

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N°: 2023/INST/.....



DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE: ELECTRONIQUE
OPTION: INSTRUMENTATION

Mémoire Présenté Pour L'obtention Du Diplôme De Master Académique

Présenté par :

Baali Abdelmalek

Berrabah Islam

Thème

**Etude et conception d'un capteur de Salinité
basé sur les cristaux phononiques 1D**

Soutenu devant le jury composé de:

KHEDROUCHE Djamel

Université Med Boudiaf M'sila

Président

KAHLOUCHE Ahmed

Université Med Boudiaf M'sila

Rapporteur

SAADA KHELKHAL Fayçal

Université Med Boudiaf M'sila

Examineur

Année Universitaire: 2022 /2023

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

- *A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père **BAALI SMAIN**.*
- *A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère **ZAHIA**.*
- *A ma chère Famille, qui n'ont pas cessée de m'encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*
- *A mon adorable petite sœur **Amira**, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*
- *A mes grands-mères, Que Dieu ait pitié de leurs âmes pures avec sa miséricorde et fasse de leur lieu de repos au paradis.*
- *A tous mes amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.*
- *Sans oublier mon binôme **ISLAM** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

Abdelmalek Baali ...#

Dédicaces

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

*Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon encadreur de ce mémoire, **Kahlouche Ahmed**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mon collègue **Baali Abdelmalek** qui m'ont apporté son soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs et mes frères pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Remerciement

Avant d'entamer le détail de notre projet de fin d'études, il nous tient à cœur de remercier toutes les personnes de mérite sans qui ce travail n'aurait jamais abouti.

*Nous exprimons nos vifs remerciements à notre encadreur **M. KAHLOUCHE AHMED** pour son soutien inconditionnel, sa disponibilité, ses conseils, son apport dans le projet et l'aide permanente qu'il nous a prodiguée.*

*Très grands sont les sentiments de gratitude et de considération que j'exprime à l'égard de notre tuteur de stage, **M. BAALI THAMER**, pour ses orientations, ses conseils et son aide précieuse tout au long de notre période de stage.*

Nous savons gré également aux membres du jury qui ont eu l'obligeance d'accepter d'évaluer ce travail.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la concrétisation de ce travail.

Résumé :

Les capteurs à cristaux phononiques offrent une nouvelle plate-forme pour les applications de détection haute performance. Ce travail contribue à la conception de capteurs de salinité basés sur la structure cristalline phononique 1D-DPnC défectueuse. Les structures étudiées sont de type (Plomb/Epoxy)²/défaut/(Epoxy/Plomb)², où la couche de défaut est remplie d'abord avec de l'eau douce, puis avec divers liquides contenant des concentrations élevées et différents teneurs en sel. Le calcul des coefficients de transmission par la méthode de la matrice de transfert montre que des modes résonants sont générés dans la bande interdite en raison des défauts.

Les résultats obtenus démontrent également que la force du mode de résonance est indépendante des propriétés spécifiques des sels dissous. Cependant, la fréquence de résonance du mode de transmission est très sensible à la concentration en sel dans le liquide analysé. Ces résultats suggèrent que cette structure a un fort potentiel pour détecter la salinité dans les liquides.

Mots clés : Capteurs de salinité, cristal phononique 1D, ondes acoustiques, matrice de transfert, eau salée.

Abstract :

Phononic crystal sensors offer a new platform for high performance sensing applications. This work contributes to the design of salinity sensors based on the defective 1D-DPnC phononic crystal structure. The structures studied are of the (Lead/Epoxy)²/defect/(Epoxy/Lead)² type, where the defect layer is filled first with fresh water, then with various liquids containing high concentrations and different contents. in salt. The calculation of the transmission coefficients by the transfer matrix method shows that resonant modes are generated in the forbidden band due to the defects.

The results obtained also demonstrate that the strength of the resonance mode is independent of the specific properties of the dissolved salts. However, the resonant frequency of the transmission mode is very sensitive to the salt concentration in the analyzed liquid. These results suggest that this structure has a strong potential to detect salinity in liquids.

Keywords: Salinity sensors, 1D phononic crystal, acoustic waves, transfer matrix, salt water.

الملخص :

تقدم أجهزة الاستشعار التي تعتمد على البلورات الصوتية منصة جديدة ومبتكرة لتطبيقات الكشف ذات الأداء العالي. يُسهم هذا العمل في تصميم أجهزة استشعار لقياس مستوى الملوحة في السوائل باستخدام هياكل بلورية فونونية ثنائية الأبعاد مع وجود عيوب.

يتم دراسة هذه الهياكل التي تتألف من طبقات $(\text{Epoxy/Plomb})^2/\text{défaut}/(\text{Plomb/Epoxy})^2$ ، حيث يتم ملء طبقة العيب بدايةً بالماء العذب. ثم مجموعة متنوعة من السوائل ذات تراكيز مختلفة من الملح، حيث يظهر حساب معاملات الانتقال باستخدام طريقة مصفوفة الانتقال أن هناك أوضاع رنينية تتشكل في الفقرة المحظورة بسبب وجود العيوب في الهيكل. ومن الملاحظ أن قوة وضع الرنين ثابتة ولا تتأثر بخصائص السوائل المحقونة. وعلى العكس من ذلك، فإن تردد وضع الانتقال يتأثر بشكل كبير بتركيز الملح في السائل المحلل ودرجة حرارة الماء. هذه النتائج تؤكد أن هذه الهياكل واعدة لتطبيقات استشعار الملوحة في السوائل. ومن الجدير بالذكر أن استخدام هذه الأجهزة الفونونية البلورية في تطبيقات كشف الملوحة يمكن أن يفتح آفاقًا جديدة في مجالات متعددة مثل صناعة المياه والزراعة والبيئة. قد يساهم التطوير المستمر لهذه التقنية في تحسين كفاءة عمليات قياس الملوحة وتوفير بيانات دقيقة وموثوقة لتلبية الاحتياجات المتزايدة للمستخدمين في هذه الصناعات المختلفة.

الكلمات المفتاحية : مستشعرات الملوحة ، الكريستال الصوتي أحادي الأبعاد ، الموجات الصوتية ، مصفوفة التحويل ، المياه المالحة.

Liste des Tableaux

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

Tableau IV.1: Paramètres physiques des différents matériaux constituant le cristal phononique solide/solide

Tableau IV. 2: Largeur (Δf) de bande interdite phononique et fréquence centrale (f_0) en fonction du nombre N de couches de plomb insérées dans le cristal

Tableau IV.3: Résultats de simulation pour différentes valeurs du facteur de remplissage

Tableau IV.4: Paramètres physiques et géométriques des matériaux constituant la structure multicouche à étudier

Tableau IV.5: Paramètres physiques des liquides utilisés à la température 20°C

Tableau IV.6 : Résultats de simulations obtenus pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche de défaut

Tableau IV.7: Paramètres physiques et géométriques des matériaux utilisés dans la structure multicouche étudiée

Liste des Figures

Figure I.1: Exemples schématiques de cristaux phononiques: 1D, 2D et 3D

Figure I.2: Représentation schématique d'un cristal phononique Unidimensionnel constitué de deux matériaux A et B

Figure I.3: Diagramme schématique d'une structure PnC-1D composée d'un réseau périodique de plomb et d'époxy avec une couche de défaut remplie d'acétone

Figure I.4: Structures périodiques constituées d'arrangement bidimensionnelles

(a) tiges d'inclusions dans l'air et (b) Cylindre d'air dans une matrice

Figure I.5: Images de structure périodique tridimensionnelle -3D-

Figure I.6: Domaines fréquentiels des ondes acoustiques

Figure I.7: Représentation schématique d'un solide traversé par une onde sonore longitudinale

Figure I. 8: Représentation schématique dans le cas d'un solide traversé par une vague d'ondes sonores transversales

Figure II.1: Structure d'un capteur

Figure II.2: Différents types de mesurandes

Figure II.3: Classification des capteurs – Terminologie

Figure II.4: Caractéristiques d'une chaîne de mesure

Figure II.5: Structure de l'acquisition numérique

Figure II.6: un exemple d'utilisation des capteurs à cristaux phononiques bidimensionnels comme capteurs de liquides consiste en une structure multicouche périodique de plomb et d'époxy

Figure II.7: Schéma des agencements de capteur. Un cristal phononique à incidence de son en fente et dans le plan

Figure III.1: Un flux de travail typique d'analyse par éléments finis

Figure III.2: la méthode saut de grenouille (ou leap-frog)

Figure III.3: Méthode Crank-Nicolson

Figure III.4: Un super-réseau à CnP-1D formé par alternance de deux couches d'impédances Z_1 et Z_2

Figure III.5: Une bicouche 1D avec des impédances Z_1 et Z_2 avec des couches externes d'impédances Z_0 et Z_L

Figure III.6: Un système à cristal phononique 1D composé de N bicouches

Figure III.7: Un système 1D composé de N bicouches et d'un défaut central de largeur d_C et d'impédance Z_C

Figure III.8: Coefficients de transmission et de réflexion des ondes longitudinale pour un cristal phononique (Al/Epoxy)¹⁰: **(a)** Transmission, **(b)** Réflexion.

Figure IV.1: Représentation schématique de la structure considérée [Plomb/Epoxy]_N

Figure IV.2: Spectre de transmission et de réflexion en fonction de la fréquence pour une onde longitudinale dans le cas d'un cristal 1D pour N=9 couches

Figure IV.3: Spectre de transmission en fonction le nombre des couches du plomb;

en bleu pour $N=5$ et en rouge pour $N=9$

Figure IV. 4: Evolutions de la largeur de la bande interdite ouverte en fonction le nombre de couches du plomb utilisées dans le PnC-1D

Figure IV. 5: Evolutions de la position de la bande interdite en fonction le nombre de couches utilisées dans le PnC-1D

Figure IV. 6: Spectres de transmission dans le cas d'une onde longitudinale à incidence

Normale ; en rouge pour $ff = 20\%$, et en bleue pour $ff = 40\%$

Figure IV.7: Variations de la largeur de la bande interdite ouverte en fonction

le facteur de remplissage ff (%) dans le cas d'un cristal PnC-1D

Figure IV.8: Variations de la location de la bande interdite ouverte en fonction le facteur de remplissage ff (%)

Figure IV.9. Représentation schématique du capteur à base d'un cristal phononique 1D - (Plomb/Epoxy)²/Défaut/(Epoxy/Plomb)² avec une couche de défaut remplie de l'eau

Figure IV.10: Spectre de transmission pour un CnP -1D parfait (en Noir), ensuite avec une couche de remplie de l'eau pure au centre d'épaisseur $D=0.5$ mm (en rouge).

Figure IV.11 : Spectre de réflexion pour un CnP -1D parfait (en Noir), ensuite avec une couche de remplie de l'eau pure au centre d'épaisseur $D=0.5$ mm (en rouge)

Figure IV.12: Spectre de transmission pour différents liquides: Eau pure (20°C), Cyclohexanone, Biodiesel, Méthanol, Ethanol, Kérosène dans le cas d'un CnP-1D [Plomb/Epoxy]²/Liquide/(Epoxy/Plomb)²].

Figure IV.13 : Coefficient de transmission en fonction de fréquence dans le cas du CnP- 1D pour différentes valeurs de l'épaisseur D de la couche du défaut

Figure IV.14: (a) : Evolution de la fréquence du mode résonant pour chaque liquide et (b): Evolution de la fréquence de décalage en fonction de l'épaisseur du défaut

Figure IV.15: Réponse de la position de la fréquence de résonance en fonction de la concentration en NaCl

Figure IV.16: (a) Evolution de la fréquence de résonance (*frésonance*) avec la concentration de NaCl. (b) Evolution de la variation en fréquence de résonance (Δf) en fonction la concentration de NaCl.

Figure IV.17: Représentation de la sensibilité en fonction la concentration en NaCl

Figure IV.18: Représentation du facteur de qualité en fonction la concentration

Figure IV.19: Représentation du facteur de mérite en fonction de la concentration C

Figure IV.20: Représentation de la lite de détection en fonction de la concentration C

SOMMAIRE

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Abstract

Liste des tableaux

Liste des figures

Sommaire

Introduction Générale 2

Chapitre I Généralités sur les cristaux phononiques

I.1. Introduction 5

I.2. Structures des cristaux phononiques 5

I.2.1. Définitions 5

I.2.2. Cristaux Electroniques, Photoniques et Phononiques 6

I.3. Familles des cristaux phononiques 7

I.3.1. Structures périodiques 1D 8

I.3.2. Structures périodiques 2D 9

I.3.3. Structures périodiques 3D 10

I.4. Bandes interdites phononiques 12

I.4.1. Type de réseau cristallin 12

I.4.2. Facteur de remplissage 12

I.4.3. Effet de la masse volumique 13

I.4.4. Effet de la célérité du son 13

I.5. Propagation des ondes acoustiques 13

I.5.1. Domaines de fréquences des ondes acoustiques 14

I.5.2. Ondes longitudinales 14

I.5.3. Ondes transversales 15

I.6. Application des cristaux phononiques 16

I.6.1. L'isolation acoustique 16

I.6.2. Détection de liquide 17

I.7. Conclusion 18

Chapitre II Capteurs à cristaux phononiques

II.1. Introduction	20
II.2. Définitions et caractéristiques d'un capteur	21
II.2.1. Définitions	21
II.2.1. Différents types de grandeurs mesurées	21
II.2.2. Caractéristiques des capteurs	22
II.2.3. Éléments de métrologie	23
II.2.4. Classement des capteurs	24
II.3. Structure d'une chaîne de mesure	25
II.3.1. Principe d'une chaîne de mesure	26
II.3.2. Structure d'une chaîne de mesure	26
II.4. Capteurs à Cristaux Phononiques	28
II.4.1. Méthode électrique	30
II.4.2. Méthode basée sur les cristaux photoniques	30
II.4.3. Méthode basée sur les cristaux phononiques	31
II.5. Concept de Capteurs a Cristaux Phononiques	32
II.5.1. Bases de la méthode	32
II.5.2. La tâche du cristal phononique	32
II.5.3. Avantages des capteurs à cristaux phononiques	33
II.6. Conclusion	33

Chapitre III Méthodes numériques de simulation

III.1. Introduction	35
III.2. Méthode des éléments finis FEM	35
III.2.1. Différents types de la Méthode des Eléments Finis	36
III.2.2. Étapes impliquées dans la méthode des éléments finis	36
III.2.3. Avantages et Applications de la méthode FEM	38
III.3. Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)	39
III.3.1. Historique et principe de base de la FDTD	40
III.3.2. Étapes impliquées dans la méthode FDTD	41
III.3.3. Avantages et limitations de la méthode FDTD	42
III.4. Méthode d'expansion des ondes planes (PWE)	43
III.4.1. Principe de base de la méthode PWE	43
III.4.2. Bases théoriques de la méthode PWE	43
III.4.3. Applications de la méthode PWE	44

III.4.4. Étapes impliquées dans la méthode PWE	44
III.5. Méthodes de la Matrice de Transfert	45
III.5.1. Super-réseaux unidimensionnels	45
III.5.2. Formalisme matriciel	46
III.5.3. Avantages et inconvénients de la méthode TMM	53
III.6. Conclusion	53
Chapitre IV : Résultats de Simulations et Discussions	
IV.1. Introduction	55
IV.2. Structure étudiée	55
IV.2.1. Présentation de la structure	55
IV.2.2. Spectre de transmission et de réflexion	56
IV.3. Etude de la bande interdite phononique	57
IV.3.1. L'influence du nombre de couches du Plomb	57
IV.3.2. L'influence du facteur de remplissage $ff(\%)$	59
IV. 4. Conception du capteur a cristal phononique 1D	62
IV. 4. 1. Présentation de la structure avec défaut	62
IV. 4. 2. Mode de résonance	63
IV. 4. 3. Principe de détection des liquides :	64
IV. 4. 4. Influence de l'épaisseur de la couche de défaut	66
IV.5. Détection de la salinité de l'eau	68
IV.5.1. Effet de concentration de NaCl	68
IV.5.2. Paramètres de performance d'un capteur	70
IV.6. Conclusion	73
Conclusion Générale	75
Bibliographie	78

Introduction Générale

Introduction générale

Les cristaux phononiques sont aujourd'hui largement utilisés pour contrôler, diriger et manipuler les ondes sonores. Les propriétés acoustiques de telles structures sont définies non seulement par les propriétés matérielles des constituants de la structure (au moins deux matériaux ayant des propriétés différentes), mais aussi par la conception (géométrie, symétrie, périodicité) [1,2]. La propagation des ondes élastiques/acoustiques à travers des cristaux phononiques caractéristiques des régions de longueur d'onde, à l'intérieur dans laquelle le son ne peut pas se propager à travers la structure, ce qu'on appelle les bandes interdites [3].

Étant donné que les propriétés acoustiques de ces composites dépendent des propriétés matérielles des composants constitutifs, une modification d'une propriété matérielle entraîne une modification du comportement de transmission de l'ensemble de la structure. Des analyses de cristaux phononiques composés d'un liquide ont montré qu'une variation des propriétés acoustiques de la composition liquide modifie leur réponse de manière distincte. Ces résultats permettent l'utilisation de ces structures cristallines dans le domaine de la détection des fluides. Ils fusionnent également les avantages des approches de détection de liquide ultrasonique et micro-acoustique [4].

Ces dernières années, une grande attention a été accordée aux structures multicouches qui ont été étudiées et proposées comme nouvelles structures pour mesurer les propriétés acoustiques des liquides [5,6]. Les caractéristiques de ces capteurs sont généralement basées sur la fréquence de résonance ou le taux de transmission. Le travail présenté dans ce mémoire représente une contribution théorique dans le domaine des capteurs de liquides à structures périodiques à bandes. La conception de capteurs de liquide à cristaux phononiques est basée sur la transmission et la réflexion des ondes acoustiques à travers la structure périodique. Ce mémoire est structuré en quatre chapitres [7].

Le premier chapitre de ce manuscrit 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, notamment dans le domaine de la détection et dans le domaine de l'isolation acoustique.

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 de mesure.

Dans le troisième chapitre, nous décrirons différentes méthodes théoriques couramment utilisées pour étudier et modéliser des structures périodiques, en particulier des structures multicouches. Les méthodes abordées dans ce chapitre sont la méthode des éléments finis FEM pour calculer les coefficients de transmission, la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), la méthode de séparation des ondes planaires (PWE), et de réflexion et la méthode de la matrice de transmission (TMM)[8,9] .

Dans le dernier chapitre, notre intérêt s'est porté sur l'étude de la structure phononiques de type solide/solide unidimensionnelle constituée d'inclusions de Plomb dans l'Epoxy. La première partie est entièrement consacrée à l'étude de l'influence de certains paramètres physiques et géométriques sur l'évolution de la bande interdite phononique. Dans la deuxième partie, notre intérêt se porte sur l'étude des cristaux phononique 1D avec défauts de type (Plomb/Epoxy)²/couche de défaut/(Epoxy/Plomb)² dont la couche de défaut sera remplie par différentes solutions ayant différentes concentrations de NaCl.

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

Généralités sur les cristaux phononiques

I.1. Introduction

Au cours des 30 dernières années, la propagation des ondes acoustiques/élastiques dans les nouveaux matériaux artificiels élastiques périodiques a connu un grand intérêt. Ces matériaux sont appelés cristaux phononiques (PnCs). Les cristaux phononiques ont suscité un intérêt croissant et des progrès importants. La nature périodique de cristaux phononiques donne des propriétés nouvelles qui ne peuvent pas être trouvées dans les matériaux en vrac, donnent également comme la capacité de contrôler la propagation des ondes acoustiques / élastiques. Les cristaux phononiques fait de matériau composite qui a différentes densité et propriétés élastiques. Les différents examens effectués sur les cristaux phononiques ont permis de mettre en évidence un grand nombre de leurs propriétés acoustiques remarquables ; L'arrangement et l'espacement entre ses éléments constitutifs.

La principale propriété de cette distribution périodique, qui a tant attiré les chercheurs, est la possibilité d'intervalles de fréquence où les cristaux phononiques se comportent comme une barrière pour les ondes acoustiques/élastiques. Ces intervalles de fréquence appelés bandes interdites phononiques.

Une grande partie de la recherche sur les effets de dispersion dans les cristaux phononiques est de nature théorique et repose sur divers outils de simulation numérique sophistiqués. Cela permet aux chercheurs de couvrir un large éventail de cadres phonémiques et de discerner leur comportement physique.

Des recherches établies ont même favorisé l'origine de nouvelles structures, montrant des activités physiques au-delà de la norme et conduisant à une autre classe de matériaux appelés méta-matériaux acoustiques [10].

I.2. Structures des cristaux phononiques

I.2.1. Définitions

Les cristaux phononiques sont des structures artificielles périodiques qui illustrent une périodicité spatiale suivant une, deux ou trois directions de l'espace. Ces matériaux sont capables de bloquer la propagation des ondes acoustique dans certaines directions et gamme de fréquence ou de longueur d'ondes, par le biais de réflexions de Bragg ou par le phénomène de résonance local des éléments mis en réseau. Le nom de cristaux phononiques a été choisi par analogie avec d'autres structures cristallines agissant sur la lumière s'appellent les cristaux photoniques. Les cristaux phononiques sont constitués au moins de deux matériaux aux propriétés acoustiques ou élastiques différentes (figure I.1).

Selon la composition matérielle d'un cristal phononique, on distingue trois types de cristaux phononiques : les cristaux de type solide/solide, les cristaux de type solide/fluide et les cristaux phononiques de type fluide/fluide. Alors que selon la périodicité spatiale, les cristaux phononiques peuvent être classés en trois familles : les cristaux phononiques unidimensionnels (PnC-1D), les cristaux phononiques bidimensionnels (PnC-2D) et les cristaux phononiques tridimensionnels (PnC-3D) [11].

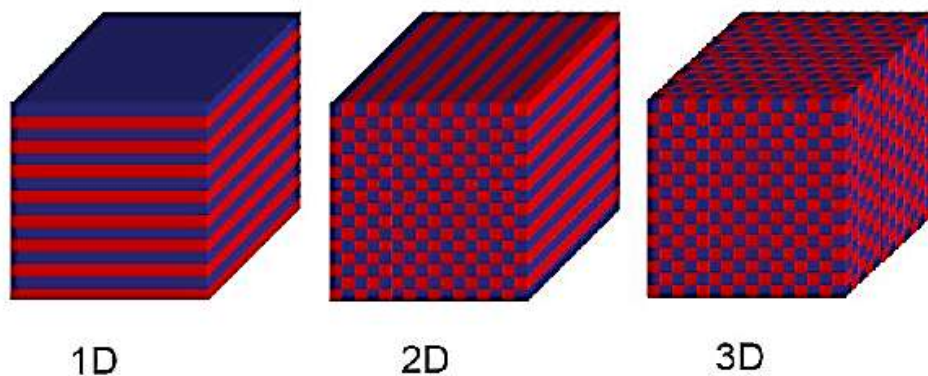


Figure I.1: Exemples schématiques de cristaux phononiques: 1D, 2D et 3D [12].

I.2.2. Cristaux Electroniques, Photoniques et Phononiques

En réalité, il y a une forte analogie entre la façon dont les électrons se propagent dans les cristaux électroniques, la manière dont les ondes optiques se propagent dans les cristaux photoniques, et la façon dont les ondes acoustiques ou élastiques se propagent dans les cristaux phononiques [11].

Bien que la structure de bande phonémique d'un cristal à intervalle phonémique soit similaire à la structure de bande d'un cristal à intervalle photonique, elle est également similaire à la structure de bande électronique d'un semi-conducteur [12]. Le concept de bande interdite, développé à l'origine dans le cadre de la théorie électronique des solides, peut être étendu à d'autres types d'ondes se propageant dans les composites [13].

La propagation des ondes électromagnétiques et/ou élastiques acoustiques dans les matériaux composites a suscité un intérêt particulier. Les cristaux photoniques et phononiques, qu'ils soient naturels ou artificiels, présentent une grande variété de propriétés physiques intéressantes, tant du point de vue de la recherche fondamentale que de la recherche appliquée [14]. En fait, les cristaux phononiques présentent des propriétés qui se rapprochent de celles des cristaux photoniques.

Le tableau I.1 illustre les propriétés fondamentales régissant la propagation des ondes électroniques, les ondes électromagnétiques et les ondes élastiques dans les structures périodiques tridimensionnelles isotropes [15].

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	Électromagnétiques 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	$\nabla^2 \psi + V(\mathbf{r})\psi - \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$	$\nabla^2 \mathbf{E} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) = \frac{\epsilon(\mathbf{r})}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$	$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_i} \right) \right] \right\}$
Particules libres	$W = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ (électrons)	$\omega = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} k$ (photons)	$\omega = c_{t,l} k$ (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	≤ 100 GHz ω

Tableau I.1 Propriétés clés pour l'étude des structures de bandes dans les matériaux tridimensionnels isotropes [16].

I.3. Familles des cristaux phononiques

Selon la périodicité spatiale on peut classer les cristaux phononiques en trois familles: Les cristaux phononiques unidimensionnels (1D), les cristaux phononiques bidimensionnels (2D) et les cristaux phononiques tridimensionnels (3D).

I.3.1. Structures périodiques 1D

Les structures périodiques unidimensionnelles (1D) sont les plus anciennes, elles sont obtenues par l'empilement en alternances suivant une seule direction de deux matériaux différents dans leurs propriétés physiques (Figure I.2).

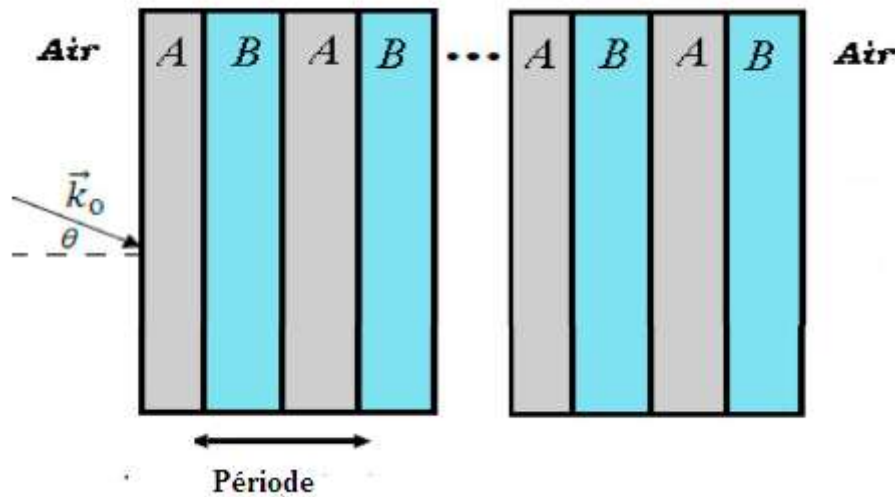


Figure I.2: Représentation schématique d'un cristal phononique Unidimensionnel constitué de deux matériaux A et B [17].

Les structures périodiques unidimensionnelles peuvent être créées par une variété de techniques, telles que la lithographie, l'holographie et l'auto-assemblage. Dans ces structures, les domaines de fréquence où les bandes interdites apparaissent dépendent principalement de la direction de propagation de l'onde incidente ce qui les rend utiles dans une variété d'applications, telles que la conception d'appareils photoniques, électroniques et acoustiques [18]. Dans le domaine de l'acoustique, les structures périodiques unidimensionnelles peuvent être utilisées pour créer des filtres qui bloquent certaines gammes de fréquences, des guides d'ondes qui contrôlent la direction et la propagation des ondes sonores, et des capteurs qui répondent à des fréquences spécifiques [19].

Des recherches récentes se sont concentrées sur le développement de nouvelles structures périodiques unidimensionnelles utilisant différentes combinaisons de matériaux et géométries, afin d'obtenir des propriétés nouvelles ou améliorées. Par exemple, l'utilisation de graphènes en combinaison avec d'autres matériaux s'est révélée prometteuse dans le développement d'appareils électroniques à haute performance. La figure I.3 présente un exemple d'une structure à cristaux phononique 1D utilisée dans le domaine des capteurs de liquides [20].

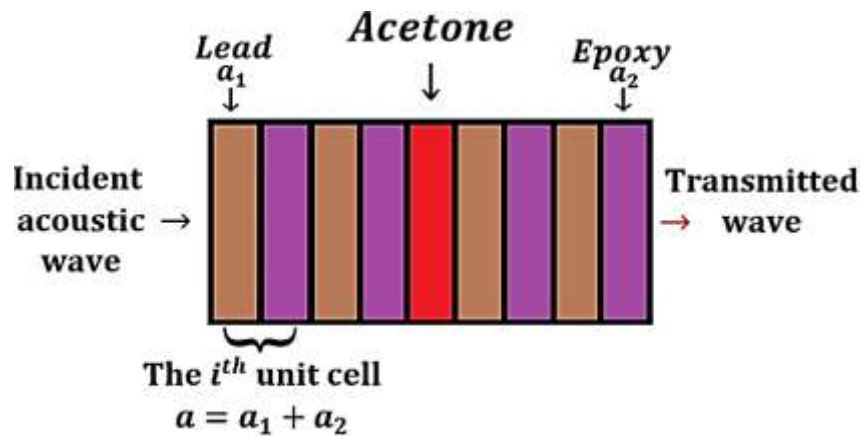


Figure I.3: Diagramme schématique d'une structure PnC-1D composée d'un réseau périodique de plomb et d'époxy avec une couche de défaut remplie d'acétone [20].

I.3.2. Structures périodiques 2D

Le cristal 2D est une structure bidimensionnelle périodique (2D) qui est une structure artificielle dont les propriétés physiques changent périodiquement dans deux dimensions spatiales et sont invariantes dans la troisième dimension (Figure I.4). Ces structures sont principalement regroupées selon trois réseaux : réseau carré, triangulaire et hexagonal. Ils sont généralement constitués de diffuseurs immergés dans une matrice. Le choix de la forme du réseau affecte et détermine les propriétés de la bande interdite ouverte, qui est la plage de fréquences sur laquelle la structure périodique présentera la bande interdite. Le réglage des paramètres de structure cyclique, tels que la taille de la cellule unitaire, joue un rôle important dans le réglage des propriétés de la structure de la bande interdite.

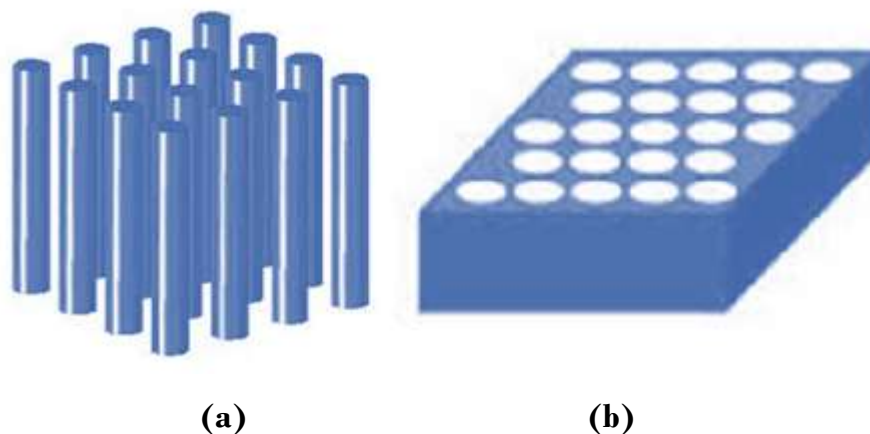


Figure I.4 : Structures périodiques constituées d'arrangement bidimensionnelles
 (a) tiges d'inclusions dans l'air et (b) Cylindre d'air dans une matrices.

Les structures 2D présentent une géométrie simple qui facilite leurs études théoriques et expérimentales. Par ailleurs, les matériaux utilisés dans les structures périodiques 2D vont des polymères aux métaux, aux semi-conducteurs et aux diélectriques ce qui les rendent utiles dans une variété d'applications. Dans le domaine de la photonique, les structures périodiques 2D contrôlent le comportement de la lumière, comme le guidage d'ondes, le filtrage et la génération de réseaux photoniques bidimensionnels. Dans l'électronique, les structures périodiques 2D sont utilisées pour contrôler la propagation des électrons résultant dans le développement de dispositifs électroniques avancés tels que les transistors et les photo-détecteurs. Dans le domaine de l'acoustique, ces structures périodiques 2D peuvent être utilisées comme filtres, guides d'ondes et des capteurs similaires aux structures périodiques 1D.

En résumé, les structures périodiques bidimensionnelles (PnC-2D) présentent un sujet de recherche intéressant qui a un grand potentiel pour de nombreuses applications. Ces structures offrent un contrôle et une manipulation uniques sur le comportement de la lumière, des électrons et du son dans un espace bidimensionnel. Avec le développement ultérieur, les structures périodiques 2D sont très prometteuses pour la création d'une nouvelle génération d'appareils avancés notamment dans le domaine des capteurs [21].

I.3.3. Structures périodiques 3D

Les structures périodiques tridimensionnelles (3D) sont des matériaux dont la structure est périodiquement modulée en trois dimensions de l'espace. Ces structures sont caractérisées par leur périodicité en trois dimensions, ce qui les distingue des structures périodiques 1D et 2D. Ils ont des propriétés uniques qui les rendent très utiles dans une variété d'applications telles que la photonique, l'électronique et l'acoustique. Malheureusement, les structures tridimensionnelles (CnPs-3D) présentent un inconvénient majeur qui réside dans le fait qu'elles soient difficiles à réaliser expérimentalement.

Une des façons les plus courantes de créer des structures périodiques 3D est par une technique appelée écriture laser directe, qui implique l'utilisation d'un faisceau laser focalisé pour polymériser un matériau photorésistant. D'autres techniques comprennent la lithographie de projection et la lithographie par faisceau d'électrons, qui peuvent également être utilisées pour fabriquer des structures 3D complexes à haute résolution.

Les structures périodiques 3D ont des applications importantes en photonique. En ajustant les paramètres de la structure périodique, comme l'espacement entre les cellules unitaires, il est possible de créer des structures qui filtrent ou piègent sélectivement la

lumière. Les cristaux photoniques 3D peuvent également être utilisés pour créer des masques d'invisibilité et des guides d'ondes pour la transmission de données à grande vitesse.

En électronique, les structures périodiques 3D peuvent être utilisées pour créer des dispositifs nouveaux et améliorés tels que les radiofréquences et les composants hyperfréquences. Les dispositifs à base de méta matériaux tels que les antennes, les filtres et les capteurs peuvent également être conçus à l'aide de ces structures.

Enfin, les structures périodiques 3D ont également des applications en acoustique. Elles peuvent être utilisées comme filtres acoustiques, guides d'ondes et autres dispositifs. En outre, ils offrent la possibilité de contrôler et de manipuler la propagation et la diffusion des ondes sonores, ouvrant ainsi des possibilités entièrement nouvelles pour l'ingénierie acoustique, la figure I.4 montre quelques exemples des structures tridimensionnelles (3D).

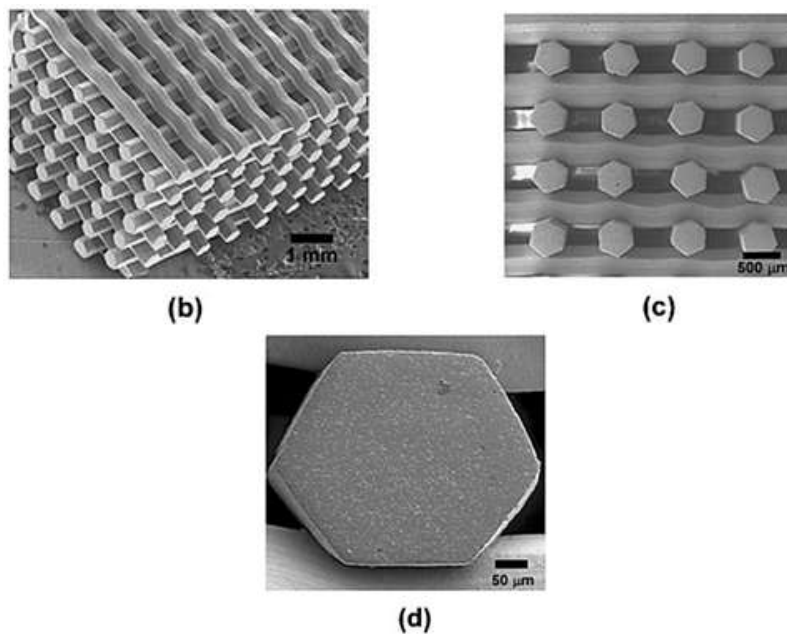


Figure I.5 : Images de structure périodique tridimensionnelle -3D- [22].

En résumé, les structures périodiques 3D sont un sujet de recherche intéressant avec de nombreuses applications potentielles en photonique, électronique et acoustique. En contrôlant soigneusement leurs propriétés géométriques et physiques, il est possible de créer des structures aux propriétés très appropriées et utiles. Au fur et à mesure que la recherche dans ce domaine se poursuit, le potentiel des structures périodiques 3D à révolutionner l'ingénierie et la fabrication de pointe ne fera qu'augmenter [23].

I.4. Bandes interdites phononiques

Semblable à la bande interdite électronique et à la bande interdite photonique, la bande interdite phonémique est la région de fréquences dans laquelle les ondes acoustiques ou élastiques ne peuvent pas se propager à travers des structures périodiques. L'ouverture de bande interdite dans le plan ou spatiale est obtenue lorsque toutes les bandes interdites unidimensionnelles se chevauchent au moins partiellement dans la première région de Brillouin. La largeur de bande phonémique est optimisée lorsque les bandes interdites sont concentrées à des énergies proches. La situation la plus favorable à l'ouverture de larges bandes est lorsque la zone de Brillouin est la plus isotrope possible. Elle est notamment obtenue pour des réseaux bidimensionnels triangulaires ou tridimensionnels faces centrées cubiques [24]. En effet, plusieurs paramètres physiques et géométriques ont une influence significative sur la largeur et la position des bandes ouvertes : type de réseau, facteur de remplissage et contraste des propriétés physiques, notamment la densité et la vitesse du son. vague.

I.4.1. Type de réseau cristallin

Par analogie avec les cristaux électroniques et photoniques, la position et la largeur des bandes interdites phononiques dépendent fortement de la forme du réseau cristallin et de la forme des inclusions. L'influence de la forme et de la symétrie des diffuseurs sur les propriétés du gap phononique d'un cristal phononique bidimensionnel a été étudiée par Kuang et al [24]. Par ailleurs, les cristaux phononiques peuvent être fabriqués suivant plusieurs types de réseaux ; carrés, triangulaires et hexagonaux. Les diffuseurs prennent aussi des formes multiples notamment cercles, triangles, hexagones et carrés.....etc.

I.4.2. Facteur de remplissage

Les propriétés des bandes ouvertes telles que la largeur et la position des bandes interdites sont fortement liées aux valeurs du facteur de remplissage. Les bandes interdites phononiques de petites tailles peuvent apparaître pour des faibles ou fortes valeurs du facteur de remplissage. D'autre part, des bandes apparaissent pour des facteurs de remplissage intermédiaires. Ces bandes ouvertes peuvent même disparaître pour des facteurs de remplissage trop faibles ou trop élevés. Cela, peut être expliqué par le fait que, si le facteur de remplissage est égal à 0% ou à 100%, la structure cristalline se ramène un milieu homogène (inclusions ou matrice).

I.4.3. Effet de la masse volumique

Les bandes interdites sont plus susceptibles de se produire lorsque les matériaux constituant le cristal présentent des densités et des constantes élastiques contrastées d'une manière significative. Les courbes de dispersion présentent une bande interdite phononique importante si les densités et les constantes élastiques des deux matériaux sont plus contrastés et un maximum de la largeur est atteint lorsque les deux contrastes sont très importants. Des observations pour les miroirs de Bragg 1D montrent que la largeur de la bande interdite augmente lorsque le contraste d'impédances acoustiques entre les matériaux constituant le miroir augmente.

Dans le cas unidimensionnel, cela s'explique par une augmentation du coefficient de réflexion des ondes élastiques à l'interface inclusion-matrice, cela augmente diffusivité et réduit la transmission directe de l'onde à travers les inclusions [25].

I.4.4. Effet de la célérité du son

Lorsque la vitesse de propagation du son dans les inclusions est plus lente que dans la matrice, l'ouverture de bande interdite phononique est favorisée. Une explication possible de ce phénomène est basée sur l'idée de multiples trajets d'ondes dans le cristal. Après s'être propagée dans les inclusions, l'onde subit plusieurs réflexions entre ces inclusions avant d'interférer avec les ondes les traversant directement. Ceci n'est possible que si les ondes se propageant directement sont ralenties par rapport aux ondes se propageant le long de longs trajets dans la matrice [25].

I.5. Propagation des ondes acoustiques

Les ondes sonores sont des vibrations propagées à travers un milieu par des charges et des décharges électriques adiabatiques. La vitesse des ondes sonores dépend des propriétés du milieu, telles que sa densité, son élasticité et sa viscosité. Les ondes sonores peuvent être générées par diverses sources, notamment des instruments de musique, des haut-parleurs et des phénomènes naturels tels que les tremblements de terre et le tonnerre. L'étude des propriétés et du comportement des ondes sonores s'appelle l'acoustique.

Dans un milieu isotrope uniforme, tel que l'air ou l'eau, les ondes sonores se propagent dans toutes les directions à des vitesses égales. C'est ce qu'on appelle la propagation sphérique. Cependant, dans un milieu hétérogène, tel qu'une pièce avec des murs, les ondes sonores peuvent être réfléchies, diffractées et absorbées, ce qui entraîne des formes d'onde complexes et une propagation directionnelle.

Un concept important dans la propagation des ondes acoustiques est l'équation d'onde, qui décrit la relation entre la fréquence, la vitesse et la longueur d'onde de l'onde. L'équation d'onde peut être utilisée pour analyser les propriétés des ondes acoustiques, telles que leur comportement de diffraction et d'interférence.

Un autre facteur important dans la propagation des ondes acoustiques est les conditions aux limites du milieu. L'impédance acoustique du milieu, qui est le produit de sa densité et de la vitesse du son, joue un rôle essentiel dans la détermination de la manière dont les ondes acoustiques interagissent avec les frontières. Par exemple, lorsqu'une onde acoustique rencontre une frontière entre deux supports avec des impédances acoustiques différentes, elle peut être réfléchiée dans le support d'origine ou transmise dans l'autre support [25].

1.5.1. Domaines de fréquences des ondes acoustiques

Les ondes sonores peuvent également être affectées par des facteurs externes, tels que les changements de température et de pression, qui peuvent modifier leur vitesse et leur fréquence. Cela a des applications importantes dans des domaines tels que l'imagerie par ultrasons et les tests non destructifs, où les ondes sonores sont utilisées pour sonder les propriétés internes des matériaux. Le schéma ci-dessous présente les principales applications du son et des ondes sonores selon la fréquence des signaux utilisés [26].

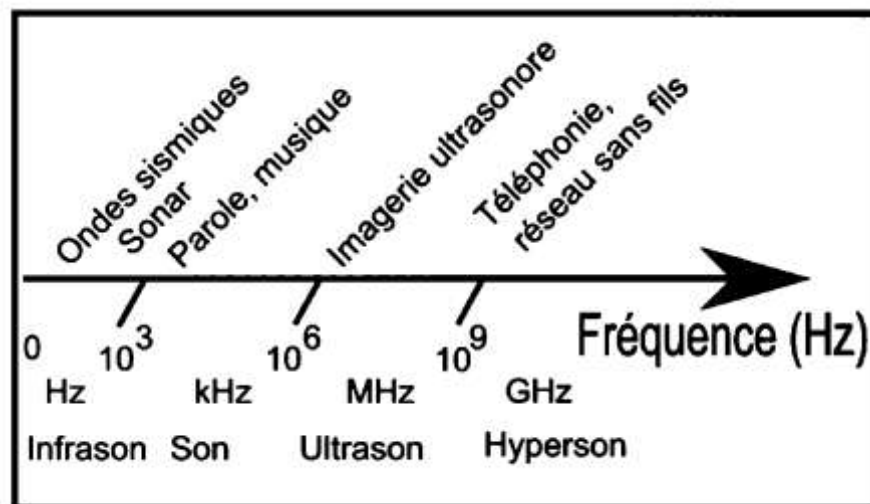


Figure I.6 : Domaines fréquentiels des ondes acoustiques [27].

1.5.2. Ondes longitudinales

Les ondes élastiques et acoustiques sont appelées ondes longitudinales ou ondes de compression, lorsque le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation des ondes, c'est-à-dire selon une polarisation alignée avec le vecteur d'onde

(Figure I.7) . La propagation longitudinale des ondes d'un plan provoque une modification de la distance entre les plans parallèles contenant des particules de sorte que le volume occupé par certaines particules change. Les ondes longitudinales se propagent généralement dans les solides, les liquides et les gaz. Cependant, avec les très hautes fréquences utilisées dans les contrôles non destructifs, l'atténuation de ces ondes est très élevée dans le gaz. Ainsi, les ondes sonores longitudinales ne peuvent réellement se propager que dans les solides et les liquides [27].

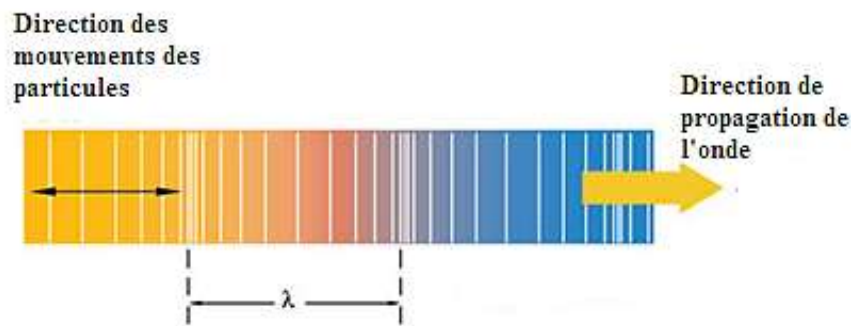


Figure I.7 : Représentation schématique d'un solide traversé par une onde sonore longitudinale [27].

I.5.3. Ondes transversales

Ondes sonores élastiques et transversales, communément appelées ondes de cisaillement. Ce type d'onde consiste en des déplacements perpendiculaires à la direction de propagation. Ainsi, le glissement de plans parallèles n'engendre aucune variation de volume puisque la distance entre les plans est conservée.

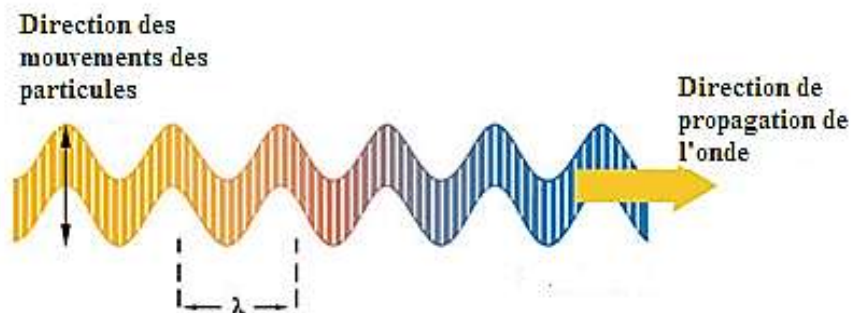


Figure I. 8: Représentation schématique dans le cas d'un solide traversé par une vague d'ondes sonores transversales [27].

Si les directions de propagation de ces ondes acoustiques et élastiques transversales sont infinies dans toutes les directions contenues dans ce plan, alors l'onde transverse est dite polarisée. En d'autres termes, ils sont caractérisés par une polarisation perpendiculaire

au vecteur d'onde ou tout simplement, des particules oscillant de part et d'autre de la ligne de leur position d'origine. Les ondes transversales ne peuvent se propager que dans les solides ou les liquides visqueux. La figure I.8 montre un schéma d'un corps solide coupant une onde transversale [28].

En résumé, la propagation des ondes sonores est un phénomène complexe et important qui joue un rôle central dans des domaines tels que la musique, les médias et l'ingénierie. En comprenant les principes fondamentaux de la propagation des ondes sonores, les chercheurs peuvent développer de nouvelles technologies et améliorer celles existantes pour mieux exploiter la puissance du son [27].

I.6. Application des cristaux phononiques

Les cristaux phonologiques sont des matériaux avec une structure disposée périodiquement. Ces structures cristallines sont capables de diriger, bloquer et contrôler la propagation des ondes sonores grâce à la présence de bandes interdites phonémiques. Ces dernières années, la recherche scientifique sur les cristaux phononiques a montré que ces structures ont un large éventail d'applications, notamment dans le domaine de l'isolation acoustique et dans le domaine de la détection des liquides.

I.6.1. L'isolation acoustique

Les barrières acoustiques ou les écrans acoustiques sont des structures externes qui représentent une méthode plus efficace pour réduire les sources de bruit industriel et routier. Ils sont conçus autour de cristaux phononiques et sont destinés à protéger les usagers sensibles des sols des nuisances sonores. On peut citer que la première application dans le domaine de l'isolation acoustique a été proposée par Kushwaha et ses collègues [27]. En effet, nous avons vu que pour toutes les fréquences contenues dans une bande totalement interdite, le cristal phononique agit comme une vraie paroi contre toutes les ondes acoustiques incidentes. Alors, il est possible de concevoir des murs insonorisés pour le trafic des autoroutes en basant sur ce principe et par conséquent, isoler l'espace derrière le mur d'une partie des fréquences sonores.

Dans une telle application les cycles mis en jeu sont de l'ordre du mètre, et tout le jeu de la conception réside dans cette capacité à diminuer si la plage de fréquence non blindée est trop élevée, l'oreille humaine est sensible aux fréquences audio comprises entre 20 et 20000Hz.

16.2. Détection de liquide

La bande interdite d'un cristal phononique peut être utilisée pour détecter des changements dans les propriétés du matériau, telles que la température, la composition chimique ou la taille. Un développement récent dans le domaine de la détection est la détection de la salinité. La salinité est un paramètre important dans de nombreux domaines, notamment l'océanographie, la biologie et les sciences de l'environnement, pour n'en nommer que quelques-uns. Les chercheurs ont exploré des moyens de développer des capteurs capables de détecter avec précision la salinité de manière non destructive.

Ces dernières années, les cristaux phononiques sont apparus comme des candidats potentiels pour le développement de capteurs de salinité en raison de leur excellente sensibilité et sélectivité. En 2022, une étude a été menée sur l'utilisation de résonateurs photoniques en anneau pour détecter la salinité à différentes températures. Les chercheurs ont découvert que le résonateur photonique en anneau pouvait détecter de manière sélective les variations des niveaux de salinité, ouvrant de nouvelles opportunités pour le développement de nouveaux capteurs [28].

Une autre étude a proposé une méthode de synthèse contrôlable pour le PtSe₂ atomiquement mince de haute qualité, qui peut être utilisé comme détecteur de salinité sensible et sélectif. Cette méthode a utilisé des cristaux phononiques pour contrôler la structure de la bande interdite du PtSe₂, conduisant à une détection sensible et sélective de la salinité avec une grande précision [28].

Les cristaux phononiques ont également été utilisés dans le développement de biocapteurs, de capteurs chimiques et de capteurs mécaniques. La capacité de manipuler et de contrôler la propagation des ondes dans les cristaux phononiques a permis le développement de capteurs sensibles et sélectifs pour une large gamme d'applications.

En plus des applications de détection, les cristaux phononiques ont été appliqués dans le domaine de la récupération d'énergie. Les cristaux phononiques peuvent convertir la chaleur perdue en énergie utile, ce qui offre une nouvelle approche des sources d'énergie à faible puissance. En concevant des cristaux phononiques avec des structures de bande interdite appropriées, les chercheurs ont pu récupérer l'énergie de la chaleur perdue avec une grande efficacité.

Les cristaux phononiques ont également été utilisés dans des applications de traitement du signal, notamment des filtres acoustiques et des guides d'ondes. Les cristaux phononiques peuvent être utilisés pour concevoir des filtres acoustiques complexes avec des bandes de transition et des bandes d'atténuation nettes. En contrôlant la structure de la

bande interdite du cristal phononique, les chercheurs peuvent créer des filtres avec des bandes passantes spécifiques, qui filtrent efficacement les ondes acoustiques dans des plages de fréquences spécifiques. Les cristaux phononiques peuvent également être utilisés pour concevoir des guides d'ondes acoustiques qui contrôlent la propagation et la redirection des ondes.

En conclusion, les cristaux phononiques sont un matériau prometteur pour de nombreuses applications. Ils ont montré leur potentiel et suscité une attention considérable ces dernières années en raison de leur capacité à contrôler la propagation des ondes acoustiques. Les propriétés uniques des cristaux phononiques ont permis le développement de nouveaux dispositifs pour un large éventail d'applications.

I.7. Conclusion

Les cristaux phononiques constitue un nouveau domaine de la physique appliquée depuis une vingtaine d'années qui a fait l'objet d'une grande attention de la part des chercheurs. Ce sont des structures périodiques composées d'au moins deux matériaux différents, elles nous permettent de manipuler et de contrôler la propagation des ondes mécaniques dans les matériaux. La technologie des cristaux phonémiques ouvre la voie à de nouvelles possibilités passionnantes, notamment dans le domaine de la détection.

Dans ce chapitre, nous avons couvert les concepts de base des cristaux phonémiques et des ondes sonores. Nous concluons ce chapitre avec des concepts de base liés à certaines applications des phononiques.

Chapitre II

Capteurs à cristaux phononiques

II.1. Introduction

Dans le monde d'aujourd'hui, axé sur la technologie, les capteurs jouent un rôle de plus en plus important dans des domaines aussi divers que la santé, la surveillance de l'environnement et l'automatisation industrielle. Les capteurs nous permettent de collecter et de traiter des données sur le monde qui nous entoure, nous fournissant des informations précises et opportunes. Grâce aux progrès de la technologie des capteurs et de la science des matériaux, les capteurs sont devenus plus petits, plus robustes et plus sensibles, permettant de nouvelles applications et innovations. Cependant, malgré leur utilisation généralisée, il reste de nombreux défis dans la conception des capteurs, notamment la réduction de la consommation d'énergie, l'augmentation de la fiabilité des données du capteur et le développement de nouvelles modalités de détection.

À la base, les capteurs sont des appareils qui détectent et réagissent aux stimuli physiques ou aux changements de l'environnement qui les entoure. Ces changements peuvent aller de la température et de la pression à la lumière et au son. Les capteurs convertissent ensuite ces informations physiques en un signal électrique qui peut être traité et analysé par un ordinateur ou un autre appareil électronique. Il existe plusieurs types de capteurs électroniques, chacun avec ses propres caractéristiques et applications. Certains des types de capteurs les plus courants comprennent les capteurs de température, les capteurs de pression, les capteurs de proximité et les capteurs de mouvement [29].

Par exemple, les capteurs de température sont utilisés pour détecter les changements de température et se trouvent couramment dans les thermostats, les réfrigérateurs et les climatiseurs. Les capteurs de pression, quant à eux, sont utilisés pour détecter les changements de pression et peuvent être trouvés dans des applications telles que les systèmes de surveillance de la pression des pneus et les baromètres. Les capteurs de proximité sont utilisés pour détecter la présence ou l'absence d'un objet à une certaine distance et sont couramment utilisés dans les systèmes d'automatisation industrielle. Les capteurs de mouvement sont utilisés pour détecter les mouvements et se trouvent couramment dans les systèmes de sécurité et les contrôleurs de jeu [30].

Les progrès récents de la technologie des capteurs ont conduit au développement de capteurs bioélectroniques capables de détecter les changements dans l'environnement liés spécifiquement aux processus biologiques, tels que la présence de certains produits chimiques ou bactéries. Ces capteurs ont le potentiel de révolutionner des domaines tels que la santé et la surveillance de l'environnement.

II.2. Définitions et caractéristiques d'un capteur

II.2.1. Définitions

Le Capteur est un dispositif de mesure chargé de convertir les modifications des processus physico-chimiques en quantités utilisables. Les capteurs sont des composants essentiels de la technologie moderne, permettant de convertir d'une grandeur physique en une autre grandeur physique qui a une image généralement électrique. Ce signal électrique, différent de la grandeur mesurée et peut être collecté, traité puis exploité avec des ordinateurs et d'autres appareils électroniques afin d'améliorer notre capacité à comprendre et à interagir avec le monde qui nous entoure.

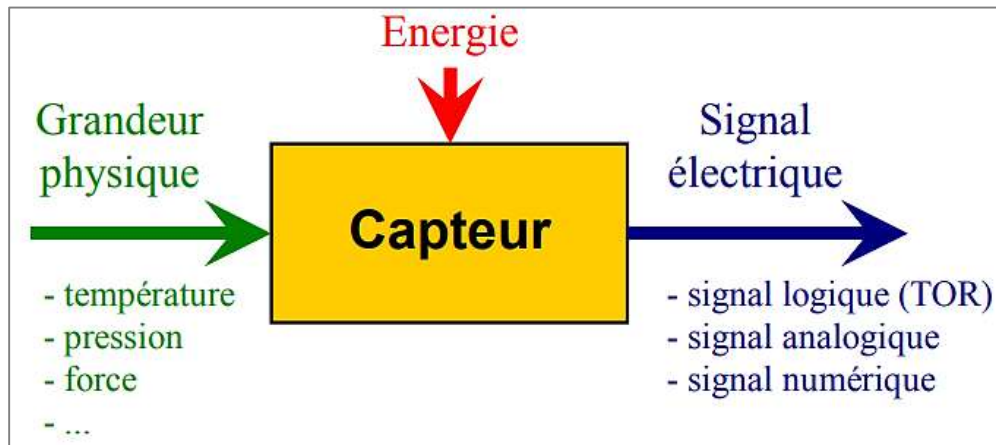


Figure II.1 : Structure d'un capteur

Le capteur possède une entrée et une sortie. L'entrée est une grandeur physique que le capteur mesure, telle que la position, la pression, la température, le niveau, le déplacement ou tout autre paramètre pertinent. Cette grandeur physique fournit, par son état ou ses variations, une information utile à l'unité d'acquisition et de traitement du capteur.

La sortie du capteur est une tension électrique. Cette tension correspond précisément à la sortie de la chaîne de mesure du capteur. Le signal de sortie est appelé signal exploitable et peut être de nature analogique (continu dans le temps), logique (binaire 0 ou 1, ou TOR : tout ou rien) ou numérique (valeur supérieure à deux états).

II.2.1. Différents types de grandeurs mesurées

Les capteurs sont des éléments utilisés pour la mesure d'une grandeur physique en général non électrique (appelée mesurande) telles que : un déplacement, une position, une température, une pression, une force,....

. Selon la nature ou la forme du mesurande, on peut distinguer trois types de mesurandes. La figure II.2 illustre les différents types de mesurandes.

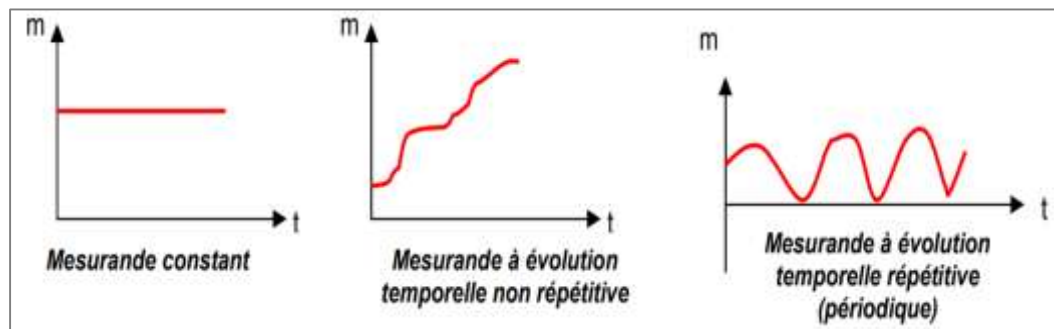


Figure II.2: Différents types de mesurandes [31]

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 des capteurs

En général, on peut classer les capteurs selon leurs performances métrologiques, pour cela, il est nécessaire de définir certaines caractéristiques métrologiques afin que les capteurs puissent être sélectionnés en fonction de l'application visée.

- L'étendue de mesure

L'étendue de mesure correspond aux valeurs extrêmes que le capteur peut mesurer. Il s'agit de la plage de mesure maximale et minimale que le capteur est capable de détecter. Cette plage est généralement spécifiée par le fabricant du capteur.

- La résolution d'un capteur

Elle correspond au plus petit changement de grandeur mesurable que le capteur peut mesurer. Cela signifie que le capteur doit être capable de détecter les plus petits changements dans la quantité mesurée afin de fournir une mesure précise.

- La sensibilité d'un capteur

Elle représente la variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée. En d'autres termes, la sensibilité correspond à la capacité du capteur à mesurer un changement de la quantité d'entrée et à convertir ce changement en un changement proportionnel du signal de sortie. Par exemple, le capteur de température LM35 a une

sensibilité de 10 mV/°C, ce qui signifie qu'un changement de température de 1°C entraîne un changement de 10 mV du signal de sortie.

- **La précision d'un capteur**

Elle représente la capacité du capteur à donner une mesure proche de la vraie valeur. En d'autres termes, la précision correspond à la capacité du capteur à donner une mesure sans erreur systématique. La précision est généralement évaluée en comparant les mesures prises par le capteur avec des mesures de référence connues.

- **La rapidité d'un capteur**

Elle représente le temps de réponse du capteur. La vitesse est liée à la bande passante du capteur, c'est-à-dire à la plage de fréquences sur laquelle le capteur peut mesurer les variations de la grandeur d'entrée. Plus la bande passante du capteur est large, plus le capteur est rapide. La vitesse est une caractéristique importante pour les capteurs utilisés dans les applications où une réponse rapide est requise.

II.2.3. Éléments de métrologie [32]

- **Le mesurage** : est l'ensemble des opérations effectuées dans le but de déterminer la valeur d'une grandeur.

- **La mesure (x)** : La mesure quantifie une grandeur en la comparant avec une autre grandeur de même nature utilisée comme unité. Par exemple, 2 mètres, 400 grammes, 6 secondes sont des mesures.

- **La grandeur (X)** : est un paramètre qui doit être contrôlé lors de la fabrication ou du transfert d'un produit, tel que la pression, la température ou le niveau. Les mesures sont utilisées pour obtenir des informations sur l'état et l'évolution de certains phénomènes physiques, chimiques ou industriels.

- **L'incertitude (dx)** : est une caractéristique importante de la mesure. Le résultat x de la mesure d'une grandeur X ne peut être entièrement défini par un seul nombre. Il est nécessaire de caractériser la mesure par un couple (x, dx) et une unité de mesure, où dx représente l'incertitude sur x. Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure.

Par conséquent, on a toujours $x-dx < X < x+dx$.

Par exemple, 3 cm \pm 10%, ou 3 cm \pm 3 mm.

- **L'erreur absolue (e)** : est la différence entre la valeur de la mesure et la valeur vraie du mesurande. L'erreur absolue s'exprime dans l'unité de la mesure et peut être calculée comme $e = x - X$.

Par exemple, une erreur de 10 cm sur une mesure de distance.

- **L'erreur relative (e_r)** : est le rapport de l'erreur de mesure à la valeur vraie du mesurande. L'erreur relative est généralement exprimée en pourcentage de la grandeur mesurée, et peut être calculée comme $e_r = e/X$; $e_r\% = 100 e_r$.

Par exemple, une erreur de 10% sur une mesure de distance correspond à une erreur de 10% de la distance réelle.

II.2.4. Classement des capteurs

Les capteurs peuvent être classés en fonction de divers critères, tels que leur mode de fonctionnement, le type de mesure et la technique utilisée. Dans ce travail, nous aborderons les classifications des capteurs en fonction de leur mode de fonctionnement.

- **Capteurs actifs :**

Les capteurs actifs émettent de l'énergie dans l'environnement pour mesurer le signal réfléchi ou rétrodiffusé par la cible. L'énergie réfléchie est alors détectée par le capteur. Les exemples les plus courants de capteurs actifs sont le radar et le lidar. Ils sont utilisés dans les systèmes de navigation, la détection d'obstacles et les études atmosphériques et océaniques.

- **Capteurs passifs :**

Les capteurs passifs n'émettent aucune énergie dans l'environnement. Au lieu de cela, ils détectent des rayonnements ou des signaux déjà présents dans l'environnement. Les capteurs optiques et les capteurs infrarouges sont deux exemples de capteurs passifs. Ils sont utilisés pour détecter la température, l'humidité et la qualité de l'air.

- **Capteurs analogiques et numériques :**

Les capteurs analogiques détectent et mesurent les changements dans les conditions physiques et produisent un signal analogique continu proportionnel au changement. Des exemples de capteurs analogiques incluent les thermistances, les capteurs de pression et les jauges de contrainte. Les capteurs numériques, quant à eux, produisent un signal numérique représentant la condition physique qui est mesurée.

Dans le domaine industriel, il existe des capteurs numériques comprenant des capteurs de température et d'humidité.

- **Capteurs avec et sans contact :**

Les capteurs avec contact nécessitent un contact physique avec l'objet qu'ils mesurent. Des exemples de capteurs de contact comprennent des capteurs de température et de pression. En revanche, les capteurs sans contact peuvent mesurer l'objet sans contact avec lui. Des exemples de capteurs sans contact comprennent des capteurs optiques et à ultrasons.

- Capteurs absolus et incrémentaux :

Les capteurs absolus mesurent la valeur absolue d'une variable physique, tandis que les capteurs incrémentaux mesurent la variation de la variable physique par rapport à une valeur de référence. Des exemples de capteurs absolus incluent des capteurs de position absolue, tandis que des capteurs incrémentaux incluent des codeurs rotatifs incrémentaux.

- Capteurs de proximité :

Les capteurs de proximité détectent la présence d'un objet à proximité immédiate du capteur. Ces capteurs sont utilisés dans l'automatisation industrielle, et des exemples incluent des capteurs capacitifs, inductifs et à ultrasons.

Les capteurs peuvent être classés en fonction de leur mode de fonctionnement en capteurs actifs et passifs, capteurs analogiques et numériques, capteurs avec et sans contact, capteurs absolus et incrémentaux et capteurs de proximité.

En fonction de l'application et de la grandeur physique mesurée, le type de capteur approprié peut être sélectionné. Avec les progrès de la technologie, de nouveaux types et classifications de capteurs sont inventés sur la base de nombreuses structures et matériaux différents.

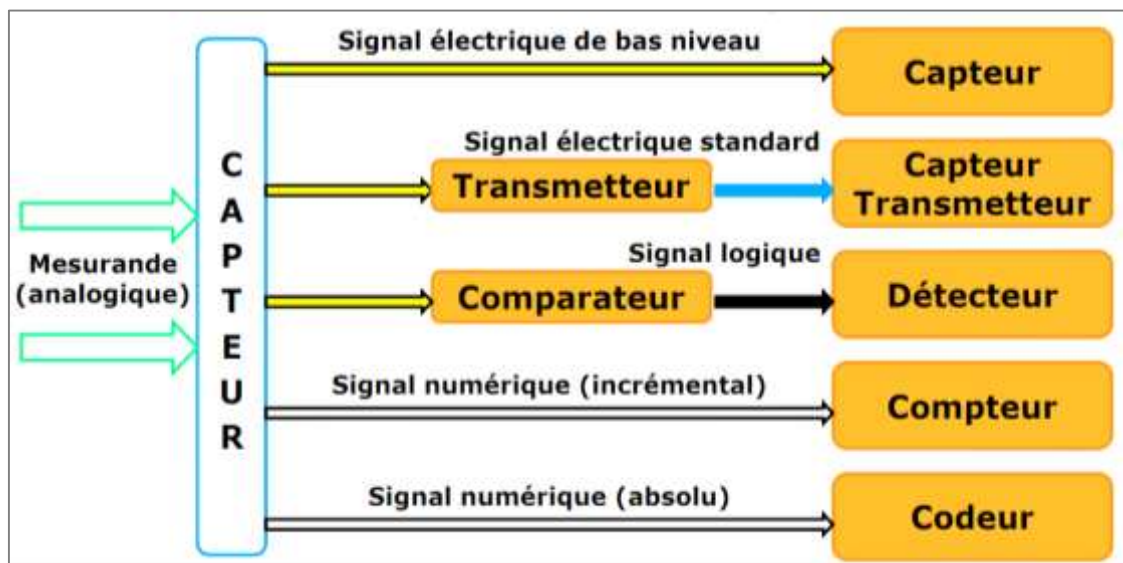


Figure II.3 : Classification des capteurs – Terminologie [33]

II.3. Structure d'une chaîne de mesure

Une chaîne de mesure est essentiellement constituée d'un capteur, d'un conditionneur, d'un dispositif de filtrage si nécessaire, d'un convertisseur analogique numérique, d'un système numérique de calcul puis du dispositif d'affichage.

II.3.1. Principe d'une chaîne de mesure

La chaîne de mesure, également appelée chaîne d'acquisition, a pour rôle de récupérer et de transformer la grandeur physique à mesurer en une forme adaptée à son utilisation. Elle est composée de plusieurs éléments, tels qu'un capteur, un conditionneur, un éventuel dispositif de filtrage, un convertisseur analogique-numérique, un système de calcul numérique, ainsi qu'un dispositif d'affichage.

Les capteurs sont des dispositifs qui permettent de convertir une grandeur physique en une grandeur électrique, qui peut ensuite être traitée par la chaîne de mesure. Le conditionneur de signal, quant à lui, adapte le signal électrique du capteur aux caractéristiques de la chaîne d'acquisition. Le dispositif de filtrage permet de supprimer les bruits indésirables du signal. Le convertisseur analogique-numérique transforme le signal électrique analogique en signal numérique, qui est ensuite traité par le système numérique de calcul. Enfin, le dispositif d'affichage permet d'obtenir une information lisible et compréhensible pour l'utilisateur.

II.3.2. Structure d'une chaîne de mesure

Quel que soit la complexité d'un système de mesure, la structure de base de la chaîne de mesure comprend au minimum les étages suivants :

- **Un dispositif de détection** : Le dispositif de détection est un composant qui réagit aux vibrations d'une grandeur physique, en convertissant ces fluctuations en un signal électrique.
- **Un conditionneur de signal** : le conditionneur est un circuit électronique qui amplifie le signal électrique du capteur pour le mettre à niveau avec l'unité de numérisation ; cet étage peut parfois inclure un filtre pour réduire les perturbations présentes sur le signal.
- **Une unité de numérisation** : L'unité de numérisation échantillonne le signal à intervalles réguliers et attribue un numéro (image de tension) à chaque point d'échantillonnage.
- **L'unité de traitement informatique** : L'unité de traitement informatique est la dernière étape de la chaîne de mesure en utilisant les valeurs mesurées enregistrées sous forme d'une série de nombres. L'appareil est capable d'afficher des courbes, d'enregistrer des données, d'effectuer des traitements mathématiques et même de transmettre les résultats obtenus.

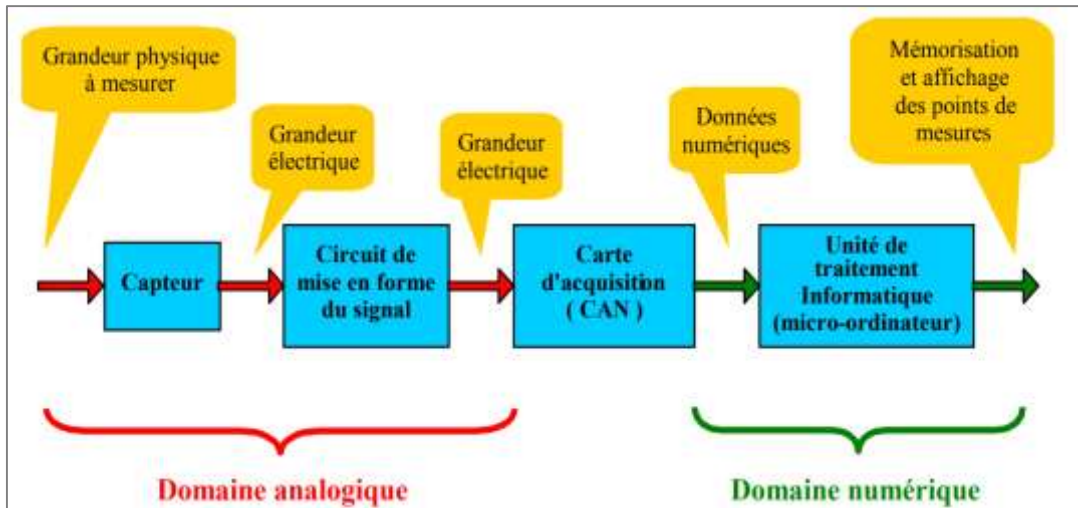


Figure II.4 : Caractéristiques d'une chaîne de mesure [32].

La figure II.4 est un schéma synoptique qui illustre les étapes nécessaires dans le processus de conversion d'une grandeur physique en un signal électrique exploitable généralement numérique.

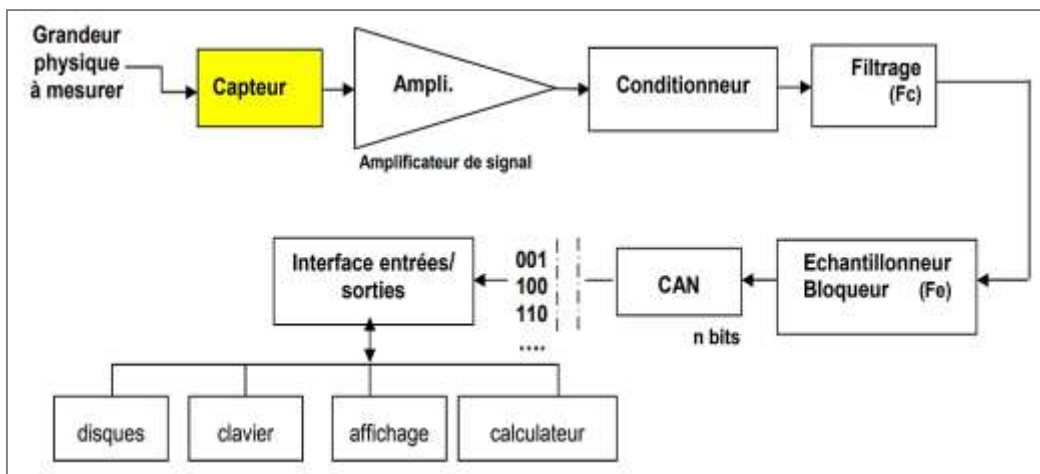


Figure II.5 : Structure de l'acquisition numérique [30]

La figure II.5 illustre un exemple d'une chaîne de mesure, la structure de la chaîne montre les différentes étapes de l'acquisition de donnée numérique. L'acquisition de donnée passe par les processus suivant:

- **Capteur** : C'est l'élément qui permet de mesurer une grandeur physique et de la convertir en un signal électrique. Il joue le rôle d'interface entre le monde physique et le monde électrique.
- **Amplificateur de signal** : Cette étape permet d'augmenter le niveau du signal électrique délivré par le capteur pour qu'il soit compatible avec la chaîne globale d'acquisition.

- **Conditionneur de signal** : L'étage de conditionnement du signal est crucial pour la qualité des mesures. Il transforme la grandeur de sortie du capteur en une tension, adapte l'impédance pour le capteur et limite l'amplification en mode commun.
- **Filtre d'entrée** : Le filtre d'entrée permet de limiter le contenu spectral du signal aux fréquences qui nous intéressent. Il supprime les parasites et a un rôle de filtre passe-bas, caractérisé par sa fréquence de coupure et son ordre.
- **Échantillonneur-bloqueur** : L'échantillonneur permet de figer l'échantillon pendant le temps nécessaire à la conversion. Son rôle est de prélever à chaque période d'échantillonnage la valeur du signal.
- **Convertisseur analogique-numérique (CAN)**: Le convertisseur analogique numérique (CAN) transforme la tension analogique de l'échantillon en un code binaire (numérique) qui peut être traité par la suite.
- **Zone de stockage** : La zone de stockage peut être un support de traitement comme un ordinateur, un élément de sauvegarde comme la RAM ou le disque dur, ou encore un dispositif de transmission vers un récepteur situé plus loin.
- **Convertisseur numérique-analogique (CNA)** : Le convertisseur numérique analogique (CNA) effectue l'opération inverse du convertisseur analogique numérique (CAN) et transforme le signal numérique en une tension analogique proportionnelle au code numérique.
- **Filtre de sortie** : Le filtre de sortie permet de lisser le signal de sortie pour ne restituer que le signal utile. Il a les mêmes caractéristiques que le filtre d'entrée.
- **Amplificateur de puissance** : L'amplificateur de puissance adapte la sortie du filtre à la charge pour assurer une transmission optimale du signal.

II.4. Capteurs à Cristaux Phononiques

Les capteurs à cristaux phononiques peuvent également être utilisés dans des applications industrielles telles que la détection de défauts et la surveillance de machines tournantes. L'une des applications les plus prometteuses des capteurs à cristaux phononiques se situe dans le domaine de la biomédecine. Les chercheurs ont travaillé sur la conception de cristaux phononiques capables de détecter la présence de cellules cancéreuses, de bactéries et d'autres agents pathogènes dans les fluides biologiques. Ces capteurs reposent sur les modifications des propriétés acoustiques du fluide qui se produisent lorsque les agents pathogènes ou les cellules sont présents. En utilisant des techniques avancées de traitement du signal, les chercheurs ont pu détecter ces changements et créer des capteurs à la fois sensibles et spécifiques.

Les chercheurs travaillent également au développement de cristaux phononiques capables de détecter l'activité sismique et d'autres phénomènes naturels.

Un autre domaine où les capteurs à cristaux phononiques sont prometteurs est la surveillance de l'environnement. Ces capteurs peuvent être utilisés pour mesurer les changements de température, de pression et d'autres propriétés physiques de l'environnement, qui peuvent être utilisés pour détecter les changements de climat, la pollution et d'autres dangers tels que la détection des gaz.

En détectant les changements dans les propriétés acoustiques du matériau, ces capteurs peuvent identifier les défauts et autres problèmes avant qu'ils n'entraînent de graves problèmes. La figure II.5 illustre un exemple d'utilisation des capteurs à cristaux phononiques unidimensionnels comme capteurs de gaz, ce capteur permet de détecter par la présence de différents gaz notamment le CO₂ dans la couche de défaut.

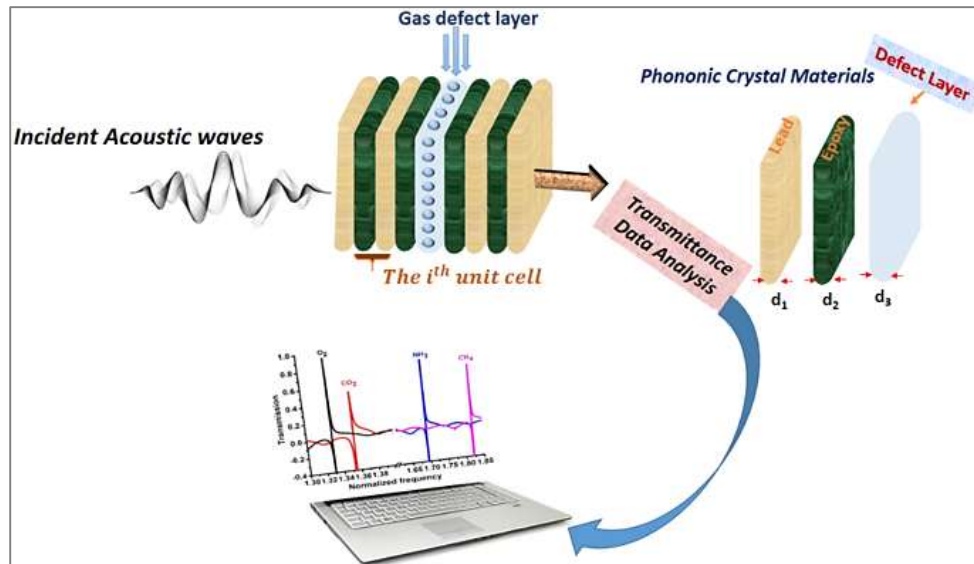


Figure II.6 : un exemple d'utilisation des capteurs à cristaux phononiques bidimensionnels comme capteurs de liquides consiste en une structure multicouche périodique de plomb et d'époxy [33].

La figure II.6 présente un exemple concret et illustratif de l'utilisation des capteurs à cristaux phononiques bidimensionnels en tant que capteurs de liquides/gaz. Ce capteur novateur est conçu pour détecter la présence de différents liquides qui sont injectés dans des cylindres spécifiques. L'objectif principal de cette configuration est de fournir une méthode précise et fiable pour l'identification et la discrimination des liquides.

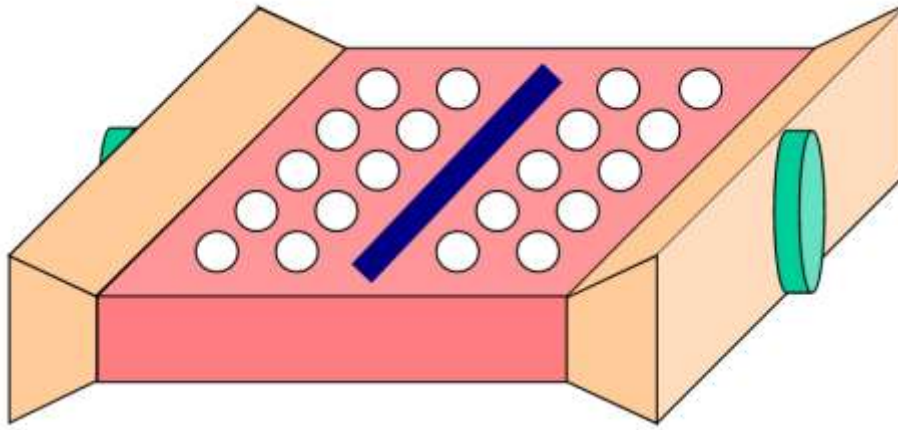


Figure II.7 : Schéma des agencements de capteur. Un cristal phononique à incidence de son en fente et dans le plan [34].

Dans le domaine des traitements des solutions par exemple, la salinité est une propriété très importante dans le cas des solutions. Cette propriété peut être détectée à travers plusieurs méthodes : méthodes électriques, méthodes photoniques et méthodes acoustique :

II.4.1. Méthode électrique

La méthode électrique de détection de salinité utilise des mesures électriques pour évaluer la concentration de sel dans un échantillon. Elle repose sur le fait que la conductivité électrique d'une solution saline est directement liée à sa concentration en sel.

Des capteurs électriques, tels que des électrodes ou des cellules de conductivité, sont utilisés pour mesurer la conductivité de l'échantillon. En analysant les variations de la conductivité, il est possible de déterminer la salinité de manière quantitative.

Un exemple de méthode électrique de détection de salinité est l'utilisation d'un conductimètre pour mesurer la conductivité électrique d'une solution saline. Le conductimètre est équipé de deux électrodes immergées dans l'échantillon. Lorsque le courant électrique est appliqué, la conductivité de la solution est mesurée en fonction de la résistance au passage du courant. Les variations de conductivité permettent de déterminer la concentration de sel dans la solution.

II.4.2. Méthode basée sur les cristaux photoniques

La méthode basée sur les cristaux photoniques est une approche optique utilisée pour détecter la salinité. Les cristaux photoniques sont des matériaux périodiques qui présentent des bandes interdites dans leur spectre de transmission optique. Lorsque la

salinité de l'environnement change, elle modifie les propriétés optiques du matériau, ce qui se traduit par des variations dans la transmission de la lumière à travers le cristal photonique.

Ces variations peuvent être détectées et utilisées pour évaluer la salinité de l'échantillon. Dans la méthode basée sur les cristaux photoniques, un exemple serait l'utilisation d'une photodiode couplée à un cristal photonique spécialement conçu pour détecter la salinité. Lorsque la salinité de l'environnement change, elle modifie les propriétés optiques du cristal photonique, ce qui affecte la transmission de la lumière à travers le matériau. La photodiode mesure les variations d'intensité lumineuse qui sont ensuite converties en une mesure quantitative de la salinité.

II.4.3. Méthode basée sur les cristaux phononiques

La méthode basée sur les cristaux phononiques repose sur l'utilisation de cristaux spécialement conçus pour manipuler les ondes sonores, appelées phonons. Ces cristaux présentent des bandes interdites pour certaines fréquences de phonons. Lorsque la salinité d'un milieu change, elle modifie les propriétés de transmission des ondes sonores à travers le cristal phononique. En mesurant ces variations de transmission, il est possible de déterminer la salinité de manière précise. Cette méthode offre des avantages en termes de sensibilité et de sélectivité pour la détection de la salinité dans différents milieux.

Un exemple de méthode basée sur les cristaux phononiques pour détecter la salinité serait l'utilisation d'un capteur acoustique à base de cristal phononique. Ce capteur est conçu avec un cristal phononique qui présente des propriétés de transmission des ondes sonores sensibles à la salinité. Lorsque l'onde sonore traverse le cristal, les variations de salinité modifient la transmission de l'onde, ce qui peut être détecté par le capteur acoustique. Les cristaux phononiques sont apparus comme une nouvelle technologie prometteuse pour le développement de dispositifs de détection. Ces cristaux présentent des variations périodiques de leurs propriétés matérielles, qui peuvent être utilisées pour manipuler et contrôler la propagation des phonons, ou vibrations mécaniques, à travers le cristal. En concevant soigneusement la structure et la composition cristallines les chercheurs ont pu créer des cristaux phononiques sensibles aux petits changements de température, de pression et d'autres quantités physiques. Dans ce travail, nous aborderons les capteurs basés sur des cristaux phononiques et leurs applications.

II.5. Concept de Capteurs a Cristaux Phononiques [35]

II.5.1. Bases de la méthode

La capacité de contrôler et de manipuler la propagation des ondes acoustiques sont un avantage inhérent à un cristal phononique (PnC). Le capteur à un cristal phononique applique cet avantage pour obtenir un facteur de résonance de haute qualité d'une cavité remplie de liquide. En d'autres termes, le capteur PnC combine la mesure d'une fréquence de résonance d'un résonateur mécanique telle qu'appliquée pour les microcapteurs acoustiques avec la propagation d'onde à travers le milieu telle qu'appliquée pour les capteurs à ultrasons. Il utilise la fréquence d'un mode de transmission bien séparé à travers le capteur PnC tout en gardant la séparation du transducteur acoustique et de l'analyte. La valeur d'intérêt modifie un ou plusieurs des paramètres de résonance inhérents d'une manière distincte.

Le principe applique la relation fondamentale entre la vitesse de son v , longueur d'onde acoustique λ et fréquence f :

$$v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

La résonance, par exemple, dans une cavité unidimensionnelle, apparaît, si son épaisseur, h , est :

$$h = n \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Où n est le nombre d'harmoniques, soit 1, 2, 3. La résonance la fréquence devient

$$f = n \frac{v}{2h} \quad (3)$$

Cette équation simple n'est valable que si les limites de la cavité sont entièrement réfléchissantes. Les impédances acoustiques, Z , de deux matériaux se faisant face définissent le coefficient de réflexion, R :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

R tend vers 1 ou -1 avec un grand contraste acoustique entre les deux matériaux, c'est-à-dire une grande différence entre leurs impédances acoustiques.

La sensibilité du capteur, S_f , peut être définie comme suit :

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta x} \quad (5)$$

Où Δf est le décalage de fréquence et Δx le changement du paramètre d'entrée à mesurer.

II.5.2. La tâche du cristal phononique

La tâche principale du cristal phononique (PnC) est l'amélioration du facteur Q du résonateur à cavité.

$$Q = \frac{f_{res}}{f_{FWHM}} \quad (6)$$

f_{res} = fréquence de résonance, f_{FWHM} = fréquence pleine largeur à mi-hauteur

Un dispositif à cristal phononique est étudié en tant que plate-forme de capteur combinant l'ingénierie des bandes interdites avec la transmission résonnante. Une cavité à fente perpendiculaire à la direction de propagation des ultrasons et placée au milieu d'un cristal phononique provoque un pic dans le spectre de transmission dont la fréquence de pic dépend fortement de la vitesse du son du liquide remplissant la fente [36].

Un pic de transmission résonant à travers une plaque régulièrement perforée de trous disposés en treillis carré peut également être trouvé en cas d'incidence normale du son. Dans cet agencement, la fréquence de crête dépend fortement de la vitesse du son du liquide entourant la plaque et remplissant les trous. Ces découvertes sont à la base de deux plates-formes de capteurs de liquide résonant basées sur des cristaux phononiques.

II.5.3. Avantages des capteurs à cristaux phononiques

L'un des principaux avantages des capteurs à cristaux phononiques est leur capacité à fonctionner à des fréquences élevées. Cela les rend bien adaptés aux applications telles que les tests non destructifs, où des vibrations à haute fréquence sont utilisées pour évaluer l'état des matériaux sans causer de dommages.

Les capteurs à cristaux phononiques peuvent également être utilisés en imagerie médicale, où des vibrations à haute fréquence sont utilisées pour créer des images du corps.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en termes généraux les concepts de base liés aux capteurs et à la science des matériaux; nous avons abordé des définitions, quelques caractéristiques métrologiques des capteurs et leurs principes de fonctionnement dans le domaine de la détection. Nous avons rappelé également les différentes méthodes utilisées pour détecter la salinité des solutions; les méthodes électriques, à base de cristaux photoniques et à base de cristaux phononiques.

En général, les capteurs conçus à base des cristaux acoustiques représentent une nouvelle technologie intéressante avec une large gamme d'applications dans des domaines allant du biomédical à la surveillance environnementale en passant par la détection industrielle.

Chapitre III

Méthodes numériques de simulation

III.1. Introduction

Les méthodes de simulation numérique impliquent l'utilisation d'algorithmes informatiques pour simuler des phénomènes du monde réel et générer des données sans effectuer réellement d'expériences physiques. Avec le développement des ordinateurs et l'augmentation des capacités des calculateurs, ces méthodes sont devenues de plus en plus populaires dans de nombreux domaines, notamment l'ingénierie, la physique et les sciences de la vie, en raison de leur capacité à fournir des informations sur des systèmes complexes difficiles ou impossibles à étudier avec les approches traditionnelles.

Ces méthodes peuvent être utilisées pour simuler la propagation des ondes acoustiques à travers des structures périodiques et pour étudier les propriétés des cristaux phononiques, telles que la taille et la position de la bande interdite, les coefficients de transmission et de réflexion ainsi que la vitesse du groupe des ondes.

La simulation des arrangements périodiques phononiques est un domaine de recherche actif, car elle permet la conception et l'optimisation de nouvelles structures cristallines phononiques. Plusieurs méthodes de simulation ont été développées telles que la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), la méthode d'expansion des ondes planes (PWE) et la méthode de transfert de la matrice (TMM). De plus, plusieurs logiciels sont disponibles pour simuler les cristaux phononiques : COMSOL Multiphysics, Lumerical FDTD et MATLAB.

Dans ce chapitre, nous présenterons certaines méthodes de simulation numérique, en mettant l'accent sur diverses techniques et algorithmes couramment utilisés. Nous explorerons également les avantages de l'utilisation des simulations numériques ainsi que les défis et les limites que les chercheurs peuvent confronter lorsqu'ils travaillent avec ces méthodes.

III.2. Méthode des éléments finis FEM

La méthode des éléments finis (FEM) est une technique numérique utilisée pour résoudre les équations différentielles qui surviennent dans l'ingénierie et la modélisation mathématique. C'est un outil puissant qui fournit des solutions à des problèmes complexes en divisant une structure en parties plus simples et en analysant chaque partie individuellement. Cette méthode est basée sur le principe de discrétisation, où la structure est divisée en petits éléments reliés par des nœuds. Les charges réparties, les conditions aux limites et les propriétés matérielles de chaque élément sont prises en compte, ce qui conduit à un ensemble d'équations qui décrivent le comportement de l'ensemble du système [37,38].

Historiquement, ses premières utilisations concernent les problèmes liés aux structures mécaniques nécessitant la recherche des solutions de contraintes et de déformations dans les milieux élastiques. Richard Courant a introduit la méthode des éléments finis pour la première fois dans les années 1940, un mathématicien allemand qui travaillait sur des méthodes de résolution d'équations aux dérivées partielles. Les premières applications de FEM se concentraient principalement sur la mécanique des structures et le transfert de chaleur, mais la méthode a depuis été appliquée à un large gamme de domaines, notamment la dynamique des fluides, l'électromagnétisme et l'acoustique.

III.2.1. Différents types de la Méthode des Éléments Finis

Il existe plusieurs types de méthodes d'éléments finis, y compris la méthode des éléments finis classique, la méthode Galerkin discontinue et la méthode des éléments finis mixtes. Chaque approche présente des avantages et des inconvénients uniques en fonction du problème à résoudre.

Un type courant est la méthode d'analyse statique linéaire, qui est utilisée pour prédire le comportement des systèmes linéaires dans des conditions de chargement statique. Un autre type est la méthode d'analyse non linéaire, qui est utilisée pour les problèmes impliquant des déformations extrêmes ou une non-linéarité matérielle.

D'autres types de FEM incluent l'analyse dynamique, qui traite des charges dynamiques et des systèmes variant dans le temps, et l'analyse thermique, qui est utilisée pour étudier le comportement thermique des matériaux et des structures. Il existe également la méthode Fluid-Structure Interaction Analysis, qui combine la dynamique des fluides et la mécanique des solides pour étudier l'interaction entre les fluides et les solides.

Dans l'ensemble, les différents types de méthodes des éléments finis offrent une gamme d'outils puissants pour résoudre des problèmes complexes en ingénierie et en physique, et sont largement utilisés dans de nombreux domaines de la recherche et de l'industrie [29].

III.2.2. Étapes impliquées dans la méthode des éléments finis

La première étape de la méthode des éléments finis consiste à discrétiser la structure en éléments plus petits. Ensuite, les équations des éléments sont dérivées en utilisant les principes d'élasticité et de rigidité. Les équations globales sont ensuite assemblées en fonction des connexions entre les éléments. Le système d'équations résultant est résolu à l'aide de méthodes numériques, telles que l'inversion de matrice, l'élimination gaussienne ou des méthodes itératives. Enfin, les résultats sont post-traités pour obtenir les valeurs souhaitées.

Par exemple, si l'on a une fonction de trois variables $f(x_1, x_2, x_3)$, l'équation suivante:

$$a_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + a_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + \frac{\partial f}{\partial x_3} + A = 0 \quad \dots\dots\dots (III.1)$$

L'équation III.1 est une équation aux dérivées partielles. Cette équation est associée aux conditions aux limites (valeurs de la fonction ou de ses dérivées partielles en certains points). Notons que :

- La fonction f peut être une fonction vectorielle,
- L'équation fait souvent intervenir des dérivées secondes $\partial^2 f / \partial x_i^2$ ou $\partial^2 f / \partial x_i \partial x_j$ (voire d'ordres plus élevés),
- Et que les coefficients a_i et A ne sont pas nécessairement des constantes mais peuvent être des fonctions.

La résolution exacte, analytique, de telles équations devient vite impossible manuellement. Par contre, si l'on découpe le domaine spatial en éléments finis, on peut résoudre simplement l'équation aux dérivées partielles sur chaque élément [39].

Les simulations par la méthode des éléments finis impliquent plusieurs étapes clés qui jettent les bases d'un modèle précis et exact. Voici un aperçu des étapes essentielles impliquées dans la réalisation de simulations par la méthode des éléments finis :

- Développement d'un modèle du système ou de la structure à analyser.
- Génération du maillage de la géométrie complexe du système en petits
- Définition des équations différentielles gouvernantes le comportement de la structure.
- Résoudre les déplacements nodaux en utilisant diverses techniques numériques ;
- Calculer les contraintes et les déformations des éléments puis les comparer aux propriétés des matériaux définis précédemment:
- Les résultats des simulations de la méthode des éléments finis sont évalués pour déterminer la validité du modèle.
- Post-traitement qui consiste à produire des représentations visuelles des résultats.

La figure III.1 illustre les principales étapes utilisées lors de l'analyse typique d'une structure par la méthode des éléments finis.

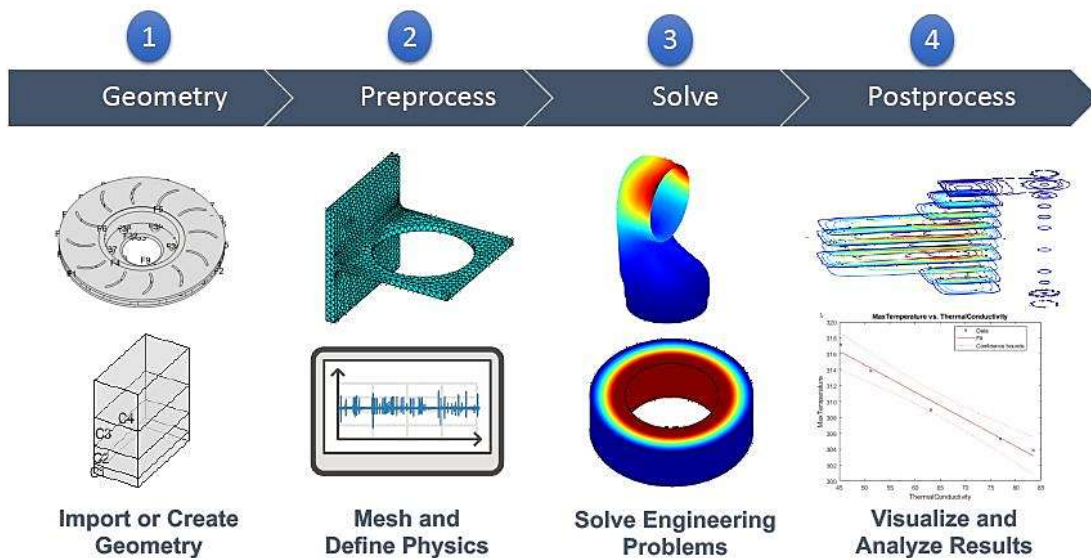


Figure III.1: Un flux de travail typique d'analyse par éléments finis [40].

III.2.3. Avantages et Applications de la méthode FEM

La méthode des éléments finis a diverses applications dans la conception technique, en particulier dans l'analyse des contraintes et des déformations dans les composants mécaniques, la conception de dispositifs électromagnétiques et la conception de systèmes d'écoulement de fluides. Il est également utilisé dans l'analyse des dispositifs médicaux, tels que les implants et les prothèses.

La FEM peut être utilisée pour simuler la façon dont les ondes sonores interagissent avec les cristaux phononiques et d'autres structures périodiques. La FEM décompose les structures complexes en éléments finis, une technique de calcul qui utilise une modélisation mathématique simple pour approximer le comportement de la structure, puis les résout de manière itérative pour simuler la propagation des ondes mécaniques. La méthode FEM a été appliquée à plusieurs domaines impliquant la propagation des ondes acoustiques : ondes libres et guidées, les vibrations et la diffusion.

Les simulations numériques avec la méthode FEM ont permis aux chercheurs d'étudier en détail la propagation des ondes sonores dans les cristaux phononiques. Ces simulations ont montré que les cristaux phononiques peuvent contrôler et manipuler la direction et la fréquence des ondes sonores avec une grande précision, élargissant considérablement leurs applications potentielles dans des domaines tels que le contrôle du bruit, la détection et l'imagerie.

La méthode FEM, peut également être exploitée pour étudier l'influence de certains facteurs pouvant affecter le comportement de la structure. Les résultats de simulation ont démontré que la FEM est efficace pour modéliser le comportement des cristaux

phononiques soumis à la propagation des ondes acoustiques. La méthode des éléments finis peut prédire les bandes interdites, déterminer les constants élastiques dans la structure et simuler la propagation, la réflexion et l'atténuation des ondes.

De plus, des recherches plus poussées sur les structures cristallines phononiques à l'aide de simulations par la méthode des éléments finis peuvent potentiellement conduire au développement de nouveaux dispositifs et applications pour la manipulation des ondes acoustiques /élastiques.

La méthode des éléments finis est une technique numérique puissante qui a révolutionné le domaine de la conception technique. Il fournit un moyen systématique d'analyser des structures et des systèmes complexes, permettant aux ingénieurs d'optimiser les conceptions et de minimiser les erreurs.

Les simulations par la méthode des éléments finis sont un outil très efficace pour modéliser en détail le comportement de structures complexes. Les étapes clés du processus comprennent la préparation du modèle, la génération du maillage, la définition des équations gouvernantes, la résolution des déplacements nodaux, le calcul des contraintes et des déformations des éléments, l'évaluation des résultats et le post-traitement. Avec une attention particulière portée à chaque étape, les simulations par la FEM peuvent fournir des prédictions très précises et fiables du comportement du système modélisé [41].

III.3. Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite-Difference Time Domain -FDTD) est une technique d'analyse numérique utilisée pour résoudre les problèmes de champ électromagnétique. Elle est basée sur la discrétisation des dimensions spatiales et temporelles et la résolution numérique des équations de Maxwell pour chaque point individuel dans l'espace et le temps. La méthode FDTD peut être utilisée pour simuler un large éventail de problèmes électromagnétiques, y compris les circuits micro-ondes, les antennes et les dispositifs photoniques.

La simulation de la propagation des ondes acoustiques à travers des structures périodiques et des cristaux phononiques est un processus complexe qui nécessite des techniques de modélisation avancées. L'une des méthodes les plus efficaces pour effectuer ces types de simulations est la méthode FDTD [42].

La méthode FDTD est particulièrement bien adaptée aux simulations impliquant à la fois des ondes électromagnétiques et acoustiques, et est couramment utilisé dans la conception et l'analyse de cristaux phononiques et d'autres structures périodiques.

III.3.1. Historique et principe de base de la FDTD

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite-Difference Time Domain) a été introduite pour la première fois dans les années 1960 par K. S. Yee. Cependant, la méthode FDTD n'a attiré l'attention que dans les années 1980, lorsque les chercheurs ont commencé à utiliser les ordinateurs pour effectuer des simulations complexes. Depuis lors, la FDTD est devenue l'une des méthodes les plus utilisées pour modéliser les champs électromagnétiques [42].

La méthode FDTD est basée sur la discrétisation des équations de Maxwell, qui décrivent le comportement des champs électromagnétiques. Les équations sont converties en un ensemble d'équations aux différences finies pour chaque point individuel dans l'espace et le temps.

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\vec{E}) &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & \operatorname{rot}(\vec{E}) &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{(Maxwell-Gauss)} & & \text{(Maxwell-Faraday)} & \\ \operatorname{div}(\vec{B}) &= 0 & \operatorname{rot}(\vec{B}) &= \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \text{(Maxwell-Flux)} & & \text{(Maxwell-Ampère)} & \end{aligned}$$

Ces équations sont ensuite résolues à l'aide de techniques numériques, telles que l'algorithme leap-frog ou le schéma de Crank-Nicolson.

Les solutions résultantes fournissent une représentation précise du comportement des champs électromagnétiques dans la structure simulée.

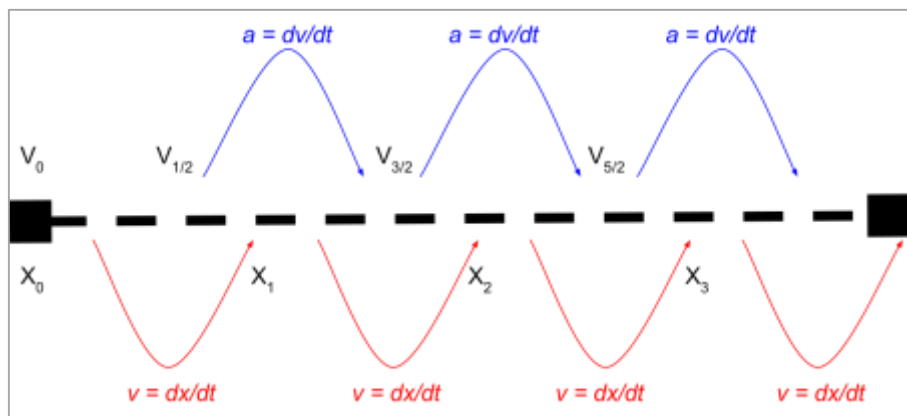


Figure III.2 : la méthode saut de grenouille (ou leap-frog) [43]

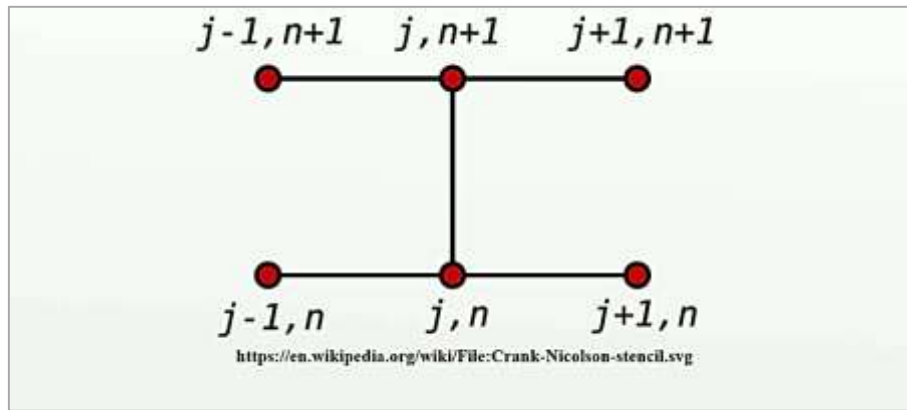


Figure III.3 : Méthode Crank-Nicolson [44]

La méthode FDTD fonctionne en divisant l'espace de simulation en une grille de petites cellules. L'onde se propageant est ensuite modélisée lors de son déplacement dans chaque cellule, en tenant compte des propriétés des matériaux et des conditions aux limites de la simulation. Les calculs sont effectués par pas de temps discrets, la solution de chaque pas dépendant des solutions des pas précédents.

Pour simuler des ondes acoustiques dans des structures périodiques, la méthode FDTD peut être utilisée pour calculer les caractéristiques de transmission, de réflexion et de dispersion de la structure. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour une analyse plus approfondie, telle que la conception de filtres ou le guidage d'ondes acoustiques dans des directions spécifiques. La FDTD peut également être utilisée pour étudier les effets de défauts ou de perturbations sur le comportement de la structure [45].

III.3.2. Étapes impliquées dans la méthode FDTD

Voici les étapes générales impliquées lors de la réalisation d'une simulation de domaine temporel à différence finie (FDTD) :

- Définissez le problème : déterminez la géométrie de l'espace de simulation, y compris la taille et la forme du domaine, l'emplacement des sources et l'emplacement des matériaux aux propriétés différentes.
- Discrétiser le domaine : diviser l'espace de simulation en petites cellules ;
- Définissez les conditions aux limites : spécifiez les conditions aux bords de l'espace de simulation, y compris le type de condition aux limites et toutes les valeurs spécifiées des champs.
- Définissez les propriétés du matériau : attribuez les propriétés du matériau appropriées aux cellules, y compris leurs constantes diélectriques, leur perméabilité magnétique ou leur conductivité.

- Calculer les coefficients de mise à jour : Calculez les coefficients de mise à jour qui permettent de mettre à jour les valeurs des champs à chaque pas de temps.
- Pas de temps de la simulation : à l'aide des coefficients de mise à jour calculés, mettez à jour les valeurs des champs électriques et magnétiques à chaque pas de temps. Répétez ce processus jusqu'à ce que le temps de simulation souhaité soit atteint.
- Analysez les résultats : une fois la simulation terminée, analysez les résultats pour déterminer le comportement des champs, y compris leur intensité, leur direction de propagation et toute interaction avec des structures ou des matériaux à proximité.

La méthode FDTD peut être utilisée pour simuler une large gamme de systèmes électromagnétiques, acoustiques, des structures complexes voire des matériaux périodiques. Cette technique puissante a de nombreuses applications dans des domaines tels que l'optique, l'électronique et l'acoustique, et continue d'être un outil précieux pour les chercheurs et les ingénieurs qui cherchent à optimiser la conception et le comportement de systèmes complexes [46].

III.3.3. Avantages et limitations de la méthode FDTD

La méthode FDTD peut être utilisée pour l'analyse des champs électromagnétiques, notamment la conception de circuits hyperfréquences, d'antennes et de dispositifs photoniques. Elle est également utilisée pour modéliser la propagation des ondes électromagnétiques dans des milieux complexes, tels que les tissus biologiques.

- L'un des principaux avantages de la méthode FDTD est sa précision, car elle fournit une représentation très précise du comportement électromagnétique d'une structure.
- La FDTD est également bien adaptée à la modélisation de structures aux géométries complexes, car elle peut facilement gérer des formes irrégulières et des angles vifs.
- De plus, la méthode FDTD est efficace en termes de calcul, ce qui en fait un bon choix pour les simulations complexes nécessitant une puissance de calcul élevée.

La méthode FDTD possède des limitations telles que :

- Le schéma de Yee impose une discrétisation en mailles régulières.
- Il faut des longueurs d'arêtes entre $\lambda / 16$ et $\lambda / 20$ pour avoir la convergence en maillage.
- Il est difficile de prendre en compte des matériaux dispersifs.
- Les conditions aux limites approchées introduisent une approximation qui peut avoir une influence sur la précision du calcul.
- La FDTD étant un schéma explicite, le pas temporel maximal est relié au pas spatial par une condition de stabilité.

- Le pas de maillage et par conséquent le pas sur le temps sont liés à la plus petite longueur d'onde λ considérée. Un maillage typique aura au moins 10 mailles par longueur d'onde pour garantir une précision acceptable sur la solution. Donc, pour traiter un objet de taille 100λ , il faudra un maillage $1000 \times 1000 \times 1000$, soit 6 milliards d'inconnues scalaires, d'où un coût mémoire très important sur de gros maillages.

Le principal inconvénient de la FDTD est qu'elle nécessite de longs temps de calculs et un espace mémoire important, en particulier pour les calculs 3D.

III.4. Méthode d'expansion des ondes planes (PWE)

La méthode d'expansion des ondes planes (Plane Wave Expansion (PWE)) est une technique numérique utilisée pour calculer les structures de bande des matériaux périodiques. Il repose sur l'idée que les ondes stationnaires peuvent être représentées comme une combinaison linéaire d'ondes planes. La méthode PWE est largement utilisée pour élucider les propriétés électromagnétiques, acoustiques et mécaniques des cristaux photoniques, des matériaux acoustiques, des semi-conducteurs et d'autres matériaux périodiques [47].

III.4.1. Principe de base de la méthode PWE

Les origines de la méthode PWE remontent aux années 1920 et 1930, lorsque de nombreux physiciens ont commencé à étudier la diffraction des ondes électromagnétiques et acoustiques par des matériaux périodiques. Cependant, ce n'est que dans les années 1960 et 1970 que la méthode PWE a été développée pour les cristaux photoniques et les matériaux acoustiques.

Depuis lors, la méthode PWE est devenue l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour étudier les propriétés des matériaux périodiques.

III.4.2. Bases théoriques de la méthode PWE

La méthode d'expansion des ondes planes est basée sur l'expansion de la fonction Bloch, qui décrit les modes de propagation périodiques dans un matériau périodique. La fonction Bloch peut être décomposée en un nombre fini d'ondes planes, qui satisfont aux conditions aux limites périodiques imposées par la structure des matériaux.

La méthode d'expansion des ondes planes consiste à résoudre un système linéaire d'équations pour déterminer les coefficients de l'expansion des ondes planes. Les solutions obtenues fournissent une représentation précise de la structure de bandes interdites.

III.4.3. Applications de la méthode PWE

La méthode PWE est couramment utilisée pour étudier les cristaux photoniques, qui sont des structures périodiques qui présentent des bandes interdites photoniques. Elle est également utilisée pour étudier les cristaux acoustiques, qui ont des propriétés similaires dans le régime des ondes acoustiques. De plus, cette méthode est utilisée pour étudier les matériaux périodiques tels que les super-réseaux semi-conducteurs, des méta-matériaux et les matériaux magnétiques.

La méthode d'expansion des ondes planes est utilisée pour simuler la propagation des ondes acoustiques à travers des structures périodiques et des cristaux phononiques. Elle fonctionne en modélisant les ondes comme une superposition d'ondes planes, qui sont ensuite analysées pour déterminer le comportement de la structure [48].

III.4.4. Étapes impliquées dans la méthode PWE

La méthode d'expansion des ondes planes (PWE) est un puissant outil numérique qui a trouvé une large application dans l'étude des matériaux périodiques. Il offre une méthode précise et efficace pour calculer la structure de la bande des cristaux photoniques, des cristaux acoustiques et d'autres matériaux périodiques. Avec sa précision et son efficacité, cette méthode continue d'être un outil précieux dans le domaine de la recherche et du développement acoustiques. La PWE implique plusieurs étapes, notamment:

- Définissez la structure cristalline : Déterminez la géométrie de la structure périodique ou du cristal phononique, y compris la taille et la forme de la cellule unitaire, et la disposition des matériaux constitutifs.
- Discrétisez la structure : divisez la cellule unitaire en un ensemble de points ou de nœuds discrets. À chaque nœud, le champ de déplacement est représenté par un ensemble de fonctions de base.
- Développez le champ : Exprimez le champ de déplacement comme superposition des ondes planes, chacune étant caractérisée par un vecteur d'onde et une fréquence.
- Résolvez le problème des valeurs propres : en utilisant les équations de mouvement, résolvez les valeurs propres et les vecteurs propres du système.
- Calculez la relation de dispersion : en utilisant les valeurs propres et les vecteurs propres, calculez la relation de dispersion de la structure. Ceci décrit la relation entre la fréquence et le vecteur d'onde des ondes de propagation.
- Analyser les résultats : une fois la simulation terminée, analysez les résultats pour déterminer le comportement des ondes et leur interaction avec la structure.
-

III.5. Méthodes de la Matrice de Transfert

Pour étudier la propagation des ondes dans les milieux multicouches, on utilise des équations locales et des conditions d'interface. Une matrice globale est introduite pour représenter un vecteur à travers les différentes interfaces, assurant ainsi la continuité des contraintes et des déplacements. Les méthodes telles que la matrice de transfert Thomson-Haskell et la matrice d'impédance de surface permettent de résoudre ce problème, mais la complexité numérique augmente avec le nombre d'éléments et la longueur d'onde.

Des problèmes bien dimensionnés et des matrices bien conditionnées sont utiles pour obtenir une solution précise. Dans le cas où le milieu multicouche est périodique, les ondes de Bloch ou les ondes de Floquet sont utilisées, tandis que pour un milieu continu, le développement en série de Peano offre une solution analytique [49].

III.5.1. Super-réseaux unidimensionnels

Prenons en compte un super-réseau composé de deux couches successives, représenté dans la figure III.5. Les couches 1 et 2 ont des épaisseurs d_1 et d_2 , ainsi que des impédances Z_1 et Z_2 respectives.

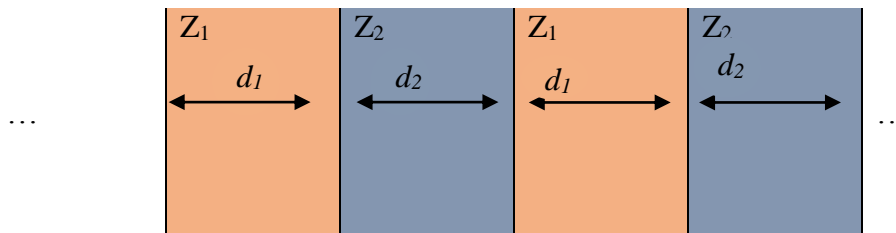


Figure III.4 : Un super-réseau à CnP-1D formé par alternance de deux couches d'impédances Z_1 et Z_2

Nous écrivons d'abord les équations fondamentales de l'acoustique [40]:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = -\rho(x) \frac{\partial v}{\partial t} \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -Y(x) \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases}, \quad c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \dots \dots \dots \text{III.18}$$

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:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial x} = \rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \tau = Y(x) \frac{\partial u}{\partial x} \end{cases} \dots \dots \dots \text{III.19}$$

Où :

($\tau = -p$) est la contrainte et (u) 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, en considérant $p = Ve^{j\omega t}$ et $v = Ve^{j\omega t}$, nous pouvons écrire la solution ainsi :

$$\begin{cases} P = Z_i A(\omega)e^{-jkx} - Z_i B(\omega)e^{jkx} \\ V = A(\omega)e^{-jkx} + B(\omega)e^{jkx} \end{cases} \dots\dots\dots \text{III.20}$$

III.5.2. Formalisme matriciel

La méthode de la matrice de transfert utilise une solution décrite par l'équation (III.20) sous forme d'un produit entre une matrice et un vecteur. Ce formalisme permet d'écrire les solutions de propagation des ondes dans des structures multicouches, qu'elles soient avec ou sans défauts. Nous démontrerons que des cas particuliers, tels que les couches quart d'onde, présentent un comportement plus simple et intéressant.

- Propagation dans une couche

À partir de l'équation (III.20), la propagation dans une couche, de la position $x = 0$ à la position x peut être écrite comme un produit de matrices:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_x = \begin{bmatrix} Z_i e^{-jk_i x} & -Z_i e^{jk_i x} \\ e^{-jk_i x} & e^{jk_i x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} Z_i & -Z_i \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jk_i x} & 0 \\ 0 & e^{jk_i x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.21}$$

Nous pouvons écrire:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_x = F_i H_i \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.22}$$

Avec :

$$F_i = \begin{bmatrix} Z_i & -Z_i \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \text{ et } H_i = \begin{bmatrix} e^{-jk_i x} & 0 \\ 0 & e^{jk_i x} \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{II.23}$$

Dans l'équation (III.23), H_i décrit la propagation des ondes dans la couche i à une distance x . On peut également noter que :

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_0 = F_i \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.24}$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 = F_i^{-1} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_0 \text{ avec : } F_i^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_i} & 1 \\ -\frac{1}{Z_i} & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{III.25}$$

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

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_x = F_i H_i F_i^{-1} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_0 = M_i \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.26}$$

Avec :

$$M_i = F_i H_i F_i^{-1} \begin{bmatrix} \cos(k_i x) & -jZ_i \sin(k_i x) \\ -\frac{1}{Z_i} \sin(k_i x) & \cos(k_i x) \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{III.28}$$

- Propagation dans une bicouche

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

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x^+} = \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x^-} \dots\dots\dots \text{III.29}$$

où x^+ appartient à Z_2 et x^- appartient à Z_1 . Ainsi, nous avons:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d_1+d_2} = M_2 M_1 \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_0 = M \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.30}$$

Avec :

$$M = \begin{bmatrix} \cos(k_2 k_2) & -jZ_2 \sin(k_2 k_2) \\ -\frac{j}{Z_2} \sin(k_2 k_2) & \cos(k_2 k_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(k_1 k_1) & -jZ_1 \sin(k_1 k_1) \\ -\frac{j}{Z_1} \sin(k_1 k_1) & \cos(k_1 k_1) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(k_1 k_1) \cos(k_2 k_2) - \frac{Z_2}{Z_1} \sin(k_1 k_1) \sin(k_2 k_2) & -jZ_1 \cos(k_2 k_2) \sin(k_1 k_1) - jZ_2 \sin(k_2 k_2) \cos(k_1 k_1) \\ -\frac{j}{Z_2} \cos(k_1 k_1) \sin(k_2 k_2) - \frac{j}{Z_1} \cos(k_2 k_2) \sin(k_1 k_1) & -\frac{Z_1}{Z_2} \sin(k_1 k_1) \sin(k_2 k_2) - \frac{Z_2}{Z_1} \sin(k_1 k_1) \sin(k_2 k_2) \end{bmatrix}$$

Ou sous forme condensée :

$$M = (F_2 H_2 F_2^{-1})(F_1 H_1 F_1^{-1}) \dots\dots\dots \text{III.31}$$

Dans un milieu périodique ($d = d_1 + d_2$), les modes de propagation sont les modes de Bloch et les valeurs propres de M sont donnés par :

$$Y_1 = e^{jkd} \dots\dots\dots \text{III.32}$$

$$Y_2 = e^{-jkd} \dots\dots\dots \text{III.33}$$

la trace de la matrice M est:

$$Tr(M) = Y_1 + Y_2 = 2\cos(kd) \dots\dots\dots \text{III.34}$$

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

$$\cos(kd) = \frac{1}{2} Tr(M) = \cos(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) - \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \sin(k_1 d_1) \dots\dots \text{III.35}$$

À l'aide de l'équation (III.35), nous pouvons calculer les courbes de dispersion.

Pour un super-réseau 1D, la première zone de Brillouin s'étend de $-\pi/d$ à $+\pi/d$ pour les vecteurs d'onde k. En considérant le terme $F_2^{-1} F_1$ dans l'équation (III.31), nous pouvons maintenant donner une interprétation physique des matrices Fi :

$$F_2^{-1} F_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_2} & 1 \\ -\frac{1}{Z_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 & -Z_1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{Z_1+Z_2}{2Z_2} \begin{bmatrix} 1 & rp \\ rp & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{tp} \begin{bmatrix} 1 & \frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \\ \frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} & 1 \end{bmatrix} = M_{12}^t \dots\dots\dots \text{III.36}$$

Ou :

$$rp = \frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \dots\dots\dots \text{III.37}$$

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

et
$$tp = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} \dots\dots\dots \text{III.38}$$

t_p : est le coefficient de transmission du même support, il semble donc que M_{12}^t représente la matrice de transfert via une interface entre le support 1 et le support 2.

- Propagation des Amplitudes

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

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d_1^-} = F_1 H_1 \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.39}$$

Et

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d_1^+} = \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d_1^-} \dots\dots\dots \text{III.40}$$

Manent :

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d_1^+} = F_1 H_1 \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \text{ et } \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_{d_1^+} = F_2^{-1} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d_1^+} \dots\dots\dots \text{III.41}$$

Après propagation à travers la Z_2 , on obtient:

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d^+} = \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{d^-} = (F_2 H_2)(F_2^{-1} F_1 H_1) \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.42}$$

et enfin :

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_{d^+} = (F_1^{-1} F_2 H_2)(F_2^{-1} F_1 H_1) \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 = C_1 \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.43}$$

Ou nous avons introduit les notations suivantes :

$$C_1 = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta^* & \alpha^* \end{bmatrix}, \text{ avec } \begin{cases} \alpha = (\cos(k_2 d_2) - jS \sin(k_2 d_2)) e^{-jk_2 d_2} \\ \beta = jD_{12} \sin(k_2 d_2) e^{jk_1 d_1} \\ S = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \\ D_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right) \end{cases} \dots\dots\dots \text{III.44}$$

Ainsi, en exprimant les valeurs des amplitudes A et B à la position d sous forme d'un produit matriciel avec le vecteur des valeurs initiales de ces amplitudes, nous observons que :

$$\det(C_1) = \alpha\alpha^* - \beta\beta^* = 1 \dots\dots\dots \text{III.45}$$

et : $\frac{1}{2} Tr(C_1) \frac{\alpha+\alpha^*}{2} = Re(\alpha)$

$$Re(\alpha) = \cos(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) - S \sin(k_1 d_1) \sin(k_2 d_2) = \frac{1}{2} Tr(M) \dots\dots\dots \text{III.46}$$

- Transmission via une bicouche

Nous examinons la propagation d'une onde élastique dans une bicouche (Figure III.4) en utilisant le formalisme précédent pour déterminer les coefficients de transmission et de réflexion pour cette structure.

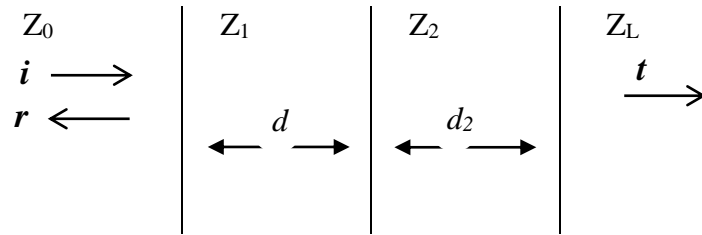


Figure III.5 : Une bicouche 1D avec des impédances Z_1 et Z_2 avec des couches externes d'impédances Z_0 et Z_L [50].

En utilisant l'équation (III.43), nous dérivons l'ensemble des équations suivantes pour Z_0 et Z_L arbitraires :

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_L = (F_L^{-1} F_1) C_1 (F_1^{-1} F_0) \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 = M \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.47}$$

En utilisant $B_L = 0$ pour le support de sortie d'impédance Z_L , nous obtenons les coefficients de transmission (t) et de réflexion (r) : $t = A_L / A_0$ et $r = B_0 / A_0$:

$$\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.48}$$

En résolvant le système d'équations, nous obtenons:

$$r = M_{21}/M_{22} \quad \text{et} \quad t = \det(M)/M_{22} \dots\dots\dots \text{III.49}$$

- Transmission via N bicouches

Nous étudions maintenant la propagation d'une onde élastique à travers un système composé de N bicouches, comme indiqué sur Figure III.6.

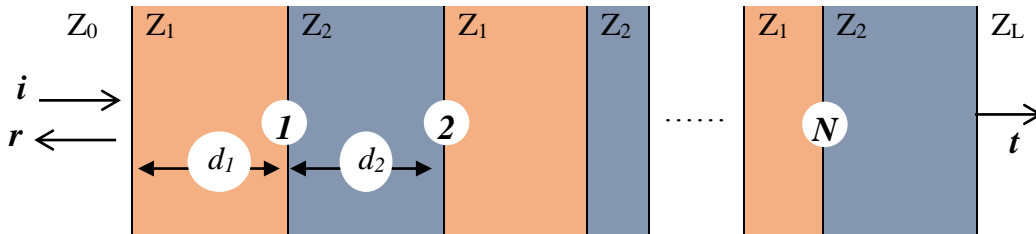


Figure III.6: Un système à cristal phononique 1D composé de N bicouches.

Pour un système de N bicouches, on peut écrire:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_{LN} = C_1 \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_{L(N-1)} = C_1^N \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots \text{III.50}$$

Ainsi, en considérant une couche d'entrée d'impédance Z_0 et une couche de sortie d'impédance Z_L , la transmission est donné par: $\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = M^T \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix}$

$$\text{avec :} \quad M^T = (F_L^{-1} F_1) C_1^N (F_L^{-1} F_0) \dots\dots\dots \text{III.51}$$

- Transmission par N bicouches avec un défaut

Nous étudions maintenant la propagation d'une onde élastique à travers le système composé de N bicouches et d'un défaut central, comme représenté sur la figure III.7 [50] :

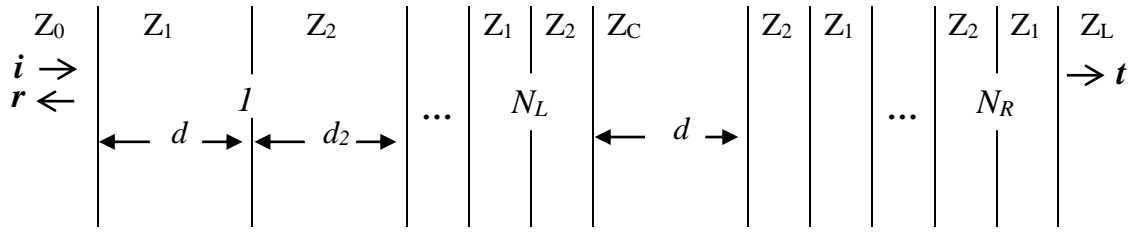


Figure III.7 Un système 1D composé de N bicouches et d'un défaut central de largeur d_C et d'impédance Z_C .

Dans ce cas la transmission est donnée par :

$$\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = M^T \begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix}, \text{ avec } M^T = M^{TR} H_C M^{TL} \dots \text{III.52}$$

Avec :

$$\begin{cases} M^{TL} = (F_C^{-1} F_1) C_1^{N_L} (F_1^{-1} F_0) \\ M^{TR} = (F_L^{-1} F_2) C_2^{N_R} (F_2^{-1} F_C) \\ C_2 = (F_2^{-1} F_1 H_1) (F_1^{-1} F_2 H_2) \end{cases} \dots \text{III.53}$$

- **Transmission à travers N bicouches avec couches quart d'onde**

Nous cherchons une expression analytique simple pour le coefficient de transmission à travers N bicouches de quart de longueur d'onde, afin de lier le facteur de qualité du résonateur (un super-réseau avec des défauts) décrit dans la section III.4.2. 6 au nombre de bicouches et au décalage d'impédance entre les couches. Deux résultats préliminaires sont présentés.

$$\begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \alpha & \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha + \beta & 0 \\ 0 & \alpha - \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \dots \text{III.54}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \beta_1 & \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 & \beta_2 \\ \beta_2 & \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \beta_2 \\ \beta_2 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \beta_1 & \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2 & \alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1 \\ \alpha_2 \beta_1 + \alpha_1 \beta_2 & \alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2 \end{bmatrix} \dots \text{III.55}$$

Puisque nous utilisons des couches quart d'onde, nous réécrivons la matrice C_I de l'équation (III.44) en utilisant:

$$d_1 = \frac{\lambda_1}{4} \text{ et } d_2 = \frac{\lambda_2}{4} \text{ ou équivalent:}$$

$$k_1 d_1 = k_2 d_2 = \frac{\pi}{2} \dots \text{III.56}$$

Donc, nous pouvons obtenir:

$$C_1 = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & \alpha \end{bmatrix}, \text{ avec } \begin{cases} \alpha = -S \\ \beta = -D_{12} \\ S = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \\ D_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right) \end{cases} \dots \text{III.57}$$

Dans ce cas :

$$\det(C_1) = \alpha^2 - \beta^2 = 1 \quad \dots\dots\dots \text{III.58}$$

et :

$$\alpha + \beta = \frac{Z_1}{Z_2}, \alpha - \beta = \frac{Z_2}{Z_1} \quad \dots\dots\dots \text{III.59}$$

En utilisant l'équation III.54, nous obtenons :

$$C_1^N = \begin{bmatrix} \alpha_N & \beta_N \\ \beta_N & \alpha_N \end{bmatrix}, \text{ avec } \begin{cases} \alpha_N = \frac{(\alpha+\beta)^N + (\alpha-\beta)^N}{2} \\ \beta_N = \frac{(\alpha+\beta)^N - (\alpha-\beta)^N}{2} \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{III.60}$$

Nous notons que :

$$\det(C_1^N) = \alpha_N^2 - \beta_N^2 = (\det(C_1))^N = 1 \quad \dots\dots\dots \text{III.61}$$

et :

$$\alpha_N + \beta_N = (\alpha + \beta)^N, \alpha_N - \beta_N = (\alpha - \beta)^N \quad \dots\dots\dots \text{III.62}$$

Dans le cas général, sans hypothèse sur les valeurs de Z_0 et Z_L , d'après l'équation (III.51), les coefficients de réflexion et de transmission sont donnés par :

$$r = -\frac{M_{21}^T}{M_{22}^T}, \text{ et } t = \frac{\det(M^T)}{M_{22}^T} \quad \dots\dots\dots \text{III.63}$$

en utilisant les expressions III.22,III.23 et III.25 :

$$F_1^{-1}F_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 1 \\ -\frac{1}{Z_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 & -Z_0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_0}{Z_1} & 1 - \frac{Z_0}{Z_1} \\ 1 - \frac{Z_0}{Z_1} & 1 + \frac{Z_0}{Z_1} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots \text{III.64}$$

Donc, étant donné leurs formes, selon l'équation (III.55), C_1^N et $(F_1^{-1}F_0)$ font la navette.

Donc:

$$M^T = (F_L^{-1}F_1)C_1^N(F_1^{-1}F_0) = (F_L^{-1}F_1)(F_1^{-1}F_0)C_1^N = (F_L^{-1}F_0)C_1^N \quad \dots\dots \text{III.65}$$

Et nous obtenons :

$$F_L^{-1}F_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_L} & 1 \\ -\frac{1}{Z_L} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 & -Z_0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_0}{Z_L} & 1 - \frac{Z_0}{Z_L} \\ 1 - \frac{Z_0}{Z_L} & 1 + \frac{Z_0}{Z_L} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots \text{III.66}$$

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

$$M^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_0}{Z_L} & 1 - \frac{Z_0}{Z_L} \\ 1 - \frac{Z_0}{Z_L} & 1 + \frac{Z_0}{Z_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_N & \beta_N \\ \beta_N & \alpha_N \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha_N + \beta_N + (\alpha_N - \beta_N) \frac{Z_0}{Z_L} & \alpha_N + \beta_N + (\beta_N - \alpha_N) \frac{Z_0}{Z_L} \\ \alpha_N + \beta_N + (\beta_N - \alpha_N) \frac{Z_0}{Z_L} & \alpha_N + \beta_N + (\alpha_N - \beta_N) \frac{Z_0}{Z_L} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots \text{III.67}$$

En introduisant ces expressions dans l'équation (III.63), le coefficient de transmission devient: $t = \frac{\det M^T}{M_{22}^T}$

$$\text{Où : } \det M^T = \det F_L^{-1} \det F_0 \det C_1^N = \frac{Z_0}{Z_L} \text{ et } M_{22}^T = \frac{1}{2} \left((n)^N + \left(\frac{1}{n} \right)^N \frac{Z_0}{Z_L} \right) \quad \dots\dots\dots \text{III.68}$$

avec l'introduit les notations suivantes:

$$\alpha + \beta = \frac{Z_1}{Z_2} = n \text{ et } \alpha - \beta = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{1}{n} \dots\dots\dots \text{III.69}$$

alors l'expression de t sera :

$$t = \frac{Z_0}{Z_L} \frac{2}{(n)^{N+1} + (\frac{1}{n})^N \frac{Z_0}{Z_L}} = \frac{2Z_0}{Z_L n^N + \frac{Z_0}{n^N}} = \frac{2n^N}{\frac{Z_L}{Z_0} n^{2N+1}} \dots\dots\dots \text{III.70}$$

le coefficient de transmission en énergie peut s'écrire:

$$T = \frac{Z_L}{Z_0} t^2 = \frac{Z_L}{Z_0} \frac{4n^{2N}}{(\frac{Z_L}{Z_0} n^{2N+1})^2} \dots\dots\dots \text{III.71}$$

On peut noter que dans le cas particulier où $Z_0 = Z_L$, lorsqu'on regarde l'énergie, le coefficient de transmission est:

$$T = t^2 = \frac{4n^{2N}}{(1+n^{2N})^2} \dots\dots\dots \text{III.72}$$

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:

$$T = \frac{4n^{2N+1}}{(1+n^{2N+1})^2} \dots\dots\dots \text{III.73}$$

La figure III.8 montre le spectre de transmission et de réflexion en fonction de la fréquence pour un cristal phononique 1D avec 10 couches alternant entre Aluminium et Epoxy. On observe des bandes interdites entre 0,48 MHz et 1,53 MHz pour les ondes acoustiques incidentes normales.

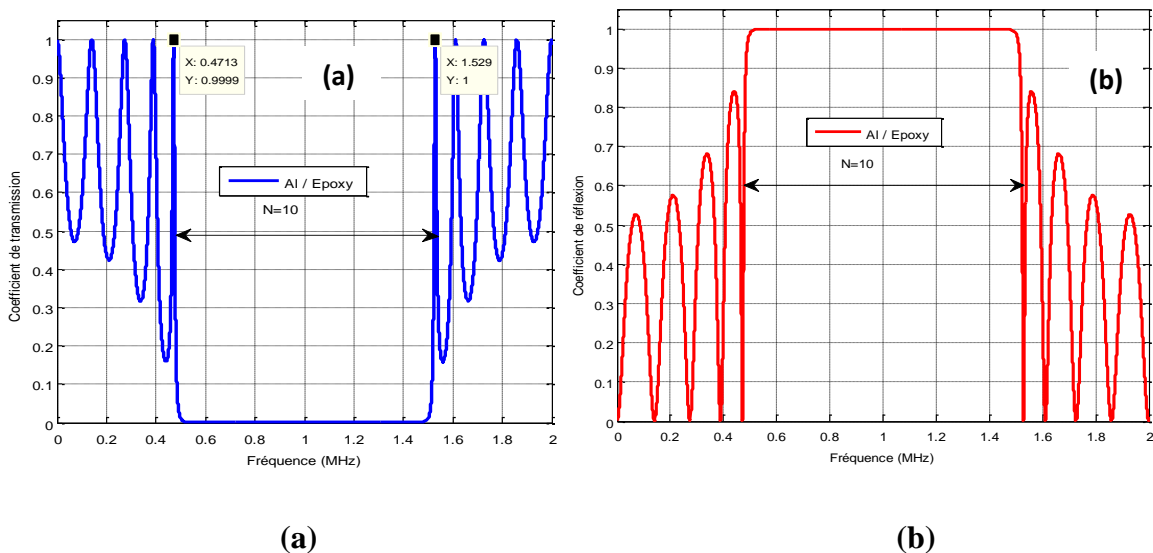


Figure III.8: Coefficients de transmission et de réflexion des ondes longitudinale pour un cristal phononique (Al/Epoxy)¹⁰: (a) Transmission, (b) Réflexion.

III.5.3. Avantages et inconvénients de la méthode TMM

La méthode de la matrice de transfert est un algorithme utile pour calculer les coefficients de réflexion et de transmission dans les structures multicouches. Elle peut être utilisée pour les matériaux sans pertes, avec pertes et absorbants.

La méthode de la matrice de transfert peut traiter n'importe quel nombre de couches dans une structure multicouche, sans restriction sur l'ordre ou la périodicité des couches. Même si elles sont périodiques, la cellule unitaire peut contenir un nombre arbitraire de couches. Les épaisseurs et les paramètres physiques de chaque couche peuvent être définis indépendamment, ce qui en fait la méthode la plus adaptée pour la modélisation des structures multicouches périodiques.

La méthode de matrice de transfert est adaptée aux structures avec un contraste élevé entre les couches. Toutefois, elle présente quelques inconvénients. Elle suppose que chaque couche s'étend indéfiniment dans ses deux dimensions, ce qui est irréaliste.

De plus, elle ne peut gérer la propagation d'impulsions et nécessite la combinaison avec la transformée de Fourier pour le faire. Pour éviter les erreurs d'hypothèse, les couches modélisées doivent être suffisamment larges. Le champ est calculé par des relations matricielles entre les couches successives.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté certaines méthodes numériques pour analyser le comportement des structures périodiques telles que les cristaux phononiques vis-à-vis la propagation des ondes acoustiques. Parmi ces techniques on peut citer ; la méthode FDTD, FEM, PWE et la méthode TMM qui sont devenues des techniques incontournables. Dans ce travail, notre intérêt est basé sur la méthode TMM, car, elle est considérée comme la plus appropriée pour résoudre la propagation des ondes acoustiques ou élastiques dans les structures multicouches. Elle nous permet de calculer les coefficients de transmission et de réflexions lors de la propagation d'une onde acoustique à incidence normale.

Il convient de noter que la TMM peut également être utilisée pour résoudre les problèmes liés à la propagation d'autres types d'ondes, telles que les ondes électromagnétiques et les ondes thermiques. Elle est basée sur une série de relations matricielles qui décrivent la propagation de l'onde à travers chaque couche de la structure multicouche, en prenant en compte les différences de propriétés physiques entre les couches. De plus, la TMM permet de prendre en compte les effets de réflexion et de transmission à chaque interface entre les couches, ce qui est essentiel pour la modélisation précise de la propagation des ondes dans les structures multicouches.

Chapitre IV

Résultats de simulation et discussions

IV.1. Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons étudier et simuler la propagation des ondes acoustiques à incidence normale à travers un cristal phononique unidimensionnel (1D-PnC) de type solide/ solide. Tout d'abord, nous allons étudier les variations de la bande interdite en fonction des paramètres physiques et géométriques des constituants du cristal 1D. Ensuite, on va étudier une structure unidimensionnelle imparfaite après l'insertion d'un défaut au centre du cristal en vue d'application dans le domaine des capteurs pour la détection de la salinité. Toutes les simulations sont effectuées en utilisant un code de la méthode des matrices de transfert (TMM) écrit avec Matlab.

IV.2. Structure étudiée

IV.2.1. Présentation de la structure

Dans cette partie, on va considérer la propagation des ondes élastiques longitudinales à incidence normale à travers un cristal phononique unidimensionnel (1D-PnC) composé de N bicouches de Plomb et de L'Epoxy placées en alternance (Plomb/Epoxy)^N.

La figure 1 représente la structure considérée. Cette structure périodique est un cristal phononique 1D fini formé par l'empilement de N couches dont la cellule élémentaire est Plomb/Epoxy composée de deux matériaux de propriétés élastiques différentes; le matériau A (Plomb en Marron) d'épaisseur a_1 et le matériau B (Epoxy) en bleue d'épaisseur a_2 . Avec : $a_1=1.5$ mm et $a_2=1.0$ mm et $N=5, 7, 9, 11, 13$ et 15 .

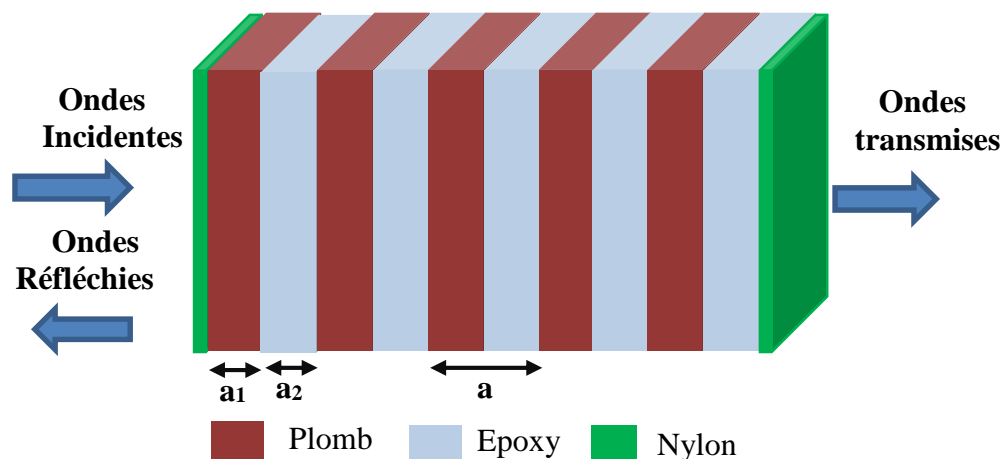


Figure IV.1: Représentation schématique de la structure considérée [Plomb/Epoxy]^N

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

Matériau	ρ (kg/m ³)	C_t (m/s)	C_l (m/s)	épaisseur
Plomb	11400	800	1960	1.5 mm
Epoxy	1180	1160	2539	1.0 mm
Nylon	1110	1100	2600	

Tableau IV.1: Paramètres physiques des différents matériaux constituant le cristal phononique solide/solide [52,53].

IV.2.2. Spectre de transmission et de réflexion

La figure IV.2 illustre le spectre de transmission (courbe en noire) et le spectre de réflexion (courbe en rouge) dans le cas de la propagation d'une onde acoustique longitudinale à incidence normale à travers la structure parfaite 1D-PnC décrite au paragraphe précédent. Les spectres représentent les coefficients de transmission et de réflexion. Ils sont obtenus en utilisant un code en matlab de la méthode de transfert de la matrice (TMM). D'après les spectres, il est clair que la structure considérée présente une bande interdite phononique dont la gamme des fréquences comprise environs entre 190 KHz et 608 KHz.

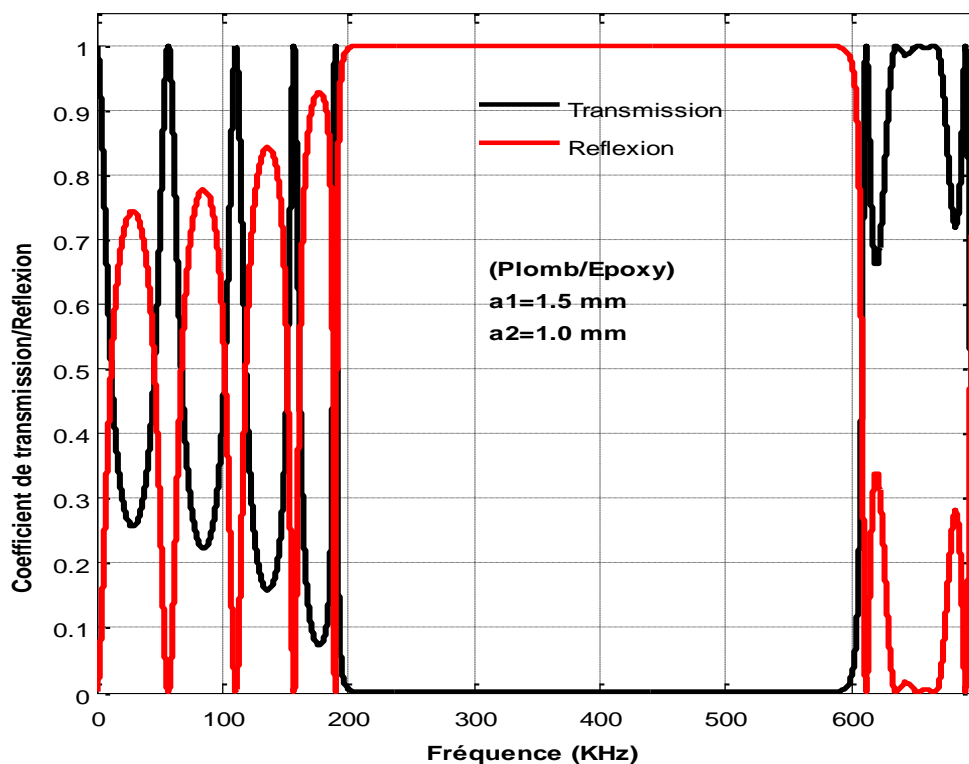


Figure IV.2: Spectre de transmission et de réflexion en fonction de la fréquence pour une onde longitudinale dans le cas d'un cristal 1D pour N=9 couches.

IV.3. Etude de la bande interdite phononique

IV.3.1. L'influence du nombre de couches du Plomb

Pour analyser l'influence du nombre de couches du Plomb sur la position et la taille de la bande interdite ouverte. Nous avons fixé tout d'abord les épaisseurs de la couche 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 changer uniquement le nombre de couches (N) du plomb insérées dans l'Epoxy. En utilisant le même code de la méthode des matrices de transfert TMM, nous allons effectuer une série de simulations.

La figure IV.3 montre le spectre de transmission en fonction le nombre de couches du plomb utilisées dans le cristal phononique 1D. Ces spectres sont obtenus respectivement pour N=5 couches, ensuite pour N=9 couches du plomb.

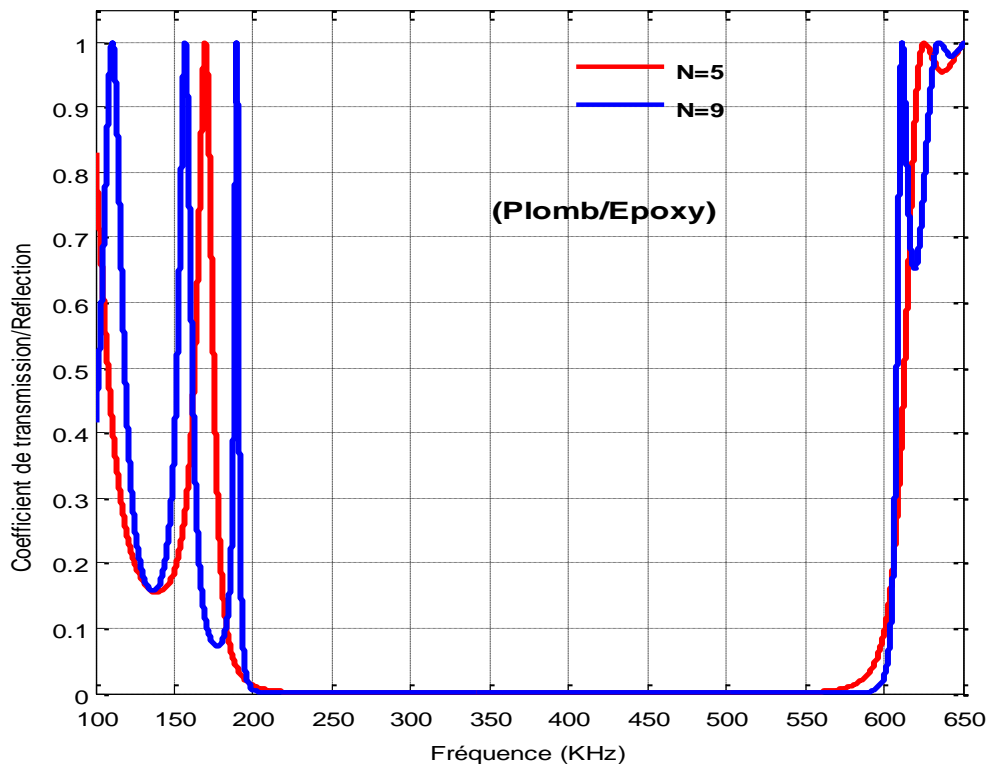


Figure IV.3: Spectre de transmission en fonction le nombre des couches du plomb; en bleu pour N=5 et en rouge pour N=9.

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

Le tableau IV.2 donne les résultats de simulation qu'on a obtenue en utilisant le même code de la méthode TMM. Les valeurs des différents paramètres illustrés dans ce tableau sont prises à 50% du taux de transmission.

N	f_1 (KHz)	f_2 (KHz)	Δf (KHz)	f_0 (KHz)
5	175	613.1	438.1	394.05
7	185.5	610.3	424.8	397.9
9	190.9	608.2	417.3	399.55
11	192.2	606.7	414.5	399.45
13	195.8	605.7	409.9	400.75
15	196.4	605	408.6	400.7

Tableau IV. 2: Largeur (Δf) de bande interdite phononique et fréquence centrale (f_0) en fonction du nombre N de couches du plomb insérées dans le cristal.

a. Evolution de la largeur de la bande (Δf) :

La figure IV.4 montre l'évolution de la largeur de la bande interdite ouverte en fonction du nombre de couches de plomb utilisées dans la structure. On constate clairement qu'autour de 400 KHz, plus le nombre de couches est élevé, plus la largeur de la bande calculée à 50% de transmission tend vers une valeur constante ce qui explique notre choix de 9 couches dans les paragraphes suivants.

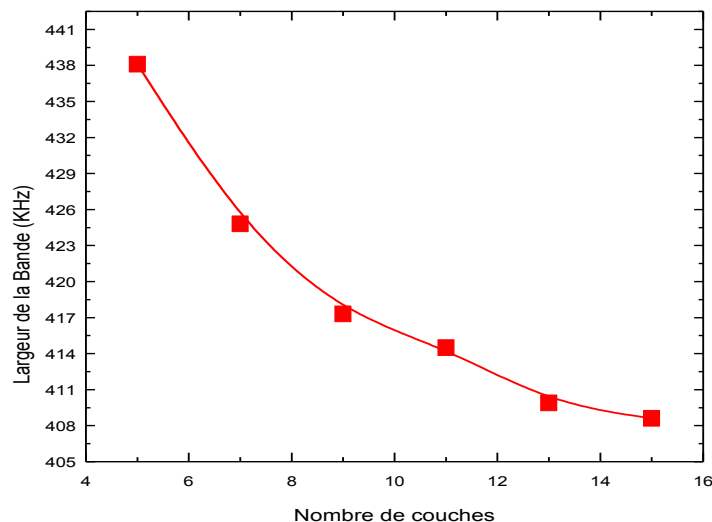


Figure IV. 4: Evolutions de la largeur de la bande interdite ouverte en fonction le nombre de couches du plomb utilisées dans le PnC-1D.

b. Evolution de la position de la bande (f_0) :

La figure IV.5 illustre l'évolution de la fréquence centrale (f_0) de la bande interdite phononique (courbe en bleue) ainsi que les fréquences limites (f_1) et (f_2) en fonction le nombre de couches du plomb.

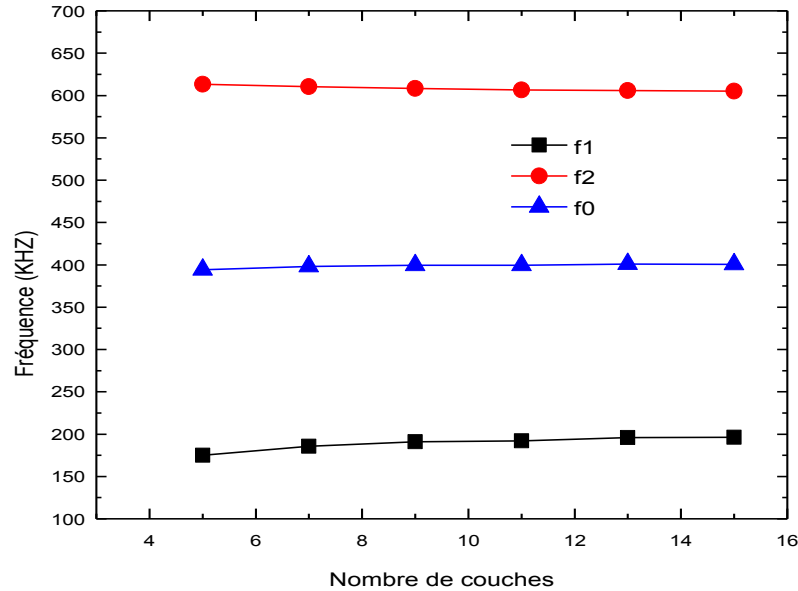


Figure IV. 5: Evolutions de la position de la bande interdite en fonction le nombre de couches utilisées dans le PnC-1D.

IV.3.2. L'influence du facteur de remplissage ff (%)

Dans la partie suivante, notre intérêt est porté sur l'étude de l'influence des paramètres géométriques sur les variations de la bande interdite phononique et notamment le facteur de remplissage. Notre structure est un cristal phononique 1D composé de 9 couches de plomb insérées dans l'Epoxy. Les paramètres élastiques et la période du cristal sont fixes.

Le facteur de remplissage est défini comme étant le rapport entre l'épaisseur de l'inclusion (Plomb) sur la période $a=a_1+a_2=2.5$ mm qui représente l'épaisseur de la cellule élémentaire. Alors, le facteur de remplissage est donné par: $ff=a_1/(a_1+a_2)$.

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.6, obtenus pour deux valeurs du facteur de remplissage $ff=20\%$, $ff=60\%$.

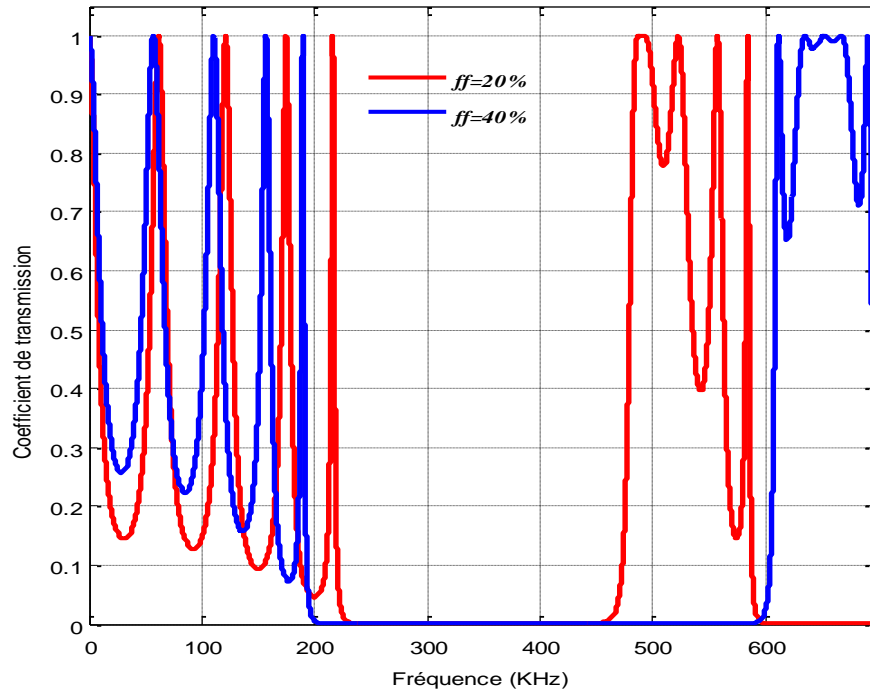


Figure IV. 6: Spectres de transmission dans le cas d'une onde longitudinale à incidence Normale ; en rouge pour $ff = 20\%$, et en bleue pour $ff = 40\%$.

Afin d'étudier l'influence du facteur de remplissage sur l'évolution des bandes ouvertes, nous avons effectué une série de simulations pour différentes valeurs du facteur de remplissage de 10% à 95%. Le tableau IV.3 reporte les différents résultats de simulation qu'on a obtenus en utilisant la méthode de la matrice de transfert (TMM).

ff (%)	f_1 (KHz)	f_2 (KHz)	Δf (KHz)	f_0 (KHz)
10	253.7	428.7	175	341.2
20	217.7	479.2	261.5	348.45
30	196.6	538.5	341.9	367.55
40	190.9	608.2	417.3	399.55
50	189.0	680.5	491.5	434.75
60	189.4	710.2	520.8	449.8
70	205.5	672.0	466.5	438.75
80	230.3	619.4	389.1	424.85
90	285.2	569.8	284.6	427.5
95	345.8	553.9	208.1	449.85

Tableau IV.3: Résultats de simulation pour différents valeurs du facteur de remplissage.

a. Evolution de la largeur de la bande (Δf)

La figure IV.7 montre les évolutions de la largeur de la bande interdite phononique en fonction le facteur de remplissage $ff(\%)$. Il est clair que autour de $ff=60\%$, on obtient une large bande interdite au tour de la fréquence centrale $f_0=400$ KHz.

Le facteur de remplissage est de l'ordre de 40% et la bande ouverte est de largeur égale à 417.3 KHz. D'autre part, on constate que pour des facteurs de remplissages très élevés ou très faibles la largeur de la bande décroît et tend vers zéro et les bandes interdites ouvertes initialement peuvent être fermées.

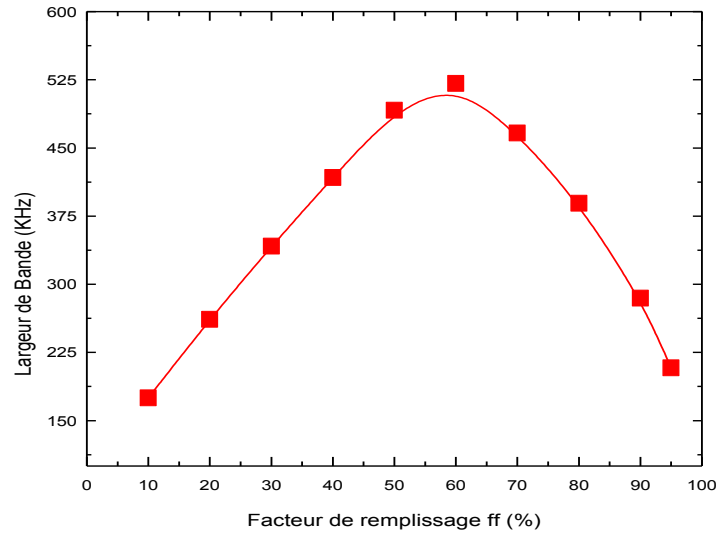


Figure IV.7: Variations de la largeur de la bande interdite ouverte en fonction le facteur de remplissage ff (%) dans le cas d'un cristal PnC-1D.

b. Evolution de la position de la bande (f_0)

La figure IV.8 montre les évolutions de la fréquence centrale (courbe bleue) en fonction le facteur de remplissage ff (%). Il est clair qu'autour de $ff = 40$ %, on obtient une bande interdite de largeur 417.3 KHz autour de la fréquence de base $f_0 = 400$ KHz.

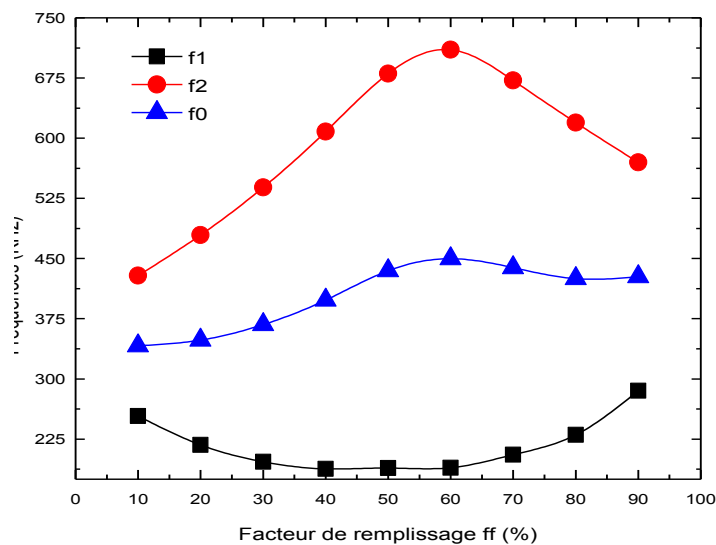


Figure IV.8: Variations de la location de la bande interdite ouverte en fonction le facteur de remplissage ff (%).

IV. 4. Conception du capteur a cristal phononique 1D

Les structures phononiques multicouches présentent une nouvelle plateforme dans le domaine des capteurs afin de déterminer les propriétés biochimiques ou physiques du matériau à analyser est ceci quel que soit la nature du matériau : liquide, solide ou gazeuse.

Dans cette partie, nous allons présenter et simuler le spectre de transmission d'un cristal phononique unidimensionnel (solide/solide) avec défaut au centre pris sous forme d'un réseau de bragg, en utilisant le logiciel MATLAB à partir d'un programme qui concerne les éléments de la méthode des matrices de transfert ; TMM.

IV. 4. 1. Présentation de la structure avec défaut

Le capteur de liquides à cristal phononique unidimensionnel qu'on a proposé dans ce travail est composé par l'empilement périodique de 8 couches de plomb et de l'époxy comme il est schématisé sur la figure IV.9. Ensuite, nous avons introduit une couche de défauts en jaune au centre de la structure proposée. Cette dernière est remplie par l'eau distillé ; $[(\text{Plomb}/\text{Epoxy})^2 - (\text{liquide}) - (\text{Epoxy}/\text{Plomb})^2]$.

Les paramètres géométriques et principalement les épaisseurs des deux matériaux (le Plomb) et (l'Epoxy) du cristal phononique unidimensionnel avec la couche de défaut placée au centre de la structure sont a_1 et a_2 et D respectivement telle que: $a_1=1.5$ mm, $a_2=1.0$ mm et $D=0.5$ mm.

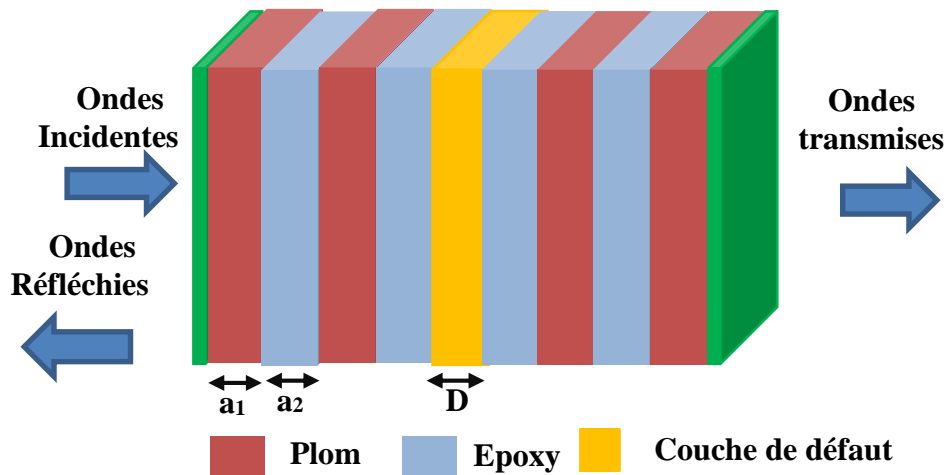


Figure IV.9. Représentation schématique du capteur à base d'un cristal phononique 1D - $(\text{Plomb}/\text{Epoxy})^2/\text{Défaut}/(\text{Epoxy}/\text{Plomb})^2$ avec une couche de défaut remplie de l'eau.

Le tableau IV.4 résume les conditions de simulations ainsi que les valeurs des propriétés géométriques et physiques pour les deux matériaux utilisés dans la conception de notre structure.

Matériau	ρ (kg/m ³)	C_t (m/s)	C_l (m/s)	Epaisseur
Plomb	11400	800	1960	1.5 mm
Epoxy	1180	1160	2539	1.0 mm
Water	998	0	1483	0.5 mm

Tableau IV.4: Paramètres physiques et géométriques des matériaux constituant la structure multicouche à étudier.

IV. 4. 2. Mode de résonance :

Dans ce travail, nous allons utiliser la méthode des matrices de Transfert TMM pour étudier et simuler la propagation des ondes acoustiques longitudinales à incidence normale à travers la structure périodique décrite au précédemment.

La figure IV.10, reporte les simulations obtenus en utilisant un code de la méthode TMM écrit en Matlab. Les deux spectres de transmission sont obtenus pour une structure sans défauts (spectre en noir), alors que le spectre en rouge est obtenu après l'introduction de l'eau distillée dans la couche de défaut d'épaisseur $D=0.5$ mm (défaut). Il est clair que le défaut provoque l'apparition d'un mode résonant dont la fréquence de résonance est 480.4 KHz.

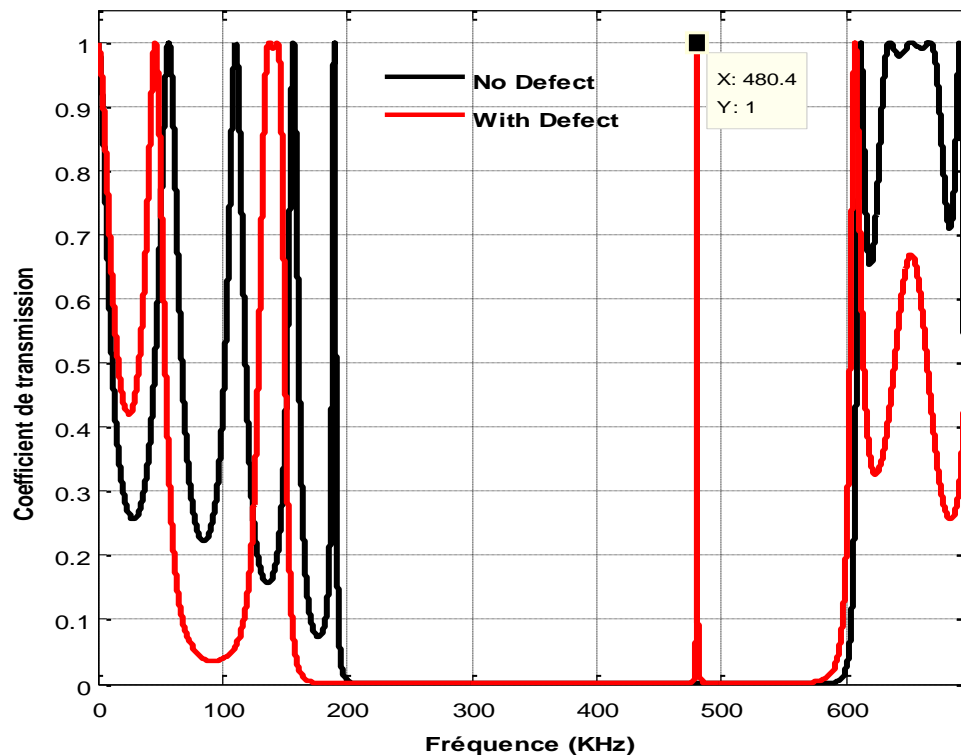


Figure IV.10: Spectre de transmission pour un CnP -1D parfait (en Noir), ensuite avec une couche de remplie de l'eau pure au centre d'épaisseur $D=0.5$ mm (en rouge).

La figure IV.11, illustre les spectres de réflexion obtenus après les simulations de la structure considérée. Le spectre en noir est obtenu pour une structure parfaite (sans défaut), alors que le spectre en rouge est obtenu après l'introduction d'une couche de remplie de l'eau pur à 20 °C dont l'épaisseur est $D=0.5$ mm. Nous pouvons constater toujours l'apparition d'un mode résonant de fréquence égale à 480.4 KHz.

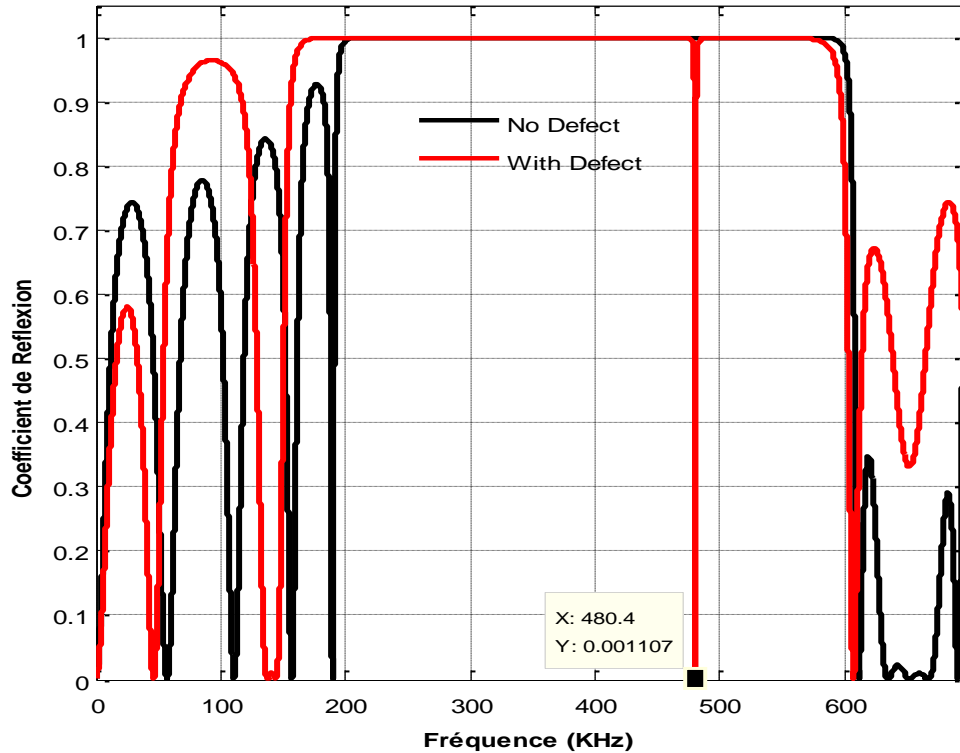


Figure IV.11 : Spectre de réflexion pour un CnP -1D parfait (en Noir), ensuite avec une couche de remplie de l'eau pure au centre d'épaisseur $D=0.5$ mm (en rouge).

IV. 4. 3. Principe de détection des liquides :

Dans la section suivante, nous allons étudier et proposer un capteur de liquides à base d'un cristal phononique (1D) de type : $[(\text{Plomb}/\text{Epoxy})^2/\text{liquide}/(\text{Epoxy}/\text{Plomb})^2]$.

Notre conception est considérée comme une structure binaire défectueuse composée de deux couches différentes de (Plomb & Epoxy) répétées deux fois de période $a=2.5$ mm, suivies de l'insertion d'une couche défectueuse au milieu de la structure. La couche défectueuse sera remplie par différents liquides qui ont été analysé séparément. Nous avons considéré les matériaux de Plomb et l'Epoxy en raison du contraste en impédance acoustique élevé. La méthode de la matrice de transfert (TMM) a été utilisée pour la modélisation numérique du spectre d'ondes acoustiques à travers la structure du capteur.

Au cours de cette section, Nous considérons la fréquence de résonance de l'eau pur à 20 °C ($f_r=480.4$ KHz) comme fréquence de référence pour la position des différentes

fréquences de résonance pour les autres liquides testés. Le tableau IV.6 illustre les propriétés physiques des couches utilisées ainsi que les différentes propriétés des liquides testés telles que la densité, la vitesse du son longitudinale sont prises sont à 20°C.

Les résultats sont obtenus en utilisant le même code de la méthode TMM. La fréquence de résonance pour chaque liquide testé est obtenue en utilisant la méthode de la matrice de transfert, ils sont résumés dans le tableau IV.5.

Liquide (20°C)	Densité (Kg/m ³)	C _l (m/s)	Z/Z(water)	f _{rés} (KHz)
Water	998	1483	1	480.4
Cyclohexanone (C ₃ H ₁₀ O)	948	1420	0.9095	482.9
Biodiesel	890	1425	0.85690599	486.4
Methanol	791.7	1116	0.59697088	488.7
Ethanol	789.24	1160	0.6185793	489.6
Kerosene	810	1324	0.72460498	490.4

Tableau IV.5: Paramètres physiques des liquides utilisés à la température 20°C [53,54].

La figure IV.12 illustre le spectre de transmission en fonction de la fréquence lorsque la couche défectueuse est remplie par chaque liquide a analysé. Pour l'eau distillé la fréquence de résonance est égale à la fréquence de base 480.4 KHz, pour le Biodiesel la fréquence de résonance est 486.4 KHz, pour le Methanol la fréquence de résonance est 488.7 KHz, pour l'Ethanol cette fréquence de résonance est 489.6 KHz, pour le Kerosene elle est 490.4 KHz.

Il est clair que lorsque le défaut est rempli par un autre liquide la fréquence de résonance se décale vers la gauche ou vers la droite avec certain Δf_r en KHz. Cette variation de la fréquence de résonance peut être utilisée pour la détection des différents liquides.

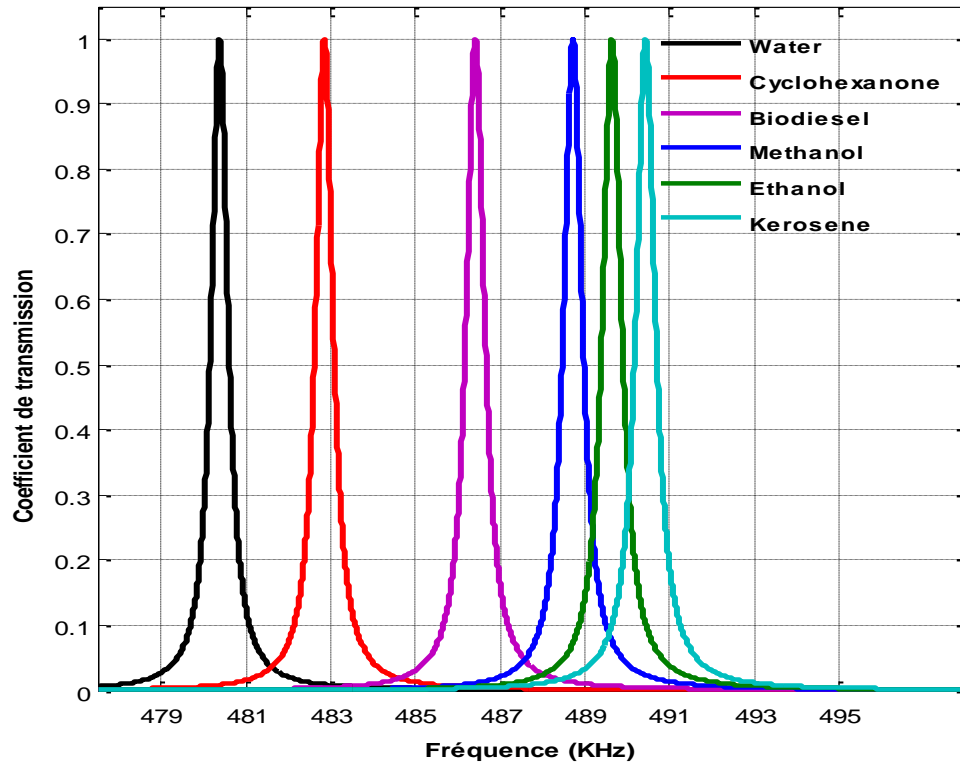


Figure IV.12: Spectre de transmission pour différents liquides: Eau pure (20°C), Cyclohexanone, Biodiesel, Méthanol, Ethanol, Kérosène dans le cas d'un CnP-1D $[\text{Plomb/Epoxy}]^2/\text{Liquide}/(\text{Epoxy/Plomb})^2$.

IV.4.4. Influence de l'épaisseur de la couche de défaut

Dans ce qui suit, nous allons utiliser le Biodiesel comme un défaut, et nous étudierons l'effet de la largeur de la couche de liquide insérée au milieu de notre structure sur le spectre de transmission d'une onde longitudinale à incidence normale qui se propage à travers le cristal $(\text{Lead/Epoxy})^2/\text{Défaut}/(\text{Epoxy/Lead})^2$.

Dans le tableau IV.6, nous avons reporté la fréquence de résonance du mode de défaut et le taux de décalage pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche du défaut.

D (mm)	0.50	0.510	0.520	0.530	0.540	0.550
$f_{\text{rés}}$ (KHz)	480.4	479.0	477.5	476.1	474.7	473.2
Δf (KHz)	0	-1.4	-2.9	-4.3	-5.7	-7.2

Tableau IV.6 : Résultats de simulations obtenus pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche de défaut.

Les spectres de transmission obtenus montrent l'effet de variation de la largeur de la couche défectueuse remplie par l'eau distillée à 20°C, il est clair que chaque épaisseur est présentée par un pic à une fréquence de résonances différente.

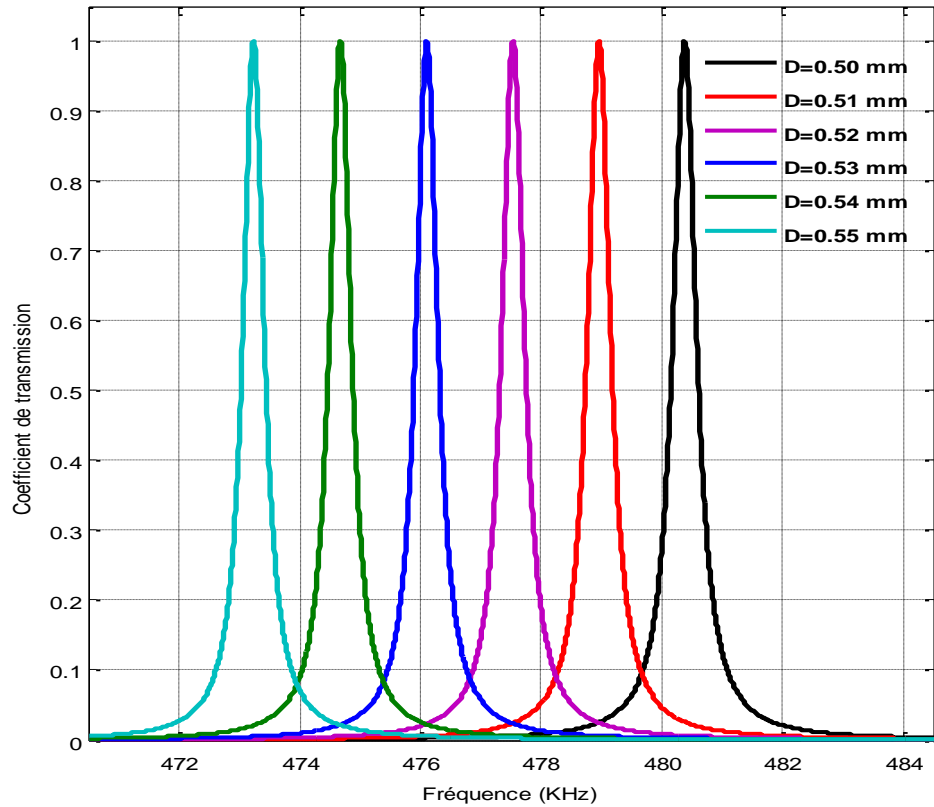


Figure IV.13 : Coefficient de transmission en fonction de fréquence dans le cas du CnP- 1D pour différentes valeurs de l'épaisseur D de la couche du défaut

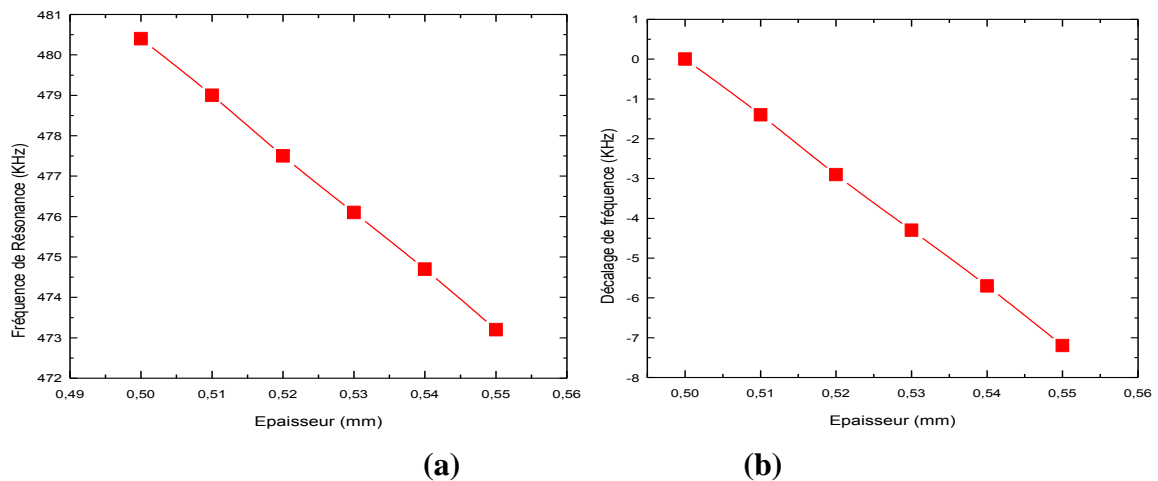


Figure IV.14: (a) : Evolution de la fréquence du mode résonant pour chaque liquide et (b): Evolution de la fréquence de décalage en fonction de l'épaisseur du défaut

Sur les figures IV.14(a) et (b), nous avons reporté les variations de la fréquence de résonance du mode de défaut en fonction de l'épaisseur de la couche de défaut remplie par l'eau distillée à 20 °C. Ainsi que l'évolution de la fréquence de décalage par rapport à la fréquence de résonance de référence c'est-à-dire de l'eau distillée en fonction de l'épaisseur du défaut.

IV.5. Détection de la salinité de l'eau

La structure phononique multicouches présente une nouvelle plateforme dans le domaine des capteurs. Dans cette partie, nous allons présenter et simuler le spectre de transmission d'un cristal phononique unidimensionnel de type solide/solide en utilisant un programme écrit en matlab qui concerne la méthode des matrices de transfert.

IV.5.1. Effet de concentration de NaCl

Pour détecter le degré de salinité de l'eau, on peut utiliser la structure décrite précédemment en injectant dans l'eau distillé des concentrations différentes en NaCl. Tout d'abord, il est nécessaire de fixer les paramètres géométriques et physiques. Ensuite, nous avons effectué une série de simulation en utilisant le code de la méthode TMM.

Le tableau IV.7 donne les valeurs des paramètres géométriques et physiques pour les différents matériaux utilisés ainsi que la fréquence de résonance ($f_{rés}$) et le décalage en fréquence (Δf) pour chaque concentration en NaCl.

Concentration en NaCl (%)	Densité (Kg/m ³)	Vitesse longitudinale du son C_1 (m/s)	$f_{rés}$ (KHz)	Δf (KHz)	FWHM (Hz)
0 (eau pure)	998	1483	480.4	0	400
5	1035	1550	478.7	-1.7	400
10	1070	1610	477.1	-3.4	400
15	1125	1662	474.2	-6.2	400
20	1148	1722	473.2	-7.2	400
25	1185	1775	471.4	-9	400
30	1230	1825	469.1	-11.3	400

Tableau IV.7: Paramètres physiques et géométriques des matériaux utilisés dans la structure multicouche étudiée.

La figure IV.16 illustre le spectre de transmission en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de concentration de NaCl : 0% (l'eau distillée), 5% ,10%, 15%, 20% 25% et 30%. A partir de cette figure, il est clair que chaque pic de résonance est lié avec les propriétés physique et principalement à la concentration de NaCl. Les résultats obtenus montrent clairement que la fréquence de résonance du mode résonant diminue progressivement avec la concentration de la solution a testée.

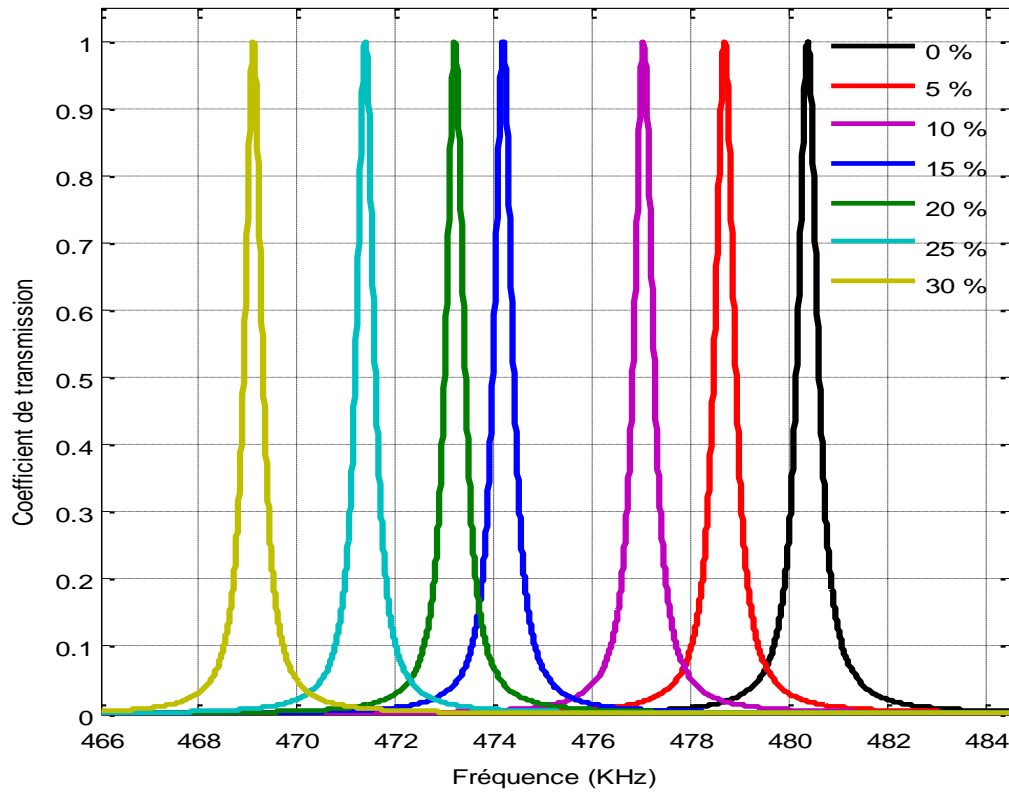


Figure IV.16: Réponse de la position de la fréquence de résonance en fonction de la concentration en NaCl.

Les figures IV.17 (a) et (b) montrent l'évolution de la fréquence de résonance ($f_{\text{résonance}}$) 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 ($\Delta f_{\text{résonance}} = f_{\text{résonance}} - f_0$). Il est clair que le pic de résonance diminue avec la concentration. Ainsi que le changement de fréquence de décalage diminue également avec la concentration de NaCl.

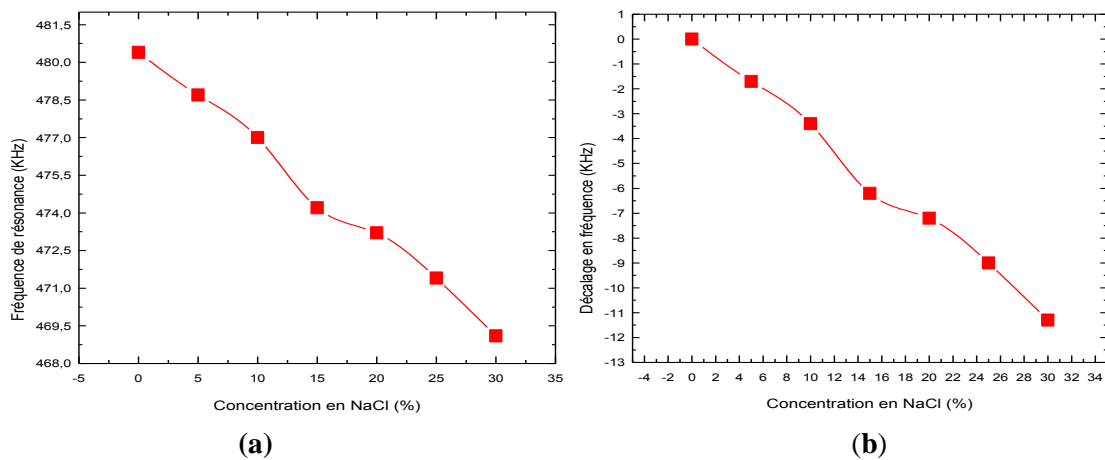


Figure IV.17: (a) Evolution de la fréquence de résonance ($f_{\text{résonance}}$) avec la concentration de NaCl. (b) Evolution de la variation en fréquence de résonance (Δf) en fonction la concentration de NaCl.

IV.5.2. Paramètres de performance d'un capteur

Les performances et l'efficacité d'un capteur sont en général caractérisées par certains paramètres tels que la sensibilité (S), le facteur de qualité (Q), le facteur de mérite et la limite de détection (DL) [56].

IV.5.2.1. 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 NaCl de la solution. Ainsi, la sensibilité renseigne sur le décalage du mode résonant en fonction du changement de la concentration en NaCl. Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante. Ce paramètre peut être obtenu en utilisant l'expression suivante:

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

Où : $\Delta f_r = f_r - f_0 \dots\dots\dots (IV.02)$

f_0 : est la fréquence de résonance de l'eau distillée, f_r (eau pure) = 480.4 KHz.

f_r : est la fréquence de résonance pour une solution de concentration C(%)

ΔC : la variation dans le paramètre d'entrée (la concentration de NaCl de la solution analysée %).

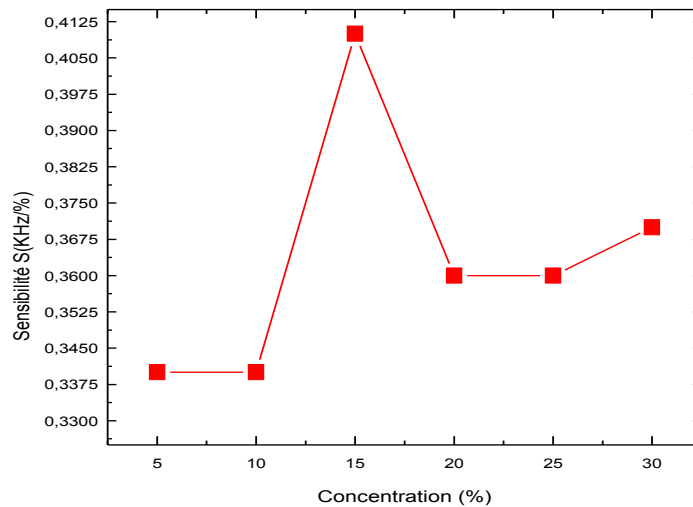


Figure IV.18: Représentation de la sensibilité en fonction la concentration en NaCl C(%).

La figure IV.18, illustre la sensibilité en fonction la concentration C (en %). La courbe de la sensibilité est obtenue en prenant les valeurs de sensibilité en valeurs absolues. Cependant, le décalage des pics de résonance pour chaque solution de concentration C(%) est effectué vers les basses fréquences (vers la gauche). On constate clairement que la sensibilité est maximale pour une concentration de 15%, elle atteint 0.41 KHzpar 1% (elle est de 1000 Hz pour une concentration de 2.43%). Ensuite, elle diminue vers 0.36 pour des concentrations élevées.

IV.5.2.2. Facteur de qualité Q

Comme dans les dispositifs destinés à l'intégration optique et audio et réalisant des fonctions 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. Le facteur de qualité est exprimé par :

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

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

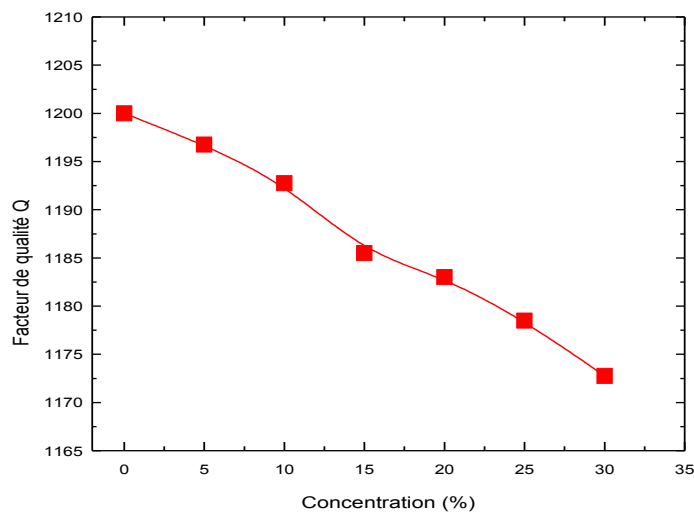


Figure IV.19: Représentation du facteur de qualité en fonction la concentration C(%).

La figure IV.19, illustre les variations du facteur de qualité en fonction la concentration en NaCl. Le facteur Q atteint son maximum qui est de l'ordre de 1200 pour les faibles concentrations, jusqu'à 5%. Puis, le facteur de qualité diminue progressivement pour les fortes concentrations, il atteint son minimum qui est de l'ordre de 1172.75 pour une concentration de 30% .

IV.5.2.3. Facteur de mérite FOM

Le facteur de Mérite (FoM) est obtenu en divisant la sensibilité par la largeur de raie de résonance à mi-hauteur. Il fournit, en plus de la sensibilité, l'information de la finesse du pic de résonance. Il est donné par l'expression suivante [57]:

$$\text{FOM} = S / \text{FWHM} \dots \dots \dots (IV.04)$$

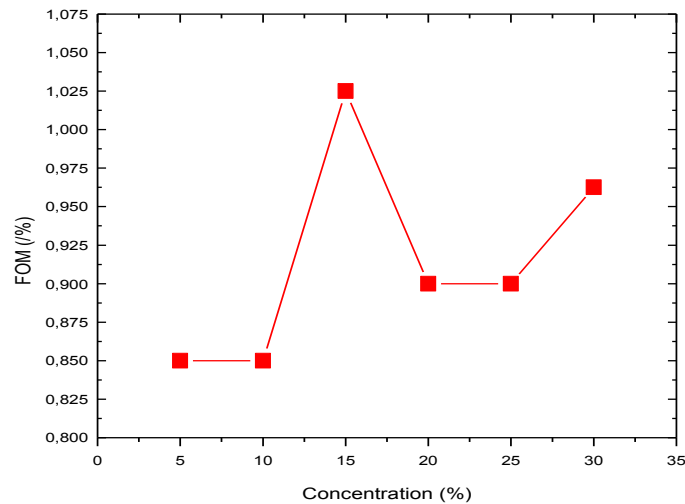


Figure IV.20: Représentation du facteur de mérite en fonction de la concentration C (en %).

La figure IV.20, illustre l'évolution du facteur de mérite en fonction de la concentration. D'après la courbe, il est clair que le facteur de mérite atteint un maximum autour d'une concentration de 15%.

IV.5.2.4. Limite de détection DL

La limite de détection (DL) peut être calculée en utilisant l'équation :

$$DL = \frac{f_r}{Q \cdot S} \dots\dots\dots (IV.05)$$

Où : Q est le facteur de qualité, S est la sensibilité et f_r est la fréquence de résonance.

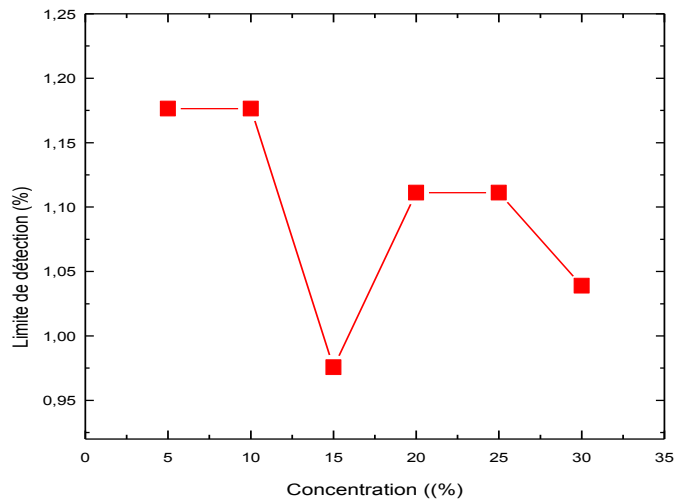


Figure IV.21: Représentation de la limite de détection en fonction de la concentration C (en %).

La figure IV.21, montre les variations de limite de détection avec la concentration de NaCl. La figure montre clairement que le minimum de détection est obtenu pour une concentration de 15%. D'après l'évolution, on note bien que la limite de détection est l'inverse de FOM.

IV.6. Conclusion

Dans cette étude, nous avons examiné la structure périodique phononique 1D composée de couches alternées de plomb et d'époxy, avec l'objectif de l'utiliser comme capteur de salinité. Les simulations réalisées ont permis de caractériser les propriétés de transmission, de réflexion et de bande interdite phononique de cette structure.

Nous avons étudié l'influence du nombre de couches de plomb sur les propriétés phononiques de la structure, ainsi que l'impact du facteur de remplissage. Ces analyses nous ont permis de concevoir un capteur à cristal phononique 1D avec une structure présentant un défaut contrôlé. Nous avons examiné les modes de résonance et le principe de détection des liquides à travers ce capteur.

Ensuite, nous avons étudié spécifiquement la détection de la salinité de l'eau en variant la concentration de NaCl. Les résultats ont montré que la structure phononique 1D était sensible aux changements de salinité, avec des variations de fréquence de résonance correspondant à différentes concentrations de NaCl. Nous avons également évalué les paramètres de performance du capteur, tels que la sensibilité et la sélectivité.

En conclusion, cette étude démontre le potentiel de la structure périodique phononique 1D (Plomb/Epoxy) en tant que capteur de salinité. Les résultats obtenus suggèrent que ce capteur peut être utilisé efficacement pour la détection et la quantification de la salinité dans l'eau. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser la conception du capteur, améliorer sa sensibilité et sa sélectivité, et explorer d'autres applications potentielles de cette structure phononique 1D.

Notes de Discussions :

1. Dans cette étude, nous avons utilisé des simulations pour caractériser les propriétés de la structure périodique phononique 1D. Il serait intéressant de réaliser des expériences pour valider les résultats obtenus et comparer les performances réelles du capteur avec les prédictions théoriques.
2. L'étude de l'influence du nombre de couches de plomb et du facteur de remplissage sur les propriétés phononiques de la structure offre des informations précieuses pour optimiser la conception du capteur. Cependant, il convient de noter que d'autres paramètres, tels que l'épaisseur des couches ou les matériaux utilisés, pourraient également avoir un impact significatif sur les performances du capteur et mériteraient d'être étudiés plus en détail.

3. La détection de la salinité de l'eau est un domaine d'application prometteur pour ce capteur à cristal phononique 1D. Cependant, d'autres liquides ou substances pourraient également être détectés en ajustant les propriétés de la structure. Une étude plus approfondie de la sélectivité du capteur vis-à-vis d'autres paramètres chimiques serait donc pertinente.
4. Enfin, il convient de souligner que cette étude se concentre sur un capteur de salinité basé sur une structure phononique 1D spécifique. D'autres architectures et approches de capteurs pourraient être explorées, telles que les structures phononiques 2D ou 3D, afin d'améliorer les performances et les fonctionnalités du capteur.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les cristaux phononiques (PnC) sont des composites fabriqués par avec une modulation spatiale de leurs propriétés acoustiques. Ces matériaux périodiques; sont constitués d'au moins deux matériaux aux propriétés élastiques différentes. En effet, la structure de la matière périodique selon une, deux ou trois dimensions de l'espace permet de contrôler et de manipuler la propagation des ondes élastiques dans ces structures. Ces structures permettent également de bloquer complètement leur transmission dans certaines directions et régions de fréquence.

A l'heure actuelle, de nombreuses structures périodiques ont été étudiées et simulées et plusieurs approches théoriques ont été développées. Toutes ces études théoriques et expérimentales ont mis en évidence l'existence de bandes passantes et autres bandes interdites, où il est possible de contrôler voire d'empêcher la propagation des ondes sonores à travers ces cristaux. D'autre part, ces nouvelles structures composites périodiques offrent de nouvelles possibilités pour développer un nouveau type de capteur à cristal phononique, notamment dans le domaine de la détection de liquide.

Le travail présenté dans ce mémoire, vise à étudier et concevoir un capteur de salinité basé sur un cristal phononique 1D. Tout d'abord, un examen complet des cristaux phononiques a été effectué au premier chapitre pour comprendre les principes de base et les propriétés de ces structures. Le second chapitre a examiné les capteurs utilisant des cristaux phononiques et a mis en évidence leur potentiel pour les applications de détection de liquide. Les calculs ont été effectués par la méthode de la matrice de transfert (TMM) qui permet de calculer les coefficients de transmission et de réflexion à travers la structure considérée.

Dans la première partie de ce travail, nous avons étudié un cristal phononique unidimensionnel formé par l'empilement de N couches ; [Plomb/Epoxy]^N. Tout d'abord,, nous avons étudié théoriquement la propagation d'ondes sonores de fréquence normale à travers un cristal parfait. En utilisant le code écrit en Matlab de la méthode de matrice de transmission TMM, nous avons calculé les coefficients de transmission et de réflexion, et observé l'ouverture des bandes interdites. Nous avons démontré par simulation que des paramètres géométriques et physiques principalement, le nombre de couches et le facteur de remplissage jouent un rôle important dans les propriétés de la bande interdite.

Dans la seconde partie, l'effet de la concentration de NaCl sur la détection de la salinité a été étudié. Dans cette étude, nous nous intéressons à la conception d'un capteur de salinité à cristal phononique unidirectionnel (PnC-1D). Il est constitué d'une structure multicouche de type (Plomb/Epoxy)²/couche de défaut/(Epoxy/Plomb)², où la couche de défaut est remplie d'eau avec différentes concentrations de NaCl.

Les résultats de la simulation montrent clairement l'existence de modes de résonance correspondant aux propriétés physiques de la solution testée. De même que la fréquence de résonance du mode de transmission est très sensible à la concentration en sel dans le liquide analysé. Cela démontre le grand potentiel des capteurs de salinité à base de cristaux phononiques 1D dans diverses applications, notamment l'industrie de l'eau, l'agriculture et l'environnement.

En résumé, cette étude fait progresser la compréhension des cristaux phononiques et suggère une conception efficace d'un capteur de salinité. Les résultats obtenus ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de capteurs de haute performance dans le domaine de la détection de liquides. Des efforts supplémentaires peuvent être entrepris pour optimiser davantage les paramètres du capteur et pour explorer d'autres applications potentielles dans divers domaines. Ces travaux constituent une contribution significative à la communauté scientifique et offrent des perspectives prometteuses pour les recherches futures dans ce domaine.

Bibliographie

- [1] Kushwaha M.S., Halevi P., Dobrzynski L., Djafari-Rouhani B. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Phys. Rev. Lett.* 1993;71:2022–2025. doi: 10.1103/PhysRevLett.71.2022.
- [2] Lu M.-H., Feng L., Chen Y.-F. Phononic crystals and acoustic metamaterials. *Mater. Today.* 2009;12:34–42. doi: 10.1016/S1369-7021(09)70315-3.
- [3] Khelif A., Wilm M., Laude V., Ballandras S., Djafari-Rouhani B. Guided elastic waves along a rod defect of a two-dimensional phononic crystal. *Phys. Rev. E.* 2004;69:067601. doi: 10.1103/PhysRevE.69.067601.
- [4] Lucklum R., Li J. Phononic crystals for liquid sensor applications. *Meas. Sci. Technol.* 2009;20:124014. doi: 10.1088/0957-0233/20/12/124014.
- [5] Lucklum R., Li J. Phononic crystals for liquid sensor applications. *Meas. Sci. Technol.* 2009;20:124014. doi: 10.1088/0957-0233/20/12/124014.
- [6] Lucklum R., Ke M., Zubtsov M. Two-dimensional phononic crystal sensor based on a cavity mode. *Sens. Actuators B.* 2012;171–172:271–277. doi: 10.1016/j.snb.2012.03.063.
- [7] Oseev A., Lucklum R., Ke M., Zubtsov M., Grundmann R. Phononic Crystal Sensor for Liquid Property Determination; Proceedings of the International Society for Optics and Photonics; San Diego, USA. 30 March 2012; p. 834607.
- [8] Oseev A., Mukhin N., Lucklum R., Zubtsov M., Schmidt M.-P., Steinmann U., Fomin A., Kozyrev A., Hirsch S. Study of liquid resonances in solid-liquid composite periodic structures (phononic crystals)—Theoretical investigations and practical application for in-line analysis of conventional petroleum products. *Sens. Actuators B Chem.* 2018;257:469–477. doi: 10.1016/j.snb.2017.10.144
- [9] Ke M., Zubtsov M., Lucklum R. Sub-wavelength phononic crystal liquid sensor. *J. Appl. Phys.* 2011;110:026101. doi: 10.1063/1.3610391.
- [10] Molerón M., Serra-Garcia M., Daraio C. Acoustic Fresnel lenses with extraordinary transmission. *Appl. Phys. Lett.* 2014;105:114109. doi: 10.1063/1.4896276.
- [11] Oseev A., Lucklum R., Zubtsov M., Schmidt M.-P., Mukhin N., Hirsch S. SAW-Based Phononic Crystal Microfluidic Sensor—Microscale Realization of Velocimetry Approaches for Integrated Analytical Platform Applications. *Sensors.* 2017;17:2187. doi: 10.3390/s17102187.
- [12] Schmidt M.-P., Oseev A., Lucklum R., Zubtsov M., Hirsch S. SAW based phononic crystal sensor, technological challenges and solutions. *Microsyst. Technol.* 2016;22:1593–1599. doi: 10.1007/s00542-015-2781-3.
- [13] Lucklum R., Zubtsov M., Oseev A. Phoxonic crystals—A new platform for chemical and biochemical sensors. *Anal. Bioanal. Chem.* 2013;405:6497–6509. doi: 10.1007/s00216-013-7093-9.

-
- [14] Amoudache S., Pennec Y., Djafari Rouhani B., Khater A., Lucklum R., Tigrine R. Simultaneous sensing of light and sound velocities of fluids in a two-dimensional phononic crystal with defects. *J. Appl. Phys.* 2014;115:134503. doi: 10.1063/1.4870861.
- [15] Altas M.C., Kudryashov E., Buckin V. Ultrasonic Monitoring of Enzyme Catalysis; Enzyme Activity in Formulations for Lactose-Intolerant Infants. *Anal. Chem.* 2016;88:4714–4723. doi: 10.1021/acs.analchem.5b04673.
- [16] B. Imad Eddine, O. Abderrezak, Study and simulation of phononic crystal waveguides: effect of localized modes in a phononic waveguide, Mémoire de fin d'études, Master en physique, Université Saad Dahleb Blida 1. 2020; P. 17
- [17] A. Mohammed, B. Fatima, Etude et simulation d'un capteur de CO₂ à base de cristaux phononiques, Mémoire de fin d'études, Master en Micro-Electronique, Université Med Boudiaf M'sila 2021, P 21.
- [18] 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 Master Académique, Département D'électronique – Msila , 2016.
- [19] C. Caloz, "EBGs and Meta materials: Concepts, Structures and Applications", EuCAP 2009,
- [20] Mehaney, Ahmed & Ahmed, Islam. (2021). Acetone sensor based 1D defective phononic crystal as a highly sensitive biosensor application. *Optical and Quantum Electronics.* 53. 10.1007/s11082-021-02737-x.
- [21] 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)
- [22] 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. <https://doi.org/10.1115/1.4026911>
- [23] Overvelde, Johannes Tesse Bastiaan, Sicong Shan, and Katia Bertoldi. 2012. Compaction through buckling in 2D periodic, soft and porous structures: Effect of pore shape. *Advanced Materials* 24(17): 2337-2342.
- [24] Micro fabricated Deposition Nozzles For Direct-Write Assembly Of Three-Dimensional Periodic Structures, *Advanced materials Magazin* , October 2004
- [25] Ranjeet B. Rao, Karen L. Krafcik, Alfredo M. Morales , Microfabricated Desposition 3D Peridodic Structures 2004.
- Lien: https://scholar.harvard.edu/files/lewislab/files/microfabricated_deposition_nozzle_for_direc_write_assembly_of_three_dimensional_periodic_structures.pdf
- [26] Kheffache, S. « Propagation d'ondes élastiques dans les cristaux phononiques bidimensionnels » thèse de Doctorat, UMMTO, (2011).
- [27] Gorisse, M.. « Réalisation de filtres RF à base de cristaux phononiques » , thèse de doctorat, Université de Grenoble), (2011).

[28] Farhad Javanpour Heravi, Hussein A. Elsayed, Walied Sabra, Ahmed Mehaney. (2023) Ultra-sensitive one-dimensional phononic crystals temperature sensor: theoretical optimization. *Journal of Natural Research A* 78:3, 249-261.

[29] M. Maldovan and E. L. Thomas, Simultaneous complete elastic and electromagnetic band gaps in periodic structures, *Appl. Phys. B* 83, 595 (2006).

[30] 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 23 décembre 2011

[31] Laude, Vincent & Benchabane, Sarah B. , (2011). Cristaux phononiques et photoniques: son et lumière pris au piège. *Photoniques*. 49-53. 10.1051/photon/20115449.

[32] Contributeurs de Wikipédia, « Onde acoustique », Wikipédia, The Free Encyclopedia, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Acoustic_wave&oldid=1138743161 (consulté le 2 avril 2023).

[33] Bruno Mangin , Majd Daroukh et Gwénaél Gabard Icône , Propagation of Acoustic Waves in Ducts with Flow Using the Multimodal Formulation.

Lien : <https://doi.org/10.2514/1.J062659>

[34] Mehdi Ghoumazi, Study of the Modeling of a Photonic Crystal Structure using COMSOL for the Design of a Temperature Sensor, Research Unit in Optics and Photonics (UROPE), Center for the Development of Advanced Technologies (CDTA), University of Setif-1. Lien : <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1809257/v1>

[35] Capteurs et leurs applications. par Kumar Venkateswara et al., publié dans la revue *Sensors and Transducers* en 2018.

[36] Technologies de détection pour les systèmes de transport intelligents. par Tariq Samad et Michael Hassler, publié dans *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* en 2020.

[37] ANNECCA Gaëtan, CAPTEURS Instrumentation Industrielle. Université de Lorraine - France, (consulté le 5 avril 2023).

Lien : <http://dptgeii.iutsd.univ-lorraine.fr/cours/geii2/ER3/introCAPTEUR.pdf>

[38] Aicha MEHIDI , Polycopié Pédagogique Capteurs Et Instrumentation , Université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis.

Lien : http://biblio.univmosta.dz/bitstream/handle/123456789/21330/polycopie_capteurs_et_instrumentation.pdf

[39] Acquisition D'une Grandeur Physique (Capteurs) . les-electroniciens.com. Lien : <http://www.les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/capteurs.pdf> (accessed April 5, 2023).

[40] R. Lucklum, "Phononic crystal sensors," 2012 European Frequency and Time Forum, Gothenburg, Sweden, 2012, pp. 196-199, doi: 10.1109/EFTF.2012.6502366.

-
- [41] Zaki, S.E., Mehaney, A., Hassanein, H.M. et al. Fano resonance based defected 1D phononic crystal for highly sensitive gas sensing applications. *Sci Rep* 10, 17979 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75076-8>
- [42] Nguyen, Ngan. (2015). Fabrication and optimization of polymer-based photonic structures and applications to nonlinear optics.
- [43] What Is Finite Element Analysis (FEA)? , Solve partial differential equations using finite element analysis, Lien : <https://de.mathworks.com/discovery/finite-element-analysis.html>
- [44] Contributeurs de Wikilivres, «Méthode des éléments finis/Présentation générale», Wikilivres, La bibliothèque libre . Lien : (accédé le 3 avril 2023).
https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=M%C3%A9thode_des_%C3%A9l%C3%A9ments_finis/Pr%C3%A9sentation_g%C3%A9n%C3%A9rale&oldid=685386
- [45] Yin, J., Ruzzene, M., Wen, J. et al. Band transition and topological interface modes in 1D elastic phononic crystals. *Sci Rep* 8, 6806 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24952-5>
- [46] Sun, Jia-Hong and Tsung-Tsong Wu. “4G-3 Guided Surface Acoustic Waves in Phononic Crystal Waveguides.” 2006 IEEE Ultrasonics Symposium (2006): 673-676.
- [47] Mehaney A, Ahmed AM. Locally Resonant Phononic Crystals at Low Frequencies Based on Porous SiC Multilayer. *Sci Rep*. 2019 Oct 14;9(1):14767. doi: 10.1038/s41598-019-51329-z. PMID: 31611574; PMCID: PMC6791839.
- [48] Méthode saute-mouton. (2021, mai 5). Wikipédia, l'encyclopédie libre. Page consultée le 09:15, mai 5, 2021 à partir de http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9thode_saute-mouton&oldid=182601883.
- [49] Méthode de Crank-Nicolson. (2019, janvier 3). Wikipédia, l'encyclopédie libre. Page consultée le 15:15, janvier 3, 2019 à partir de http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9thode_de_Crank-Nicolson&oldid=155454905.
- [50] John B. Schneider , Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method, December 20, 2022.
- [51] Mehaney A, Ahmed AM. Locally Resonant Phononic Crystals at Low frequencies Based on Porous SiC Multilayer. *Sci Rep*. 2019 Oct 14;9(1):14767. doi: 10.1038/s41598-019-51329-z. PMID: 31611574; PMCID: PMC6791839.
- [52] Mehaney, A. “Biodiesel Physical Properties Detection Using One-Dimensional Phononic Crystal Sensor”. *Acoust. Phys.* 65, 374–378 (2019).
- [53] 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).
- [54] Aghilas Brahimi. Etude de performances d’un capteur solaire plan à eau. *Génie des procédés*. 2016. ffh1-01825548f

[55] 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).

[56] Zheng Han, «Vers le laser Raman à cristal photonique en filière silicium», thèse d'Université Paris-Sud XI (2010).

[57] K. M. Mayer and J. H. Hafner, Localized Surface Plasmon Resonance Sensors, *Chem. Rev.* 111, 3828 (2011).

Abstract:

Phononic crystal sensors offer a new platform for high performance sensing applications. This work contributes to the design of salinity sensors based on the defective 1D-DPnC phononic crystal structure. The structures studied are of the (Lead/Epoxy)²/defect/(Epoxy/Lead)² type, where the defect layer is filled first with fresh water, then with various liquids containing high concentrations and different contents. in salt. The calculation of the transmission coefficients by the transfer matrix method shows that resonant modes are generated in the forbidden band due to the defects.

The results obtained also demonstrate that the strength of the resonance mode is independent of the specific properties of the dissolved salts. However, the resonant frequency of the transmission mode is very sensitive to the salt concentration in the analyzed liquid. These results suggest that this structure has a strong potential to detect salinity in liquids.

Keywords: Salinity sensors, 1D phononic crystal, acoustic waves, transfer matrix, salt water.

المخلص:

تقدم أجهزة الاستشعار التي تعتمد على البلورات الصوتية منصة جديدة ومبتكرة لتطبيقات الكشف ذات الأداء العالي. يُسهم هذا العمل في تصميم أجهزة استشعار لقياس مستوى الملوحة في السوائل باستخدام هياكل بلورية فونونية ثنائية الأبعاد مع وجود عيوب.

يتم دراسة هذه الهياكل التي تتألف من طبقات (Epoxy/Plomb)²/défaut/Plomb/Epoxy² ، حيث يتم ملء طبقة العيب بدايةً بالماء العذب. ثم مجموعة متنوعة من السوائل ذات تراكيز مختلفة من الملح، حيث يظهر حساب معاملات الانتقال باستخدام طريقة مصفوفة الانتقال أن هناك أوضاع رنينية تتشكل في الفرقة المحظورة بسبب وجود العيوب في الهيكل. ومن الملاحظ أن قوة وضع الرنين ثابتة ولا تتأثر بخصائص السوائل المحقونة. وعلى العكس من ذلك، فإن تردد وضع الانتقال يتأثر بشكل كبير بتركيز الملح في السائل المحلل ودرجة حرارة الماء. هذه النتائج تؤكد أن هذه الهياكل واعدة لتطبيقات استشعار الملوحة في السوائل. و من الجدير بالذكر أن استخدام هذه الأجهزة الفونونية البلورية في تطبيقات كشف الملوحة يمكن أن يفتح آفاقاً جديدة في مجالات متعددة مثل صناعة المياه والزراعة والبيئة. قد يساهم التطوير المستمر لهذه التقنية في تحسين كفاءة عمليات قياس الملوحة وتوفير بيانات دقيقة وموثوقة لتلبية الاحتياجات المتزايدة للمستخدمين في هذه الصناعات المختلفة.

الكلمات المفتاحية: مستشعرات الملوحة ، الكريستال الصوتي أحادي الأبعاد ، الموجات الصوتية ، مصفوفة التحويل ، المياه المالحة.