [39]. Selon la Figure (I.15), lorsque l'on supprime une inclusion, on constate un maximum de transmission dans la bande interdite, ce qui entraîne une résonance.

Son étude porte également sur les résultats obtenus lorsque deux de ces cavités sont placées l'une à côté de l'autre. Il est observé qu'en cas d'alignement avec la direction de propagation, deux pics apparaissent. Grâce à ces cavités astucieuses, on peut obtenir une bande passante dans la bande d'arrêt. En revanche, si elles sont orientées perpendiculairement à la propagation, la résonance est légèrement déplacée en fréquence, mais elle reste toujours isolée et la pression est calculée dans une série de cavités qui forment un guide similaire à la figure(e) [33,39].

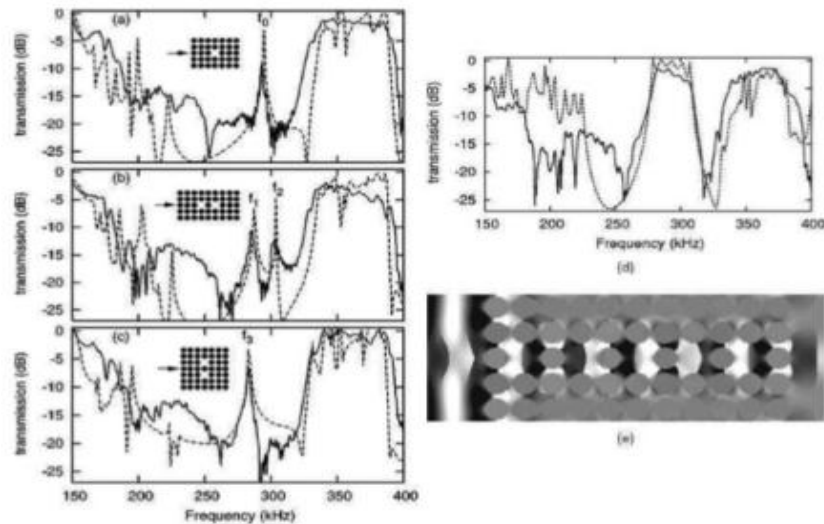


Figure I.15 : Mesure des transmissions (lignes pleines) et calcul des transmissions (lignes pointillées) en fonction de la fréquence pour (a) une cavité résonante, (b) deux cavités alignées dans la direction de propagation, (c) deux cavités alignées dans la direction perpendiculaire [5,33] .

I.6.3. Couplage de défauts

Tout d'abord, une cavité est créée sur le bord d'un guide, comme illustré dans la (Figure (I-16)) [40]. On fabrique ces dispositifs en plongeant des cylindres d'acier dans l'eau en suivant une maille carrée. La bande passante dans la bande d'arrêt était créée par le guide d'onde décrit précédemment, mais l'ajout d'une cavité au guide crée deux bandes passantes.

La bande passante présente un creux de transmission. La fréquence des résonances est influencée par la longueur de la cavité, même si la cavité est à cheval de chaque côté du guide (Figure I.16). Lorsque plusieurs cavités sont ajoutées le long du guide, cela crée une nouvelle bande d'arrêt dans la bande passante du guide.

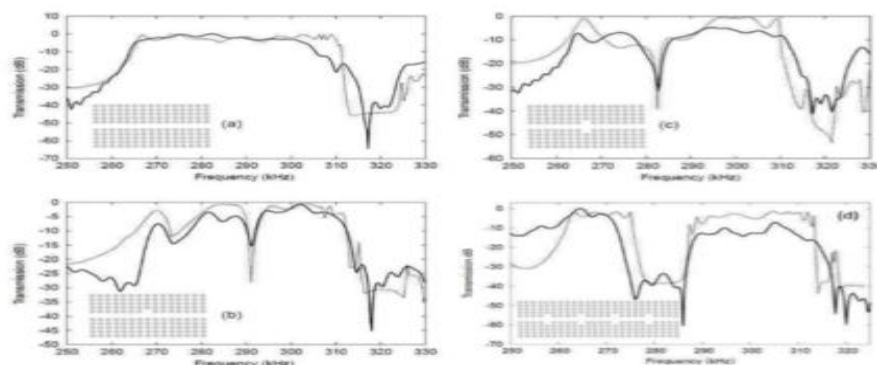


Figure I.16 : Transmission mesurée (lignes pleines) et calculée (pointillés) pour (a) un guide d'ondes linéaire, (b) un guide couplé à une cavité, (c) un guide couplé à une cavité longue à cheval sur le guide et (d) un guide bordé de cavités sur ces deux côtés [5].

I.6.4. Filtrage et Multiplexage des Ondes Acoustiques

La capacité de filtrage consiste à distinguer et choisir des éléments à partir d'un flux. L'objectif est de distinguer les ondes acoustiques à fréquences spécifiques à partir d'un ensemble de fréquences initiales. Effectivement, en utilisant les bandes interdites. En utilisant des cristaux phononiques, il est envisageable de supprimer certains paquets d'ondes indésirables sur des intervalles de fréquences spécifiques. Le guidage, de son côté, permet de laisser circuler certaines fréquences dans la bande interdite pour distinguer une information des autres données transmises par l'onde. Le schéma (I.17) présente le concept de construction d'un système de multiplexage qui permet d'incorporer ou d'extraire certaines fréquences des ondes acoustiques [5].

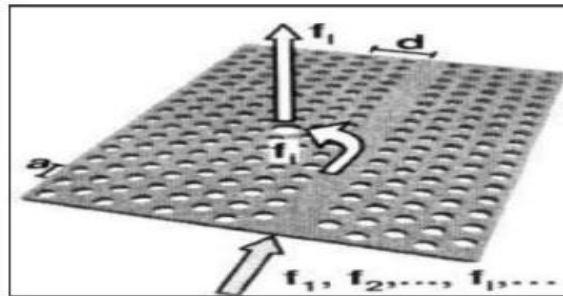


Figure I.17 : Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage [41].

I.7. Conclusion

Les cristaux phononiques sont des structures périodiques qui forment un nouveau domaine de recherche qui a reçu beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs ces dernières années. Au cours de ce chapitre, nous avons présenté en premier temps des généralités sur les cristaux phononiques ; en commençant par quelques concepts de base, la notion de bande interdite, les différents types de cristaux, l'insertion des différents types de défauts dans ces structures. Enfin, nous avons terminé ce chapitre par des notions fondamentales concernant la propagation des ondes acoustiques.

CHAPITRE II

A decorative graphic of a scroll, with the text centered on it. The scroll has a vertical bar on the left side and a small circular element at the top right corner.

**Notions et caractéristiques
fondamentales sur les capteurs**

II.1. Introduction

Dans notre société contemporaine, centrée sur la technologie, les capteurs occupent une place de plus en plus cruciale dans des secteurs aussi variés que la santé, la surveillance de l'environnement et l'industrie automatisée. Les capteurs nous offrent la possibilité de recueillir et de traiter des informations sur notre environnement, nous offrant ainsi des informations précises et opportunes. Les avancées technologiques dans le domaine des capteurs ont permis d'améliorer leur taille, leur résistance et leur sensibilité, ce qui a ouvert la voie à de nouvelles applications et innovations. Néanmoins, il existe encore de nombreux défis dans la conception des capteurs, tels que la consommation d'énergie, l'amélioration de la fiabilité des données et l'élaboration de nouvelles méthodes de détection.

Les capteurs sont fondamentalement des dispositifs qui repèrent et réagissent aux stimuli physiques ou aux modifications de l'environnement qui les entoure. La température et la pression peuvent être modifiées, tout comme la lumière et le son. Les capteurs passent en conversion. Par la suite, ces données physiques se transforment en un signal électrique qui peut être transmis et analysé par un ordinateur ou un autre dispositif électronique. Différents types de capteurs électroniques sont disponibles, chacun possédant ses propres caractéristiques et utilisations. Les capteurs de température, de pression, de proximité et de mouvement sont parmi les types de capteurs les plus fréquents [42].

Par exemple, on retrouve fréquemment des capteurs de température dans les thermostats, les réfrigérateurs et les climatiseurs afin de repérer les variations de température. De leur côté, les capteurs de pression servent à repérer les variations de pression et peuvent être employés dans des domaines tels que les systèmes de surveillance de la pression des pneus et les baromètres. Les systèmes d'automatisation industrielle utilisent souvent des capteurs de proximité pour détecter la présence ou l'absence d'un objet à une distance spécifique. Les systèmes de sécurité et les contrôleurs de processus utilisent fréquemment des capteurs de mouvement pour détecter les mouvements [43].

Les avancées récentes dans le domaine des capteurs ont entraîné l'apparition de capteurs bioélectroniques qui peuvent repérer les modifications de l'environnement liées spécifiquement aux processus biologiques, comme la présence de certains produits chimiques ou des bactéries.

II.2. Définitions et caractéristiques d'un capteur

II.2.1. Définitions

Il est nécessaire de réguler des paramètres physiques tels que la température, la force, la position, la vitesse, la luminosité dans de nombreux secteurs (industrie, services, loisirs...). Le capteur joue un rôle essentiel dans la détection des grandeurs physiques. La structure de base d'une chaîne de mesure est représentée dans la Figure (II.1). Un capteur est un dispositif qui collecte des informations et crée à partir d'une grandeur physique une autre grandeur physique de nature différente (généralement électrique).

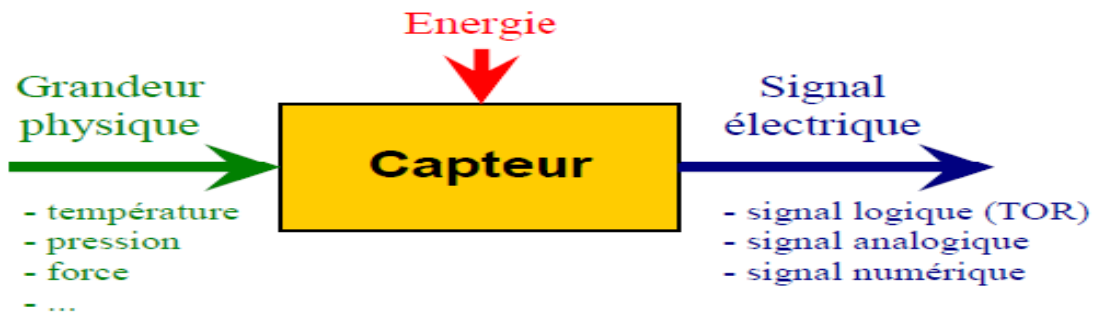
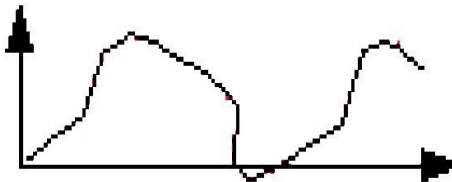


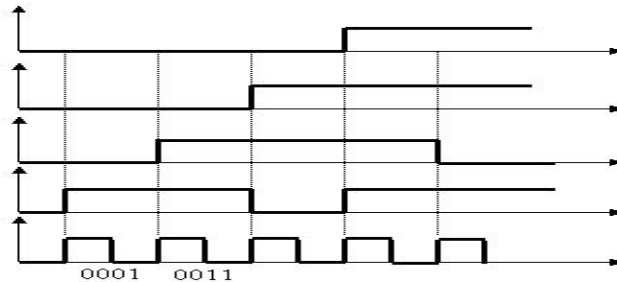
Figure II.1 : Schéma synoptique d'une structure de base d'un capteur

On peut classer les capteurs en fonction de la nature de l'information délivrée en sortie en 3 groupes:

- a. Les capteurs analogiques :** Dans la pratique industrielle, on donne à ce type de matériel le nom de capteurs. Type de signal de sortie : 0 – 10V ou 4 – 20mA.

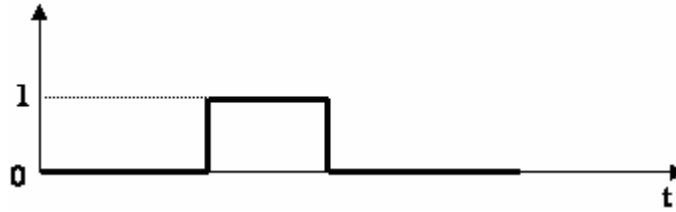


- b. Les capteurs numériques :** Souvent nommés codeurs ou compteurs. Type de signal de sortie : 0011 ou 0001



c. Les capteurs logiques ou Tout Ou Rien (TOR) : Ils portent le nom de détecteurs.

Type de signal de sortie 0V ou 5V.



D'autre part, les différentes grandeurs physiques existant actuellement peuvent être classées en 6 familles distinctes, chacune correspondant à un type de capteur:

- Grandeurs mécaniques: déplacement, force, masse, débit, Etc.
- Grandeurs thermiques: température, capacité thermique, flux thermique, etc.
- Grandeurs électriques: courant, tension, charge, impédance, diélectrique, ...etc.
- Grandeurs magnétiques: champ magnétique, perméabilité, moment magnétique,.... etc.
- Grandeurs radiatives: lumière visible, rayons X, ...etc.
- Grandeurs (bio) chimiques: Humidité, gaz, etc.

II.2.2. Caractéristiques métrologiques des capteurs

En règle générale, afin de classer les capteurs en fonction de leurs performances métrologiques, il est nécessaire de définir certaines caractéristiques métrologiques qui permettent de désélectionner les capteurs en fonction de l'application prévue [42-44]. Parmi les éléments métrologiques clés, on peut mentionner

a. Etendue de mesure

Il détermine la zone qui garantit les performances du capteur en fonction de spécifications fournies. La plage de mesure est la distance entre les valeurs extrêmes employées (max-min). La zone d'utilisation nominale est souvent confondue avec cette plage, mais elle peut être réduite ou élargie en fonction de la norme d'utilisation adoptée.

b. Sensibilité d'un capteur

Un capteur est un appareil qui permet de mesurer un élément physique ou électronique. Il donne généralement une grandeur de sortie électrique qui en est la représentation la plus précise possible. De manière générale, cette valeur électrique fluctue en fonction du paramètre mesuré. L'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la variation de la grandeur d'entrée en un point donné est déterminée par la sensibilité. Donc,

si la grandeur à mesurer varie de Δe , la grandeur de l'ortie varie de Δs de la manière suivante [45] :

$$\text{sensibilité} = \frac{\Delta e(\text{Grandeur de sortie})}{\Delta s(\text{mesurande})} \dots \dots \dots (01)$$

Où : S est la sensibilité du capteur. Elle doit dépendre le moins possible de son vieillissement et de son environnement, (des autres grandeurs). Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité est constante. Afin qu'un capteur soit facilement exploité, on s'efforce, dans la mesure du possible, de le réaliser de façonna ce qu'il délivre une relation linéaire:

c. Linéarité

Le caractère linéaire d'un capteur désigne sa capacité à produire une valeur de sortie qui est proportionnelle à celle du mesura de. La concordance entre le diagramme d'étalonnage statique et une droite sélectionnée comme référence est évaluée (la droite des moindres carrés ou, sinon, la droite qui rassemble les points extrêmes de l'étendue de mesure). L'écart linéaire est donc le maximum de différence entre la caractéristique réelle et la droite de référence.

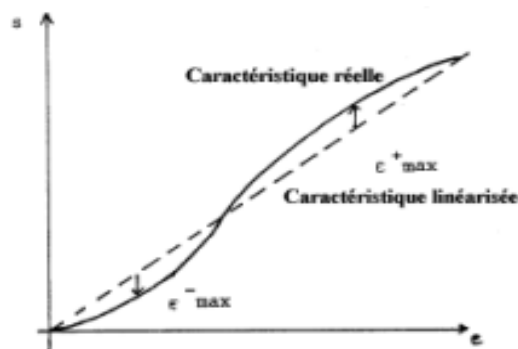


Figure II.2: Exemple de linéarisation de caractéristiques

d. Résolution

La résolution d'un capteur correspond à la variation la plus faible du mesura que le capteur est capable de détecter. Dans le cas d'un appareil de mesure numérique, la résolution est définie par la formule suivante : Résolution : Étendue de mesure / Nombre de points de mesure. Il est possible que la résolution ne soit pas constante sur l'ensemble de la mesure. Il en va de même pour les convertisseurs analogiques/numériques (A/N).

e. Finesse

Elle explique comment l'outil de mesure influence le phénomène de mesure. Son niveau est élevé lorsque les interférences entre l'appareil et le mesura de sont minimales. La présence du capteur n'affecte pas la grandeur à mesurer. Cela donne la possibilité d'évaluer l'impact du capteur sur la mesure. Il s'applique non seulement au capteur, mais aussi à l'environnement dans lequel il est employé.

f. Sélectivité

Un capteur est qualifié de sélectif lorsque le signal de sortie varie exclusivement en fonction de la seule grandeur (physique, chimique, biologique...) que l'on souhaite mesurer. Le capteur a la capacité de ne mesurer qu'une seule grandeur dans le milieu où il est employé, c'est-à-dire d'être le capteur. Plus sensible aux variables d'influence, variables qui ne sont pas mesurées, mais qui ont un impact sur la sortie du capteur

II.3. Caractéristiques statistiques d'un capteur

Ces paramètres permettent de prendre en compte la notion d'erreurs accidentelles qui peuvent survenir sur un capteur. Soit n mesures effectuées sur un mesura de, on définit à partir de ces n mesures :

✓ La valeur moyenne:

Soit n mesures effectuées sur un mesura de, on définit à partir de ces n mesures :

✓ La valeur moyenne: $\langle m \rangle = \frac{\sum m_i}{n}$

✓ L'écart type mesure la dispersion d'une série de mesures autour de leur valeur Moyenne:

$$\langle \sigma \rangle = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \langle m \rangle)^2}{n-1}}$$

II.3.1. Fidélité

Son objectif est de déterminer la capacité d'un capteur à fournir une mesure répétitive sans erreur. L'erreur de fidélité désigne la différence typique observée sur une série de mesures qui correspond à une valeur constante du mesura. Les conclusions des mesures répétées d'une valeur identique de Les mesures sont toujours regroupées autour d'une valeur moyenne). Un capteur est d'autant plus précis qu'il présente un écart type minime.

II.3.2. Justesse

La précision se réfère à la capacité d'un capteur à fournir une réponse proche de la valeur réelle, sans tenir compte de la notion de fidélité (les erreurs de fidélité n'étant pas considérées). La valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures est associée à cela. Par rapport à la véritable valeur. Un instrument est plus équitable lorsque la valeur moyenne est proche de la valeur réelle.

III.3.3. Précision

La précision constitue l'un des critères essentiels d'un système de mesure. L'écart en % entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie d'un capteur est appelé la précision d'un capteur. Elle désigne la capacité d'un capteur à produire une donnée. La figure II.3 met en évidence l'exactitude, la précision et la précision. Un capteur précis garantira à la fois une fidélité et une précision optimales.

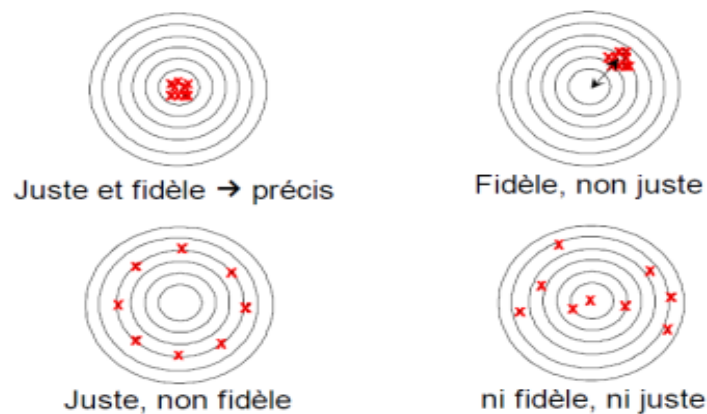


Figure II.3: Caractéristiques statistiques d'un capteur

II.3.4. La rapidité d'un capteur

Elle indique la durée de réaction du capteur. La vitesse est corrélée à la plage de fréquences du capteur, c'est-à-dire à la plage de fréquences où le capteur peut observer les fluctuations de la grandeur d'entrée. En augmentant la bande passante du capteur, plus le capteur est large, plus il est rapide. La vitesse revêt une importance capitale pour les capteurs employés dans des applications nécessitant une réponse rapide.

Généralement, on obtient une grandeur de sortie du type électrique. Elle peut être une charge (Q), une tension (V), un courant (I), une impédance (R, L, C). On parle aussi de transducteur, lorsque la grandeur physique d'entrée (le mesura de) étant transformée en une autre grandeur physique de sortie ou en un signal électrique.

Actuellement, tous les domaines d'activité nécessitent l'emploi de capteurs: on peut citer quelques domaines tels que : Automobile qui représente un domaine principal), contrôle de la production, agriculture, sécurité, médical et dans le domaine de l'électroménager.

II.4. Capteurs de liquide à cristaux phononiques 1D

II.4.1. Principe de détection

On peut analyser les caractéristiques des liquides en utilisant des structures 1D. Le capteur de liquide est composé de deux couches disposées de manière régulière, présentant une bande interdite. On obtient la détection en introduisant une couche de cavité remplie par le liquide à tester. On peut déterminer la nature de l'analyte grâce à la spectroscopie de transmission, qui peut être réalisée à l'aide de la méthode de la matrice de transfert (TMM).

La TMM permet d'identifier les états de défauts en observant une augmentation soudaine de la transmission dans la bande interdite de la structure parfaite [46].

II.4.2. Structures à cristaux phononiques 1D finies

La structure multicouche est la plus simple, elle est composée de couches homogènes alternées avec des densités ρ_1 et ρ_2 , des vitesses transversales c_{T1} et c_{T2} et des vitesses longitudinales c_{L1} et c_{L2} , noyées dans un matériau solide homogène et caractérisées par les paramètres mécaniques ρ_0 , c_{T0} et c_{L0} , comme illustré dans la figure (II.1). Les épaisseurs des couches le long de la direction sont indiquées par : t_1 et t_2 .

Les couches solides homogènes s'étendent indéfiniment dans le plan yz , ce qui entraîne des variations périodiques dans les propriétés mécaniques du cristal, telles que $\rho=\rho(x)$, $c_T=c_T(x)$ et $c_L=c_L(x)$ dans une direction unique dans l'espace. Les ondes élastiques se produisent habituellement à la surface du cristal phononique unidimensionnel.

Les cristaux phononiques 1D sont composés de deux matériaux solides où les ondes mécaniques se propagent périodiquement sous forme d'ondes élastiques. Dans le même ordre d'idées que le cas électromagnétique, prenons l'exemple d'une onde plane élastique (transversale ou longitudinale), qui se produit habituellement à la surface d'un cristal phononique avec une bande interdite phononique (Figure II.4) [44].

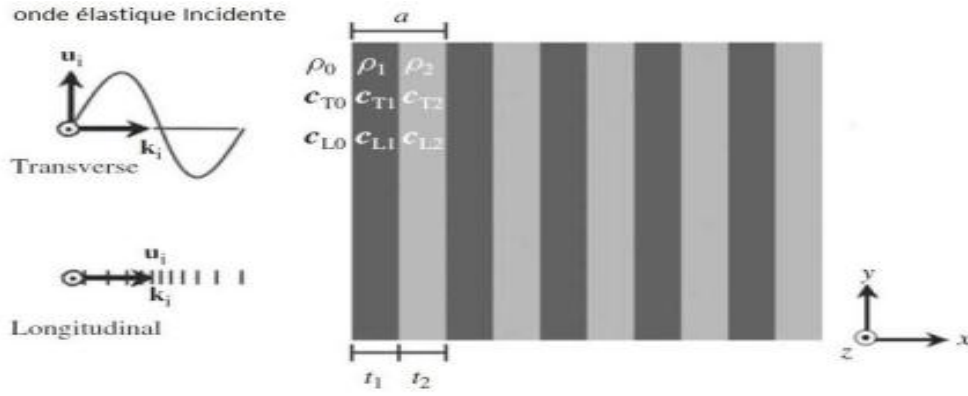


Figure II.4: Schéma de principe de la structure à cristal phononiques unidimensionnelle finie (1D-PnCs) [44].

Les 10 couches solides alternées dans la structure périodique présente des densités ρ_1 et ρ_2 , avec des vitesses transversales et longitudinales de c_{T1} , c_{T2} , c_{L1} et c_{L2} , et des épaisseurs de couches de t_1 et t_2 , respectivement. Le cristal phononique présente les caractéristiques mécaniques suivantes : $\rho=\rho(x)$, $c_T=c_T(x)$ et $c_L=c_L(x)$. Les ondes d'incidence normale des ondes élastiques dans les couches d'un milieu solide homogène. ρ_0 , c_{T0} et c_{L0} sont périodiquement répartis le long de la direction x .

II.4.3. Structures à cristaux phononiques infinies

Une structure unidimensionnelle à cristal phononique est considérée comme infinie lorsque tout l'espace est rempli de la structure périodique. Grâce à cette hypothèse, nous pouvons utiliser des méthodes numériques relativement basiques afin de déterminer l'existence de bandes phononiques interdites. De plus, elle convient davantage car elle aborde directement la propagation des désodés dans le cristal phononiques 1D. Il est important de souligner que les bandes interdites sont des gammes de fréquences où les ondes acoustiques ne peuvent pas se propager dans la structure en question.

Dans cette partie, nous considérons que la structure à CnPs-1D est infinie dans l'espace et nous examinons si une onde acoustique ou élastique de fréquence ω peut se propager dans cette structure périodique infinie. Il a été observé que la relation entre la fréquence ω et le vecteur d'onde k est donnée pour une onde acoustique qui se propage dans un matériau solide homogène, que ce soit en fonction du caractère transversal ou longitudinal de cette onde.

Où : $\rho=\rho(x)$, $c_T=c_T(x)$ et $c_L=c_L(x)$: sont les propriétés mécaniques du cristal phononique unidimensionnel et $u_s=u_s(x)$, $u_n=u_n(x)$ et $u_z=u_z(x)$ sont les composantes cartésiennes du vecteur de déplacement spatial $u=u_n(x)$.

Cela implique que les ondes sonores peuvent être diffusées de manière autonome sous forme d'ondes élastiques longitudinales (données par u_x) ou d'ondes élastiques transversales (données par u_y et u_z) dans des cristaux phononiques unidimensionnels.

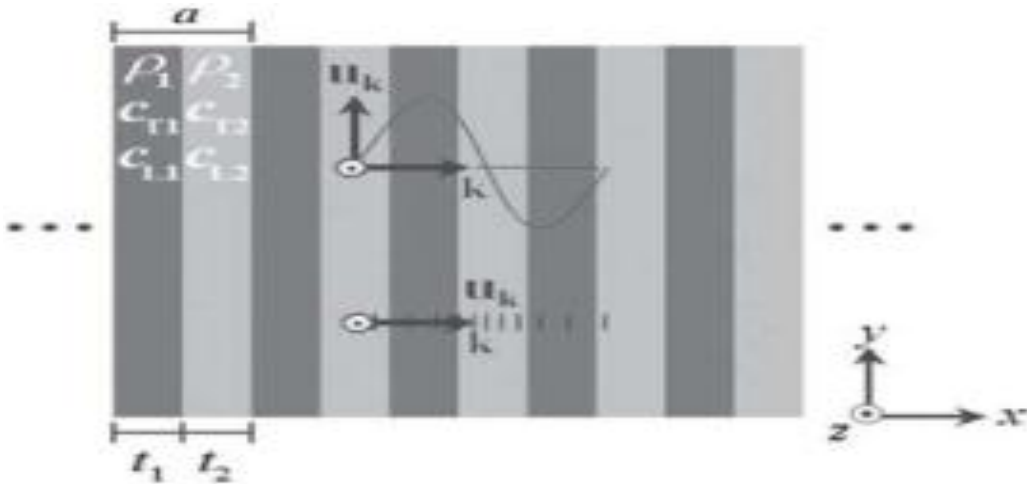


Figure II.5: Structure infinie à cristal phononique unidimensionnel [44].

Dans un cristal phononiques infiniment solide et solide. La structure périodique se compose de couches solides alternes disposées à l'infini, comportant des densités ρ_1 et ρ_2 , des vitesses transversales et longitudinales c_{T1} , c_{T2} , c_{L1} et c_{L2} , ainsi que des épaisseurs t_1 et t_2 . Il existe une bande interdite phononique dans les cristaux phononiques infinis.

Il est possible d'analyser ces structures en calculant la relation de dispersion $\omega=\omega(k)$ des ondes élastiques qui se propagent dans le cristal phononique [44].

II.5. Méthode de la Matrice de Transfert

Les équations locales et les conditions d'interface sont utilisées pour étudier la propagation des ondes dans les milieux multicouches. On utilise une matrice globale pour représenter un vecteur à travers les différentes interfaces, garantissant ainsi la continuité des données. Il est essentiel d'avoir des problèmes bien définis et des matrices bien structurées afin d'obtenir une solution précise.

Si l'environnement multicouche est périodique, on utilise les ondes de Bloch ou les ondes de Floquet, tandis que pour un environnement continu, le développement en série de Pano propose une solution analytique [47].

II.5.1. Super-réseaux unidimensionnels

Prenons l'exemple d'un super-réseau composé d'une série de deux couches, comme le montre la figure II.7. Les deux couches, 1 et 2, présentent des épaisseurs d_1 et d_2 respectives, ainsi que des impédances Z_1 et Z_2 respectives [48].

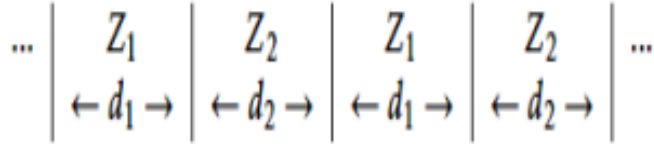


Figure II.6: Un super-réseau 1D avec des couches alternées d'impédances Z_1 et Z_2

Les équations fondamentales de l'acoustique sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -Y \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases}, \quad c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \dots \dots \dots \text{(II.1)}$$

Où p est la pression, v est la vitesse des particules, ρ est la masse volumique et Y est le module de Young. Ces équations sont équivalentes à:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \tau = Y \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases} \dots \dots \dots \text{(II.2)}$$

Où τ est la contrainte et v est le déplacement des particules.

Pour une onde harmonique, la solution générique de ce système d'équations pour une couche d'impédance Z_i est une onde plane, composée d'une onde incidente d'amplitude A et d'une onde réfléchie d'amplitude B . Dans ce cas, nous pouvons écrire la solution [36,37].

$$\begin{aligned} P &= A e^{-jkx} + B e^{jkx} \\ V &= \frac{A}{Z_i} e^{-jkx} - \frac{B}{Z_i} e^{jkx} \end{aligned} \dots \dots \dots \text{(II.3)}$$

II.5.2. Formalisme matriciel

La solution utilisée dans la méthode de la matrice de transfert sera représentée par l'équation (II.3) qui est le produit d'une matrice et d'un vecteur. Ce formalisme nous donnera la possibilité de rédiger les solutions de propagation des ondes dans des structures multicouches sans aucun défaut.

Nous démontrons que certains cas spécifiques, comme les couches quartes d'onde, présentent un comportement plus facile et plus captivant.

II.5.2.1. Propagation dans une couche

À partir de l'équation (II.3), la propagation dans une couche, de la position $x = 0$ à la position x peut être écrite comme un produit de matrices:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Zi e^{-jkix} & -Zi e^{-jkix} \\ i e^{-jkix} & e^{-jkix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Zi & -Zi \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jkix} & 0 \\ 0 & e^{-jkix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.4).$$

Nous pouvons écrire:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} = Fi Hi \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.5)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Zi & -Zi \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \text{et} \quad Fi Hi = \begin{bmatrix} e^{-jkix} & 0 \\ 0 & e^{-jkix} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.6)$$

Dans l'équation (II.6), **Hi** décrit la propagation des ondes dans la couche *i* à une distance x .

On peut également noter que:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} = Fi \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.7)$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = Fi^{-1} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}$$

$$\text{avec : } Fi^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Zi} & 1 \\ -\frac{1}{Zi} & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.8)$$

De cette façon, on obtient pour la propagation à travers une couche d'impédance **Zi** et une longueur x :

$$Mi = \begin{bmatrix} \cos(kix) & -jZi \sin(kix) \\ -\frac{1}{Zi} \sin(kix) & \cos(kix) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.9)$$

II.5.2.2. Propagation dans une bicouche

Pour écrire la propagation dans une bicouche, nous utilisons la propriété de continuité de P et V aux interfaces:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} + = \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.10)$$

Où : $x+$ appartient à Z2 et $x-$ appartient à Z1. Ainsi, nous avons:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1+d2} = M1 M2 \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.11)$$

Avec :

$$M = \begin{bmatrix} \cos(k_2 d_2) & -jZ_1 \sin(k_2 d_2) \\ -\frac{1}{Z_2} \sin(k_2 d_2) & \cos(k_2 d_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(k_1 d_1) & -jZ_1 \sin(k_1 d_1) \\ -\frac{1}{Z_1} \sin(k_1 d_1) & \cos(k_1 d_1) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(k_2 d_2) \cos(k_1 d_1) - \frac{Z_2}{Z_1} \sin(k_1 d_1) \sin(k_2 d_2) & -jZ_1 \cos(k_2 d_2) \sin(k_1 d_1) - jZ_1 \cos(k_2 d_2) \sin(k_1 d_1) \\ -\frac{1}{Z_1} \cos(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) - \frac{1}{Z_1} \sin(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) & -\frac{1}{Z_1} \sin(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) - \frac{1}{Z_1} \sin(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.12)$$

Ou sous forme condensée:

$$M = (F_2 H_2 F_2^{-1})(F_1 H_1 F_1^{-1}) \dots \dots \dots (II.13)$$

Dans un milieu périodique (d = d1 + d2), les modes de propagation sont les modes de Blochet les valeurs propres de M sont donnés par :

$$Y_1 = e^{jkd} \dots \dots \dots (II.14)$$

$$Y_2 = e^{-jkd} \dots \dots \dots (II.15)$$

La trace de la matrice M est: $(Tr(M) = Y_1 + Y_2 = 2\cos(Kd)) \dots \dots \dots (II.16)$

La loi de dispersion du milieu infini périodique bicouche peut s'écrire:

$$\cos(kd) = 1/2 Tr(M) = \cos(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) - 1/2 (Z_1/Z_2 + Z_2/Z_1) \sin(k_1 d_1) \sin(k_2 d_2) \dots \dots (II.17)$$

À l'aide de l'équation (II.17), nous pouvons calculer les courbes de dispersion. Pour un super-réseau 1D, la première zone de Brillouin s'étend pour les vecteurs d'onde entre $-\pi/2$ et $+\pi/2$. Compte tenu du terme apparaissant dans l'équation (II.13), nous pouvons maintenant donner une interprétation physique des matrices F_i :

$$F^{-1} F_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 1 \\ -\frac{1}{Z_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 & -Z_1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_2} \begin{bmatrix} 1 & r_p \\ r_p & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{t_p} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \\ \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} & 1 \end{bmatrix} = M_{12}^t \dots \dots (II.18)$$

Ou : $r_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots \dots \dots (II.19)$

r_p : est le coefficient de réflexion entre un milieu d'impédance Z_1 et un de l'impédance Z_2 .

Et $t_p = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \dots \dots \dots (II.20)$

t_p : est le coefficient de transmission du même support, il semble donc que représentera matrice de transfert via une interface entre le support 1 et le support 2.

II.5.2.3. Propagation des Amplitudes

On peut aussi relier les amplitudes A et B en position d aux amplitudes A et B en position 0 avec :

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1-} = H_1 F_1 \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots \dots \dots (II.21)$$

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1+} = \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1-} \dots \dots \dots (II.22)$$

$$\text{Manent : } \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1+} = H1F1 \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \text{ et } \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_{d1+} = F_2^{-1} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1-} \dots\dots\dots(\text{II.23})$$

Après propagation à travers la Z2, on obtient :

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1+} = \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1-} = (F_2 H H_2) (F_2^{-1} F_1 H H_1) \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

$$\text{et enfin : } \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d1+} = (F_1^{-1} F_2 H H_2) (F_2^{-1} F_1 H H_1) \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 = c_1 \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots(\text{II.25})$$

Ou nous avons introduit les notations suivantes :

$$c_1 = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta^* & \alpha^* \end{bmatrix}, \text{ avec}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = (\cos(k2d2) - js \sin(k2d2)) e^{-jk2d2} \\ \beta = jD12 \sin(k2d2) e^{-jk1d1} \\ s = \frac{1}{2} \left(\frac{Z1}{Z2} + \frac{Z2}{Z1} \right) \\ D12 = \frac{1}{2} \left(\frac{Z1}{Z2} - \frac{Z2}{Z1} \right) \end{array} \right. \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

Ainsi, nous avons exprimé les valeurs des amplitudes **A** et **B** en position **d** comme unproduit entre une matrice et le vecteur des valeurs initiales de ces amplitudes, on remarque que : $\text{Det}(c_1) = \alpha\alpha^* - \beta\beta^* = 1$(II.27)

$$\text{et: } \frac{1}{2} T_r(C_1) \frac{\alpha + \alpha^*}{2} = \text{Re}(\alpha) = \cos(k1d1) \cos(k2d2) - S \sin(k1d1) \sin(k2d2) = \frac{1}{2} T_r(M) \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

II.5.2.4. Transmission via une bicouche

La propagation d'une onde élastique à travers la bicouche présentée dans la figure II.8 est maintenant examinée en utilisant le formalisme des paragraphes précédents. L'objectif est de déterminer les coefficients de transmission et de réflexion à l'aide d'une structure bicouche de cette nature.

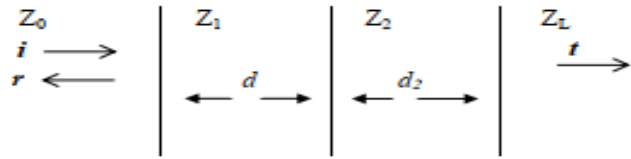


Figure II.7: Une bicouche 1D avec des impédances Z1 et Z2 avec des couches externes d'impédances Z0 et ZL [48]

Pour Z0 et ZL arbitraires, nous dérivons en utilisant l'équation (II.43) l'ensemble d'équations suivant:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_L = (F_L^{-1} F_1) C1 (F_L^{-1} F_0) \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 = M \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots(\text{II.29})$$

Maintenant, en prenant en compte le fait qu'aucune onde ne pénètre dans la bicouche à partir du support de sortie d'impédance ZL, c'est-à-dire $B_L = 0$, nous pouvons

obtenir les coefficients de transmission (t) et de réflexion (r) qui sont donnés par :
 $t=A_1/A_0$ et $r=B_0/A_0$:

$$\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots(\text{II.30})$$

En résolvant le système d'équations, nous obtenons:

$$r = M_{21}/M_{22} \text{ et } t = \det(M)/M_{22} \dots\dots\dots(\text{III31})$$

II.5.2.5. Transmission via N bicouches

Nous étudions maintenant la propagation d'une onde élastique à travers un système composé de N bicouches, comme indiqué sur la figure II.9.

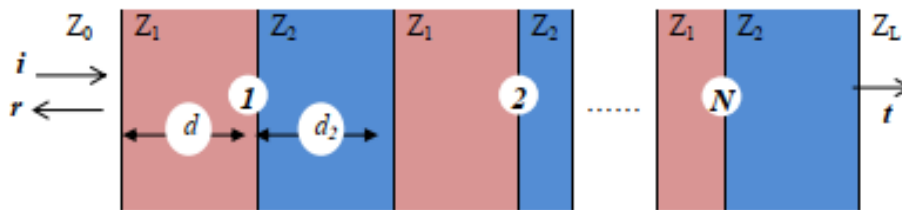


Figure II.8.: Un système à cristal phononiques 1D composé de N bicouches.

Pour un système de N bicouches, on peut écrire:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_L = (C_1) \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_{L(N-1)} = C_1^N \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots(\text{II.31})$$

Ainsi, en considérant une couche d'entrée d'impédance Z0 et une couche de sortie d'impédance ZL, la transmission est donné par:

$$\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = M^T \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Avec : } M^T = (F_L^{-1}F_1)C_1^N(F_L^{-1}F_0) \dots\dots\dots(\text{II.32})$$

II.5.2.6. Transmission par N bicouches avec un défaut

La propagation d'une onde élastique à travers le système suivant, constitué de N bicouches et d'un défaut central, est examinée (la figure II.10) [48] :

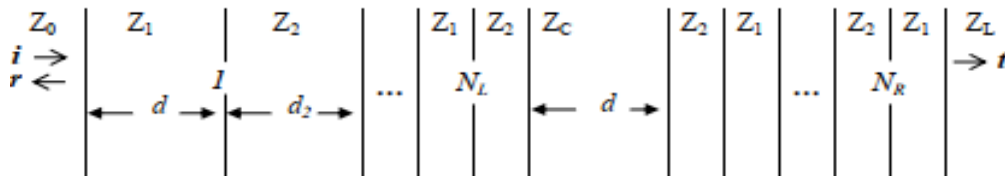


Figure II.9. Un système 1D composé de N bicouches et d'un défaut central de largeur d_c et d'impédance Z_c

Dans ce cas la transmission est donnée par :

$$\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = M^T \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Avec : } M^T = M^{TR}H_C M^{TL} \dots\dots\dots(\text{II.33})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} M^{TL} = (F_1^{-1} F_0) C_1^{N_L (F_1^{-1} F_0)} \\ M^{TR} \\ C_2 = (F_2^{-1} F_1 H_1) (F_1^{-1} F_2 H_2) \end{cases} = (F_1^{-1} F_0) C_2^{N_R (F_1^{-1} F_0)} \dots \dots \dots \text{(II.34)}$$

II.5.2.7. Transmission à travers N bicouches avec couches quart d'onde

Une expression analytique simple du coefficient de transmission d'une onde à travers N bicouches dont l'épaisseur est égale au quart de la longueur d'onde est recherchée. Cela nous aidera à établir une corrélation entre le facteur de qualité du résonateur décrit dans la section II.4.2.6 et le nombre de bicouches et le décalage d'impédance entre les différentes couches structurales.

Dans un premier temps, nous exposons deux résultats préliminaires :

$$\begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \alpha & \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha + \beta & 0 \\ 0 & \alpha - \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{-1}{2} \end{bmatrix} \dots \dots \dots \text{(II.35)}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_1 & \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 & \beta_2 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_1 & \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 & \beta_2 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2 & \alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1 \\ \alpha_2 \beta_1 + \alpha_1 \beta_2 & \alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots \text{(II.36)}$$

Puisque nous utilisons des couches quart d'onde, nous réécrivons la matrice C_1 de l'équation (II.26) en utilisant :

$$d_1 = \frac{\lambda_1}{4} \text{ et } d_2 = \frac{\lambda_2}{4} \text{ ou équivalent : } K_2 d_2 = \frac{\pi}{2} \dots \dots \dots \text{(II.37)}$$

Donc, nous pouvons obtenir: $C_1 = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & \alpha \end{bmatrix}$,

$$\text{Avec : } \begin{cases} \alpha = -s \\ \beta = -D12 \\ S = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \\ D_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right) \end{cases} \dots \dots \dots \text{(II.38)}$$

Dans ce cas : $\text{Det}(C_1) = \alpha^2 - \beta^2 = 1 \dots \dots \dots \text{(II.39)}$

Et : $\alpha + \beta = \frac{Z_1}{Z_2}$, $\alpha - \beta = \frac{Z_2}{Z_1} \dots \dots \dots \text{(II.40)}$

En utilisant l'équation II.35, nous obtenons :

$$C_1^N = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_1 & \beta_1 \end{bmatrix}, \text{ Avec } \begin{cases} \alpha_{N = \frac{(\alpha + \beta)^N + (\alpha - \beta)^N}{2}} \\ \beta_{N = \frac{(\alpha + \beta)^N - (\alpha - \beta)^N}{2}} \end{cases} \dots \dots \dots \text{(II.41)}$$

Nous notons que :

$$\text{Det}(C_1^N) = \alpha_N^2 + \beta_N^2 = (\text{det}(C_1^N)) = 1 \dots \dots \dots \text{(II.42)}$$

$$\alpha_N + \beta_N = (\alpha + \beta)^N, \alpha_N - \beta_N = (\alpha - \beta)^N \dots \dots \dots \text{(II.43)}$$

Dans le cas général, sans hypothèse sur les valeurs de Z_0 et Z_L , d'après l'équation (II.32), les coefficients de réflexion et de transmission sont donnés par :

$$r = -\frac{M_{21}^T}{M_{22}^T}, \text{ et } t = \frac{\det(M^T)}{M_{22}^T} \dots\dots\dots(\text{II.44})$$

En utilisant les expressions II.5, II.6 et II.8 :

$$F_1^{-1}F_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 1 \\ -\frac{1}{Z_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 & Z_0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{Z_1} & 1 - \frac{Z_0}{Z_1} \\ 1 - \frac{1}{Z_1} & 1 + \frac{Z_0}{Z_1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.45})$$

Donc, étant donné leurs formes, selon l'équation (II.55), et () font la navette.

$$\text{Donc: } M^T = (F_L^{-1}F_1)C_1^N(F_1^{-1}F_0) = (F_L^{-1}F_1)(F_1^{-1}F_0) = (F_L^{-1}F_0)C_1^N \dots\dots\dots(\text{II.46})$$

$$\text{Et nous obtenons : } F_1^{-1}F_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 1 \\ -\frac{1}{Z_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 & Z_0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{Z_1} & 1 - \frac{Z_0}{Z_1} \\ 1 - \frac{1}{Z_1} & 1 + \frac{Z_0}{Z_1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.47})$$

Ce qui conduit à l'expression suivante de la matrice de transmission M^T :

$$M^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{Z_1} & 1 - \frac{Z_0}{Z_1} \\ 1 - \frac{1}{Z_1} & 1 + \frac{Z_0}{Z_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_N & \beta_N \\ \beta_N & \alpha_N \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha_N \beta_N + (\beta_1 + \beta_2) \frac{Z_0}{Z_L} & \alpha_N + \beta_2 + (\alpha_2 - \beta_1) \frac{Z_0}{Z_L} \\ \alpha_N \beta_N + (\alpha_1 - \beta_2) \frac{Z_0}{Z_L} & \alpha_N + \alpha_2 + (\alpha_1 - \beta_1) \frac{Z_0}{Z_L} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.48})$$

En introduisant ces expressions dans l'équation (II.44), le coefficient de transmission

$$\text{devient } = \frac{\det M^T}{M_{22}^T}$$

$$\text{Ou : } \det M^T = \det F_L^{-1} \det F_0^1 \det C_L^{-1} = \frac{Z_0}{Z_L} \text{ et } M_{22}^T = \frac{1}{2} \left((c)^N + \left(\frac{1}{n}\right)^N \frac{Z_0}{Z_L} \right) \dots\dots\dots(\text{II.49})$$

avec l'introduction des notations suivantes:

$$\alpha + \beta = \frac{Z_1}{Z_2} = n \text{ et } \alpha - \beta = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{1}{n} \dots\dots\dots(\text{II.50})$$

alors l'expression de t sera :

$$T = \frac{Z_0}{Z_L} \frac{2}{\frac{Z_L n^{2N+1}}{Z_0} + \frac{Z_0}{n^N}} = \frac{2Z_0}{Z_L n^{2N} + \frac{Z_0}{n^N}} = \frac{2n^N}{\frac{Z_L n^{2N+1}}{Z_0} + \frac{Z_0}{n^N}} \dots\dots\dots(\text{II.51})$$

Le coefficient de transmission en énergie peut s'écrire:

$$T = \frac{Z_L}{Z_L} t^2 = \frac{Z_L}{Z_0} \frac{4n^N}{\frac{Z_L n^{2N+1}}{Z_0} + \frac{Z_0}{n^N}} \dots\dots\dots(\text{II.52})$$

On peut noter que dans le cas particulier où $Z_0 = Z_L$, le coefficient transmission est:

$$T = t^2 = \frac{4n^{2N}}{(1+n^{2N})^2} \dots\dots\dots(\text{II.53})$$

Où N est le nombre de bicouches, donc 2N est le nombre des couches.

Maintenant, si l'on considère le cas où $Z_0 = Z_2$ et $Z_L = Z_1$ alors le coefficient de transmission en énergie devient:

$$T = t^2 = \frac{4n2^{N+1}}{(1+n2^{N+1})^2} \dots\dots\dots (II.54)$$

Un exemple de calcul du spectre de transmission et de réflexion en fonction de la fréquence est illustré dans la figure II.13, qui illustre un cristal phoniques 1D constitué de 10 couches alternes d'plomb et de l'Epoxy. Le comportement du cristal à l'égard de l'autre cristal est visible. Les bandes interdites se forment lorsque les ondes acoustiques à incidence normale se propagent entre $3.128 \cdot 10^8$ Hz et $9.485 \cdot 10^8$ Hz.

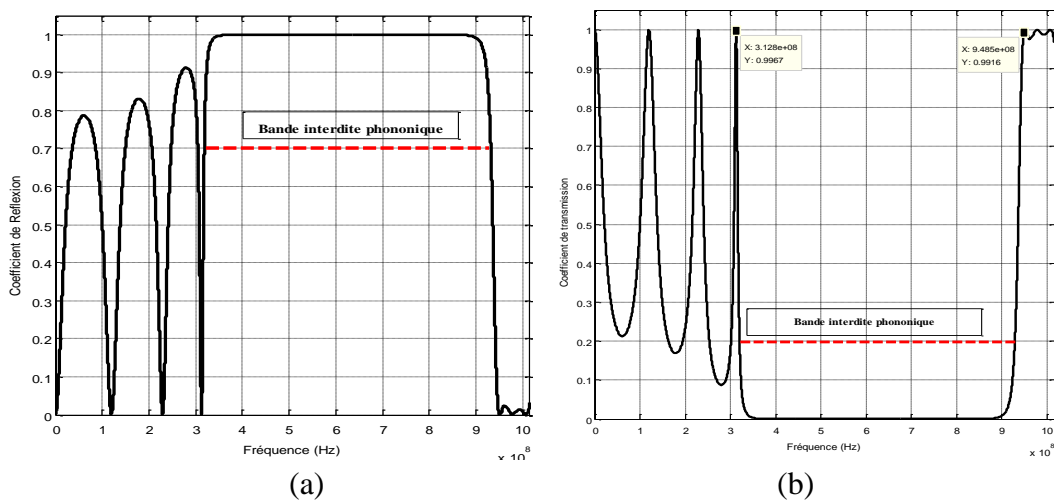


Figure II.10: Coefficients de transmission et de réflexion des ondes longitudinale en fonction de fréquences pour un cristal 1D pour 8 couches: **(a)** Réflexion **(b)** Transmission.

II.6. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons examiné de manière générale les concepts fondamentaux liés aux capteurs et à la science des matériaux. Nous avons examiné les définitions, les caractéristiques métrologiques des capteurs et leurs principes de fonctionnement dans le domaine de la détection. Nous avons également souligné les diverses techniques employées pour évaluer la salinité des solutions : les techniques électriques, les techniques à base de cristaux photoniques et les techniques basées sur les cristaux phoniques. Les capteurs à base des cristaux acoustiques sont généralement considérés comme une nouvelle technologie intéressante qui offre de nombreuses applications dans divers domaines, tels que le biomédical, la surveillance environnementale.

CHAPITRE III

A decorative border resembling a scroll, with a vertical line on the left and horizontal lines at the top and bottom. The corners are rounded and feature small circular motifs.

Méthodes de détection des métaux lourds dans l'eau

III.1. Introduction

Les capteurs jouent un rôle de plus en plus crucial dans différents secteurs tels que la santé, la surveillance de l'environnement et l'automatisation industrielle dans notre société contemporaine. Les capteurs nous offrent la possibilité de recueillir et de traiter des informations sur notre environnement, nous offrant ainsi des informations précises et opportunes. Les avancées technologiques dans le domaine des capteurs et de la science des matériaux ont permis d'améliorer leur taille, leur résistance et leur sensibilité, ce qui a ouvert la voie à de nouvelles applications et innovations. Néanmoins, même si elles sont couramment utilisées, il existe encore de nombreux défis dans la conception des capteurs, tels que la diminution de la consommation d'énergie, l'amélioration de la fiabilité des données du capteur et l'élaboration de nouvelles méthodes de détection.

Les capteurs sont à l'origine des dispositifs qui repèrent et réagissent aux modifications de l'environnement qui les entoure. La température et la pression peuvent être modifiées, tout comme la lumière et le son. Par la suite, ces données physiques sont converties en un signal électrique qui peut être traité et analysé par un ordinateur ou un autre dispositif électronique. Différents types de capteurs électroniques sont disponibles, chacun possédant ses propres caractéristiques et utilisations. Les capteurs les plus fréquemment utilisés sont les capteurs de température, de pression, de proximité et de mouvement [5,47].

Par exemple, on retrouve fréquemment des capteurs de température dans les thermostats, les réfrigérateurs et les climatiseurs afin de repérer les variations de température. De leur côté, les capteurs de pression servent à repérer les variations de pression et peuvent être employés dans des domaines tels que les systèmes de surveillance de la pression des pneus et les baromètres. La présence ou l'absence d'un objet à une distance donnée est détectée par des capteurs de proximité, qui sont fréquemment employés dans les systèmes d'automatisation industrielle. Les systèmes de sécurité et les contrôleurs de jeu utilisent fréquemment des capteurs de mouvement pour détecter les mouvements [48].

Les avancées récentes dans la technologie des capteurs ont entraîné la création de capteurs bioélectroniques qui peuvent repérer les modifications de l'environnement liées spécifiquement aux processus biologiques, comme la présence de certains produits chimiques sur les bactéries. Le potentiel de ces capteurs est de transformer des secteurs tels que la santé et la surveillance de l'environnement.

III.2. Différentes méthodes de détection des métaux lourds dans l'eau

En réagissant avec des composés organiques, les métaux lourds ont un effet néfaste sur l'environnement aquatique, le sol et les plantes, en particulier dans les zones à forte concentration. L'effet toxique des métaux peut différer en fonction des caractéristiques du métal, en particulier le zinc. Le cuivre, le fer et le manganèse sont des éléments essentiels pour les fonctions corporelles normales, à des concentrations modérées. Les éléments environnementaux tels que la salinité, le pH, la température et la sédimentation influencent l'accumulation des métaux. Dans les milieux aquatiques, la solubilité des métaux lourds varie en fonction du pH, de l'oxygène dissous et de la sédimentation. En général, une augmentation de l'acidité dans ces milieux augmente la solubilité de ces métaux toxiques.



Figure III.1. Image montrant le capteur d'ondes sonores

III.2.1. Définition des métaux lourds :

Les éléments naturels de la croûte terrestre sont les métaux lourds. Leur décomposition ou leur fragmentation à basse température sont impossibles et ils pénètrent dans nos corps par l'eau potable, la nourriture ou l'air. On peut définir les métaux lourds de la manière suivante : Tout matériau dont la densité dépasse 5 (g/cm³). Tout métal dont le nombre atomique est plus élevé que celui du sodium (Z=11). Tout métal susceptible de causer des dommages aux systèmes biologiques. Les métaux lourds sont définis par un géologue comme tout métal qui interagit avec les pyrimidines. Les métaux lourds essentiels dans le traitement des déchets liquides sont : Ni, Hg, Cr, Cd, Pb, Se, Zn [49].

Les métaux lourds les plus couramment liés aux notions de pollution et de toxicité en sciences environnementales sont : Al (aluminium), As (arsenic), Ba (baryum), Cd (cadmium), Cr (chrome), Cu (cuivre), Pb (plomb), Mn (manganèse), Hg (mercure) et Ni (nickel).



Figure III.2. Image contenant certains métaux lourds

Le tableau périodique indique que les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en quantités très faibles le plus souvent. Ces métaux de transition sont tous partiellement remplis d'orbitale, dont les lanthanides et les actinides (groupes d et f du tableau périodique de Mendeleïev), sauf le scandium (Sc), le titane (Ti) et l'yttrium (Y). Les métaux lourds comprennent également les éléments intermédiaires moins électropositifs du groupe p, tels que le plomb (Pb) et l'étain (Sn).

Bloc s		Bloc d										Bloc p						
H		Métaux lourds de densité > 5															He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Bloc f															
Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr			

Tableau III.1: Tableau périodique des éléments [50].

III.3. Classification des métaux lourds

- a. **Minéraux essentiels:** Ce sont des éléments indispensables à de nombreux processus cellulaires et présents en très faibles pourcentages dans les tissus biologiques. Certains d'entre eux peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. Ces éléments sont : Cuivre (Cu), Zinc (Zn), fer (Fe).
- b. **Métaux toxiques :** Ils ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faibles concentrations. Ils n'ont aucun effet bénéfique sur la cellule. Ces éléments sont : Plomb (Pb), Mercure (Hg) et Cadmium (Cd) [51].

Métaux	La plante	Animal	Densité (g/cm ³)
Pt	T ^a	T	21,4
Hg	T	T	13,59
Pb	T	T	11,34
Mo	E	E T	10,2
Cu	E T	E T	8,92
Ni	T	E	8,90
Co		E	8,9
Cd	T	T	8,65
Fe	E	E	7,86
Sn		E	7,28
Cr		E	7,20
Mn	E T	E	7,2
Zn	E T	E	7,14
V	E	E	5,96

E : Basique , ET : Essentiellement toxique à haute densité , T :Toxique

Tableau III.2:Classification des métaux lourds selon leur densité et leur toxicité [52].

III.4. Sources d'éléments lourds dans le milieu aquatique

Tous les milieux aquatiques, notamment les grands milieux environnementaux à proximité desquels se déroule la vie urbaine et rurale, sont touchés par les métaux lourds de différentes façons, entraînant la pollution, soit par des sources naturelles, soit par différentes activités humaines, comme suit.

III.4.1.Sources naturelles

La libération naturelle des éléments lourds dans l'environnement aquatique se fait par des processus géologiques, tels que l'altération des roches. Ces métaux, provenant de sources naturelles comme les roches et les dépôts, se retrouvent dans l'espace aquatique. Ils sont solubles ou suspendus dans les eaux de pluie qui s'écoulent à la surface du sol ou transportés d'un endroit à un autre par le vent. La pollution de l'environnement aquatique est également causée par les activités volcaniques, qui sont des sources naturelles. En outre, les précipitations acides contenant différents polluants, y compris les éléments lourds, peuvent également apporter leur contribution à cette pollution en dissolvant le sol et en libérant ces éléments dans l'eau [53,54].

III.4.2. Sources humaines

L'activité industrielle est une source majeure de pollution par les métaux lourds dans l'environnement, car de nombreuses industries, telles que l'industrie pétrolière, les raffineries, la production de benzène, les usines de fer, de cuivre, de verre, d'aluminium, les

tanneries et les activités agricoles telles que l'utilisation d'engrais, de pesticides et d'autres activités diverses, sont des sources de pollution. De plus, les éléments lourds peuvent atteindre l'eau par le biais de la pollution des déchets de consommation.

	Valeurs moyennes des émissions de certains métaux lourds (tane-1)	
	Sources naturelles	Sources humaines
Cr	44000	3077
Cu	28000	38189
Ni	30000	55642
Pb	12000	331854
Zn	45000	131866

Tableau III.3: Valeurs moyennes d'émissions de certains métaux lourds dans le monde.

III.5. Aperçu sur quelques métaux lourds

III.5.1.1. Le plomb

Le plomb est un métal épais, d'un gris bleuté, à point de fusion faible, facile à marteler et à plaquer. Il s'associe aisément à d'autres métaux pour créer des alliages. Grâce à ces caractéristiques, le plomb est employé depuis des milliers d'années et est utilisé dans de nombreux produits : batteries, pigments, peintures, verre, poids, enrobage des câbles, vêtements de protection contre les radiations. Le plomb est représenté par le symbole chimique Pb, abréviation du nom latin "Plomb". Il possède un numéro atomique 82, un poids atomique de 207,2 g/mol, une densité de 11,34 g/cm³ et un point de fusion de 327,46 °C. Le plomb brut constitue 0,005% de la croûte terrestre, selon l'Organisation de coopération et de développement économiques [55].



Figure III.3: Image illustrant le métal plomb.

III.5.1.2. Sources de plomb

a. Les sources naturelles : les sources de plomb remontent aux époques géologiques les plus anciennes, où il se trouve naturellement dans la croûte terrestre à des concentrations variant entre 5 mg/g et 50 mg/g. Le plomb est libéré dans la surface terrestre par divers événements naturels, notamment l'érosion, l'exposition et les activités volcaniques. Les roches de charbon noir se fissurent également.

b. les sources humaines : libèrent le plomb de la croûte terrestre, le faisant ainsi se répandre dans l'environnement, augmentant ainsi l'exposition des humains et des écosystèmes au plomb. Le plomb est libéré dans l'environnement à travers des processus de fusion métallique et d'extraction minière. La production, l'utilisation ou le raffinage de composés contenant du plomb, le rejet des déchets contenant du plomb et la combustion de carburants et de bois contribuent à la libération de plomb dans l'atmosphère. L'ajout de tétra éthyle de plomb ($C_8H_{22}Pb$) aux carburants utilisés pour les voitures entraîne une augmentation de la libération de plomb dans l'atmosphère. Certaines industries et petits métiers, tels que la réparation d'outils électroniques à l'aide de soudures au plomb et les travaux de peinture domestiques, constituent des sources fixes et mobiles de plomb dans les zones à forte densité de population et à proximité des fonderies. Les émissions de plomb dans l'atmosphère se déplacent vers d'autres environnements où le plomb se dépose dans le sol, les eaux de surface et sur les parties aériennes des plantes, puis se déplace vers les animaux et les humains [55].

III.5.2. Zinc

Le zinc est un élément chimique métallique de couleur bleue, symbolisé par Zn, et il est essentiel au développement de la vie. Il a de nombreuses utilisations. Sa toxicité pour les organismes marins n'a été prouvée que dans des concentrations élevées, où il affecte la reproduction des huîtres et la croissance des larves. Il est également largement présent dans la croûte terrestre, se présentant naturellement sous forme d'oxyde de zinc (ZnO), de silicates (H_2O , SiO_2 , ZnO_2), de carbonates de zinc ($ZnCO_3$), etc. Sous sa forme pure, le zinc est un minéral cristallin insoluble dans l'eau. Il est principalement utilisé comme revêtement anticorrosion pour l'acier, dans les piles sèches et le traitement des eaux industrielles. Il est souvent associé au plomb et au cadmium dans les minerais, avec une teneur variant de 4 à 20%. Sa principale matière première est la sphalérite (blende), un

sulfure de zinc (ZnS). Le numéro atomique du zinc est 30, son poids atomique est 65,409 g/mol, sa densité est de 7,14 g/cm³, et son point de fusion est 787,15 °F (419,5 °C) [55].



Figure III.4: Image illustrant le métal Zinc

III.5.2.1. Sources de Zinc

Le zinc peut provenir de diverses sources telles que l'exploitation minière industrielle (traitement des minéraux, raffinage, galvanisation du fer, gouttières de toit, batteries, colorants, plastiques et caoutchouc), les applications agricoles (aliments pour animaux, fumier), les activités urbaines (circulation routière, incinération des déchets), et l'introduction de zinc dans les zones portuaires par le biais de la décomposition des anodes pour protéger les structures des bateaux contre la corrosion [55].

III.5.2.2. Les caractéristiques biologiques et toxiques du zinc

Le zinc est l'un des éléments les plus abondants chez l'être humain (15 mg/jour) et il participe à la croissance des os, au développement du cerveau et de la reproduction, au développement embryonnaire, au goût, à l'odorat, à la fonction immunitaire et à la cicatrisation des plaies. Il ne devient pas toxique pour les organismes aquatiques prioritaires, bien qu'il agisse à des concentrations élevées sur la prolifération et la croissance des moules [49].

III.5.3. Nickel

Le nickel (Ni) est un métal dur, de couleur argentée tirant vers le blanc, ayant un numéro atomique de 28, une masse atomique de 58,71 g/mol, une densité de 8,9 g/cm³, un point de fusion de 1455°C et un point d'ébullition de 2837°C. Le nickel joue un rôle dans l'activation de plusieurs enzymes telles que les phosphatases et les carboxylases, et son rôle principal a été identifié en induisant des carences en ce métal chez les volailles et les rats.

Le nickel forme des complexes dans les systèmes biologiques avec l'adénosine triphosphate, les acides aminés, les peptides et les protéines. Le nickel est présent en grande quantité dans le pétrole et le charbon en raison de la capacité élevée des composés organiques à l'absorber. Le nickel est également présent dans le sol à des concentrations allant de 0,2 à 450 mg/kg, cette grande variation étant due à la diversité des sols qui peuvent absorber le nickel à des degrés variables [56].



Figure III.5 : Image illustrant le métal Nickel

III.5.3.1.Sources de Nickel :

Le nickel est naturellement présent dans la croûte terrestre et se répand également dans l'air, le sol, les sédiments et l'eau en raison d'une gamme de facteurs, qu'ils soient naturels ou artificiels. La dispersion du nickel dans l'air est attribuable à diverses sources naturelles, telles que les éruptions volcaniques, les émissions de poussières massives, ainsi qu'à des sources anthropiques. Dans les zones aquatiques, sa présence est due aux sources anthropiques, le nickel présent dans l'eau résultant de la désintégration des roches, de l'érosion du sol et des déchets industriels déversés dans l'eau. La plupart des formes de nickel se trouvent sous forme de cations Ni^{2+} dans l'eau, et l'eau potable peut contenir du nickel provenant des tuyaux utilisés pour la distribution d'eau. Plusieurs facteurs contribuent à la variation de la concentration en nickel entre les eaux souterraines et les eaux de surface, notamment le pH et la profondeur. Dans le sol, sa présence peut être attribuée à des activités humaines telles que l'exploitation minière, la fusion, la combustion de charbon [57,58].

III.5.4. Cuivre

Le cuivre (Cu) se distingue par sa conductivité élevée, sa grande capacité à conduire la chaleur et l'électricité. Il a une couleur brun rougeâtre qui se recouvre avec le temps

d'une couche verte résultant de son exposition à l'air humide. Il a un numéro atomique de 29, une masse atomique de 63,54 g/mol, une densité de 8,96 g/cm³, un point de fusion de 1083°C et un point d'ébullition de 2567°C. Le cuivre entre dans la composition de nombreux enzymes et aide à extraire l'énergie des aliments et à absorber le fer, jouant ainsi un rôle important dans la prévention de l'anémie. Cependant, une concentration élevée de cuivre dans le corps peut entraîner de nombreuses maladies, la plus célèbre étant la maladie de Wilson [58].



Figure III.6: Image illustrant le Cuivre.

III.5.4.1. Applications du cuivre dans la vie

- a) Industrie électrique : c'est elle qui consomme la plus grande quantité de cuivre, car elle est utilisée dans la fabrication des fils, générateurs électriques.
- b) Industrie des alliages : tels que l'alliage de bronze, l'alliage cuivre-nickel-zinc, l'alliage de bronze, Phosphore et étain, alliage de bronze et de silicium, alliage de bronze, de cuivre et d'aluminium.
- c) Soudure et alimentation [59].

III.5.5. Magnésium

Le manganèse (Mn) se distingue par sa couleur argentée grisâtre, sa difficulté de fusion par rapport aux autres métaux de son groupe. Il a un numéro atomique de 25, une masse atomique de 54,94 g/mol, une densité de 5,95 g/cm³, un point de fusion de 1246°C et un point d'ébullition de 2061°C. Il se trouve naturellement associé à plusieurs autres métaux, dont le fer, et est considéré comme un élément essentiel pour les organismes vivants, intervenant dans la composition de nombreux enzymes où il agit en tant qu'activateur métallique de l'activité du pyruvate carboxylase. Le manganèse est stocké dans le foie et la rate chez les humains, et il est moins toxique que le cuivre et le fer.

Cependant, une exposition excessive peut entraîner le syndrome du manganèse, provoquant des troubles neurologiques parfois irréversibles [56].



Figure III.7: Image illustrant le métal « Magnésium »

III.5.6. Cadmium

Le cadmium est un élément chimique de symbole Cd et de numéro atomique 48. Le cadmium a été découvert en 1808. Par Magnus Martin af Pontin, mais en 1817 l'Allemand Friedrich Störmer. Le configurer pour la première fois. Le nom cadmium vient du mot latin cadmium, « calamine », l'ancien nom sous lequel...

On l'appelle carbonate de zinc - le cadmium était extrait de ce minerai autour de la ville de Thèbes, qu'il fonda Cadmus, dont le château porte le nom, kadmeia en français, Cadmée Le cadmium est un métal blanc et tendre Et malléable. Il se déforme au contact de l'air.

Le cadmium se trouve dans presque tous les minerais de zinc (La teneur en cadmium varie de 0,01 à 0,05 %). Le cadmium se trouve également dans les minerais de plomb et de cuivre. Dans les rivières, l'absorption du cadmium est un enjeu majeur pour expliquer la concentration de cet élément dans les eaux naturelles [60].

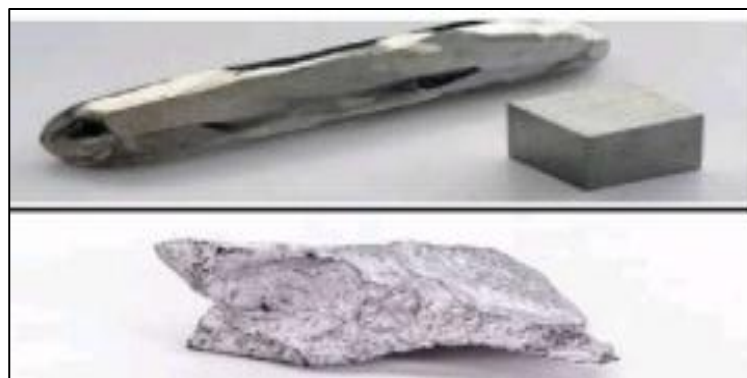


Figure III.8 : Image illustrant le métal Cadmium

III.5.7. Mercure

Le mercure est un minéral naturel qui se présente sous de nombreuses formes. Le mercure minéral est un liquide incolore. Lorsqu'il est chauffé, il se transforme en un gaz inodore et incolore. Le mercure se combine avec d'autres éléments, comme le chlore, le soufre ou l'oxygène, pour former des composés inorganiques du mercure ou « sels », qui sont généralement des poudres ou des cristaux blancs. Le mercure se combine également avec le carbone pour produire des composés organiques du mercure. Le plus courant de ces composés est le méthyle-mercure.

Le mercure présent dans l'environnement peut entraîner une augmentation des quantités de méthyle-mercure produites par ces micro-organismes.

Le mercure minéral est utilisé pour produire du chlore gazeux et de la soude caustique, et est également utilisé dans les appareils électroménagers, Mesure de la température, certaines obturations dentaires et piles [61].



Figure III.9: Image illustrant le métal Mercure

EPA	WHO/FAO	
Mil g / L	200-100 Mic g / L	Aluminium(AL)
Mil g/ L	3 Mic g / L	Cadmium(Cd)
1.3 mil g / L	2.00 Mic g / L	Cuivre(Cu)
0.0015 mil g / L	10Mic g / L	balles(Pb)
0.002 mil g/ L	6 Mic g / L	Mercure(Hg)

Tableau III.4 : concentrations maximales admissibles selon OMS

Le tableau ci-dessus, indique les concentrations maximales admissibles de métaux lourds dans l'eau recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation de protection de l'environnement [62].

III.6. Effets des métaux lourds sur la santé humaine

Le tableau suivant montre les effets de quelques métaux lourds sur la santé humaine.

Métaux lourds	Effets
Cd	Hypertension artérielle et dommages au foie
Cr	Substance cancérigène sous forme de chrome(VI)
Cu	Faible toxicité pour les animaux, écotoxicité pour les plantes et les algues à des niveaux modifiés
Hg	Toxicité chronique et aiguë
Ni	Allergies cutanées, maladies respiratoires et éventuellement cancer
Pb	Poison
As	Toxique, peut-être cancérigène
Ce	Nécessaire à faibles doses, toxique à fortes doses
Zn	Intra toxicité pour les plantes à des niveaux élevés

Tableau III.5: Effets des métaux lourds sur la santé humaine [63]

III.7. Différentes méthodes de détection des métaux lourds dans l'eau

Les techniques spectroscopiques offrent un moyen efficace de détecter les métaux lourds dans l'eau. Ces techniques reposent sur la mesure de l'effet spectroscopique produit par le métal lorsqu'il est exposé au rayonnement lumineux. Cela se fait en envoyant un faisceau lumineux sur l'eau à analyser et en enregistrant le rayonnement absorbé, réfléchi ou émis par les métaux présents dans l'eau.

III.7.1. Spectroscopie d'absorption atomique (AAS) :

Cette technique mesure les concentrations métalliques en mesurant la quantité de lumière absorbée par le métal lorsqu'il est exposé à un rayonnement lumineux. Cette technique peut être utilisée pour déterminer les concentrations de métaux lourds tels que le plomb, le mercure et le cadmium dans l'eau

III.7.2. Spectroscopie d'émission atomique (AES) :

Cette technique utilise l'émission qui se produit lorsque le métal est excité par l'énergie lumineuse pour déterminer les concentrations métalliques. Cette technique peut

être utilisée pour analyser les métaux lourds en mesurant le rayonnement émis après stimulation de l'échantillon avec l'énergie appropriée.

III.7.3. Spectroscopie d'absorption atomique dans les domaines visible et proche infrarouge (UV-VIS) :

Elle peut être utilisée pour détecter certains métaux lourds tels que le plomb et le mercure en mesurant l'absorption lumineuse des échantillons.

III.7.4. Spectre d'émission optique

Cette technique (OES) est utilisée pour analyser les métaux lourds en mesurant le rayonnement émis après stimulation avec de l'énergie.

III.7.5. Spectroscopie d'absorption atomique d'intensité

La technique (ICP-AES) est utilisée pour analyser des échantillons d'eau rapidement et avec précision à l'aide d'une source de plasma radiant.

III.8. Utilisation des techniques spectroscopiques

Les récentes avancées dans l'utilisation des techniques de chromatographie pour l'analyse des métaux lourds dans l'eau : Les récentes avancées dans l'utilisation des techniques de chromatographie facilitent une analyse précise et efficace des métaux lourds dans l'eau, contribuant ainsi à surveiller la qualité de l'eau et à protéger l'environnement.

III.8.1. Chromatographie liquide haute performance (HPLC)

Les développements dans les techniques HPLC permettent de séparer et d'analyser les métaux lourds avec une précision accrue et une vitesse plus élevée [89].

III.8.2. Chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC-MS)

Cette combinaison associe les avantages de la chromatographie liquide à l'efficacité de la spectrométrie de masse, permettant une analyse précise des métaux lourds dans l'eau.

III.8.3. Applications avancées de la chromatographie gazeuse (GC)

Les améliorations des techniques de GC permettent une analyse plus efficace et plus précise des métaux lourds.

III.8.4. Utilisation de la spectrométrie de masse à plasma induit par couplage inductif (ICP-MS)

Cette technologie analytique combine la spectrométrie d'émission plasma et la spectrométrie de masse pour fournir une capacité élevée d'analyse des métaux lourds dans l'eau à faible concentration.

III. 9. Applications des techniques de spectrométrie de masse

Les techniques de spectrométrie de masse telles que la (ICP-MS) sont utilisées pour détecter et analyser les métaux lourds dans l'eau de mer. Egalement sont appliquées à la surveillance de la pollution de l'eau, le contrôle de la qualité de l'eau et l'étude des impacts des activités industrielles sur l'environnement marin.

III.9.1. Surveillance de la pollution de l'eau

Les techniques de spectrométrie de masse sont utilisées pour surveiller et analyser les concentrations de métaux lourds tels que le mercure, le plomb et le cadmium dans l'eau de mer. Cela aide à évaluer les niveaux de pollution et à identifier leurs sources.

III. 9.2. Contrôle de la qualité de l'eau

La spectrométrie de masse peut être utilisée pour s'assurer que l'eau de mer répond aux normes de qualité définies par les autorités locales et internationales, contribuant ainsi à protéger la vie marine et la santé humaine.

III.9.3. Étude des impacts des activités industrielles

Ces techniques aident à déterminer les effets des activités humaines telles que l'industrie, l'exploitation minière et l'agriculture sur les océans et l'environnement marin. Les données peuvent être utilisées pour améliorer les pratiques environnementales et réduire les impacts négatifs.

III.9.4. Surveillance des métaux précieux

En plus des métaux lourds, la spectrométrie de masse peut être utilisée pour détecter des métaux précieux tels que l'or et l'argent dans l'eau de mer, ce qui est important pour de nombreuses industries telles que l'exploitation minière en mer et la recherche de trésors.

III.10. Différentes méthodes d'extraction des métaux lourds

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour extraire les métaux lourds de l'eau : par la filtration, la précipitation, les solvants organiques, la spectrométrie atomique et bien d'autres méthodes. Chacune de ces méthodes diffère en termes d'efficacité, de précision, de coût et de vitesse et le choix dépend du but de l'extraction, des métaux ciblés, des conditions de l'échantillon et des ressources disponibles.

III.10.1. Extraction par solvants organiques

Des solvants organiques sont utilisés pour extraire les métaux lourds de la solution aqueuse. Cela se fait en formant des complexes avec les métaux lourds dans les solvants organiques.

III.10.2. Analyse par spectrométrie atomique :

Cette méthode repose sur l'utilisation de la spectrométrie atomique pour déterminer et estimer les concentrations des métaux lourds dans les échantillons d'eau. Cette méthode offre une grande précision et une capacité à détecter une variété de métaux.

III.10.3. Utilisation de solvants organiques:

Les solvants organiques sont utilisés pour extraire les métaux lourds des échantillons d'eau, ce qui permet de concentrer les métaux et de réduire la quantité d'échantillon requise pour l'analyse.

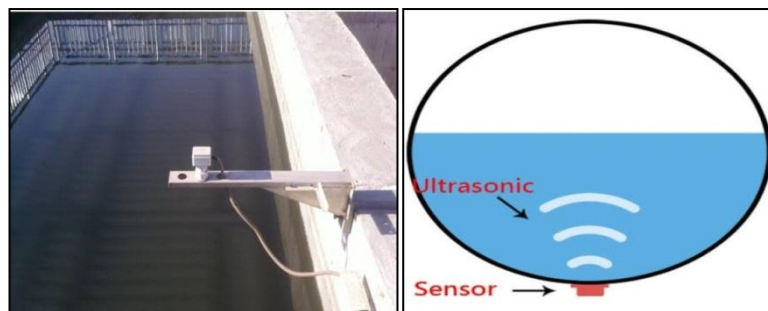


Figure III.10: Illustration de la détection de métaux toxiques par un capteur d'ultrasons

III.11. Applications des techniques d'intelligence artificielle :

Les méthodes d'intelligence artificielle peuvent être utilisées dans l'analyse des données pour détecter les métaux lourds dans l'eau en employant les réseaux de neurones artificiels et de l'apprentissage automatique afin d'analyser de vastes quantités de données et d'identifier des modèles potentiellement invisibles.

III.11.1. Identification des modèles invisibles :

L'intelligence artificielle peut analyser de grandes quantités de données pour découvrir des modèles invisibles ou de petites variations dans la concentration des métaux lourds, ce qui permet d'identifier les risques environnementaux et sanitaires.

III.11.2. Amélioration de la précision du diagnostic :

En utilisant des techniques d'apprentissage automatique, il est possible d'améliorer la précision de la détermination des concentrations précises des métaux lourds dans l'eau, ce qui aide à prendre les bonnes décisions en matière de gestion et de purification de l'eau.

III.12. Conclusion

Les avancées technologiques dans le domaine de la détection, telles que la spectroscopie, la chromatographie et de l'intelligence artificielle, présentent des perspectives prometteuses pour une détection plus rapide, précise et efficace des métaux lourds présents dans l'eau. Au cours de ce chapitre, nous avons abordé le sujet de la détection des métaux lourds toxiques présents dans l'eau, dans le but de sensibiliser aux risques potentiels que ces substances présentent pour la santé humaine et l'environnement. Elle souligne l'importance primordiale de mettre au point et d'appliquer des méthodes de détection avancées afin de surveiller et de gérer la qualité de l'eau.

CHAPITRE IV



Résultats de simulation et discussions

IV.1. Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter, étudier et simuler la propagation des ondes acoustiques à incidence normale à travers un cristal unidimensionnel de type [Lead/Epoxy]^N. Tout d'abord, nous allons étudier l'évolution de la bande interdite en fonction certains paramètres géométriques tels que le nombre de couches et le facteur de remplissage. Ensuite, notre intérêt sera porté sur l'étude d'une structure unidimensionnelle imparfaite.

Dans cette étude, les effets de différentes concentrations d'une solution aqueuse de nitrate de cuivre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) sur les spectres de transmission d'un capteur à cristal phononique 1D sont étudiés. Pour cela, on va utiliser tout au long de ce chapitre un code qui concerne la méthode des matrices de transfert (TMM) pour calculer les coefficients de transmission dû à la propagation des ondes acoustiques à travers la structure proposée.

IV.2. Etude de la structure périodique parfaite

Dans cette partie, on va considérer la propagation des ondes acoustiques longitudinales à incidence normale à travers une structure périodique unidimensionnelle (1D-PnC). La structure est composée de N bicouches de plomb et de L'Epoxy placées en alternance [Plomb/Epoxy]^N.

IV.2.1. Structure étudiée

La figure IV.1 représente le schéma de la structure considérée. Cette structure périodique est un cristal phononique unidimensionnel fini, il est formé par l'empilement de N bicouches dont la cellule élémentaire est [Plomb/Epoxy]. Le choix des deux matériaux est basé sur leurs propriétés acoustiques différentes (en particulier l'impédance acoustique) ; le Plomb (en jaune) d'épaisseur a_1 et l'Epoxy (en vert) d'épaisseur a_2 . Avec: $a_1=1.0 \mu\text{m}$ et $a_2=0.5 \mu\text{m}$ et $N=10$ (5 unités élémentaires). La période de la structure proposée est $a=a_1+a_2=1.5\mu\text{m}$.

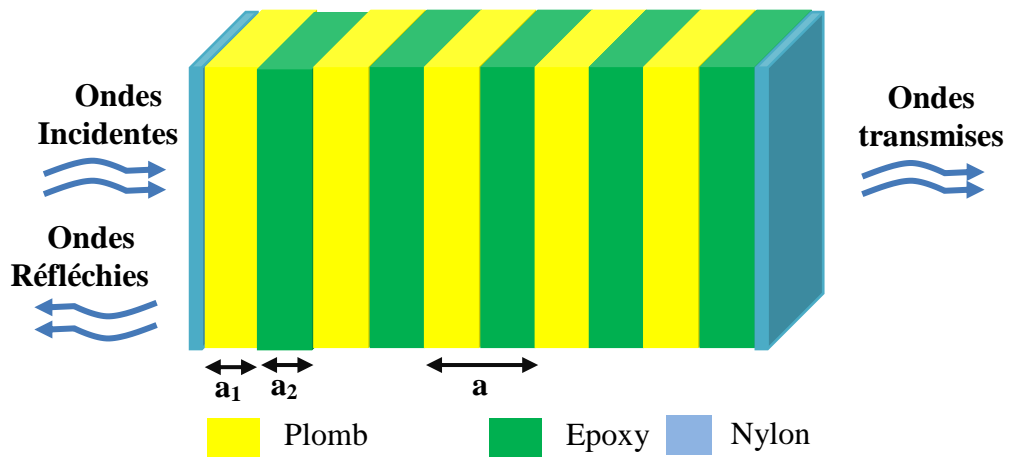


Figure IV.1: Représentation schématique du cristal phononique parfait (PnC-1D) [Plomb/Epoxy]⁵.

IV.2.2. Propriétés acoustiques des matériaux utilisés

Les propriétés acoustiques telles que les densités et les vitesses de propagation longitudinales et transversales sont illustrées dans le tableau IV.1.

Matériau	Plomb	Epoxy	Nylon
Masse volumique ρ (kg/m ³)	11400	1180	1110
Vitesse longitudinal C_L (m/s)	1960	2539.5	2600
Vitesse transversale C_T (m/s)	800	1160	1100
Épaisseur (μm)	$a_1=1.0$	$a_2=0.5$	

Tableau IV.1: Masse volumiques et vitesses de propagation des matériaux constituant le cristal phononique unidimensionnel (Plomb/Epoxy)^N.

IV.3. Etude de la bande interdite

L'étude de la bande interdite présente une phase indispensable avant de passer à la conception de notre capteur de métaux lourds. Pour cela, dans la section suivante, on va analyser et d'optimiser certains paramètres géométriques tels que le nombre de bicouches et le facteur de remplissage sur les variations de la bande interdite.

IV.3.1. Spectre de transmission de la bande interdite:

Les spectres de transmission du cristal parfait PnC-1D ont été tracés en fonction de la fréquence normalisée ($\omega a / 2\pi C_L$), où C_L : est une vitesse du son arbitraire et elle est considérée comme la vitesse du son dans l'époxy. La conception parfaite du PnC-1D sans

couche de cavité présente une large bande interdite dans la plage des fréquences normalisées (0,1846 à 0,5604) comme le montre la figure IV.2a. En effet, une partie de l'onde acoustique incidente est réfléchi, et l'autre est transmise à chaque interface entre les couches d'époxy et du plomb. Il y a une interférence entre les ondes incidentes et réfléchissantes.

D'après la diffusion de Bragg, une certaine plage de longueurs d'onde correspond à une réflexion complète, ainsi, la propagation des ondes acoustiques dans cette plage est empêchée de se propager à travers la structure (transmission nulle) et apparaît comme des ondes stationnaires. On constate que la largeur de la bande vient du contraste élevé entre les propriétés acoustiques des deux matériaux utilisés ; l'époxy et le plomb.

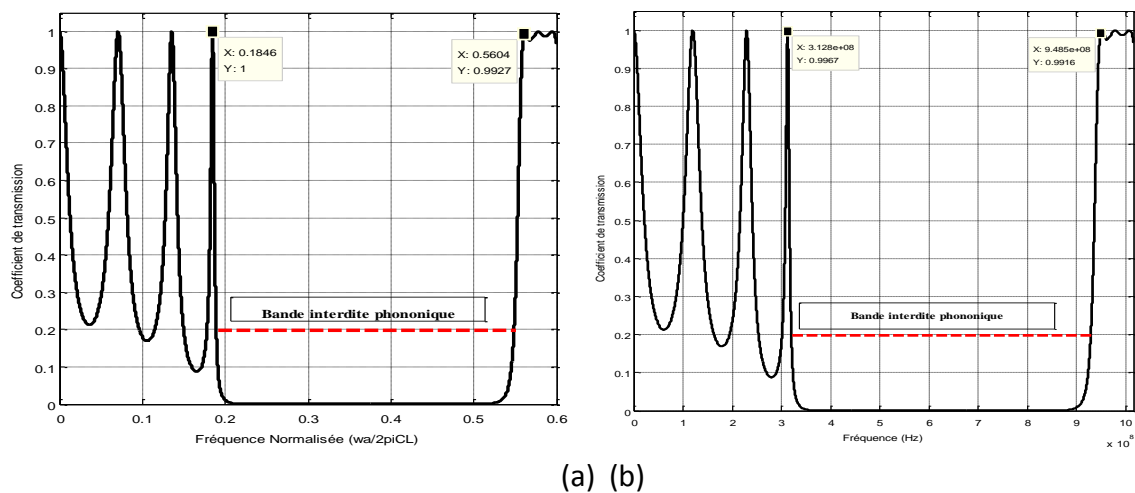


Figure. IV.2: Spectre de transmission : (a) en fonction de la fréquence normalisée, (b) en fonction de la fréquence absolue pour un cristal 1D composé de [Plomb/Epoxy]⁵.

La figure IV.2(b) représente la bande interdite phononique pour une structure périodique de période $a=1.50 \mu\text{m}$ et un facteur de remplissage $ff(\%)=66.66\%$. La bande correspond à la plage de fréquences ($3.128 \cdot 10^8 \text{ Hz}$ et $9.485 \cdot 10^8 \text{ Hz}$) qui apparaît dans le spectre de transmission.

IV.3.2. Spectre de Réflexion de la bande interdite

Le spectre de la figure ci-dessous représente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, il est obtenu par simulation dans le cas de la propagation d'une onde acoustique longitudinale à travers la structure multicouche décrite au paragraphe précédent. D'après la figure, il est clair que le coefficient de réflexion R présente une valeur très élevée dans la plage des fréquences allant de $3.128 \cdot 10^8 \text{ Hz}$ à $9.485 \cdot 10^8 \text{ Hz}$.

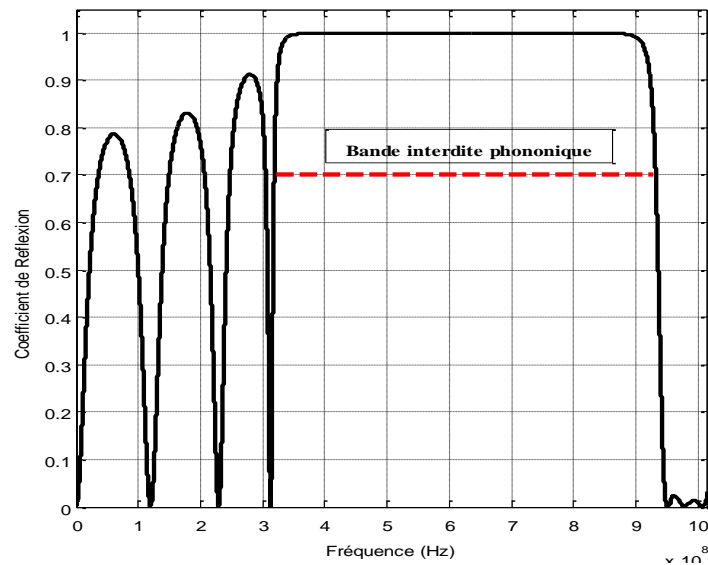


Figure. IV.3: Spectre de réflexion en fonction de la fréquences pour un cristal 1D composé de [Plomb/Epoxy]⁵.

IV.3. 3. Evolution de la bande interdite en fonction le nombre de bicouches

Pour voir l'influence du nombre de couches sur la position et la taille de la bande interdite. Nous avons fixé tout d'abord les épaisseurs de la couche du plomb et celle de la couche de l'Epoxy, les propriétés acoustiques de la structure proposée sont aussi fixées. Puis, on fait varier le nombre de bi-couches (N). En utilisant le même code de la méthode des matrices de transfert TMM (Transfer Matrix Method), nous allons réaliser une série de simulations. La figure IV.4 montre le spectre de transmission en fonction le nombre de couches utilisées dans le cristal phononique 1D. Ces spectres sont obtenus respectivement pour N=2, N=3 et pour N=4.

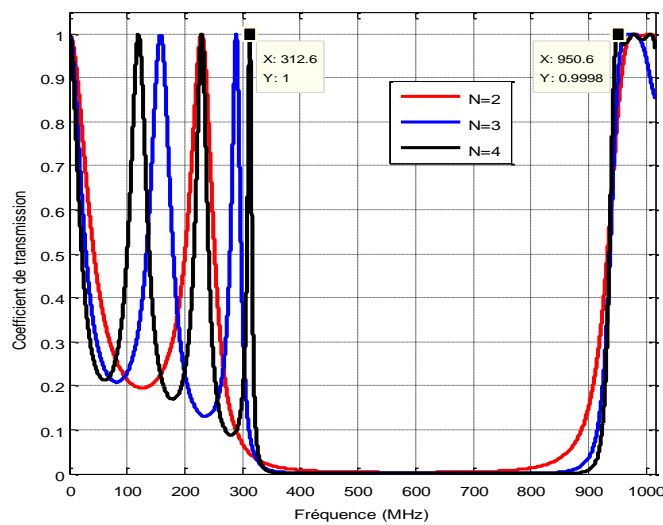


Figure. IV.4: Spectre de transmission en fonction de la fréquences pour différentes valeurs de bicouches N dans le cas d'un cristal [Plomb/Epoxy]^N.

D'après les résultats obtenus, il est clair que plus le nombre des bicouches (N) est élevé, la bande ouverte est plus raide. D'autre part, le nombre de pics au voisinage de la bande interdite phononique devient important en nombre et en taux de transmission.

IV.3.4. Evolution de la bande interdite en fonction le facteur de remplissage

Dans la partie suivante, notre intérêt est porté sur l'étude de l'influence du facteur de remplissage $ff(\%)$ sur les variations de la bande interdite phononique. Notre structure est un cristal phononique 1D composé de 4 bicouches de plomb/Epoxy.

Le facteur de remplissage est défini comme étant le rapport entre l'épaisseur de l'inclusion (Plomb) sur la période $a=a_1+a_2=1.5 \mu\text{m}$ qui représente l'épaisseur de la cellule élémentaire. Alors, le facteur de remplissage est donné par: $ff(\%)=a_1/(a_1+a_2)*100$. Ensuite, et en utilisant le même code de la méthode de la matrice de transfert (TMM), on obtient les spectres de transmission de la figure IV.5, obtenus pour quatre valeurs du facteur de remplissage $ff=40\%$, $ff=50\%$, $ff=60\%$ et $ff=70\%$.

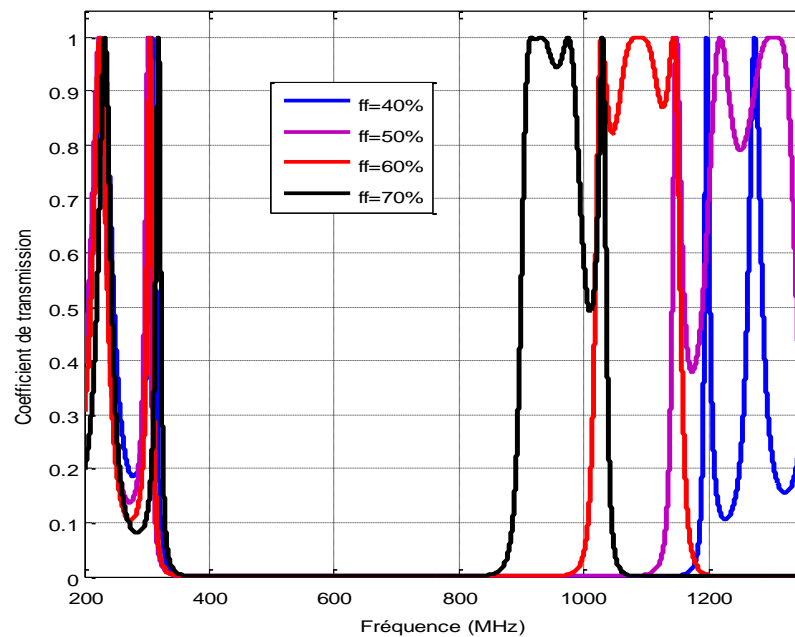


Figure. IV.5: Spectre de transmission en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du facteur de remplissage dans le cas d'un cristal [Plomb/Epoxy]⁴

IV.4. Conception du capteur a cristal phononique1D

Actuellement, les cristaux phononiques, présentent une nouvelle technologie dans le domaine de détection des liquides. Pour cela, nous intéresserons dans ce qui suit à la conception d'un biocapteur pour la détection des métaux lourds dans l'eau en particulier la détection de nitrate de cuivre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$).

IV.4.1. Structure étudiée

Dans cette section, nous avons décrit la représentation schématique du capteur conçu. Dans ce contexte, la Figure IV.6 indique le diagramme schématique de notre outil de détection dans lequel une couche de cavité est placée au centre de la structure étudiée. Ici, la couche de cavité est conçue pour être remplie de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ de différentes concentrations en unité ppm. De plus, du Plomb et de l'Époxy sont utilisés pour former chaque cellule unitaire du cristal phononique proposé PnC-1D. Ainsi, la conception suggérée est représenté par $[(\text{Plomb}/\text{Epoxy})^{N/2} / \text{couche de cavité} / (\text{Epoxy}/\text{Plomb})^{N/2}]$. Ici, N définit le nombre de cellules unitaires. D'autre part, Les propriétés acoustiques de la solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ sont discutées en détail dans les références [67,68].

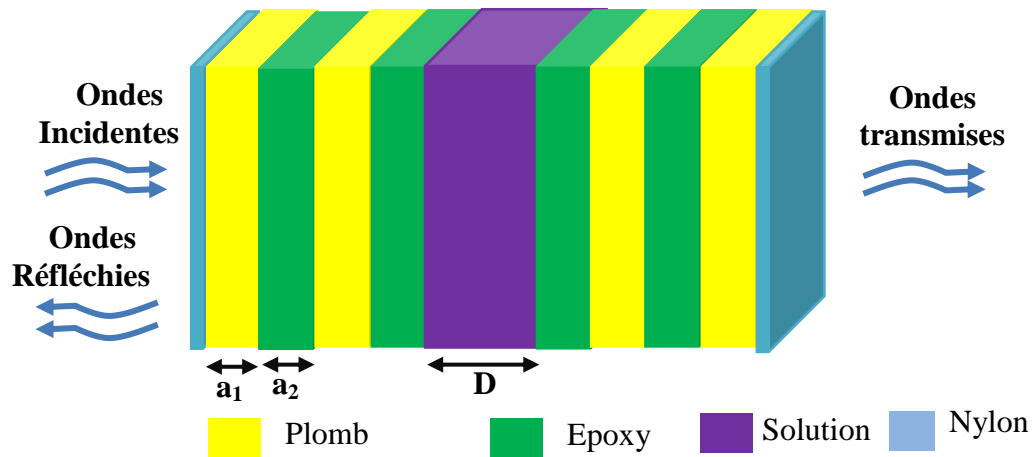


Figure IV.6: Représentation schématique d'un cristal phononique PnC-1D $(\text{Plomb}/\text{Epoxy})^2/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/(\text{Epoxy}/\text{Plomb})^2$ avec défaut au centre de largeur D

IV.4.2. Application à la détection de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Dans la section suivante, nous allons étudier et proposer un biocapteur à base d'un cristal phononique (1D) de type $[(\text{Plomb}/\text{Epoxy})^2/\text{Couche de cavité}/(\text{Epoxy}/\text{Plomb})^2]$. Nous considérons tout au long de section que la fréquence de résonance de l'eau à 25°C ($f_{res}=558.9$ MHz) comme fréquence de référence pour comparer les différentes fréquences de résonance des autres solutions de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

a. Paramètres physiques et géométriques de la structure

Le tableau ci-dessous résume les conditions de simulations ainsi que les valeurs des propriétés géométriques pour les différents matériaux utilisés dans notre configuration tels que les épaisseurs des couches, la largeur de la couche de cavité et les propriétés physiques des constituants.

Matériau	Plomb	Epoxy	Water (à 25°C)
Masse volumique ρ (kg/m ³)	11400	1180	997.044
Vitesse longitudinal C_L (m/s)	1960	2539.5	1496.687
Vitesse transversale C_T (m/s)	800	1160	0
Epaisseur (μ m)	$a_1=1.0$	$a_2=0.5$	$D=1.0$

Tableau.IV.2: Propriétés acoustiques et géométriques si la couche de cavité est remplie par l'eau à 25 °C [64-68]

b. Propriétés acoustiques de la solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Les propriétés acoustiques de la solution de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en ppm peuvent être dérivées des données expérimentales inespérées de la référence (Ernst et al. 1999) [66-68]. Sur la base de ces données, la densité de masse et la vitesse du son de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ augmente avec l'augmentation de la concentration (C) à température ambiante (25°C). Sachant que la masse molaire de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ est 187.56 g/mol et que 1ppm (partie par million) est équivalent 1mg/Kg, on peut convertir les concentrations en ppm.

Concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en mol/kg	Concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en ppm (en mg/kg)	Densité (kg/m ³)	Vitesse C_L (m/s)	Références
0 (Water)	0	997.044	1496.687	[67,68]
0.0632	11853.792	1006.54	1499.7	[66]
0.2758	51729.048	1037.94	1507.6	[66]
0.6310	118350.36	1088.93	1523.1	[66]
1.1536	216369.216	1160.22	1547.9	[66]
2.0548	385398.288	1273.11	1590.8	[66]
2.8676	537847.056	1364.63	1628.3	[66]

Tableau. IV.3: Propriétés acoustiques de la solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ - Données à 25 °C [66-68]

La figure IV.7 représente les données expérimentales (points) de la densité et de la vitesse de propagation longitudinale mesurées dans une solution aqueuse pour différentes concentrations en ppm de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ selon la référence [66].

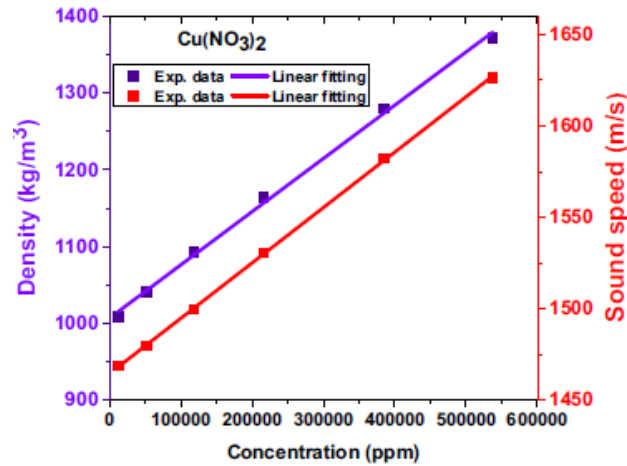


Figure. IV.7 : Propriétés acoustiques de la solution en fonction la concentration en ppm de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ à 25°C d'après les références [64,66].

IV.5. RESULTATS DE SIMULATIONS

Dans cette partie, nous allons simuler notre configuration en utilisant le logiciel MATLAB à partir d'un code qui concerne les éléments de la méthode des matrices de transfert (TMM).

IV.5.1. Spectre de transmission

Sur la figure IV.8 nous avons reporté le spectre de transmission de la structure périodique sans défauts, alors que le spectre en rouge est obtenu après l'insertion au centre de la structure une couche d'épaisseur $D=1.0 \mu\text{m}$, remplie par l'eau à 25°C . Nous constatons clairement l'apparition d'une bande passante étroite centrée à la fréquence de résonance est 558.9MHz .

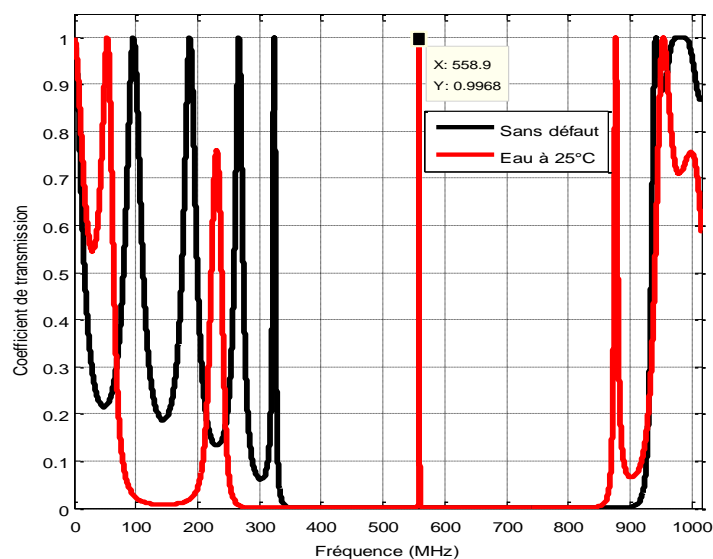


Figure IV.8: Spectre de transmission pour un cristal parfait (en noir), Spectre de transmission si la couche de cavité est remplie avec l'eau à 25°C (en rouge).

La figure IV.9 illustre un exemple pour le calcul de la fréquence de résonance et la largeur à mi-hauteur FWHM. Elle est obtenue lorsque la couche de cavité est remplie par l'eau pure à 25°C (Concentration égale 0 ppm). D'après le pic obtenu, on peut constater une largeur à mi-hauteur FWHM=332736Hz et un taux de transmission très élevée 100%.

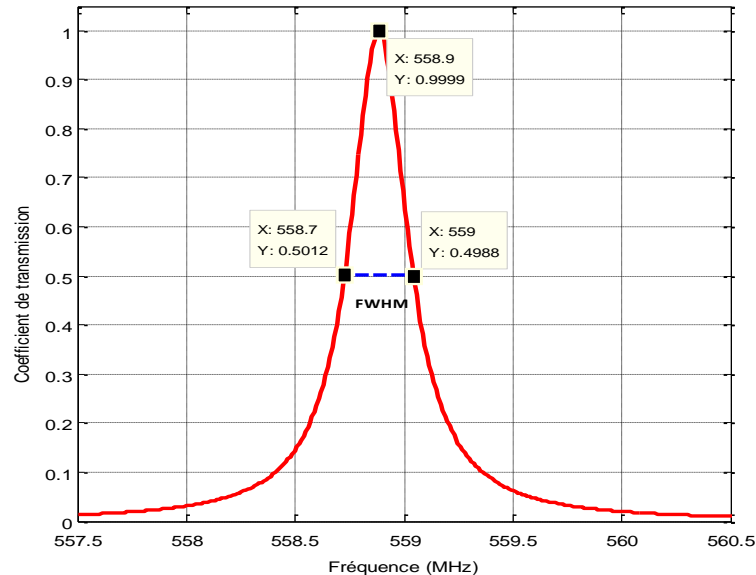


Figure IV.9:Caractéristiques du pic de résonance pour une couche de cavité remplie par l'eau à 25°C (en rouge).

IV.5.2. Influence de la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Lorsque l'eau dans la couche de cavité est remplacée par une solution de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, le pic de résonance se déplacera à une nouvelle fréquence de résonance. La figure IV.5 montre que le spectre de transmission simulé dans le cas où la couche de cavité est remplie par la solution à différentes concentrations de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. La concentration est comprise entre 0 et 550 000 ppm. Les résultats montrent clairement qu'avec l'augmentation de la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, le mode résonant décale vers les fréquences les plus basses. Le tableau suivant, résume les résultats de simulations.

Concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en mol/kg	Concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en ppm	fréquence Normalisée	Fréquence $f_{\text{rés}} \times 10^8$ (Hz)	Fréquence $f_{\text{rés}}$ (Hz)
Water (0)	0	0.3301	5.589	558893160
0.0632	11853.792	0.3298	5.584	558385260
0.2758	51729.048	0.3286	5.563	556252080
0.6310	118350.36	0.3269	5.534	553407840
1.1536	216369.216	0.3247	5.498	549750960
2.0548	385398.288	0.3214	5.442	544164060
2.8676	537847.056	0.3189	5.399	539897700

Tableau. IV.4: Résultats de simulations obtenus pour différentes concentration de la solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ [66-68].

En fréquence normalisée, le mode transmis passe de la fréquence normalisée 0,3301 à 0,31819 c'est-à-dire, il passe de 558893160 Hz à 539897700 Hz pour un changement dans la concentration de 0 ppm à 550 000 ppm.

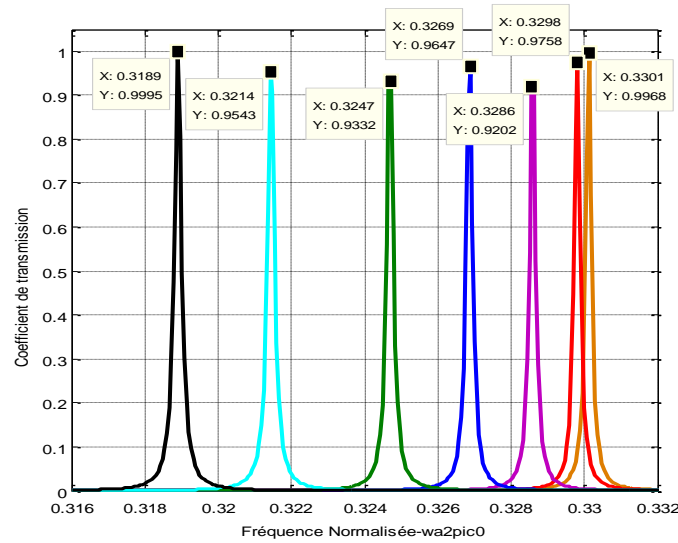


Figure. IV.10: Spectres de transmission en valeurs normalisées pour différentes concentrations de la solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ dans la couche de cavité à 25°C .

D'autre part, tous les modes de résonance ont une intensité de transmission très élevée (supérieure à 90 %), comme le montre la figure IV.10. Cela suggère le confinement de l'énergie acoustique à l'intérieur de la couche de cavité pour toutes les concentrations. Physiquement, chaque pic est considéré comme une bande passante de largeur étroite, il provient du couplage entre le mode de résonance dans la couche de cavité et l'onde évanescente dans les couches solides.

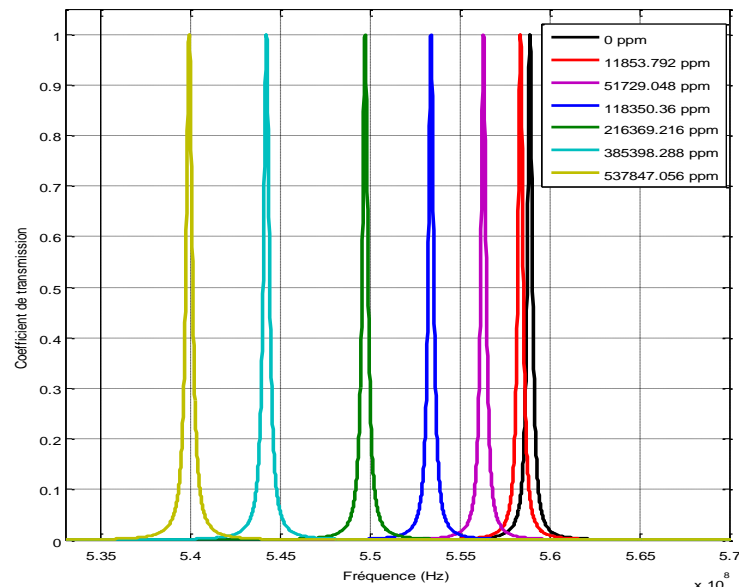


Figure. IV.11: Spectres de transmission calculés en injectant différentes concentrations de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ dans la couche de cavité en ppm à 25°C .

La figure IV. 11 illustre le spectre de transmission en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de concentrations de la solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ entre $c=0$ ppm (eau pure) et $c=537847$ ppm.

A partir de cette figure, il est clair que chaque pic de résonance est lié aux propriétés physiques et principalement à la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Les résultats obtenus montrent clairement que la fréquence de résonance du mode résonant décale progressivement vers les basses fréquences.

IV.5.3. Evolution du mode résonant en fonction la concentration

Dans cette section, une série de simulations est effectuée pour chaque concentration de Nitrate de cuivre. Les données concernent la fréquence de résonance ($f_{\text{rés}}$) et le décalage en fréquence ($\Delta f = f_{\text{rés}} - f_{\text{water}}$), la largeur à mi-hauteur FWHM.

Sur le tableau IV.5, nous avons reporté les résultats obtenus par simulations à différentes concentrations en $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

Concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en ppm	Fréquence de résonance $f_{\text{rés}}$ (Hz)	$\Delta f = f_w - f_{\text{rés}} $ en (Hz)	S (Hz/ppm)	FWHM (Hz)	Q	FOM $\times 10^{-4}$	DL
0	558893160	0	-----	332736	1679,68	-----	-----
11853.792	558385260	507900	42.84	330280	1690,64	1.29	76834,49
51729.048	556252080	2641080	51.05	331223	1679,38	1.54	6488,24
118350.36	553407840	5485320	46.34	346116	1598,90	1.33	7469,09
216369.216	549750960	9142200	42.25	363841	1510,96	1.16	8611,64
385398.288	544164060	14729100	38.21	387849	1403,03	0.985	10150,46
537847.056	539897700	18995460	35.31	396845	1360,47	0.889	11238,92

Tableau. IV.5: Résultats de simulations obtenus pour différentes valeurs Déconcentration de la solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en ppm.

Les figures IV.12 (a) et (b) montrent l'évolution de la fréquence de résonance ($f_{\text{rés}}$) du mode et la variation de la fréquence d'un mode résonant par rapport à la fréquence de résonance de référence correspondante à l'eau pure ($\Delta f = f_w - f_{\text{rés}}$). Il est clair que le pic de résonance diminue avec la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en ppm. Ainsi que le changement de fréquence de décalage ($\Delta f_{\text{rés}}$ augmente également avec la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$).

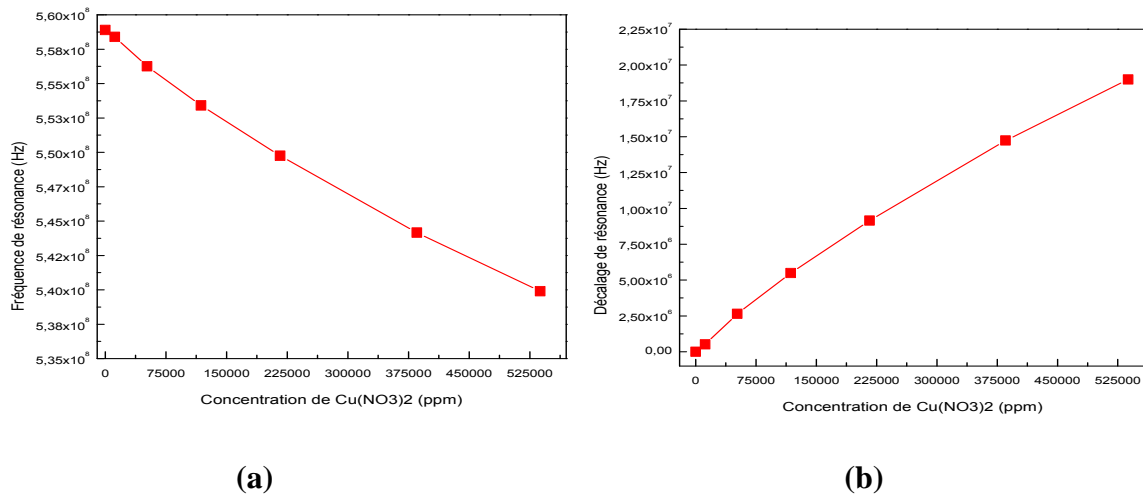


Figure IV.12: (a) Evolution de la fréquence de résonance ($f_{\text{rés}}$) avec la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. (b) Evolution de la variation en fréquence de résonance (Δf) en fonction la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

Sur la figure IV.13, nous avons étudié l'élargissement des pics de résonance (FWHM) du capteur proposé pour différentes concentrations de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ à température ambiante. En effet, la netteté des pics de résonance pour chaque concentration est liée à la valeur du FWHM. D'après [69,70], la netteté du pic de résonance augmente avec l'augmentation du FWHM.

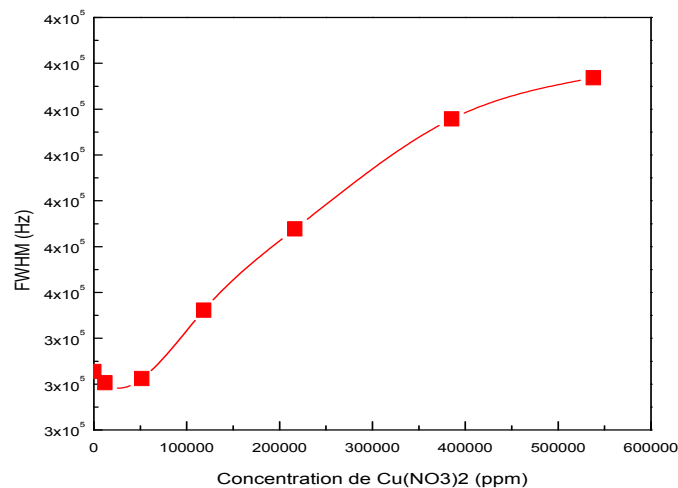


Figure IV.13: L'influence de la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ sur la largeur des pics de résonance FWHM.

Les résultats montrent clairement que la largeur à mi-hauteurs des pics de résonances augmente avec la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. La concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ de 2.8676 mol/kg a introduit la plus grande valeur de $\text{FWHM} = 396845 \text{ Hz}$ ce qui correspond à un pic plus net par rapport à d'autres concentrations avec des valeurs de FWHM faibles.

IV.5.4. Effet de l'épaisseur de la couche de cavité sur la fréquence de résonance

Dans ce paragraphe, on va étudier l'influence du décalage (Δd) dans la largeur de la couche de cavité sur la fréquence de résonance du mode transmis pour une onde acoustique longitudinale à incidence normale. Dans ce cas la cavité est remplie par l'eau pure (concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2=0$ ppm). Ensuite, nous avons effectué une série de simulations en utilisant le même code. Le tableau IV.6, illustre les variations de la fréquence de résonance et le taux de transmission en fonction de la largeur du défaut.

D(μm)	1.00	1.001	1.002	1.003	1.004	1.005
f_{res} (MHz)	558,893	558,537	558,182	557,836	557,490	557,141
Δf (MHz)	0	0,356	0,711	1,057	1,403	1,752

Tableau IV.6 : Résultats de simulations obtenus pour différentes valeurs Δd .

La figure IV.14 présente le spectre de transmission en fonction de la fréquence lorsque le décalage dans l'épaisseur de la couche de défaut (Δd) passe de 0nm à $\Delta d=5$ nm. Les résultats montrent clairement l'existence d'un pic de transmission importante (presque 100%) pour chaque valeur du décalage. Il est clair que plus le décalage Δd augmente plus le pic de transmission correspondant décale vers les basses fréquences.

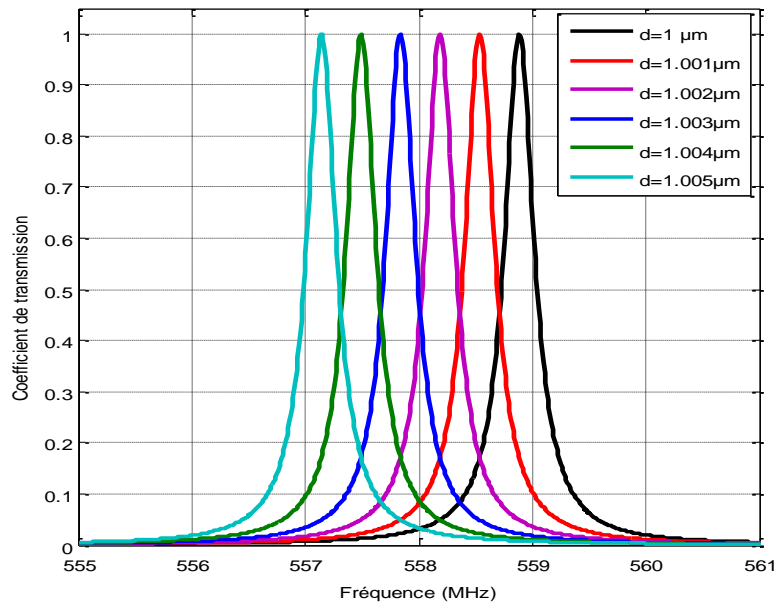


Figure IV.14: Coefficient de transmission en fonction de la fréquence dans le cas du CnP-1D pour différentes valeurs de l'épaisseur D de la couche de cavité

La figure IV.15, illustre l'évolution de la fréquence de résonance c'est à dire la location du pic en fonction le décalage Δd dans la largeur de la couche de cavité, il est clair que plus la valeur du décalage augmente plus le pic se déplace vers les basses fréquences.

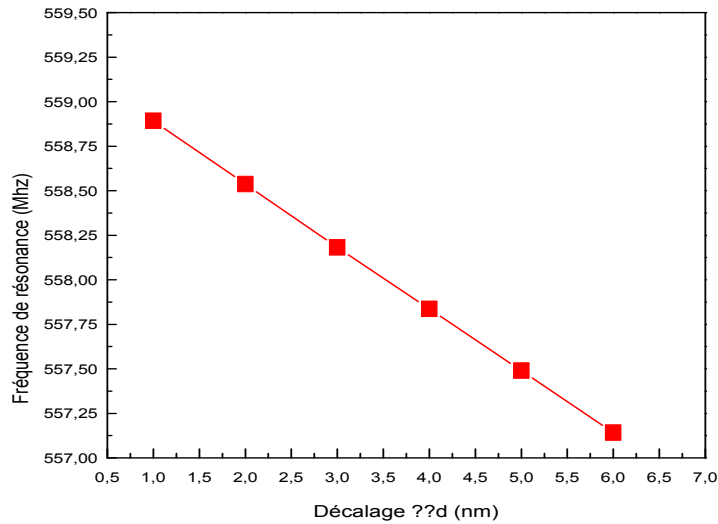


Figure IV.15: Evolution de la fréquence de résonance du pic en fonction la largeur de la couche de cavité pour une concentration égale à 0 ppm.

IV.6. Performances du capteur

Pour voir les performances du capteur conçu, il est nécessaire d'étudier l'évolution de certains paramètres principaux tels que la sensibilité (S), la figure de mérite (FOM), le facteur de qualité (Q) et la limite de détection (DL). Mais, il reste la sensibilité est la principale caractéristique de performances des capteurs.

IV.6.1. Sensibilité (S)

La sensibilité S d'un capteur est définie comme le rapport entre la variation du paramètre caractéristique de résonance et la grandeur à mesurer ; la concentration en $Cu(NO_3)_2$ de la solution. Ainsi, la sensibilité renseigne sur le décalage du mode résonant en fonction du changement de la concentration en $Cu(NO_3)_2$. Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante. Ce paramètre peut être obtenu en utilisant l'expression suivante:

$$S = \Delta f / \Delta C \dots\dots\dots (IV.01)$$

Où : $\Delta f = f_w - f_{rés} \dots\dots\dots (IV.02)$

f_w : est la fréquence de résonance de l'eau pur, f_r (eau pure) = 558.9MHz.

$f_{rés}$: est la fréquence de résonance pour une solution de concentration C en ppm.

ΔC : la variation dans le paramètre d'entrée (la concentration de $Cu(NO_3)_2$ de la solution analysée en ppm.

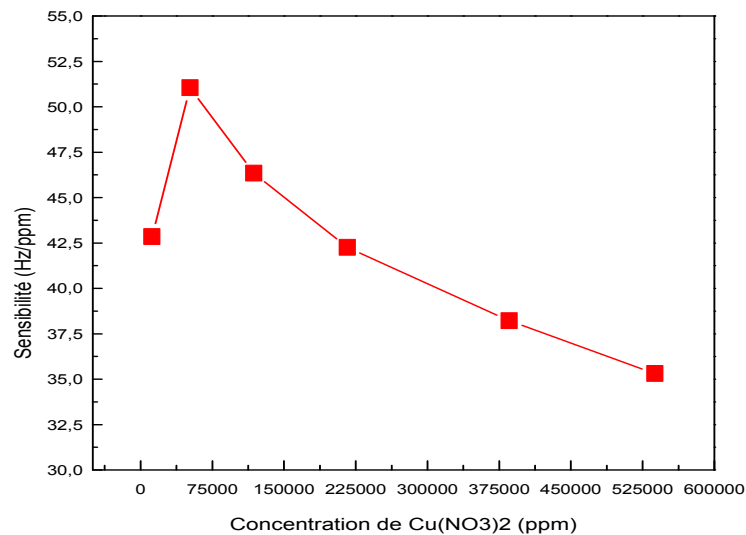


Figure IV.16: Evolution de la sensibilité en fonction la concentration de Cu(NO₃)₂ en ppm.

La figure IV.16, représente l'évolution de la sensibilité du capteur proposé en fonction la concentration C (en ppm). Cette courbe est obtenue en prenant le décalage en fréquence $\Delta f_{\text{rés}}$ en valeur absolue. D'après la courbe, il est clair que la sensibilité est maximale pour une concentration de Cu(NO₃)₂ égale à 51729 ppm (0.2758 mol/Kg), elle atteint 51.05Hz/ppm. Ensuite, elle diminue vers 35.31 pour une concentration de 537847.056 en ppm (2.8676 mol/Kg).

IV.6.2. Facteur de qualité (Q)

Comme dans les dispositifs destinés à l'intégration optique et audio et réalisant dysfonctions telles que le filtrage, les capteurs acoustiques utilisant la résonance optique et acoustique doivent être réglés le plus finement possible. Cela se traduit par un facteur de recherche de haute qualité. Par définition, le facteur de qualité est défini comme le rapport entre la fréquence de résonance et la largeur à mi- hauteur du pic [71,72]. Le facteur de qualité est exprimé par:

$$Q = f_{\text{rés}} / \text{FWHM} \dots \dots \dots (\text{IV.03})$$

Où: FWHM est la pleine largeur du à mi-hauteur du pic de résonance.

La figure IV.17, illustre l'évolution du facteur de qualité pour différentes concentration en Cu(NO₃)₂.

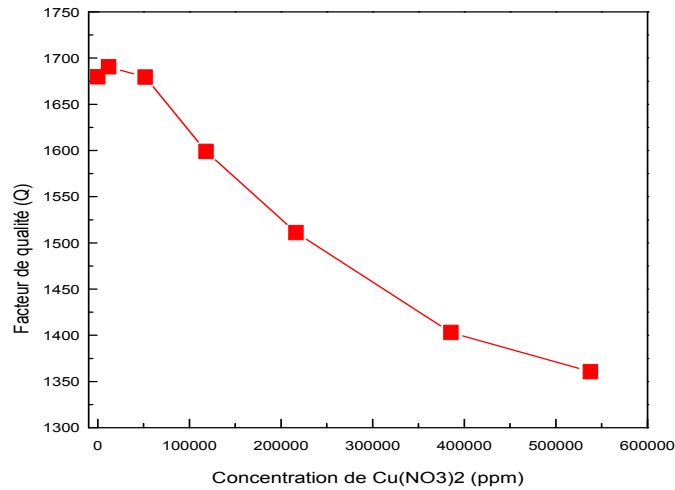


Figure IV.17: Evolution du facteur de qualité en fonction la concentration de Cu(NO₃)₂ en ppm.

Le facteur de qualité Q atteint son maximum qui est de l'ordre de 1690,64 pour une concentration de Cu(NO₃)₂ égale à 51729 ppm (0.2758 mol/Kg). Puis, le facteur de qualité Q diminue progressivement pour les concentrations en Cu(NO₃)₂, il atteint son minimum qui de est de l'ordre de 1360,47 pour une concentration de 537847.056 en ppm (2.8676 mol/Kg).

IV.6.3. Figure de mérite (FOM)

La figure de Mérite(FOM) est obtenue en divisant la sensibilité par la pleine largeur du mode de résonant à mi-hauteur (FWHM). Il fournit, en plus de la sensibilité, l'information de la finesse du pic de résonance. La figure de mérite est donné épar l'expression suivante [73]:

$$FOM=S/FWHM.....(IV.04)$$

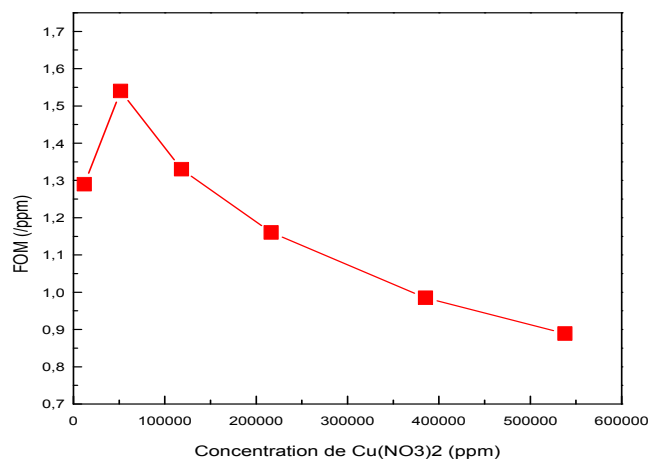


Figure IV.18: Evolution de la figure de mérite en fonction de la concentration (en ppm).

La figure IV.18, montre l'évolution de la figure de mérite en fonction les concentrations de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. D'après la courbe, il est clair que la figure de mérite a le même comportement que la sensibilité.

Ce paramètre atteint un maximum de $1.54 \cdot 10^{-4}$ (/ppm) pour une concentration de 51729 ppm (0.2758 mol/Kg), puis sa valeur diminue vers $0.889 \cdot 10^{-4}$ (/ppm) pour une concentration de 537847.056 en ppm (2.8676 mol/Kg).

IV.6.4. Limite de détection (DL)

La limite de détection introduit la quantité minimale de concentration de liquide pouvant être détectée avec précision par le capteur. La limite de détection (DL) peut être calculée en utilisant l'équation:

$$DL = f_{\text{rés}} / (Q \cdot S) \dots \dots \dots (IV.12)$$

Où: Q est le facteur de qualité, S est la sensibilité et $f_{\text{rés}}$ est la fréquence de résonance.

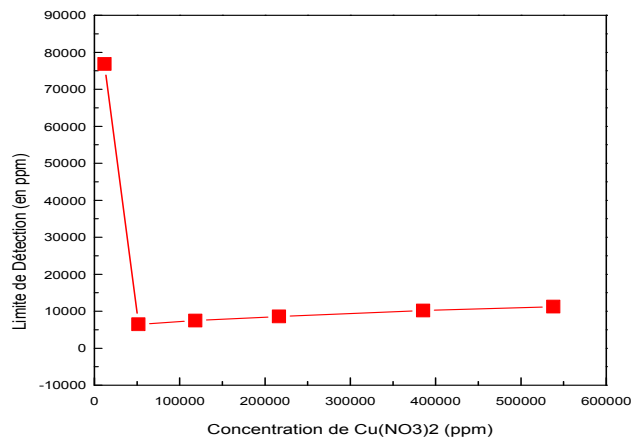


Figure IV.19: Evolution de la limite de détection en fonction la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (en ppm).

La figure IV.19, représente la limite de détection (DL) par rapport à la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Les résultats montrent que la limite de détection la plus basse que notre capteur à cristal phononique peut détecter avec précision est égale à $DL = 0.2758$ mol/Kg (6488,24 ppm) pour une concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ de 0.2758 mol/Kg (51729.048 ppm).

IV.6.5. Influence de l'épaisseur de la couche de cavité sur la sensibilité

Dans tous les résultats ci-dessus, l'épaisseur de la couche de cavité est d'environ 1.0 μm . Dans le paragraphe suivant, on va étudier l'influence du changement de l'épaisseur de la couche de cavité sur les performances du capteur et en particulier sur la sensibilité du capteur conçu.

Pour cela, on suppose que l'épaisseur de la couche de cavité prend la valeur : $d_c = d_0 + \Delta d$. Où d_0 est de $1.00 \mu\text{m}$ et Δd varie de 0 nm à 15 nm entre deux concentrations $c=0 \text{ ppm}$ et $c=51729.048 \text{ ppm}$.

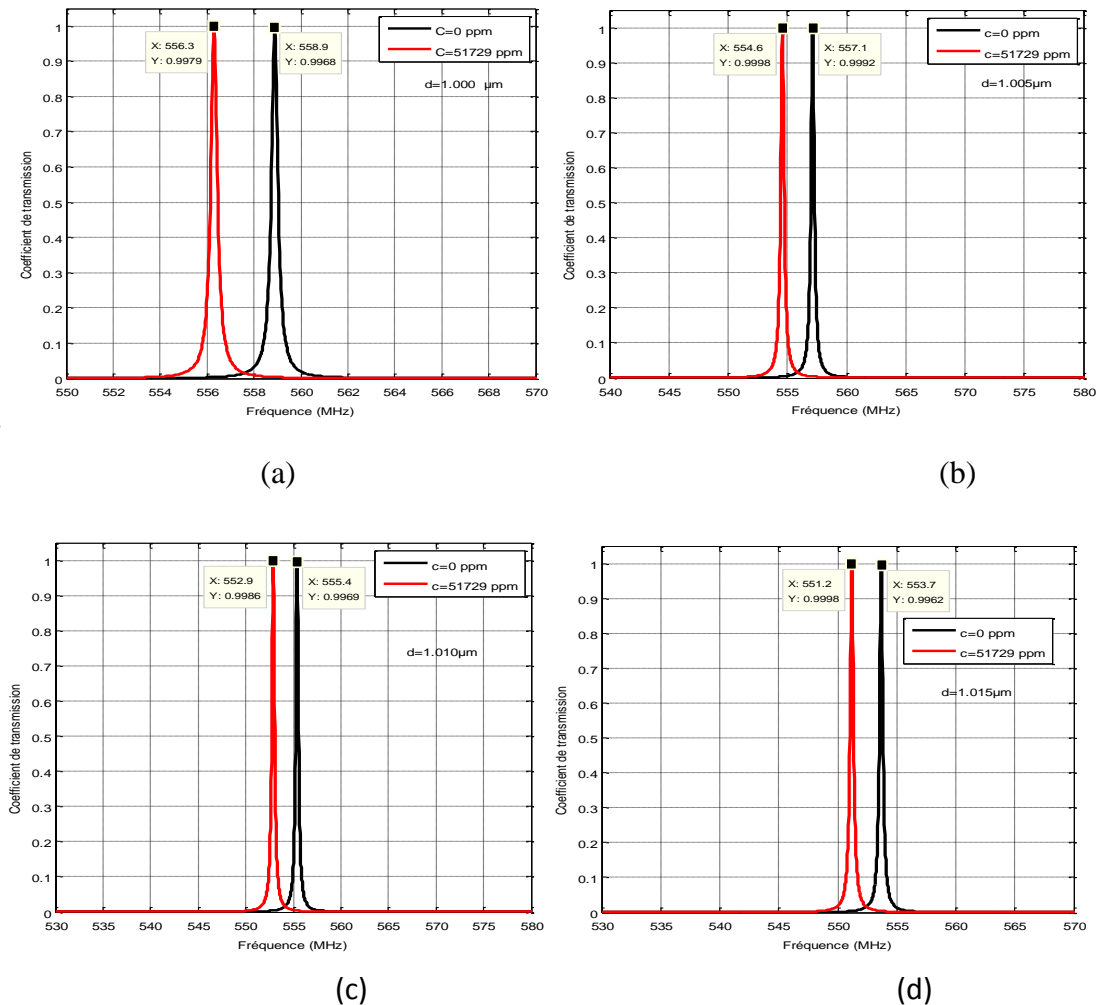


Figure IV.20: L'effet du changement de l'épaisseur de la cavité sur la sensibilité du capteur pour deux concentrations de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (en ppm)

La figure IV.20 présente l'effet du changement de l'épaisseur de la couche de cavité sur la transmission de la résonance maximale. À la même concentration, la résonance maximale se déplace vers une fréquence inférieure, comme le montre clairement les figures IV.20(a) à (d). La sensibilité diminue de 50.27 à 48.03 Hz/ppm à mesure que la valeur de Δd augmente de 0 à 15 nm comme affiché dans le tableau IV.7.

Δd (nm)	$f_{\text{rés}}$ (Hz) à 0 ppm	$f_{\text{rés}}$ (Hz) à 51729 ppm	Δf (HZ)	Sensibilité S (Hz/ppm)
0	558893160	556292712	2600448	50.27
5	557145984	554586168	2559816	49.48
10	555398808	552879624	2519184	48.69
15	553692264	551193396	2498868	48.03

Tableau IV.7: L'effet du changement de l'épaisseur de la cavité sur la sensibilité du capteur pour deux concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (en ppm)

IV.7. Conclusion

Dans cette étude, nous avons présenté théoriquement un biocapteur à base d'un cristal phononique unidimensionnel pour la détection des faibles concentrations de métaux lourds. La conception de ce capteur simple et très sensible basée sur l'inclusion d'une couche de cavité à l'intérieur d'un PnC-1D pour la détection du métal lourd $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ à différentes concentrations en ppm. Tout d'abord, nous nous sommes intéressés à l'étude d'une structure parfaite, les résultats de simulations montrent clairement l'ouverture de bandes phononiques sous certaines conditions géométriques et physiques et que les propriétés de ces bandes sont liées au nombre de couches et du facteur de remplissage. En second temps, nous avons examinée simulé la structure imparfaite de type $[(\text{Plomb}/\text{Epoxy})^2/\text{Couchée cavité}/(\text{Epoxy}/\text{Plomb})^2]$ dans laquelle la couche de cavité est remplie avec une solution de différentes concentrations de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (0 à 500 000 ppm).

Les résultats obtenus montrent clairement que le mode résonnant pour chaque concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ se déplace vers des fréquences plus basses avec l'augmentation de la concentration de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. En plus, l'épaisseur de la couche de cavité s'est avérée avoir un effet prononcé sur la valeur de sensibilité.

Enfin, le capteur proposé a fourni de bonnes valeurs aux paramètres de performance du capteur tels que la sensibilité, le facteur de qualité et la figure de mérite. Par conséquent, ce capteur peut être utilisé efficacement pour détecter d'autres types de métaux lourds.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow. The scroll is horizontal and has a vertical strip on the left side. The text is centered within the scroll.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les cristaux phononiques (PnCs) sont des matériaux artificiels composites à modulation spatiale de leurs propriétés acoustiques. Ces structures périodiques; constituées au moins de deux matériaux de propriétés élastiques différentes sont qualifiées de cristaux phononiques. En structurant la matière de manière périodique, il est possible de contrôler voire d'empêcher la propagation des ondes acoustiques ou élastiques dans certaines directions et gammes de fréquences spécifiques. Ces dernières années, un grand nombre de structures périodiques ont été étudiées et diverses approches théoriques ont été appliquées. Toutes ces études théoriques ont montrées l'existence de bandes interdites phononiques où aucune propagation d'onde n'est permise. Pour cela, ces matériaux représentent un domaine de recherche en pleine effervescence dans divers domaines, allant de l'isolation acoustique et de la filtration des signaux acoustiques à leur traitement en preuves et à l'analyse des propriétés des liquides.

Le travail présenté dans ce mémoire de master, s'inscrit dans le cadre d'une contribution à l'étude des structures multicouches unidimensionnelles basées sur les cristaux phononiques (PnC-1D) pour des applications au domaine des capteurs notamment dans le domaine de la détection des métaux lourds et toxiques dans l'eau.

En premier lieu, nous nous intéressons à l'étude d'une structure multicouche parfaite de défauts et formée par l'empilement de N bicouches [Plomb/Epoxy]^N. En utilisant un code écrit en Matlab de la méthode de la matrice de transfert TMM, nous avons montré à travers la simulation que les paramètres géométriques notamment, le facteur de remplissage et le nombre de bicouches jouent un rôle important sur l'ouverture et la location des bandes interdites phononiques.

En second lieu, nous avons étudié et simulé, une structure avec défaut physique de type [(Plom/Epoxy)²/couche de cavité/(Epoxy/Plomb)²], dont laquelle une couche est placée au centre de la structure parfaite pour former un miroir de Bragg. Ensuite, la couche de cavité est remplie avec une solution de différentes concentrations de Cu(NO₃)₂ (0 à 500 000 ppm). Les résultats obtenus en utilisant la méthode TMM montrent clairement que le mode résonnant pour chaque concentration de Cu(NO₃)₂ se déplace vers des fréquences plus basses avec l'augmentation de la concentration de Cu(NO₃)₂. En plus, l'épaisseur de la couche de cavité a un effet prononcé sur les paramètres de performances de notre configuration notamment sur la sensibilité, le facteur de qualité et la figure de mérite.

A travers les résultats obtenus, on peut conclure que ces capteurs offrent des possibilités prometteuses pour surveiller efficacement et précisément la qualité de l'eau. Cependant, il existe encore des défis, notamment en ce qui concerne la sélectivité, la sensibilité et la stabilité à long terme. Alors, d'autres efforts de recherche sont nécessaires pour surmonter ces défis et à améliorer les performances des capteurs à cristaux phononiques dans le domaine de la détection des métaux toxiques dans l'eau, contribuant ainsi à la protection de la santé publique et de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Kushwaha M.S., Halevi P., Dobrzynski L., Djafari -Rouhani B. "Acoustic band structure of periodic elastic composites". *Phys. Rev. Lett.* 1993;71:
- [2] Lu M.H., Feng L., Chen Y.-F. "Phononic crystals and acoustic meta-materials". *Mater. Today.* 2009;12:34–42.
- [3] R.H. Olsson, I. El-Kady, "Microfabricated phononic crystal devices and applications", *Meas. Sci. Technol.* 20 (2008), 012002.
- [4] Y. Pennec, D.R. Bahram, H. Larabi, J. Vasseur, A.C. Hladky-Hennion, "Phononic crystals and manipulation of sound", *Phys Status Solidi Curr Top Solid State Phys* 6 (2009) 2080–2085.
- [5] A. Khelif, P.A. Deymier, B. Djafari-Rouhani, J.O. Vasseur, L. Dobrzynski, "Two-dimensional phononic crystal with tunable narrow pass band: application to a waveguide with selective frequency", *J. Appl. Phys.* 94 (2003) 1308.
- [6] M. Ke, Z. Liu, C. Qiu, W. Wang, J. Shi, W. Wen, et al., "Negative-refraction imaging with two-dimensional phononic crystals", *Phys. Rev. B* 72 (2005), 064306.
- [7] A. Mehaney, H. Gharibi, A. Bahrami, "Phononic eco-sensor for detection of heavy metals pollutions in water with spectrum analyzer", *IEEE Sens. J.* 21 (2021).
- [8] H. Ali, E. Khan, I. Ilahi, "Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation", *J. Chem.*, 2019.
- [9] T. Athar, A. Waris, M. Nisar, "A review on toxicity and environmental implications of heavy metals", *Emergent Life Sci. Res.* 4 (2018) 31–37.
- [10] A.L. Chen, Y.S. Wang, "Study on band gaps of elastic waves propagating in one-dimensional disordered phononic crystals", *Phys. B Condens. Matter* 392 (2007) 369–378.
- [11] M.I. Hussein, G.M. Hulbert, R.A. Scott, "Dispersive elastodynamics of 1D banded materials and structures": analysis, *J. Sound Vib.* 289 (2006) 779–806.
- [12] Schmidt M.-P., Oseev A., Lucklum R., Zubtsov M., Hirsch S. "SAW based phononic crystal sensor, technological challenges and solutions". *Microsyst. Technol.*, 2016.
- [13] Solie, L. P., "Surface acoustic wave reflective dot array (RDA)", *Applied Physics Letters*, vol. 28, no. 8, 1976.
- [14] Achenbach, J. D. et Kitahara, M., "Harmonic waves in a solid with a periodic distribution of spherical cavities", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.81, no. 3,(1987).
- [15] S. kheffache, "propagation d'ondes élastiques dans les cristaux phononiques bidimensionnels", mémoire de magister, université mouloud mammeri, tizi-ouzou, 2011.
- [16] Jaffre, T., "Caractérisation des matériaux à bande interdite électromagnétique multi périodiques et leurs applications aux antennes", Thèse de doctorat - Université de Limoges, (2005).
- [17] Ho, K.M., Chan, C.T. et Soukoulis, C. M., *Phys. Rev. Lett.* 65, 3152, 1990.
- [18] Van Der Biest, F., "Diffusion multiple et renversement du temps ultrasonore dans des milieux périodiques et désordonnés", Thèse de doctorat - Université de Paris 7, (2006).
- [19] Nasri Omar, "Etude théorique et numérique d'une structure périodique pour l'isolation phonique", Mémoire de master, université Mohamed boudiaf - M'sila , 2017
- [20] Fugen Wu, Zhengyou Liu et Youyan Liu : "Splitting and tuning characteristics of the point defect modes in two-dimensional phononic crystals", *Phys. Rev. E*, 69:066609, 2004.

-
- [21] Yannick Merle, "Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels", Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003.
- [22] Quentin Rolland, "Couplages acousto-optiques dans les cristaux photoniques et phononiques", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 2013.
- [23] M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski et B. Djafari-Rouhani, "Acoustic band structure of periodic elastic composites". *Phys. Rev. Lett.* 71, 2022 (1993).
- [24] B. Imad Eddine, O. Abderrezak, "Study and simulation of phononic crystal waveguides: effect of localized modes in a phononic waveguide", Mémoire de Master, Université Saad Dahleb Blida 1. 2020.
- [25] Yan Pennec, Jérôme O. Vasseur, Bahram Djafari-Rouhani, Leonard Dobrzynski et Pierre, A. Deymier: "Two-dimensional phononic crystals: Examples and applications. Surface", *Science Reports*, 65(8):229 – 291, 2010.
- [26] A. Mohammed, B. Fatima, "Etude et simulation d'un capteur de CO₂ à base de cristaux phononiques", Mémoire de Master, Université Med Boudiaf- M'sila, 2021.
- [27] B. Abdellatif, B. Mohamad Nour El islam, "Etude et simulation de la bande interdite d'un cristal phononique 2D structuré en un réseau carré ", Mémoire de Master, Université Med Boudiaf-M'sila, 2016.
- [28] Jaime García, Pablo Sanchis, Alejandro Martínez, and Javier Martí, "1D periodic structures for slow-wave induced non-linearity enhancement", *Opt. Express* 16, 3146-3160(2008)
- [29] Hussein, M. I., Leamy, M. J., and Ruzzene, M. (May 2, 2014). "Dynamics of Phononic Materials and Structures: Historical Origins, Recent Progress, and Future Outlook." *ASME. Appl. Mech. Rev.* July 2014; 66(4): 040802.
- [30] Overvelde, Johannes, Tesse Bastiaan, Sicong Shan, and Katia Bertoldi, "Compaction through buckling in 2D periodic, soft and porous structures: Effect of pore shape", *Advanced Materials* 24(17): 2337-2342, (2012).
- [31] Sayad youcef, Zarfaoui abdelkader, "Contribution à l'étude des cristaux phononiques 1d en vue de l'application au domaine des barrières phoniques", Mémoire de Master, université M'sila, 2019.
- [32] ALI BOUGRESSI "Application du concept des réseaux acoustiques à bandes interdites pour l'isolation sismique d'un site", Mémoire de Magister, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2013.
- [33] M. GORISSE, "Réalisation de filtres RF à base de cristaux phononiques", Thèse de doctorat, université de grenoble, 2011.
- [34] R. Houwink, "Elasticity Plasticity and structure of matter", Cambridge University (Press, London), 1971.
- [35] T. Miyashita, "Sonic crystals and sonic wave-guides", *Measurement Science & Technology*, 16 (5), R47-R63 (2005).
- [36] Walid HERIZI, "Etude théorique de la propagation des ondes acoustique dans une membrane à cristal phononique bidimensionnels" Mémoire de Master, université M'sila, 2016.
- [37] A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, B. Djafari-Rouhani et V. Laude, "Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides". *Appl. Phys. Lett.*, 84, 4400 (2004).

- [38] Khelif, A., Wilm, M., Laude, V., Ballandras, S., & Djafari-Rouhani, B., "Guided elastic waves along a rod defect of a two-dimensional phononic crystal". *Physical Review E*, 69(6), (2004). 067601.
- [39] A. Khelif, A. Choujaa, B. Djafari-Rouhani, M. Wilm, S. Ballandras, and V. Laude, "Trapping and guiding of acoustic waves by defect modes in a full-band-gap ultrasonic crystal", *Physical Review B*, 68 (21), 214301(2003).
- [40] S. Benchabane, A. Khelif, A. Choujaa, B. Djafari-Rouhani, and V. Laude, "Interaction of waveguide and localized modes in a phononic crystal", *Euro physics Letters*, 71 (4), 570-575(2005).
- [41] Benchabane, S., "Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques", (Doctoral dissertation, Université de Franche-Comté), (2006).
- [42] M. Maldovan and E. L. Thomas, "Simultaneous complete elastic and electromagnetic band gaps in periodic structures", *Appl. Phys. B* 83, 595 (2006).
- [43] C. Croenne, a E. J. S. Lee, Hefei Hu,b et J. H. Page . Département de physique et d'astronomie, Université du Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada. mis en ligne le 23décembre2011
- [44] Yacouba Sanogo "Conception et fabrication de capteur et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la santé et de l'enivrement", thèse de doctorat, 2014.
- [45] R. Luckluma, J. Lia,b, M. Zubtsova, "1D and 2D Phononic Crystal Sensors", *Procedia Engineering* 5 (2010).
- [46] Samira Amoudache, " Cristaux photonique accordables ; application au domaine des capteurs". Thèse de doctorat , Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015
- [47] Martin Maldovan and Edwin L. Thomas, "Periodic Materials and Interference Lithography: For Photonics, Phononics and Mechanics", 2008.
- [48] Bruneau, M., and C. Potel. "Matériaux et acoustique", (Tomes 1 et 2), (2006).
- [49] Belabre Borane, "La pollution par les métaux lourds dans la région de Annaba ; Sources de contamination des écosystèmes aquatiques; Biologie et physiologie des organismes marins"; Université Badji Mokhtar –Annaba, 2010.
- [50] Runnels, D.D., Sheperd, T.A. & Angino, E.E., "Metals in water, determining natural background concentrations in mineralized areas". *Environmental Science and Technology*, 26(12): 2316-2323, 1992.
- [51] Hammadache Zineb, Guerrache Sama, Saib Samia; "Evaluation du Transfert des métaux lourds dans le système sol-plante (Phragmites australis) dans le bassin versant d'oued Nil la région de Jijel"; Université M'hamed bougara, 2016.
- [52] Kadem Dhaou-El-Djabine , "Évaluation et Comportement Des Métaux lourds (Cd – Cr –Cu – Ni – Pb – Zn et Mn) Dans Les sols à vocation agricole et végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique. (EL-Hadjar –Annaba – est Algérien). Influence De La Végétation sur la Dynamique des métaux"; thèse de doctorat d'état en écologie ; Université mentouri-Constantine, 2005.
- [53] Everaart, J.M.a.N., J. , "Heavy metals in surface Sediments and Epibenthic Macroinvertebrates from the coastal zone and continental slope of Kenya". *Marine poll.Bull*, 1995
- [54] Majed , A.M., Mahmoud , A ,H and Hassan ,M.A., "Heavy metal contents of some Molluscs and Crustaceans Along Al Hodedah Sea ". *Bull. Nat .of Oceanog and fish* . 2002

- [55] Akbulut and Tuncer 2011.
- [56] BELITZ H.D.; GROSCH W.; SCHIEBERLE P., 2009- Food Chemistry.4th revised and extended ed., Springer, Verlags Berlin Heidelberg.
- [57] H Chakroun N. Hfaiedh, F.Makni-Ayadi, F. Guerhazi, A. Kammoun ,A Elfeki (2001).Nickel et fertilité chez le rat.p59-60
- [58] WHO(World Health Organization)(2005). Nickel in Drinkingwater
- [59] Plumlee, G.S. et Ziegler, T.L., 2003. The medical geochemistry of dust, soils and other earth materials. In: B.S. Lollar (Ed.), Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergamon, Oxford.
- [60] Callender, E., 2003. Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. In: B.S. Lollar (Ed.), Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergamon, Oxford.
- [61] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). "Toxicological profile for mercury", Atlanta,GA: U.S. 1999..
- [62] Slatni Ibtissem ; " Etude de la destruction ou la perturbation des espèces végétales par la pollution ", Mémoire de magister, Université De Med Cherif Messadia, 2014
- [63] Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). "Principles of Instrumental Analysis", Cengage Learning.
- [64] T. A. Taha · Hussein A. Elsayed · Ashour M. Ahmed · Ali Hajjiah,Ahmed Mehaney, "Theoretical design of phononic crystal cavity sensor for simple and efficient detection of low concentrations of heavy metals in water". Optical and Quantum Electronics (2022).
- [65] R. Lucklum, M. Zubtsov, and S. V. Arango, in Proc. ASME 2014 Int. "Mechanical Engineering Congress and Exposition", IMECE 2014 (Montreal, November 14–20, 2014).
- [66]-Ernst et al., 1996; Ernst and Manikowski, 1997),
- [67] Del Grosso and Mader (1972).
- [68] Tabellenbuch Chemie(1975).
- [69] Billah, K.Y., Scanlan, R.H.: "Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks", Am. J. Phys. 59, 118–124 (1991).
- [70] Giurgiutiu, Victor: "Vibration fundamentals. In: Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors", pp. 51–143. Elsevier (2014).
- [71] P. R.Villeneuve, S. Fan and J. D. Joannopoulos, "Microcavities in photonic crystals: Mode symmetry, tunability, and coupling efficiency", Phys. Rev. B 54, 7837 (1996).
- [72] Zheng Han, "Vers le laser Raman à cristal photonique en filière silicium", thèse d'Université Paris-Sud XI (2010).
- [73] K. M. Mayer and J. H. Hafner, "Localized Surface Plasmon Resonance Sensors", Chem. Rev.111, 3828 (2011).