

République algérienne démocratique et populaire  
ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Saad Dahleb Blida 1



Faculté des sciences

Département de physique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique

Option : Nano Physique

Thème :

" Comparaison entre les bandes interdites de structures phononiques avec des résonateurs de section circulaire et celles avec résonateurs à section carrée "

Présenté par :

Arabe Mohamed – Khaled Seddam

Soutenu le 24/10/2021 devant le jury suivant :

Dr.Salah Eddine Aoudj	Université Blida 1	Président
Dr. Abedalkader Hassen Bey	Université Blida 1	Examineur
Dr.Amine Amrane	Université Blida 1	Promoteur



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## RESUME

Le thème de ce sujet de Master consiste en l'étude des structures phononiques en basses fréquences. Ces structures étant munies de résonateurs qui entraînent l'apparition de bandes interdites ou bandes gap synonymes de blocage de certaines bandes de fréquences.

Les structures phononiques avec des résonateurs sont généralement constituées d'un substrat et de cylindres émergents composés d'un matériau ayant une masse volumique et des constantes élastiques différentes de celles du substrat.

On fait la simulations par Comsol Multiphysics une cellule de base constituée d'un certain matériau et munie d'un résonateur de section circulaire composé lui même d'un noyau assez lourd et enrobé dans une couche de polymère, en faisant tout d'abord apparaître les bandes gap. Il est ensuite varier la section des résonateurs en prenant une section carrée et de voir l'effet sur ces bandes gap.

### ملخص

يتمثل موضوع هذه الماستر في دراسة الهياكل الصوتية عند الترددات المنخفضة. يتم تزويد هذه

الهياكل بالرنانات التي تسبب ظهور نطاقات ممنوعة أو نطاقات فجوة مرادفة لحجب نطاقات

تردد معينة

تتكون الهياكل الصوتية ذات الرنانات عموماً من ركيزة وأسطوانات ناشئة تتكون من مادة لها كثافة وثوابت مرنة مختلفة عن تلك الموجودة في الركيزة.

الدراسات عن طريق المحاكاة كـمسول ميلتي فزياء على خلية أساسية مصنوعة من مادة معينة ومزودة برنان من المقطع الدائري نفسه يتكون من قلب ثقيل إلى حد ما ومغلف بطبقة من البوليمر ، عن طريق إظهار نطاقات الفجوة أولاً. وتغيير القسم من الرنانات بأخذ مقطع مربع ومعرفة التأثير على نطاقات الفجوة هذه.

### Abstract

The theme of this Master topic is the study of low frequency phononic structures. These structures are equipped with resonators that cause the appearance of prohibited bands or gap bands synonymous with the blocking of certain frequency bands.

Phononic structures with resonators are generally composed of a substrate and emergent cylinders composed of a material with a density and elastic constants different from those of the substrate.

Comsol Multiphysics simulates a basic cell consisting of a certain material and equipped with a circular resonator section composed of a rather heavy core and coated in a polymer layer, first of all making the gap bands appear. It is then vary the resonator section by taking a square section and see the effect on these bands gap.

## *Remerciements*

*Nous rendons nos profondes gratitude à Allah qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons de remercier sincèrement Monsieur,*

*Dr. Amine Amrane pour avoir assuré*

*L'encadrement de ce travail. Sa disponibilité, son expérience, son savoir scientifique et ses qualités humaines ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.*

*Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.*

*Nos sincères gratitude à tous ce qui nous ont enseigné.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour Leurs soutiens moraux ou matériels.*

# **Dédicaces**

**JE DEDIE CE TRAVAIL DE THESE :**

**A TOUTE MA FAMILLE**

## TABLEDES MATIERES :

Liste des Figures.....	09	
Introduction générale.....	14	
Chapitre 1 : CRISTAUX PHONONIQUES - GENERALITES ET APPLICATIONS		
LES CRISTAUX PHONONIQUE.....	15	
1.2.1HISTORIQUE ET CONCEPT DES CRISTAUX PHONONIQUE PHOTONIQUES.....	16	
1.2.2 PROPAGATION DES ONDES ELASTIQUES ACOUSTIQUES DANS LES MILIEUX PERIODIQUE .....	20	
1.2.3 DEFINITION D'UN CRISTAL PHONONIQUE.....	24	
1.2.3.1:COMPARAISON AVEC D'AUTRES STRUCTURES CRISTALLINES.....	27	
1.2.4.1CRISTAUX PHONONIQUE A BONDE INTERDITES DE BRAGG .....	31	
1.2.5 : ETUDE EXPERIMENTAL ET APPLICATION.....	35	
1.2.5.1 : GUIDAGE DANS LES STRUCTURES PHONONIQUE.....	35	
1.2.5.2 : AUTRES APPLICATION DES CRISTAUX PHONONIQUE.....	36	
1.2.6 FORMEL THEORIQUE .....	36	
1.2.6.1 RESOUT RESPECT.....	36	
1.2.6.2 ZONE DE BRILLOUIN.....	37	
CONCLUSION .....	38	
Chapitre 2 : MODELISATION ET METHODE DE SIMULATIONS D'UNE STRUCTURE PHONONIQUE A BASE DE BETON		
2.1- Introduction.....	39	
2.2 - DEFINITION ET CHOIX DES MODELES ETUDIES .....	39	
3-MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS SOUS COMSOL MULTIPHYSICS .....		41

4- MODELISATION ET SIMULATION D'UNE CELLULE DE BASE PHONONIQUE A UN RESONATEUR POUR LE CALCUL DES COURBES DE DISPERSION .....	42
4.1- Choix DE LA CELLULE DE BASE - MODELE NUMERIQUE .....	42
4.2- IMPLEMENTATION DES EQUATIONS.....	45
4.3- CONDITIONS AUX LIMITES (CL) .....	45
4.4- MAILLAGE ET CONVERGENCE .....	46
4.5- COURBES DE DISPERSION ET CHAMPS DE DEPLACEMENTS .....	48
4.6- CALCUL DU SPECTRE DE TRANSMISSION .....	49
4.7- METHODE PAR UTILISATION DE DOMAINES ABSORBANTS PML (PERFECTLY MATCHED LAYER) .....	49
4.8- CHOIX DES MATERIAUX UTILISENT .....	49
4.9- EXEMPLE DE RESULTATS DE SIMULATIONS .....	50
- Conclusion.....	50

Chapitre 3 : PERFORMANCES ET OPTIMISATION D'UNE CELLULE PHONONIQUE A UN RESONATEUR LOCAL POUR L'ISOLATION DE STRUCTURES A BASE DE BETON

3.1– Introduction.....	52
3.2–Géométrie du modèle étudié et conditions de calculs.....	52
3.3–Définition des paramètres globaux et création de la géométrie.....	53
3.4–les propriétés de matériau composant la plaque .....	54
3.5–les conditions frontières .....	54
3.6–Le Maillage .....	55
3.7–Simulation et traitement des résultats .....	56
3.8–Courbes de dispersion .....	56
3. –9Modélisation et simulation .....	57
3.10E–ffet des paramètres géométriques sur les bandes interdites.....	58



3.11–Courbes de dispersion pour $h_1/a = h_2/a = 0.5$ .....	59
3.12– La définition de la physique et le choix du type d'analyse.....	59
3.13–Géométrie de la structure cristaux phononiques (PC).....	59
3.14–Matériaux constituant la structure.....	60
3.15 –Condition aux limites.....	60
3.16–Maillage de la structure.....	61
3.17–Les résultats de la simulation.....	61
résonateurs de section circulaire .....	61
1-les graphes des résonateurs circulaire Gamma-X .....	61
2-les graphes des Résonateurs circulaire _X-M .....	62
3-les graphes des Résonateurs circulaire M-Gamma .....	63
Tableau Récapitulatif des Bandes Interdites Complètes Selon les Différents Paramètres Géométriques(circulaire).....	64
Graphe variations de la fréquence centrale et largeur des bandes interdites en fonction $\beta$ .....	64
résonateurs de section carrée.....	65
1-les graphes des Résonateurs carrée _X-M .....	65
2-les graphes des résonateurs carrée Gamma-X .....	66
3-les graphes des Résonateurs carrée M-Gamma .....	67
Tableau Récapitulatif des Bandes Interdites Complètes Selon les Différents Paramètres Géométriques(carrée).....	68
Graphe variations de la fréquence centrale et largeur des bandes interdites en fonction $\beta$ (carrée).....	68
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	69

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> : schéma d'un cristal photonique 2D.....	17
<b>Figure 1.2</b> : schéma d'un cristal photonique 3D.....	17
<b>Figure 1.3</b> : sculpture d'E. Semper, exposé à la fonction jaun March Madrid, utilisé pour les démonstrations par martines –sala .....	18
<b>Figure 1.4</b> : cristaux photonique 1D, 2D, 3D et de matériaux de déférent diélectrique 19	
<b>Figure 1.5</b> : (a) la zone de Brillouin d'un réseau carré. (b) zone de Brillouin d'un réseau triangulaire .....	20
<b>Figure 1.6</b> : son (dans l'air), onde acoustique (dans les liquides), onde élastique (dans les solides) font partie d'une seule et même famille d'onde couvrant un large spectre de fréquences et d'application .....	22
<b>Figure. 1.7</b> : Représentation Schématique d'un solide traversé par une onde longitudinale	22
<b>Figure 1.8</b> : Représentation schématique d'une onde transverse.....	23
<b>Figure 1.9</b> : cristaux phononique (a) unidimensionnels (1D), (b) bidimensionnels (2D) et (c) tridimensionnels (3D).....	25
<b>Figure .1.10</b> : schéma d'un cristal phononique bidimensionnel pour deux réseaux (carré triangulaire).....	26
<b>Figure 1.11</b> : Différentes structures 3D : structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure.....	26
<b>Figure 1.12</b> : schéma présente une structure de bonde pour un cristal phononique (arrangement de tige d'aluminium dans matrice de nickel) .....	30
<b>Figure 1.13</b> : schéma présente d'un exemple de calcule de bande de la première zone de Brillouin pour un cristal phononique [26] .....	30
<b>Figure 1.14</b> : schéma expliquant la loi de Bragg.....	31
<b>Figure1.15</b> : (31) : schéma présenté cellules élémentaires électromagnétique permettant d'affecter :(a) le champ électrique(b) le champ magnétique .....	32
<b>Figure :1.16</b> : schéma présente méta cellule et exemple d'application : la super-lentille. ....	33
<b>Figure 1.17</b> : principaux résultat de l'article fondateur de ping sheng et al .concernant le milieu périodique à résonance locale (39).....	34
<b>Figure 1.18</b> : illustration d'un résonateur de Helmholtz et d'un disposition permettant d'obtenir une compressibilité effective négatif (N. Fange et al).....	35
<b>Figure 1.19</b> : montre les premières zones de Brillouin du réseau réciproque dans le cas d'une	

structure carrée.....	38
<b>Figure. 2.1</b> Structure périodique composée d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindres métalliques enrobés d'une couche de polymère[48].....	40
<b>Figure. 2.2</b> Structures périodiques composées d'un massif en béton .....	40
<b>Figure. 2.3</b> Les étapes suivies dans Comsol Multiphysics pour l'analyse d'un modèle .....	42
<b>Figure. 2.4</b> (a) Structure périodique composée d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindres métalliques enrobés d'une couche de polymère, (b) Modèle représentant une cellule de base.....	43
<b>Figure. 2.5</b> Différentes étapes pour la conception géométrique d'un modèle.....	44
<b>Figure. 2.6</b> Configuration des différents modèles de base (a) cylindres non émergents, (b) seul le cylindre de métal émerge du substrat, (c) cylindres émergents, (d) modèle après grugeage.....	45
<b>Figure. 2.7</b> Conditions aux limites périodiques appliquées aux quatre faces latérales du massif de béton[56].....	46
<b>Figure. 2.8</b> Maillage fin pour les différentes cellules .....	47
<b>Figure. 2.9</b> Zones de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour un réseau carré et pour des matériaux isotropes.....	48
<b>Figure. 2.10</b> pour le couple de matériaux "acier-pvc" (a) Courbes de dispersion des fréquences, (b) Spectre de transmission pour une structure périodique unidimensionnelle finie à 8 cellules unitaires.....	50
<b>Figure 3.3</b> : Construction de la géométrie cellule unité.....	54
<b>Figure 3.5</b> : Définition des conditions frontière.....	55
<b>Figure 3.6</b> : (a) État du modèle avant de simuler et (b) Résultat de la simulation.....	56
<b>Figure 3.7</b> : Structures de bandes dans la direction $\Gamma$ X présenté pour une "super cellule".....	57
<b>Figure 3.9</b> Courbes de dispersion des fréquences, ( $r_1/a=0.45$ $r_2/a=0.35$ , $h_1/a=h_2/a=0.5$ ) gap situé entre 50 et 63 m/s.....	58

<b>Figure. 3.11</b> Courbes de dispersion des fréquences.....	59
<b>Figure.3.14</b> : position de rubber.....	60
<b>Figure 3.16:</b> maillage de la structure.....	61
<b>Figure 3.17</b> : la géométrie de la structure .....	62

## LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1.1 : Propriétés clés pour l'étude des structures de bandes dans les matériaux tridimensionnels isotropes.....	28
Tableau 2.1 : Caractéristiques des matériaux .....	50
Tableau 3. 3: les propriétés du caoutchouc.....	60
Tableau : Les paramètres géométriques .....	56

## **INTRODUCTION GENERALE :**

Les cristaux phononiques (CP) forment une branche nouvelle et dynamique du domaine des ondes acoustiques et élastiques qui reçoit un grand intérêt depuis quelques années [16]. Les cristaux phononiques par définition sont des structures artificielles, dont la densité et les constantes élastiques sont des fonctions périodiques suivant une, deux ou trois directions de l'espace. Un cristal phononique est constitué d'au moins de deux matériaux élastiques différents ; il est formé généralement d'une distribution périodique d'inclusions ou diffuseurs incorporées dans une matrice. Ces nouveaux matériaux appelés cristaux phononiques sont conçus principalement pour modifier la propagation des ondes acoustiques ou élastiques de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur affecte le déplacement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites. Du fait de leur structure périodique, les cristaux phononiques appelés aussi cristaux acoustiques peuvent présenter, sous certaines conditions géométriques et physiques, des gaps acoustiques absolus, c'est-à-dire des bandes interdites de fréquence quelque soit la direction de propagation de l'onde acoustique incidente.

Dans le domaine de fréquences du gap, une onde incidente sera réfléchiée par le cristal phononique qui opère alors comme un miroir parfait non absorbant. Une telle propriété est prometteuse pour une variété importante d'applications, comme par exemple la réflexion des ondes sismiques, la création de boucliers acoustiques ou encore la construction de miroirs non absorbants permettant l'isolation phonique de cavités.

# Chapitre 1:CRISTAUX PHONONIQUES - GENERALITES ET APPLICATIONS

## 1.1 Introduction :

De nombreux travaux ont été menés sur les cristaux photonique et phononique de façon séparée, mais peu encore sur une structure présentant potentiellement le mélange des deux propriétés

La compréhension des phénomènes de diffusion multiple dans les structures périodiques a permis l'émergence dès les années 90 de structures artificielles permettant d'envisager le contrôle de la propagation des ondes. Décrites de façon globale par des théories de diffusion multiples, les mécanismes de ces structures sont donc généralisables à tous types

D'ondes dont les ondes lumineuses et les ondes électriques un cristal phononique est une structure présentant une périodicité, cette périodicité dans la matière produit des effets étonnants, pouvant être, l'arrangement périodique de motifs très spécifiques de deux matériaux d'impédance acoustique différentes.

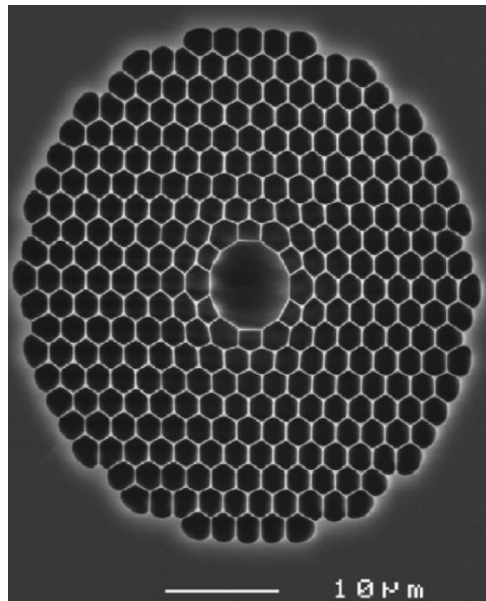
Dans ce premier chapitre, consacré et rappel quelques notions des cristaux photoniques et boîtes plus les cristaux phononiques, et l'histoire de ces matériaux qui a commencé la première fois à l'étude théorique de propagation des ondes électromagnétiques, et développé après, les études de ces matériaux, il est plus intéressante dans les dernières années tel que l'importance de l'utilisation dans différentes domaines de notre vie.

Et à la fin de ce chapitre, on a parlé de quelques-unes de leurs propriétés, applications et quelques formulations théoriques.

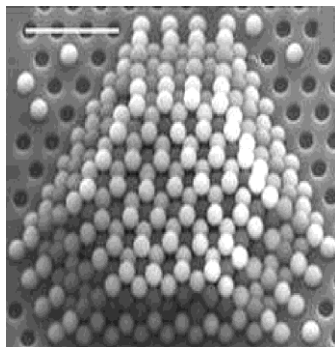
## 1.2 LES CRISTAUX PHONONIQUE

### 1.2.1 HISTORIQUE ET CONCEPT DES CRISTAUX PHONONIQUE-PHOTONIQUES

En 1887, les travaux de Lord Rayleigh [1] c'est la première fois qui ont étudié théoriquement la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique périodique unidimensionnel et directionnel, la possibilité d'obtenir des matériaux à bandes interdites de photons (en anglais photonic band gap PBG) pour des ondes électromagnétiques a été démontré absolument en 1987 par E. Yablonovitch et John [2] c'est l'émergence de cristaux photoniques comme la démonstration expérimentales 2D/3D comme exemple suivant (figure 1 et 2)



**FIGURE 1.1** SCHEMA D'UN CRISTAL PHOTONIQUE 2D [4]



**FIGURE 1.2** SCHEMA D'UN CRISTAL PHOTONIQUE 3D [3]

En 1993, c'est la première fois que fut introduit le concept de cristal phononique presque simultanément par deux équipes l'une constituée de E.N.Economu et M.Sigalas [5] et l'autre de M.S.Kushwaha, P.Halov, L.Dobranski et B.Djafari-Rouhani [6], qui publie un article sur la structure de bandes acoustique d'un cristal phononique bidimensionnel composé de cylindres d'aluminium dans une matrice de nickel, c'est la première fois qu'une équipe présente une bande interdite absolue.

La présence d'un gap acoustique est essentielle pour certains matériaux, ou bien des bandes interdites quelle que soit la direction de propagation de l'onde élastique



incident, dans le domaine de la bande interdite inter, la structure conduite comme miroir réfléchissant, dans les structures périodique, l'étude de la propagation des ondes élastique permis de mettre en évidence des analogies et des différences .

Le mécanisme de formation des bandes interdites et le paramétrés géométrique et physique qui contrôle des bandes interdites gaps dans différents types de cristaux photonique (2D /3D....) [7].

Si on a le type de cristal phononique 2D (deux dimension), formé section de cylindre, que on peut disposer selon un réseau cristallographique

En 1995, la première validation expérimentale d'une bande interdite acoustique publiée par Martínez-Sala [8] sur une sculpture d'artiste espagnol Eusebio Sempere pour exposée dans les jardins de la Juan March Foundation à Madrid comme présentée dans la (figure 1.2)



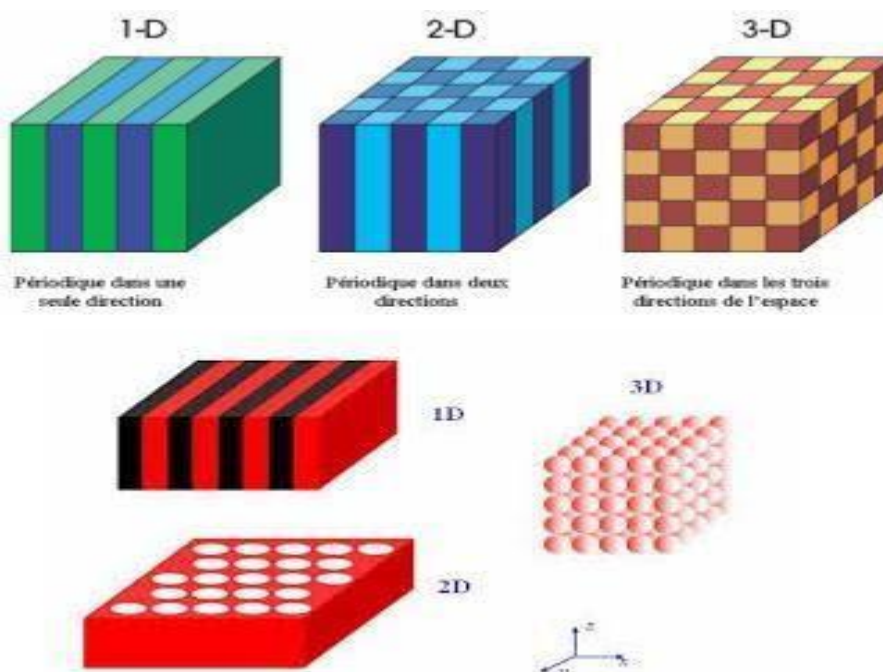
**Figure 1.3 :** sculpture d'E. Sempere, exposée à la Fundación Juan March Madrid, utilisée pour la démonstration par Martínez-Sala [9]

Cette sculptr constituée de cylindre d'acier de 2.9 cm de diamètre placé selon un réseau carre de 10 cm de maille fut entouré de microphones, mettant ainsi en évidence une bande interdite directionnelle centré sur 2khz.

En 1998 confirmé la possibilité d'obtenir des bande interdite absolues avec les première mesurent qui ont été présente par Sanchez-Perez [10] et Vasseur et al [11], la première présentation c'est la structure solide /fluide, c'est un système 2D carré ou hexagonale de cylindre d'acier dans l'air

Le concept de cristaux photonique est présentant une variation périodique d'indice de réfraction de l'ordre de la longueur d'onde interdisent une la propagation des ondes lumineuses dans certain gammes de longueur d'onde situées l'intérieur de la bonde interdite quel que soit d'incidence.

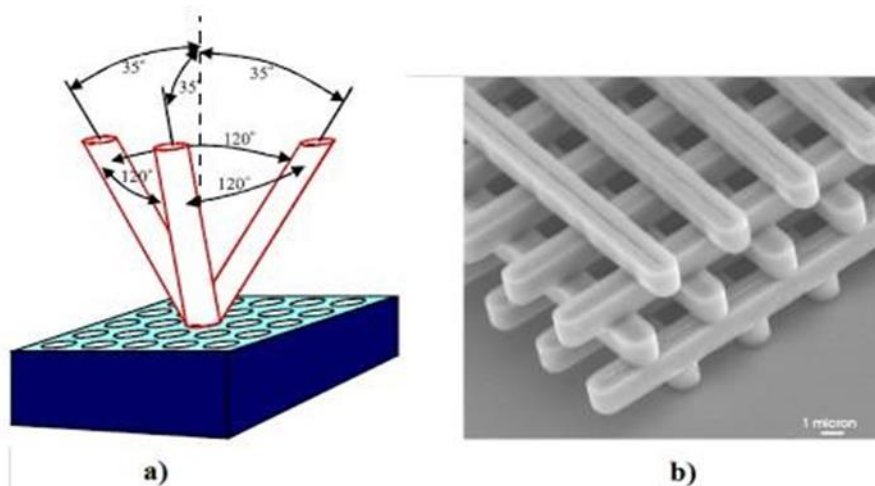
Dans les cristaux photoniques il y a déférents types, classé selon leur dimensionnalité. On le premier type, une dimension, que en trouve le miroir de Bragg, formé d'une alternance de couches de bat et haut indice, et constituant des cristaux photonique deux ou trois dimension (2D ou 3D), représente dans la (figure.1.4).



**Figure .1.4 :** cristaux photonique 1D, 2D, 3D et de matériaux de déférent diélectrique [12]

En plus il y a troisième type des cristaux photonique, tridimensionnel permettent d'obtenir une bande interdite omnidirectionnel, le premier cristal fabriqué en 1991 par « yblonovitch » appelé « yablonovite » en perçant mécaniquement des trous selon des angles bien choisis dans un bloc de plexiglas, comme le diamant qui en trouve de structure a cubique à face centre.

Les deux structures « yablonovitch » et « tas de bois » (figure 1.5), ce sont des exemples de ce type de cristaux photoniques



« yablonovite » « structure « tas de bois »

**Figure 1.5** :- Deux exemples célèbres de cristaux photoniques tridimensionnels. a) Schéma de la Yablonovite, structure 3D pour les micro-ondes fabriquée en 1993 par E. Yablonovitch [14]

### 1.2.2 : Propagation des ondes élastiques acoustiques dans les milieux périodique

Les milieux périodique apparaissent dans un grand nombre d'application dans matériaux composites ou à fibres en mécaniques et les cristaux photoniques en micro-et nanotechnologies. Ces milieux périodiques présents des propriétés. Par exemple, en optique, dans les cristaux photonique qui sont appelé également des matériaux à bandes interdites de photons. Ces milieux peuvent ainsi être utilisés par exemple dans la réalisation de filtre d'antennes. On s'intéresse dans ce cours aux phénomènes de propagations d'onde dans les milieux périodique.

La propagation dans les milieux périodiquement structure, très miroitaient artificiel, en optique c'est cristal photonique, qu'en acoustique cristaux phononique [15]

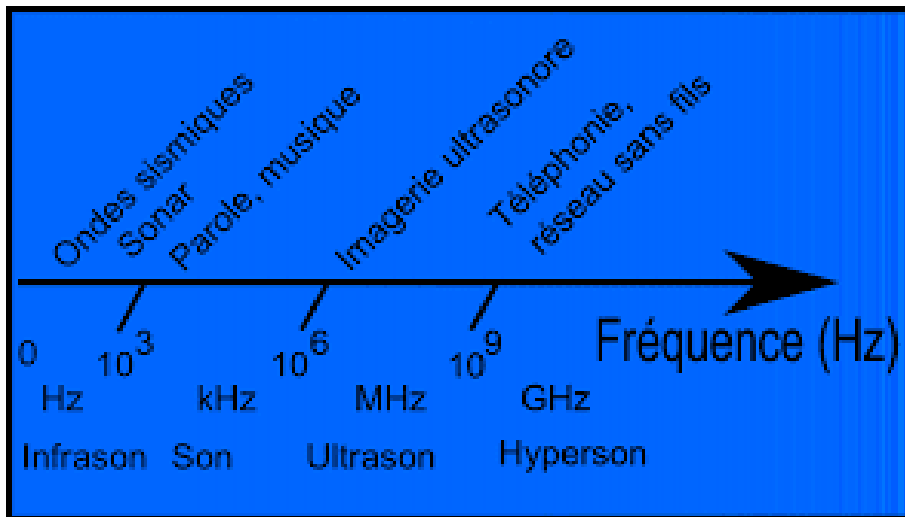
Les ondes acoustiques et élastiques font partie de notre expérience quotidienne et de notre environnement immédiat. Une onde élastique ou acoustique est une perturbation d'un milieu matériel qui se propage dans le temps et l'espace. Il existe plusieurs classifications des ondes selon le milieu matériel (gaz, liquide, ou solide) dans lequel elles se propagent et selon les caractéristiques de la propagation. On peut également les diviser dans des groupes différents en fonction de leur domaine de fréquence (figure 1.7) les champs de blé sous le vent ou les ondulations de la surface de l'eau qui suivent l'impact se d'un caillou sont des manifestations de cette classe de phénomènes. Les ondes sonores se propagent dans l'atmosphère, par leur entremise la parole humaine. Toutes l'onde acoustique sont composées de vibration progressives des atomes composant le milieu de propagation, les onde acoustique, qui se propagent dans les milieux fluides ou solides, sont utilisées dans des domaines aussi variés que l'imagerie échographique du corps humain.

En plus, dans notre moyen de communication, nos Téléphones portables et nos télévisions comportent des filtres électroniques exploitant des ondes acoustiques à haute fréquence dans des cristaux synthétique exotique tantalite de lithium. Dans le cas d'une onde élastique, et par exemple dans un solide les atomes sont contraints de rester en moyenne autour de leur position d'équilibre, et l'onde se propage en mettant en mouvement une succession de plans cristallins.

Plusieurs paramètres caractérisent la propagation d'une onde élastique : en particulier, la fréquence  $f$  de l'onde et sa longueur d'onde  $\lambda$  liée suivent relation suivante :

$$\lambda = c/s \quad (1.a)$$

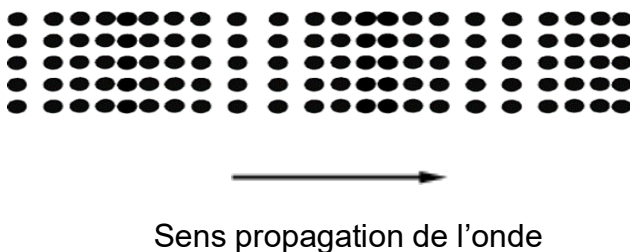
Les vitesses en jeu sont de l'ordre de quelques milliers de mètres par seconde en général dans les milieux solides. [16]



**Figure 1.6** : son (dans l'air), onde acoustique (dans les liquides), onde élastique (dans les solides) font partie d'une seule et même famille d'onde couvrant un large spectre de fréquences et d'application [17]

### A) ONDES LONGITUDINALES

Lorsque le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation, c'est-à-dire par polarisation du cône vers le vecteur ondulatoire, on dit que les ondes élastiques et acoustiques sont longitudinales, aussi appelées ondes de compression (figure 1.7). Le passage d'une onde longitudinale modifie la distance entre les plans parallèles, ce qui entraîne un changement du volume occupé par un nombre donné de particules. Les ondes longitudinales se propagent habituellement dans les solides, les liquides et les gaz. Cependant, en raison des fréquences extrêmement élevées utilisées dans le contrôle non destructif, l'atténuation de ces ondes dans les gaz est extrêmement élevée. Ainsi, les ondes longitudinales ne peuvent se déplacer que dans les solides et les liquides [18]

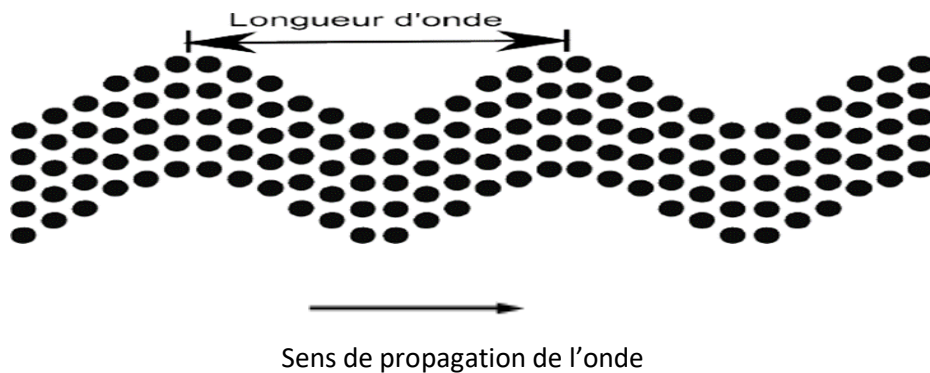


**Figure. 1.7** : Représentation Schématique d'un solide traversé par une onde longitudinale [18]

## B) ONDES TRANSVERSALES

Ondes transversales élastiques et acoustiques, également appelées ondes de cisaillement. Ces ondes sont constituées de déplacements perpendiculaires à la direction de propagation. En conséquence, le glissement des plans parallèles ne provoque aucun changement de volume car les distances entre les plans sont préservées. Si ces vibrations se produisent dans toutes les directions contenues dans ce

plan indéfiniment, on dit que l'onde transversale est polarisée. En d'autres termes, ils ont polarisation perpendiculaire au vecteur d'onde, ou les particules oscillent à travers et à partir de la droite de leur position initiale. Les ondes transversales ne peuvent se propager que dans les solides ou les liquides visqueux. La figure (1.8) représente un solide traversant une onde transversale [18]



**Figure 1.8 :** Représentation schématique d'une onde transverse

## C) ONDES DE SURFACE

Les ondes acoustiques ou élastiques de surface se trouvent à la limite plate d'un médium. Comme l'amplitude de ce type d'onde diminue de façon exponentielle avec la profondeur, elle n'affecte le substrat que sur une épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde.

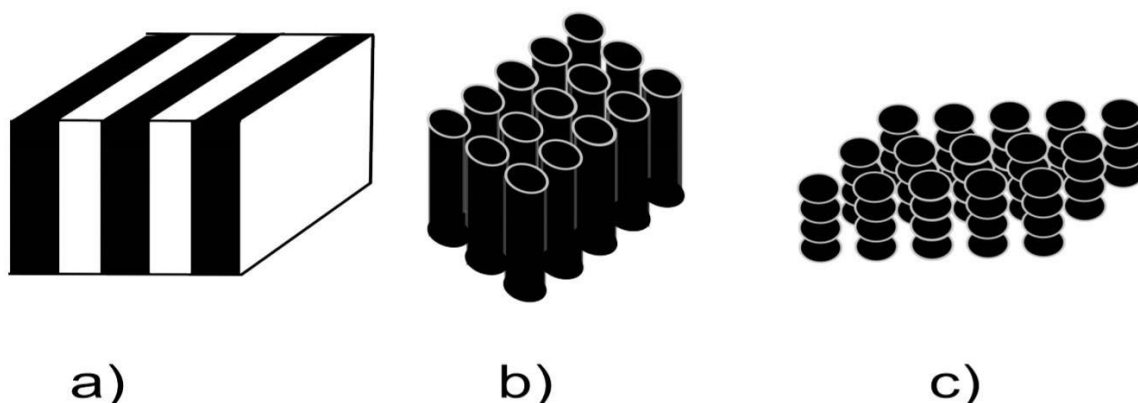
Les ondes de surface n'affectent que les particules à proximité de la surface de séparation d'un matériau avec de l'air ou d'autres milieux. Les ondes de surface se propagent généralement sur une épaisseur correspondant à une longueur d'onde. Les ondes acoustiques de surface se propagent toujours plus lentement que les ondes volumiques dans un environnement donné. C'est parce que les particules sur la surface libre ne subissent des forces de cohésion élastiques que d'un côté, alors

que les ondes volumiques affectent les particules qui sont entourées de tous les côtés du milieu. Ces ondes de surface sont extrêmement complexes et les vibrations des particules peuvent varier considérablement. [19]

### 1.2.3 : Définition d'un cristal phononique

Les cristaux phononiques sont des structures uni-, deux- et trois-dimensionnelles artificielles composées d'au moins deux matériaux ayant des propriétés élastiques différentes. (Figure 1.9) Ces structures peuvent être vues comme l'équivalent pour l'onde élastique des cristaux photoniques qui, eux, permettent d'interdire et de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques [19]. L'arrangement périodique peut se faire suivant une, deux ou trois dimensions de l'espace, la propriété la plus importante de ces cristaux est leur capacité à présenter des bandes interdites, c'est-à-dire des gammes de fréquences pour lesquelles l'onde ne peut se propager dans la structure. Il s'agit de bandes de fréquences pour lesquelles la pénétration des ondes dans le cristal est interdite. L'apparition de bandes interdites n'est possible sous des conditions spécifiques dépendant du choix des matériaux et des paramètres géométriques des structures. Deux phénomènes distincts sont liés à l'origine de l'ouverture de bandes interdites et l'on distingue alors deux types de bandes interdites : les bandes de Bragg et les bandes interdites liées à des résonances locales [20].

L'onde se propageant à une fréquence appartenant à une bande, on a deux probabilités, soit elle est réfléchi par la structure, ou confinée à l'intérieur d'un défaut ponctuel introduit par la soustraction d'un résonateur. [21].



**Figure 1.9** : cristaux phononiques (a) unidimensionnels (1D), (b) bidimensionnels (2D) et (c) tridimensionnels (3D) [16]

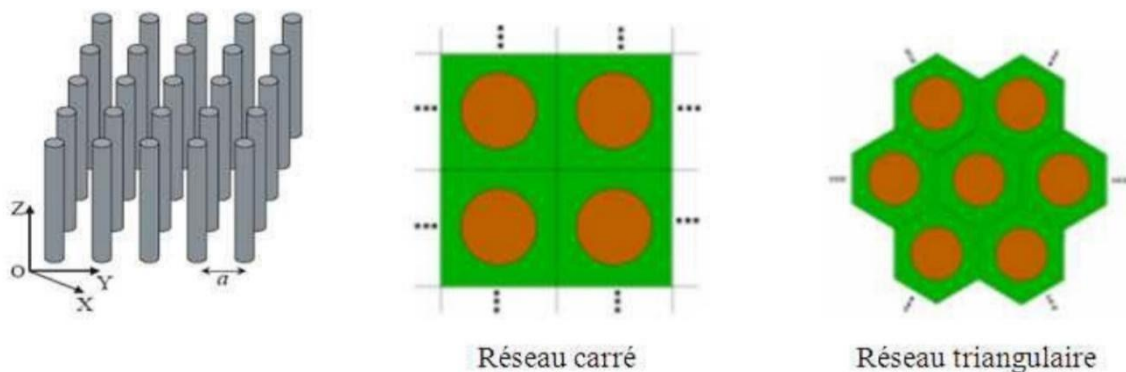


Dans les cristaux phononiques il y a : cristal unidimensionnel est plus ancien, composite et utilisée comme miroir de filtre acoustique. D'un point de vue, les structures à une dimension (1D) sont constituées de couches élastiques, et un composite stratifié obtenu en empilant en alternance des couches de matériaux de caractéristiques physiques différentes, dans ces structures l'ensemble de diffuseurs est réparti de façon périodique, d'un obstacle à l'autre les ondes sont très fortement diffusées, et suivant la fréquence de l'onde incidente elle interfère de façon constructive ou destructive, un cristal unidimensionnel les propriétés élastiques sont périodiques dans une direction, pour ça n'a pas de bande interdite complétée.

Le vecteur d'onde se forme perpendiculaire à la direction de propagation, il ne sera pas traduit, alors il n'y aura pas de bandes interdites dans cette direction.

Facilites d'obtenir de grandes bandes interdites, c'est le raison plus important de cette structure (cristal phononique unidimensionnel)

Un cristal bidimensionnel (2D), est une structure dont propriété élastique varie périodiquement suivant deux dimensions de l'espace est dont reste variable dans la troisième dimension, constituant l'inclusion qui sont des cylindres à section quelconque, qui peut

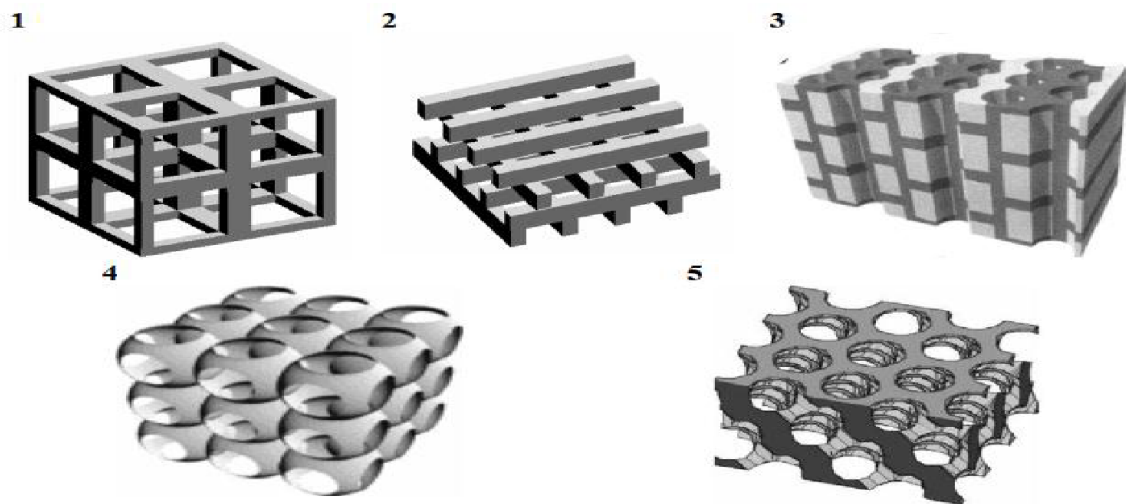


**Figure .1.10:** schéma d'un cristal phononique bidimensionnel pour deux réseaux (carré triangulaire) [22]

Les cristaux phononiques tridimensionnels sont des structures généralement artificielles périodiques suivant les trois directions de l'espace, Ils décrivent comment les forces de radiation acoustiques peuvent guider l'assemblage de particules colloïdales qui servent alors d'éléments microscopiques composant des métamatériaux acoustiques ou des cristaux phononiques. Ils démontrent diverses



structures colloïdales de symétrie orthorhombique assemblées à l'aide d'ondes de pression stationnaires dont la fréquence est de l'ordre du mégahertz (MHz). Ces structures permettent un ajustement rapide des propriétés acoustiques et constituent une nouvelle plateforme pour les applications des métamatériaux dynamiques (Figure 1.11).



**Figure 1.11** : Différentes structures 3D : structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite[22]

### 1.2.3.1 : Comparaison avec d'autres structures cristallines

Nous avons mentionné en introduction que les cristaux phononiques ont beaucoup en commun avec les cristaux photoniques, il y a de fortes analogies entre la propagation des électrons dans les cristaux ordinaires et les ondes électromagnétiques et élastiques dans ces cristaux. Bien que la structure de bandes phononiques d'un cristal à gap phononique est analogue à la structure de bande d'un cristal à gap photonique, celle-ci est aussi analogue à la structure de bande électronique d'un semi-conducteur. Les cristaux phononiques ont des propriétés qui concordent avec celles des cristaux photoniques, toutefois il existe une certaine nuance entre eux. Les cristaux photoniques peuvent être caractérisés par deux paramètres indépendants, à savoir le rapport de la fraction diélectrique et la fraction volumique occupée par un de ces composants ; tandis que pour les cristaux phononiques plusieurs paramètres peuvent déterminer la propagation des ondes, tels que : le rapport des vitesses transversales et longitudinales, la densité, la

fraction volumique. D'une manière générale, dans les deux cas la propagation des ondes dépend de la structure.

propriétés	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
Constantes de maille	1-5Å (microscopique)	0.1µm -1cm (mésoscopiques ou macroscopiques)	mésoscopiques ou macroscopiques
Ondes	De Broglie (électron) $\psi$	Électromagnétiques ou lumineuses (photon) E.B	Vibration ou sonores (phonon) u
Polarisation	Spin (haut et bas)	Transversale : $\nabla \cdot D = 0$ $\nabla \cdot E \neq 0$	Trans. Longit : $\nabla \cdot u \neq 0$ $\nabla \times u \neq 0$
Équation différentielle	$\left(-\frac{\hbar}{2m}\right) \nabla^2 \psi + v(r)\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$	$\nabla^2 E - \nabla(\nabla E) = \frac{\epsilon(r)}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$	$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] \right\}$ milieu isotrope
Particules libres	$W = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ (electron)	$w = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} k$ (photons)	$w = c_{t,l} k$ (phonons)
Bandes interdite	Augmente avec le potentiel dans le cristal ; pas d'état électronique possible.	Augmente avec $ \epsilon_a - \epsilon_b $ ; pas de photons, pas de lumière.	Augmente avec $ \rho_a - \rho_b $ ; pas de vibration, pas de son
Gamme spectrale	Ondes radio, micro-ondes, optiques, rayons X	Micro-ondes, optique	$w \leq qq \text{ GHz}$

**Le tableau 1.1** illustre les propriétés fondamentales régissant la propagation des ondes électroniques, les ondes électromagnétiques et les ondes élastiques dans les structures périodiques tridimensionnelles isotropes [23].

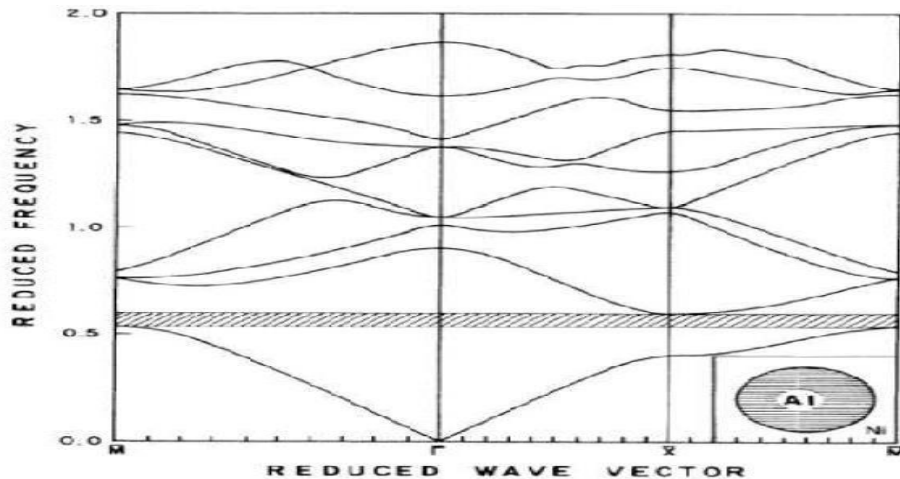
#### 1.2.4 : propriétés fondamentales des cristaux phononiques bande interdite

Les propriétés de cristaux phononiques il est plus important pour utiliser dans les études scientifiques, l'un des avantages majeure de ces structures est la possibilité de concevoir le matériau en fonction des besoins, il est ayant la possibilité de présenter des bandes interdites absolues qui elle est capable pour bloquer la propagation des ondes incidentes quel que soit leur direction.

L'objectif de l'étude qui traitent de la propagation des ondes dans un milieu quelconque, c'est cerner le comportement de celles-ci en termes de relation de dispersion qui lient entre la fréquence et le vecteur d'onde en fonction des autres paramètres liés au milieu de la propagation. Par exemple dans les milieux élastiques présente une relation linéaire simple  $\Psi(k)=v \cdot k$   $v$  représentant la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu, qui dépend directement des propriétés élastiques et de la densité de ce dernier.

La structure de cristaux phononiques, présentant une périodicité (1D à 3D) d'au moins une de ces propriétés élastiques, la périodicité dans leur structure produit des effets étonnants, les structures artificielles leur permettent d'envisager le contrôle de la propagation des ondes, l'arrangement périodique de pouvant être très spécifique d'impédance acoustique de deux matériaux différentes, produite pour la propagation d'onde dans la structure des interférences de Bragg responsable de la formation de bandes pour la propagation des ondes devient atypiques, par exemple on observe un ralentissement de vitesse d'énergie de la réflexion totale ou encore de la réfraction négative [24].

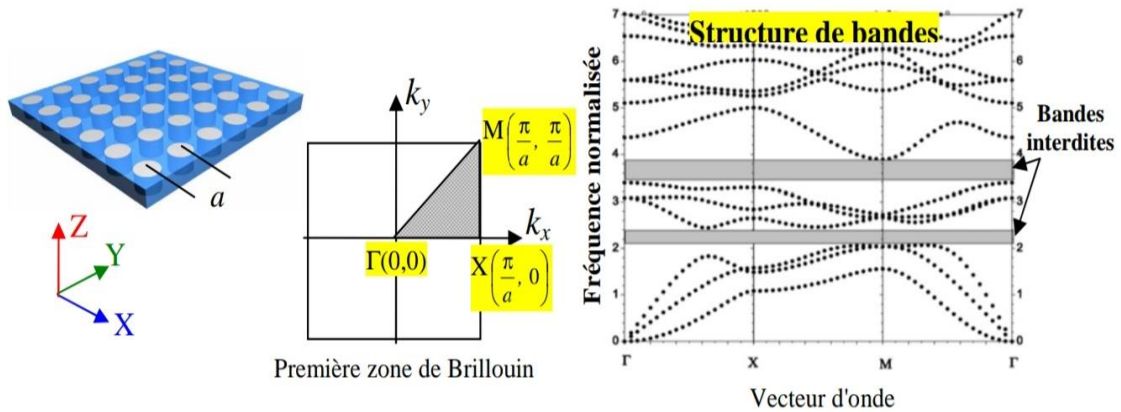
Et dans le premier article publié de Kushwaha présentant le calcul de la structure de bande d'un matériau composite périodique bidimensionnel, ce matériau constitué par un cylindre d'aluminium inséré dans une matrice de nickel (figure 1.12).



**Figure 1.12 :** schéma présente une structure de bande pour un cristal phononique (arrangement de tige d'aluminium dans matrice de nickel) [25]

Les chercheurs se sont depuis toujours intéressés à calculer les relations de dispersion, qu'ils représentent sous forme de courbes reliant fréquence ou vecteur d'onde. Afin de caractériser les comportements des ondes élastique/acoustique dans les milieux périodiques suivant différentes directions de propagation, cette forme de visualisation du comportement dispersif est appelée « structure de bande phononique ». Le théorème de Bloch précise que chaque onde solution qui se propage dans les cristaux phononiques, est le produit d'une onde plane et d'une fonction périodique.

Dans la structure le calcul de bande se limite donc à une zone réduite de l'espace des vecteurs d'onde, la cellule de périodicité appelée zone de Brillouin comme dans le cas des états d'énergie électronique dans une structure cristalline périodique d'un matériau, cette structure « structure de bande phononique » présente les différents modes de propagation possible des ondes élastique qui diffusent dans le cristal phononique figure 1.13.



**Figure 1.13 :** schéma présente d'un exemple de calcul de bande de la première zone de Brillouin pour un cristal phononique [26]

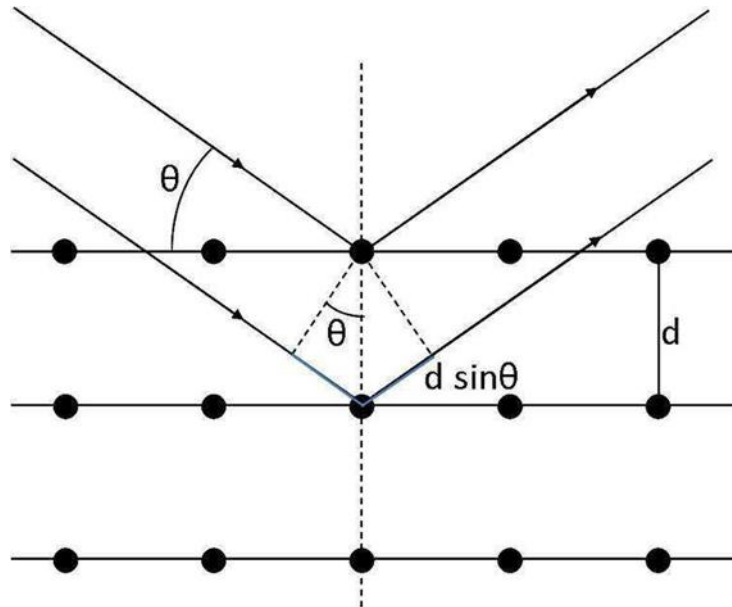
### 1.2.4.1 Cristaux phononique a bonde interdites de Bragg

L'apparition des bondes interdites de Bragg s'explique en partie par un accumulation d'interférence destructives liées à la réflexion de l'onde sur les diffuseurs [27] cette bande de fréquence dépend de la loi de Bragg définissant les fréquence

l'observation de la diffraction de rayon X sur un cristal, génialement en pout appliqué a la diffraction d'un onde plane dans un milieu périodique dans le cas d'un cristal phononique a l'arrangement périodique d'atomes des rayon X, chaque atome frappe avec un chemin optique différent subissent un diffusion de Rayleigh. il y a réémission d'ondes de même fréquence. Si la distance entre les atomes respecte la loi de Bragg avec la forme suivent :

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad \dots\dots (1)$$

Où  $n$  est un entier naturel,  $\lambda$  la longueur d'onde,  $d$  la distance entre deux plans cristallins et  $\theta$  l'angle entre le faisceau incident et la surface du cristal, il y a interférence constructive. Ce phénomène est expliqué en se limitant à une dimension (correspondant à la distance entre plans cristallins) dans la Figure 1.14.

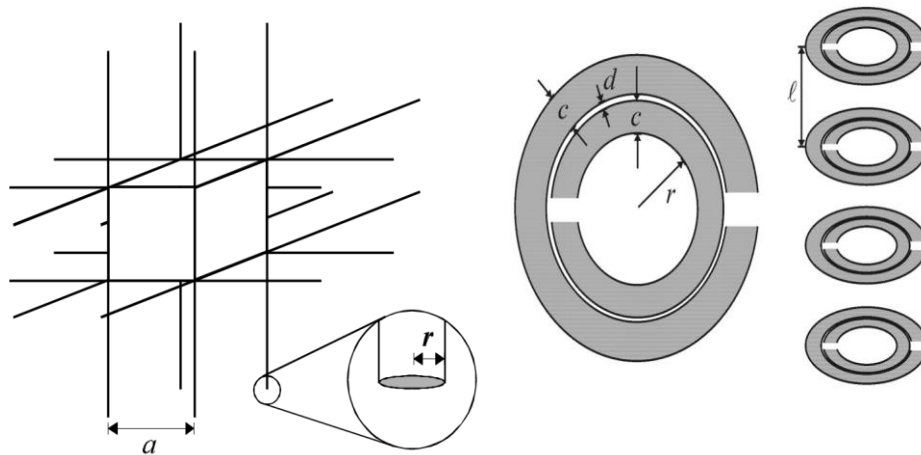


**Figure 1.14** : schéma expliquant la loi de Bragg [28]

De cette figure on déduit géométriquement la loi de Bragg en considérant la différence de chemin optique entre les deux rayons incidents. Lorsque cette différence est égale à un nombre entier de la longueur d'onde incidente, alors les rayons peuvent se combiner pour donner une interférence constructive, ce qui conduit à l'équation (1-b).

#### 1.2.4.2 : Cristaux phononiques à résonances locales—Méta matériaux

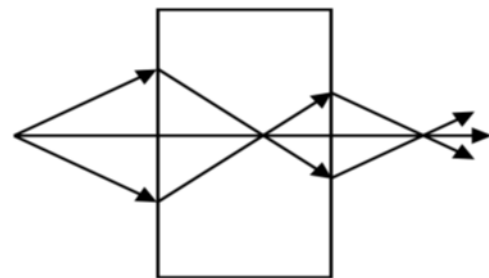
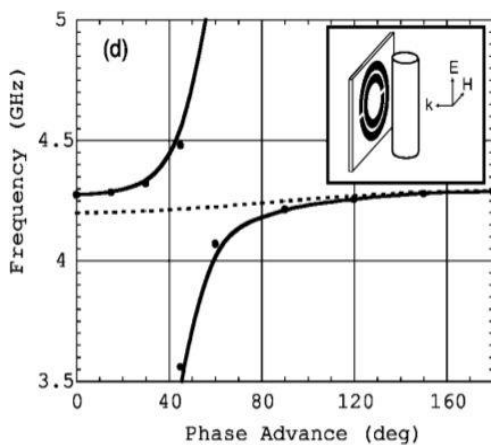
Dans le domaine de la micro-onde  $\approx 10\text{GHz}$ , et dans un premier article [29] montra que l'association de fins conducteurs (fils d'aluminium) dans une structure de type « cage à poule », ces fils est que leur diamètre est bien plus petit que la longueur d'onde. Dans un second article [30] une cellule en forme d'anneau, appelée « split ring résonateur (SRR) », plus petit que la longueur d'onde, est fabriquée afin d'obtenir une perméabilité effective  $\mu_r$  négative.



(a) Cellule « fil » avec  $\epsilon_r < 0$  (b) Cellule SRR avec  $\mu_r < 0$

**Figure 1.15** : schéma présenté cellules élémentaires électromagnétique permettant d'affecter : (a) le champ électrique (b) le champ magnétique [31]

Les deux cellules élémentaires en associant et produit 'méta-cellule' il contrôle complètement dans la fabrication, alors possible l'obtention d'un matériau possédant pour l'onde électromagnétique une permittivité et une perméabilité toutes deux négatives dans le domaine des micro-ondes. En 2000 réaliser de ce travail expérimentale par l'équipe du professeur Davide Smith [31]. Le premier méta matériau à résonances locales électromagnétique d'indice négatif  $n_{\text{eff}} = -3$  était né



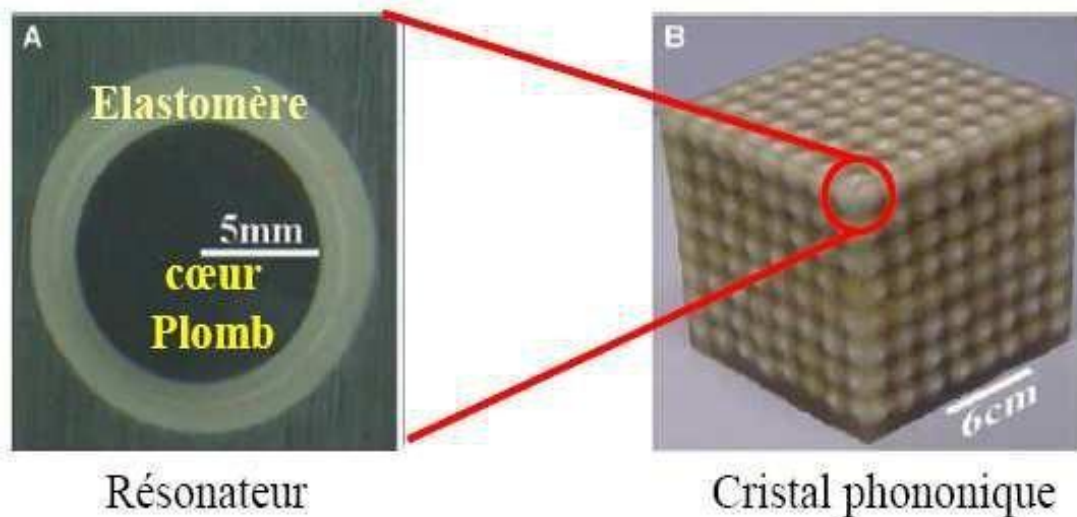
(a) Métacellule composée d'un fil et d'un SRR -D. Smith [33] (b)

Propagation des rayons dans une lentille

**Figure : 1.16 :** schéma présente méta cellule et exemple d'application : la super-lentille.[32]

En même année, et grâce aux travaux de V. Vasselage, J. Pendra démontra qu'un tel matériau permettrait la production d'une super-lentille plate exempte d'aberration [33]

Ping sheng et son équipe de l'université de Hong Kong. Dans domaine des ondes élastiques ont présenté un matériau formé de billes de plomb enrobées d'un polymère présentant des propriétés effectives pour la propagation des ondes mécaniques. Ce composite posséd toutes les les caractéristiques d'un matériau ayant dans dans certaines bandes de fréquence une compressibilité négative.



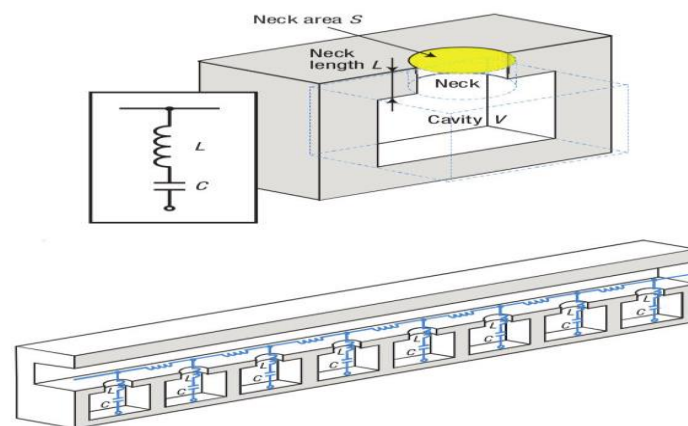
Cellule résonante acoustique et cristal phononique. Cette réalisation expérimentale correspondu premier cristal phononique à résonance locale.

**Fuguer 1.17 :** principaux résultats de l'article fondateur de Ping sheng et al .concernant le milieu périodique à résonance locale [35]

De la continuité des travaux sur les méta-matériaux formés par l'association de cellules solide fluide Y. Wu et son équipe d l'université de Hong Kong ont proposé 2011 un matériau possédant une densité et un module de cisaillement simultanément négatif dans un bande de fréquence prouvent être accordée en fonction des paramètres du motif et de l'arrangement de l'hétéro structure [36]. Le



matériau est une mousse formée de billes de caoutchouc remplies d'eau autre exemple de ces travaux, en 2011 avec la cellule élémentaire de X.N. Liu et de son équipe [37] la structure formée de masses et de ressorts autorise des résonances transverses et de rotation permettant l'obtention d'une masse effective négative et une compressibilité effective négative dans un domaine de fréquence autour de 15 KHz. En même modèle, un autre type de résonateur mécanique fut proposé. Il s'agit des résonateurs de Helmholtz [38] une structure type fut proposée par N.Fang cavités son équipe [39] ils 'agit d'un guide d'onde linéaire contenant de l'eau sur lequel des cavités (remplie d'eau) sont connectées. Les cavités sont des résonateurs mécaniques plus petits que la longueur d'onde de l'onde se propageant dans le guide. Ces particules de fluide peuvent être considérées comme des masselottes connectées à des ressorts eux mêmes attachés à une chaîne linéaire de ressorts, ou encore du point de vue électrique, comme l'illustre la figure 1.18 équivalent à un circuit.



**Figure 1.18**– Illustration d'un résonateur de Helmholtz et d'une disposition permettant d'obtenir une compressibilité effective négative (N.Fang et al [39]).

## 1.2.5 : étude expérimental et application

### 1.2.5.1 : guidage dans les structures phononique

Le développement d'études et les recherche dans les cristaux phononique, notamment les ondes guidés la propagation des ondes il est a des propriétés qui liées aux conditions aux limites et aux interfaces entre le milieu de propagation de l'onde et les milieux environnants, c'est milieu est supporter ce types d'onde à cause de son de dimensions finies. Il est plusieurs de ce type suivantes configuration des frontières des milieux de propagation, on l'onde de surface, dans ce cas la surface

de milieu est libre, ont regroupées suivant plusieurs catégories dépendant notamment de l'épaisseur du solide (cristaux phononique), ces ondes de surface indique, un champ d'action réduit par rapport au volume du solide dans lequel elles sont générées.

En 2006 c'est la première observation d'une bande interdite complétée pour des ondes de surface se propageant sur substrat de niobate de lithium réalisé par Benchabane et al [40].

La réflexion des ondes liée au mécanisme de bande interdite de Bragg dans un cristal phononique.

### 1.2.5.2 : autres application des cristaux phononique

Ilya beaucoup des exemples pour l'application des cristaux phononique dans défèrent

Domaine comme exemple les poutres phononique dans qui réalise dans les structure phononique bidimensionnel, et considérée comme des systèmes alliant propagation d'ondes élastiques, et résonateurs MELS/NEMS, été faites à partir de structures découpées dans des plaques agrémentées de piliers[41] .c'est poutre elles composer des résonateurs sur les modes excités en particulier. En plus utilisées pour améliorer le facteur de qualité d'une résonateur [42] l'idée de ce travail c'est remplacé les ancrages d'un résonateur mécanique par des poutres phononique dont la bande interdite couvre la fréquence de résonance.et al, améliorent le facteur de qualité d'un résonateur résonant autour de 213 il passe de 1400 sans poutre phononique à 2550 avec poutre [43]

## 1.2.6 Formel théorique

### 1.2.6.1 résout respect

Réseau réciproque et réseau direct se sont des constitué de toute les structure cristallin, la diffraction dans cristal est une propriété spécifique du réseau réciproque du cristal. Quand nous faisons subir une rotation, nous faisons subir la même au les deux réseaux, nœud deux réseau est repéré par un vecteur  $\vec{r}$ , et  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  et  $\vec{c}$  sont des vecteur primitifs

$$\vec{r} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c} \dots\dots\dots(1)$$

Un nœud de ce réseau réciproque Repéré par un vecteur  $\vec{G}$  , et  $\vec{A}$  ,  $\vec{B}$  et  $\vec{C}$  sont des vecteurs primitifs

$$\vec{G} \equiv h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C} \dots\dots\dots(2)$$

U, v, w sont les coordonnées d'un nœud du réseau direct et h, k, l les indices de Miller définissant un nœud du réseau réciproque. Les deux réseaux sont reliés par les définitions suivantes :

$$\vec{a} \cdot \vec{A} = 2\pi, \vec{b} \cdot \vec{B} = 2\pi \text{ et } \vec{c} \cdot \vec{C} = 2\pi \text{ avec } \dots\dots\dots(3)$$

$$\vec{A} = \frac{2\pi}{V} (\vec{b} \times \vec{c}), \vec{B} = \frac{2\pi}{V} (\vec{c} \times \vec{a}), \vec{C} = \frac{2\pi}{V} (\vec{a} \times \vec{b}) \text{ Avec } V = (\vec{a} \cdot \vec{b}) \times \vec{c} \dots\dots\dots(4)$$

Se réseaux c'est composent d'un cristal, le cristal est un arrangement périodique qui définit comme suivent :

Structure cristalline = réseau + base

$$\vec{r}' = \vec{r} + u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$$

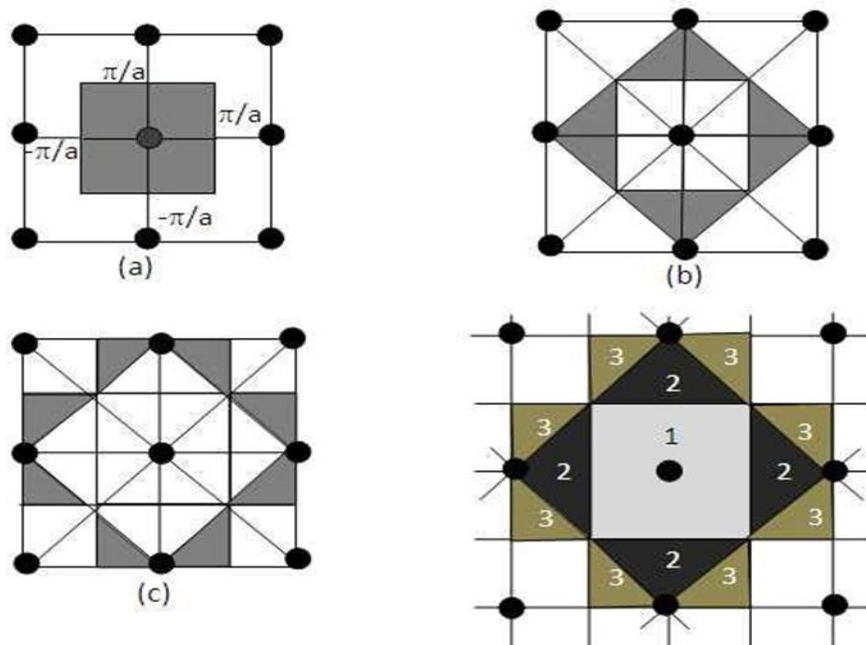
$(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  vecteurs de base pour les trois vecteur translation fondamental u , v , w sont des valeur entier dessiné un réseau, et l'ensemble des points  $\vec{R}$  [44]

### 1.2.6.2 : zone de Brillouin

L'énoncé le plus important de la condition de diffraction pour la physique de l'état solide fut donné par Brillouin. C'est la seule construction utilisée dans la théorie des bandes d'énergie pour les électrons d'un Cristal et dans expression des excitations élémentaires des cristaux. Par raison de symétrie, la zone de Brillouin est par définition la maille de Wigner Seitz du réseau réciproque ; nous représentons les vecteurs joigne antenniste du réseau réciproque à tous les sites voisins, puis onde seine les plans bissecteurs perpendiculaires ace Vecteurs.

Le volume le plus petit autour du site choisi limité par ces plans est appelé lapinière zone de Brillouin. Nous pouvons construire les zones supérieures de Brillouin de la même manière, la IIème zone de

Brillouin est l'espace limité d'une part par les plans bissecteurs perpendiculaires aux vecteurs joignant le site à l'origine au 1<sup>er</sup> site voisins et d'autre part les plans bissecteurs des zones de Brillouin inférieures.



**La figure 1.19** : montre les premières zones de Brillouin du réseau réciproque dans le cas d'une structure carré

### 1.3. Conclusion :

Une nouvelle structure phononique aux propriétés dispersive qui sortent de l'ordinaire, para pour aux autres cristaux phononiques classiques qui basés sur le mécanisme de Bragg. Ils apparée 2000, IL a montré qu'une bande interdite peu t'exister pour des ondes aye une longueur d'onde largement supérieur à la périodicité de la structure périodique. C'est la première fois de création nouvelle class de matériaux acoustique, appelés méta-matériaux acoustique.

Les cristaux phononique ce sont des structure périodiques et compose de deux au plus des matériaux, et a des propriétés spécifiques, les propriétés qui lie les cristaux phononique et photonique c'est l'équivalent de cristaux phononique pour les ondes électromagnétique des cristaux phononique pour les ondes élastique, et les semi-conducteurs sont l'origine de compréhension des phénomènes. Eton plus la possibilité d'obtenir des fibres optiques de très haute

qualité, avec ou sans dispersion, d'augmenter les phénomènes non-linéaires, de fabriquer des dispositifs optoélectroniques.

## **Chapitre 2 : MODELISATION ET METHODE DE SIMULATIONS D'UNE STRUCTURE PHONONIQUE A BASE DE BETON :**

### **2.1- Introduction :**

De nombreux travaux ont fait l'objet d'études de propagation des ondes par simulation numérique afin de proposer des fondations périodiques capables d'empêcher la propagation des ondes sismiques dans les superstructures, et ces études remontent à près de dix ans maintenant, ainsi que l'utilisation de la théorie de l'élasticité la dynamique et la théorie de Bloch-Floquet, révélatrices. Ces structures expriment le phénomène d'abscission[46].

Les structures périodiques sont amenées à fonctionner à basses fréquences afin d'isoler une structure soumise à des vibrations d'équipements industriels ou de séismes, et d'obtenir des bandes interdites par les réflexions de Bragg. De ce fait, la présence de résonateurs est nécessaire pour attirer les bandes interdites vers les basses fréquences. La structure des courbes de diffusion peut être modifiée selon la taille ou la nature des matériaux utilisés dans ce milieu périodique. Nous décrivons également les étapes de modélisation par Comsol Multiphysics, ce qui nous a permis d'atteindre les résultats finaux [47].

### **2.2 - Définition et choix des modèles étudiés :**

L'étude de l'architecture en architecture se fait avec des fondations en béton contenant des inclusions enrobées d'une couche de caoutchouc, et l'architecture peut être représentée sous la forme d'un bloc de béton de faible épaisseur, comme le montre la figure 2.1 [48].

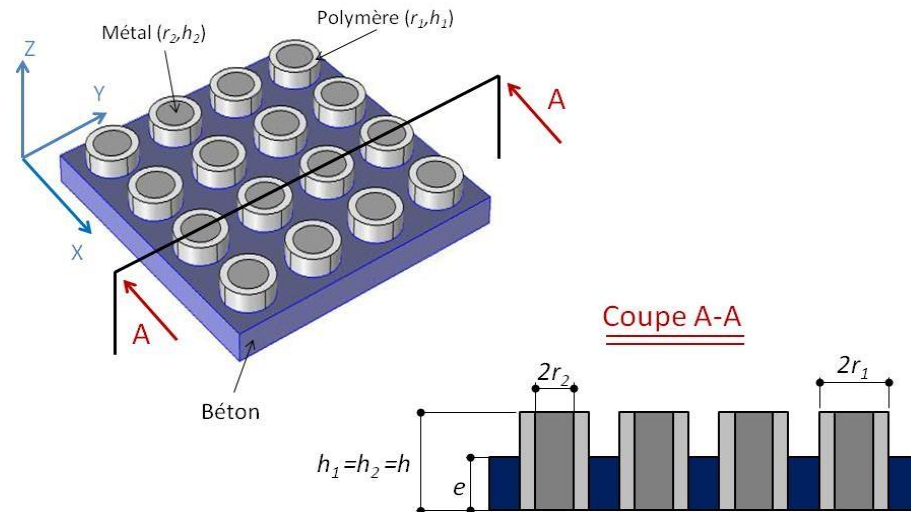
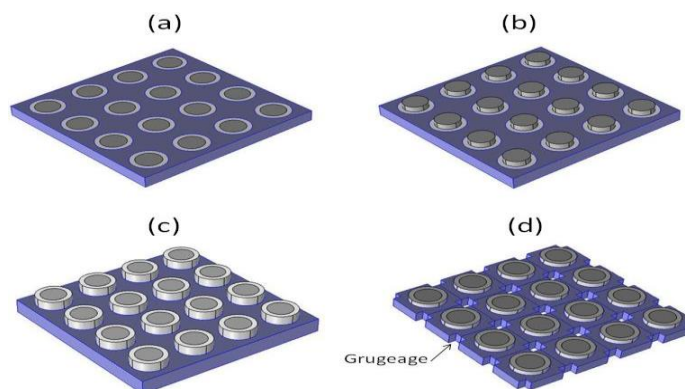


Fig. 2.1 Structure périodique composée d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindres métalliques enrobés d'une couche de polymère [48]

L'archétype a été étudié dans diverses configurations (voir Fig. 2.2). Initialement, les cylindres ont la même hauteur que le bloc de béton (cylindres non émergents) ; dans la deuxième étape, seule l'âme métallique sort du bloc de béton. Dans la troisième étape, des cylindres métal-polymère apparaissent à la même hauteur que le bloc de béton. Enfin, comme le montre la figure 2.2 [49], des fentes ont été pratiquées aux quatre coins de la cellule primaire.

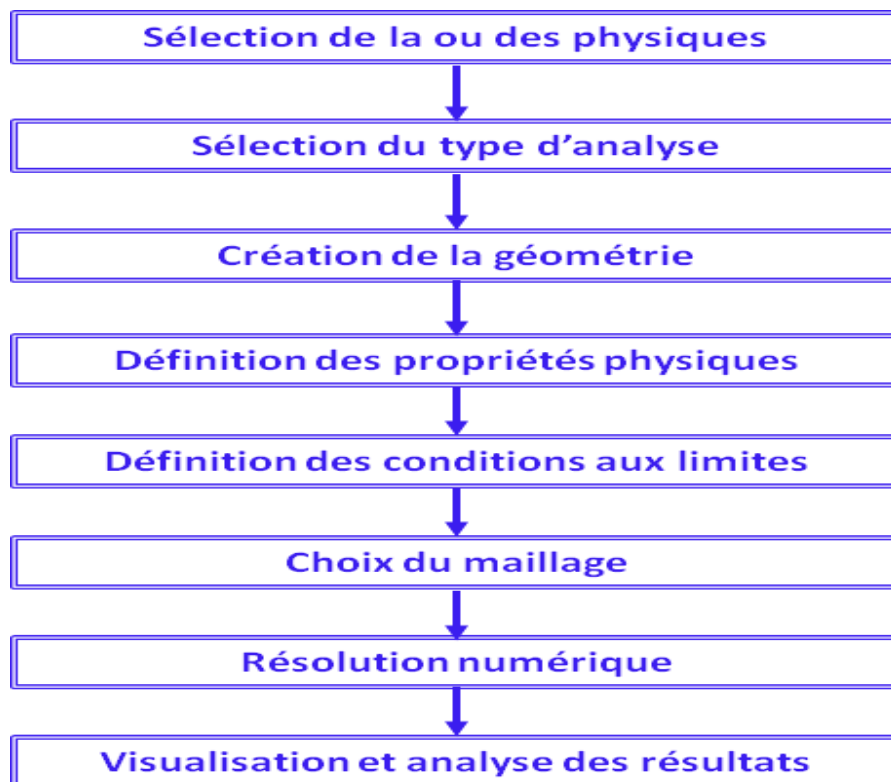


**Fig.2.2** Structures périodiques composées d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindres métalliques enrobés d'une couche de polymère, (a) cylindres non émergents, (b) seul le cylindre de métal émerge du substrat de béton, (c) les deux cylindres (métal-polymère) émergent du substrat, (d) un grugeage effectué aux quatre coins de la cellule de base [49]

Les matériaux utilisés pour réaliser les cylindres sont choisis de manière à ce que leurs propriétés élastiques leur confèrent un caractère vibratoire, permettant un couplage entre les modes de résonance locaux des cylindres, qui se produisent à de très basses fréquences, et les ondes de surface à établir. Le bloc de béton C'est précisément l'objectif du métier de génie civil [50].

### **3-Modélisation par éléments finis sous Comsol Multiphysics :**

Le logiciel COMSOL Multiphysics est utilisé pour concevoir et résoudre les modèles étudiés dans le cadre de cette thèse. La méthode des éléments finis est utilisée dans ce logiciel (FEM). Les problèmes sont résolus avec des équations aux fréquences propres et PDE (Partial Differential Equations) [51], et les structures de bandes sont calculées avec l'analyse des fréquences propres (Eigen Fréquence analysais) proposée dans le modèle utilisé.



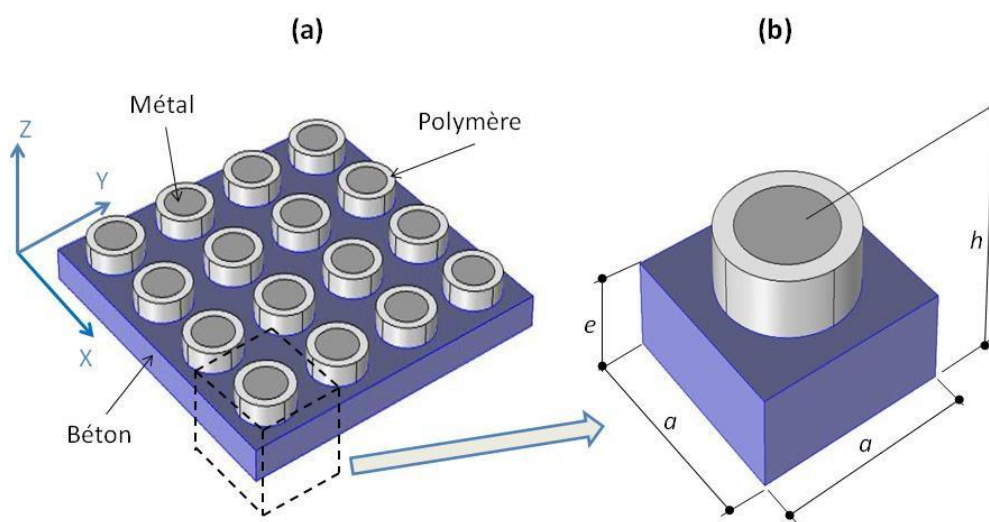
**Fig.2.3** L'étape suivie dans Comsol Multiphysics pour l'analyse d'un modèle [51]

La figure 3.3 décrit la séquence d'étapes distinctes requises pour la résolution et l'analyse complète d'une structure périodique à l'aide de la méthode des éléments finis dans Comsol Multiphysics [52].

#### 4- Modélisation et Simulation d'une cellule de base phononique à un résonateur pour le calcul des courbes de dispersion :

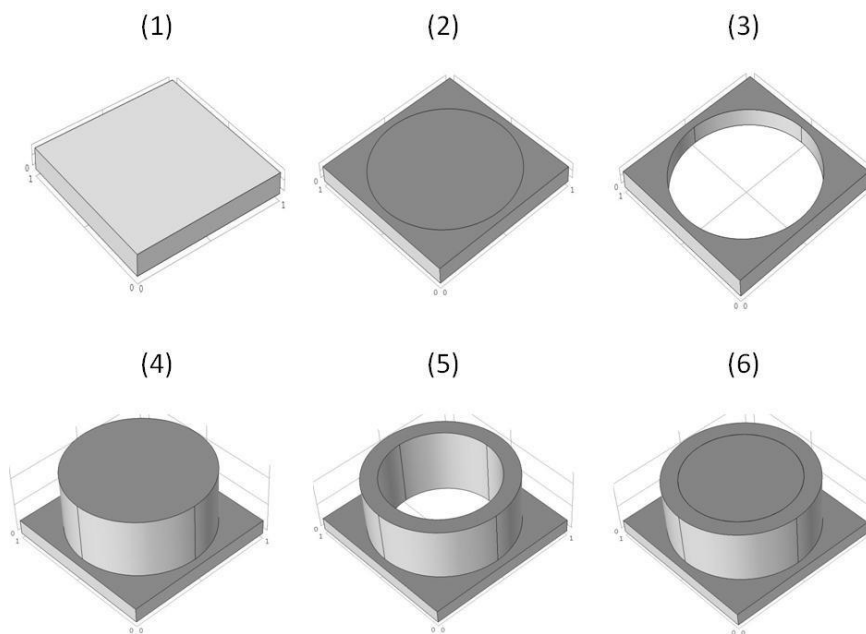
##### 4.1- Choix de la cellule de base - Modèle numérique :

En appliquant les conditions aux limites de Bloch-Floquet aux limites des cellules, les simulations se concentrent sur une seule cellule appelée cellule de base, comme le montre la figure 2.4 (b). Les dimensions de la structure sont ainsi supposées infinies dans les deux directions X et Y. Le domaine de calcul est subdivisé en fonction de la nature des matériaux qui composent le modèle [53].



**Fig.2.4**(a) Structure périodique composée d'un massif en béton Et d'un arrangement carré de cylindres métalliques enrobés d'une couche de polymère,(b) Modèle représentant une cellule de base[53]

Tout d'abord, les formes géométriques et les tailles qui composent le modèle de



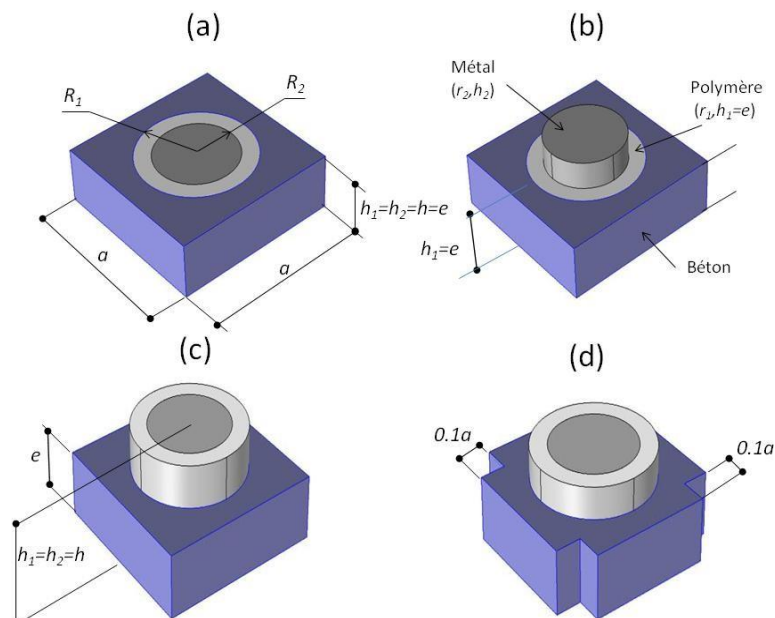


base sont définies à l'aide des étapes décrites dans la figure 2.5. Nous pouvons même entrer des géométries paramétrées pour faciliter la numérisation d'un large éventail de dimensions possibles de notre géométrie ; configuration que nous avons effectuée lors des mappages des écarts.

**Fig.2.5** Différentes étapes pour la conception géométrique d'un modèle [54]

La bibliothèque Comsol Multiphysics vous permet de choisir la nature des matériaux qui composent la structure périodique, ainsi que leurs propriétés physiques et mécaniques. Les propriétés d'homogénéité, d'isotropie, d'orthotropie et d'anisotropie peuvent être introduites et le programme est alimenté par une base de données résultante. D'autres matériaux ou propriétés peuvent être saisis manuellement en saisissant les valeurs appropriées (densité, module d'Young, coefficient de Poisson, etc.).

Les cellules élémentaires sont ainsi constituées de trois sous-domaines dans toutes les configurations (Fig. 2.6) : la masse en béton, l'âme métallique et l'élastomère [55].



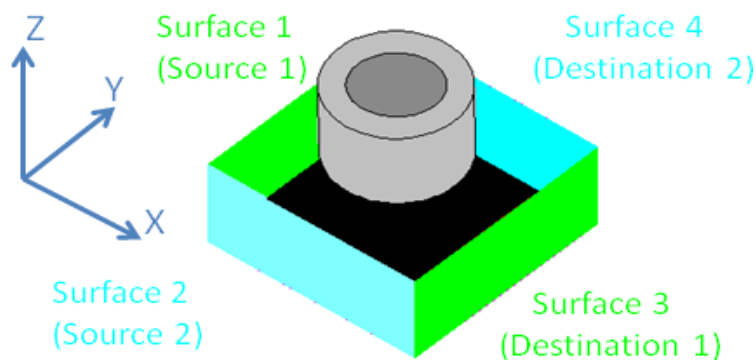
**Fig.2.6** Configuration des différents modèles de base

### 4.3-Conditions aux limites (CL) :

Après avoir défini le domaine de résolution et mis en œuvre les équations du mouvement, nous ajoutons les conditions aux limites qui nous permettent d'orienter les solutions recherchées. Les conditions de Bloch sont introduites sur les surfaces latérales du massif en béton au niveau du domaine (cellule de base), traduisant la périodicité de la structure selon les directions X et Y. Si la structure est supposée infinie dans le plan (O, X, Y), nous nous intéresserons à la propagation des ondes dans les directions X et Y. Le vecteur d'onde  $k$  ressemblera à

$$\text{ceci : } k(k_x, k_y, 0) \dots \dots \dots (2.1)$$

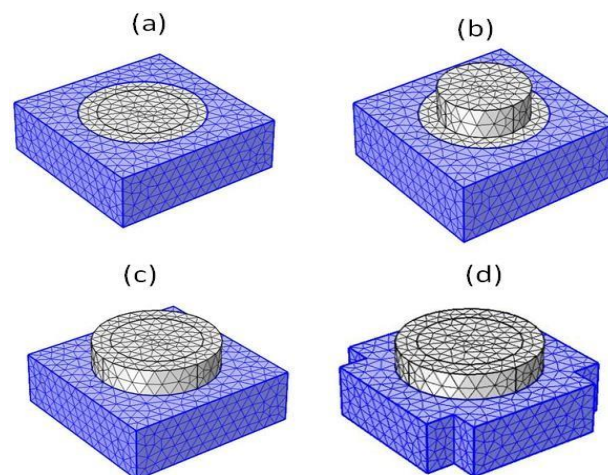
Les déplacements mécaniques peuvent ainsi être déduits pour tous les nœuds situés aux limites de la cellule à l'aide du théorème de Bloch-Floquet en [56].



**Fig.2.7** Conditions aux limites périodiques appliquées aux quatre faces latérales du massif de béton [56]

#### 4.4-Maillage et convergence :

Le maillage peut être généré automatiquement dans Comsol. En effet, Comsol propose une option « maillage contrôlé par la physique ». De manière générale, toute exploitation d'une solution numérique suppose avant tout qu'elle soit cohérente et stable. Ces deux propriétés sont conditionnées par le choix d'un maillage approprié ; ainsi, le niveau de raffinement que nous choisissons est de type « fin » que nous considérons optimal pour éviter une consommation excessive de temps et d'espace. Dans notre cas, le modèle 3D est maillé (maillage fin) en éléments solides de formes tétraédriques, ce qui semble le mieux adapté à nos structures (figure 2.6). La figure 2.8 montre un exemple du maillage que nous avons utilisé pour nos modèles [57].

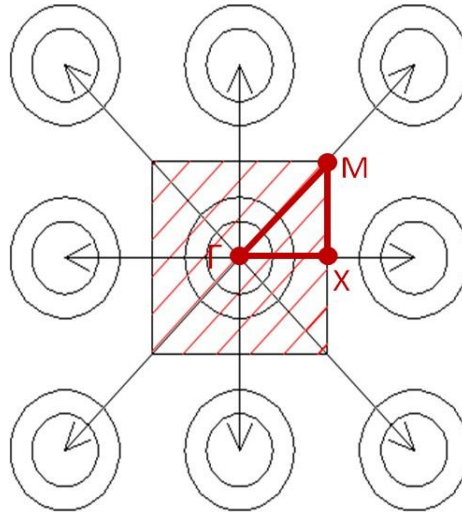


**Fig. 2.8** Maillage fin pour les différentes cellules de base (a) cylindres non émergents,(b)seule cylindre de métal émerge du substrat,(c)cylindres émergents,(d)modèle après grugeage[57]

Le maillage utilisé détermine la convergence des calculs d'éléments finis. Plus le maillage est raffiné, plus l'espace de décomposition est grand et meilleure est l'interpolation de la solution qui se rapproche de la solution souhaitée. Cependant, une optimisation du maillage est nécessaire afin de rester dans les limites de performances des machines de calcul (en temps et en espace), car un maillage « trop » raffiné nécessitera presque toujours un solveur direct plus gourmand en mémoire et en temps pour résoudre le système de équations à chaque étape du calcul.

#### 4.5-Courbes de dispersion et champs de déplacements :

Parce que notre structure est une structure périodique bidimensionnelle avec un arrangement périodique carré, nous limiterons initialement le calcul de la courbe de dispersion et des champs de déplacement à une maille unitaire appelée « modèle de base » ou « cellule de base ».



**Fig.2.9** Zones de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour un réseau carré et pour des matériaux isotropes. [57]

#### 4.6-Calcul du spectre de transmission :

Nous avons vu qu'il est possible de tracer les courbes de dispersion fréquentielle pour une onde incidente donnée pour une structure périodique bidimensionnelle supposée infinie suivant les deux directions X et Y en utilisant les conditions de Bloch-Floquet ; qu'en est-il d'une structure finie ? Il est intéressant dans ce cas de pouvoir estimer la transmission d'ondes élastiques à travers un milieu fini, donc avec un nombre de périodes limité [58].

#### **4.7- Méthode par utilisation de domaines absorbants PML (Perfectly Matched Layer) :**

Le PML est un domaine fictif créé pour le calcul numérique afin de traiter les problèmes de propagation des ondes dans des milieux infinis. Sachant que les domaines conçus en simulation numérique ne peuvent pas être infinis, l'idée est de mettre en place des conditions aux limites absorbantes aux frontières du domaine étudié.

L'idée est d'empêcher l'onde de se réverbérer à ces endroits. Les ondes traversent ainsi l'interface entre les domaines non-PML et PML et sont absorbées au niveau de ce dernier.

#### **4.8-Choix des matériaux utilisés :**

Notre recherche s'appuie sur un modèle initial qui est une structure périodique bidimensionnelle formée par une masse de béton d'épaisseur « e » relativement faible par rapport à ses dimensions en plan. Le solide est incrusté de cylindres métalliques (acier) disposés régulièrement dans les deux directions X et Y. Une couche d'élastomère est appliquée sur les cylindres en acier (pvc). Le modèle de base ou alvéole est ainsi un substrat en béton de section carrée "axa" incrusté d'une âme cylindrique en acier revêtue d'une couche de polychlorure de vinyle (pvc). D'autres combinaisons de matériaux ont été étudiées en remplaçant l'acier par du plomb et le PVC par du caoutchouc, suivi du silicone. Il est évident que le choix de l'élastomère comme matériau élastiquement très mou, par rapport aux autres matériaux constituant la structure, peut donner lieu à des modes vibratoires très confinés et conférer au résonateur un comportement de résonance bien localisé à très basses fréquences, ce qui est en ligne avec l'objectif recherché de blocage des fréquences sismiques ou des fréquences correspondant aux séismes[59].

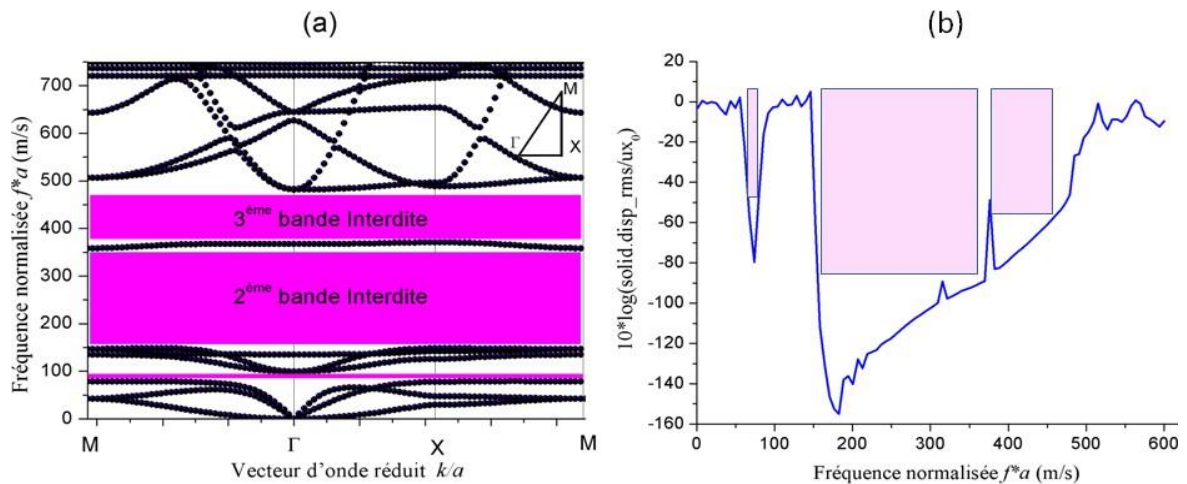
Les dimensions relatives (par rapport au substrat) des noyaux métalliques et des couches d'élastomère sont respectivement  $r_2/a$ ,  $h_2/a$  et  $r_1/a$ ,  $h_1/a$ . Tous les milieux utilisés dans notre étude sont supposés isotropes et la nature viscoélastique de l'élastomère est ignorée. Le tableau affiche les propriétés physiques de divers matériaux (densités, modules d'Young E, coefficients de Poisson  $\nu$  et constantes élastiques).

Tableau : Caractéristiques des matériaux

	Masse volumique $\rho(\text{Kg/m}^3)$	$E(\text{GPa})$	$\nu$	$C_{11}(\text{GPa})$	$C_{12}(\text{GPa})$	$C_{44}(\text{GPa})$
Béton	2400	30	0.3	40.38	17.3057	11.538
Acier	7870	209	0.3	281.35	120.578	80.385
Plomb	11350	16.7	0.44	54.12	42.5228	5.7986
Pvc	1400	0.35	0.3	0.47	0.2014	0.1346
Caoutchouc	950	0.1	0.45	0.379	0.3101	0.03448
Silicone	1300	0.000137	0.463	0.000679	0.000585	0.0000468

#### 4.9-Exemple de résultats de simulations :

La figure 2.10 représente une courbe de dispersion fréquentielle représentant la variation des fréquences normalisées en fonction du vecteur d'onde réduit dans la première zone irréductible de Brillouin, ainsi qu'une courbe de transmission pour le couple de matériaux « acier-pvc ».



**Fig. 2.10** pour le couple de matériaux "acier-pvc" (a) Courbes de dispersion des fréquences, (b) Spectre de transmission pour une structure périodique unidimensionnelle finie à 8 cellules unitaires [59]

La figure 2.10 (a) illustre la présence de trois bandes interdites situées entre 80 et 100 m/s, 150 et 350 m/s, et 370 et 480 m/s. Ces bandes interdites se retrouvent dans la courbe de transmission avec quelques écarts (zones colorées sur la figure 2.10 (b)) [60].

### **-Conclusion**

Les différents types de modèles étudiés dans cette thèse sont définis dans ce chapitre. Comsol Multiphysics décrit toutes les étapes de l'analyse par éléments finis en modélisant et en simulant une cellule de base phononique vers un résonateur. Il existe également un exemple de courbe de dispersion de fréquence selon les trois directions de la zone irréductible de Brillouin, ainsi qu'un exemple de courbe représentant le spectre de transmission de fréquence correspondant au couple de matériaux « acier-PVC ». Nous avons vu que le calcul des courbes de transmission pour une structure périodique de dimensions finies nécessite l'utilisation d'une couche absorbante parfaitement adaptée appelée couche PML (Perfectly Matched Layers), dont le rôle est de pallier certains problèmes. Par les réflexions des ondes incidentes sur les structures [61].

L'analyse des courbes de dispersion fréquentielle et de transmission révèle une adéquation entre l'existence et la position des bandes interdites dans les deux sens entre un modèle supposé infini et un modèle de dimension finie. Ceci démontre l'importance d'un tel résultat, ainsi que son application potentielle comme structure isolante contre les ondes nocives [62].

## **CHAPITRE 3 : PERFORMANCES ET OPTIMISATION D'UNE CELLULE PHONONIQUE A UN RESONATEUR LOCAL POUR L'ISOLATION DE STRUCTURES A BASE DE BETON**

### **3.1– Introduction**

Dans la plupart des cas l'intérêt d'un cristal phononique provient de sa capacité à interdire la propagation des ondes acoustiques ou élastiques. Il est donc hautement désirable de travailler avec un cristal qui présente la bande interdite la plus complète possible.

La création des défauts dans le cas des cristaux phononiques bidimensionnels s'effectue, soit par une modification locale des propriétés élastiques ou un changement de taille d'un motif du cristal (d'une inclusion), soit par le déplacement d'un de ces inclusions (défaut interstitiel), ou par l'insertion d'un diffuseur de propriétés élastiques différentes (dopant), ou encore par l'absence de l'un des motifs (défaut lacunaire). La présence d'un défaut ponctuel peut conduire à l'existence de niveaux discrets d'énergies dans une bande interdite.

Les modes introduits par le défaut sont appelés modes de défaut. C'est un mode dont la fréquence peut se situer dans la bande interdite et qui est localisé autour du site du défaut. Il est montré théoriquement que les propriétés des modes de défauts peuvent être contrôlées. Avant d'aborder les structures avec défauts, nous entamons en premier lieu l'étude des structures bidimensionnelles sans défauts. Ensuite, nous étudierons la propagation des ondes acoustiques dans les guides d'ondes à cristaux phononiques fabriqués par ces mêmes structures après création d'un défaut linéique. La connaissance approfondie dans ce type de guide est essentielle car le guide  $W$  est l'élément de base nécessaire à la réalisation de structures plus complexes.

### **3.2 Géométrie du modèle étudié et conditions de calculs**

Les dimensions de notre structure sont supposées infinies dans les deux directions  $x$  et  $y$ . Nous nous intéresserons à la simulation d'une super cellule de base en appliquant les conditions aux limites de Bloch (continue) aux frontières de la cellule. La méthode utilisée est celle des éléments finis (FEM). Qui s'adapte très bien à la résolution des équations aux dérivées partielles. La simulation a été effectuée par le logiciel Comsol Multiphysics. En faisant varier le vecteur d'onde  $k$



Dans la zone de Brillouin suivant les deux directions, la résolution du système d'équations nous permet d'obtenir les valeurs propres et les fréquences propres du modèle. Pour chaque fréquence donnée, les vecteurs propres peuvent être calculés afin de montrer la distribution et les déformations spatiales de chaque mode. Les vecteurs propres représentent les champs de déplacement modaux. On tracera ensuite les courbes de dispersions des fréquences en fonction des vecteurs d'ondes  $k$ .

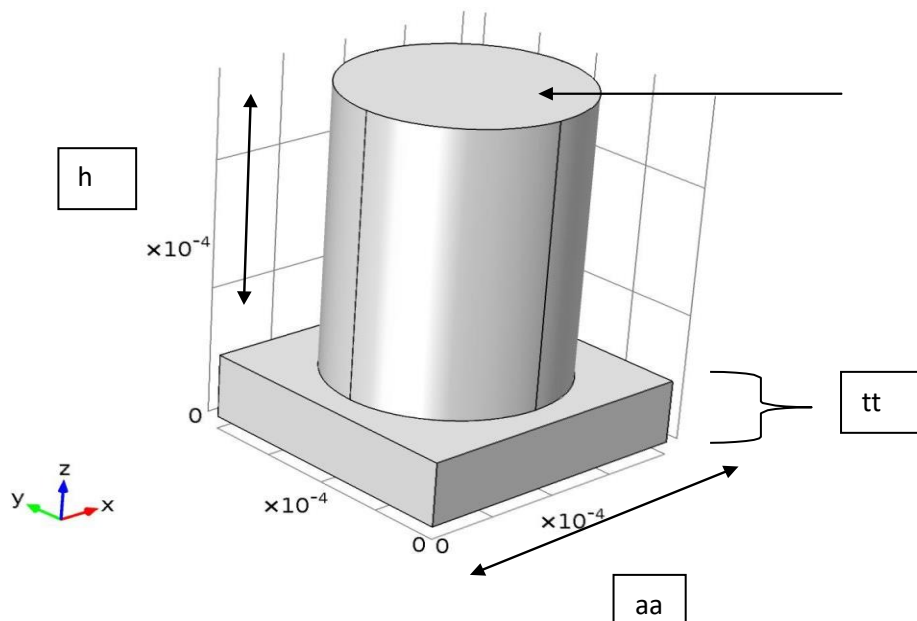
Dans le modèle étudié, on s'intéresse à la structure de bande d'un cristal constitué de plots cylindriques déposés sur une plaque fine.

### **3.3 Définition des paramètres globaux et création de la géométrie**

Il est très utile de paramétrer dans un tableau les variables du modèle et les utiliser ensuite dans les différentes étapes de simulation, il suffit ensuite de changer dans le tableau la valeur correspondante à la variable qu'on veut modifier et il sera tenu en compte automatiquement dans tout le modèle. Dans cette simulation, les valeurs des paramètres géométriques sont listées dans le tableau, Dans le Model Builder, Lorsqu'on veut définir une nouvelle variable, il est possible et fortement conseillé de lui associer une unité. Les unités doivent être mises entre crochets. Par exemple, pour spécifier une épaisseur écrire sous Name

«  $t$  » et sous Expression [m] ». On pouvant maintenant entrer les différentes variables relatives au problème.

Dans notre conception on a choisi de modéliser une partie du plaque fine sous forme de cube 3D avec un plot sous la forme d'un cylindre. L'unité de longueur utilisée est le  $\mu\text{m}$  et l'unité des angles est le degré.



**Figure 3.3 :** Construction de la géométrie cellule unité

### 3.4 les propriétés de matériau composant la plaque

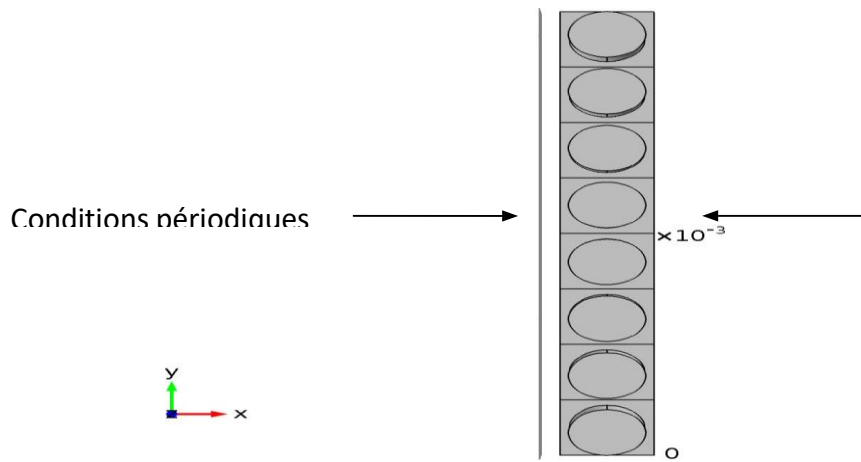
Les paramètres physiques des matériaux, tel que le module de Young, la masse volumique, la permittivité diélectrique, le tenseur d'élasticité et le tenseur piézoélectrique, etc. sont des caractéristiques propres à chaque matériau.

### **3.5 Les conditions frontières**

Dans cette étape, nous avons ajouté la physique Mécanique structurale (structural Mechanics) et on a choisi Mécanique solide (solid mechanics). Afin de permettre aux simulations d'être le plus près possible de la réalité expérimentale et de limiter le nombre de solutions éventuelles, il est impératif de fixer des conditions aux frontières. Ces conditions peuvent être la valeur d'une grandeur physique imposée sur des surfaces ou des lignes

Pour chacune des conditions aux frontières sélectionner la frontière appropriée dans la fenêtre d'affichage graphique et ajoutez-la à la condition frontière. Entrez aussi les paramètres associés à la condition frontière.

La super cellule sont construites d'abord en respectant la périodicité suivant la direction  $X$ , puis en introduisant les conditions périodiques de Bloch (continue) suivant la même direction  $X$ , comme le montre la figure 2.3.



**Figure 3.5 : Définition des conditions frontière**

L'expression de cette condition est :

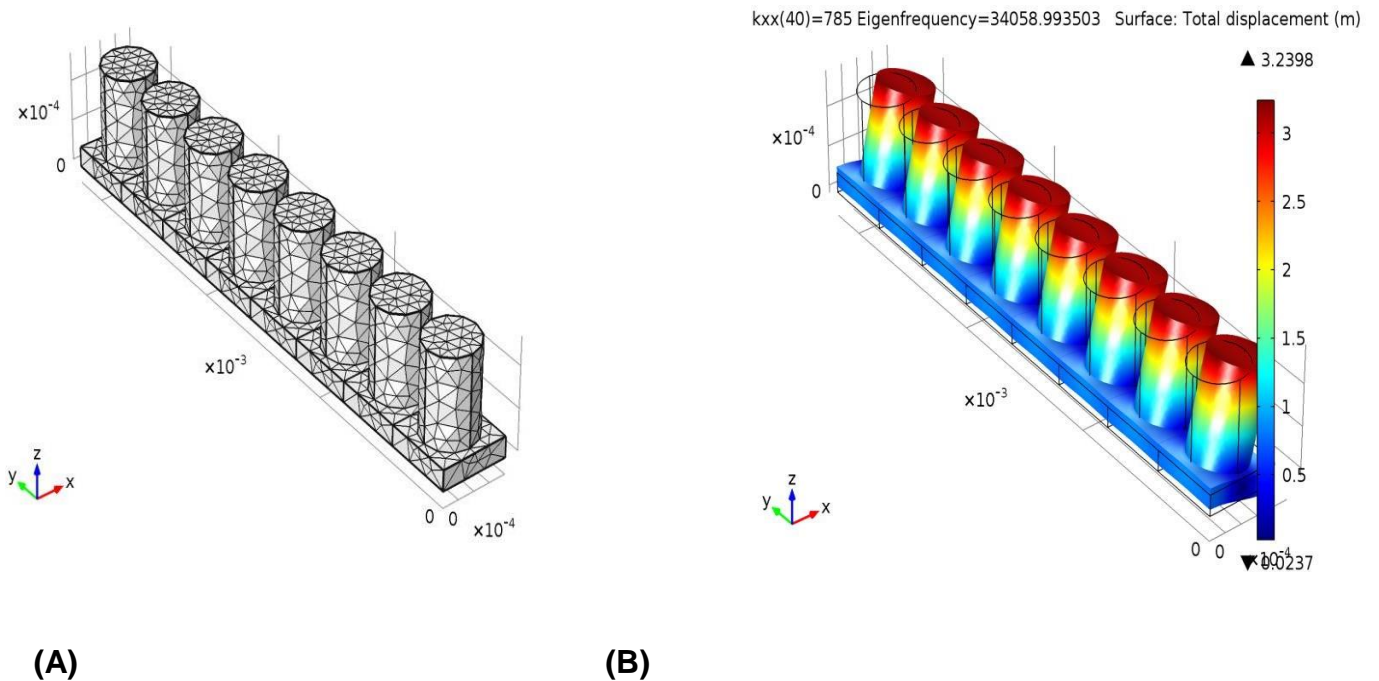
$$u_{dst} = u_{src} - i(r_{dst} - r_{src}) \dots \dots \dots (3.1)$$

### 3.6 Le Maillage

Le maillage est un découpage du domaine global en un nombre fini de sous domaines. Comsol Multiphysics propose plusieurs méthodes pour le maillage, dont le maillage tétraédrique libre, extrudé, couche limite.etc. Le choix du maillage dépend de la nature de la structure, de la géométrie, des conditions aux limites et aussi de la physique.

Le maillage de la structure est une étape très critique dans la simulation, le maillage de notre structure est triangulaire.

Les modèle devront ressembler à celui présenté à la Figure 2.4.



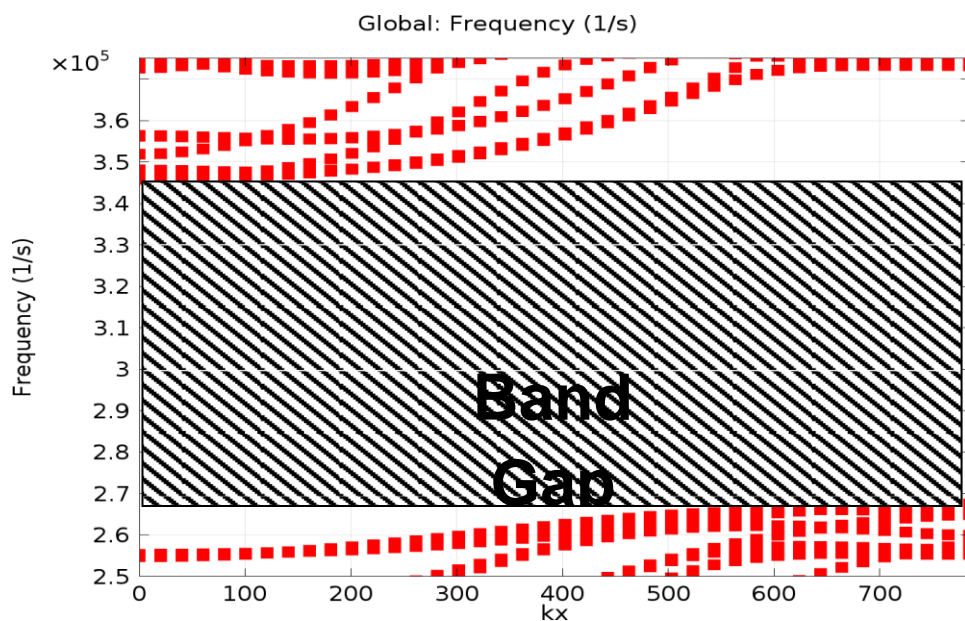
**Figure 3.6 :** (a) État du modèle avant de simuler et (b) Résultat de la simulation.

### 3.7 Simulation et traitement des résultats

Comme mentionné auparavant, nous nous intéressons à la propagation des ondes dans la direction X. De ce fait, nous nous focaliserons uniquement sur la direction  $\Gamma X$  de la première zone irréductible de Brillouin dans les simulations des structures.

La première simulation numérique de la structure de bande dans cette direction concerne la "super cellule" sans défaut. La figure 2.6 représente une structure de bandes d'une "super cellule" sans défaut dans la direction  $\Gamma X$ .

L'intervalle de la première zone de Brillouin est discrétisé pour une vingtaine de valeurs (dans notre cas) entre 0 et  $\pi/a$ . Pour chaque pas de la valeur de k une simulation est lancée afin de calculer ainsi une trentaine (dans notre cas) de fréquence (valeurs propres). Les valeurs propres sont récupérées dans un fichier de données permettant ainsi d'avoir les courbes de dispersions  $f_{réduite}$  (f.a) en fonction de k.

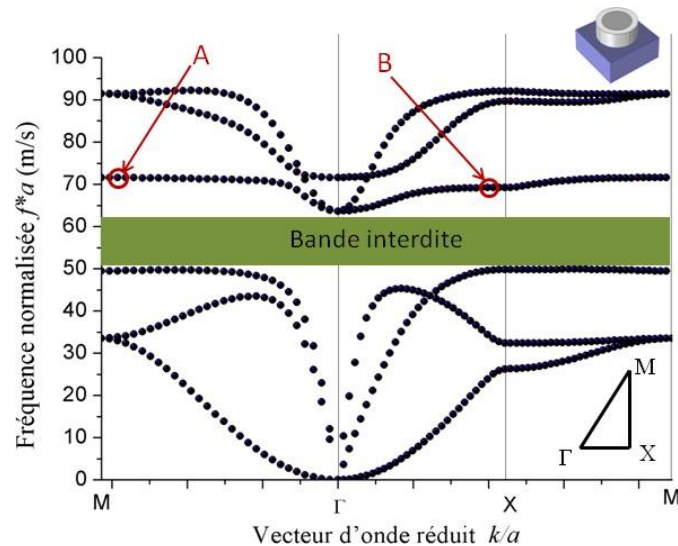


**Figure 3.7 :** Structures de bandes dans la direction  $\Gamma$  X présenté pour une "super cellule".

### 3.9-Modélisation et simulation

La cellule est construite d'abord en respectant la périodicité du structure, suivant la direction Y, puis en introduisant les conditions périodiques de Bloch suivant la direction du guide (direction X). Il faudra cependant un nombre suffisamment élevé de cellules unités du structure de part et d'autre du défaut afin que le guide d'onde voisins ne puissent pas interagir entre eux.

Les courbes de dispersion sont calculées avec la méthode des éléments finis et tracées dans chaque direction de La zone de Brillouin irréductible représentée en bas de la figure 3.9. Une normalisation des courbes est nécessaire avant d'obtenir une juxtaposition des structures de bandes calculées. La zone colorée correspond à une bande interdite absolue où aucune propagation d'ondes n'est possible ; en d'autres termes les modes de vibration Z ou XY ne peuvent se propager et cela, quelle que soit la direction de propagation dans le plan du massif de béton ou dans le plan perpendiculaire aux cylindres.



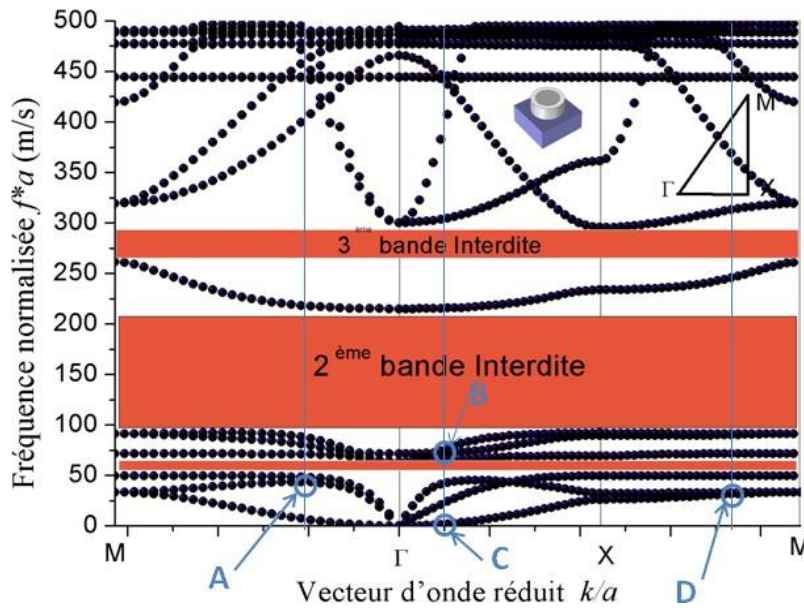
**Figure 3.9** Courbes de dispersion des fréquences, ( $r_1/a = 0,45$   $r_2/a = 0,35$ ,  $h_1/a = h_2/a = 0,5$ ) ; gap situé entre 50 et 63 m/s

### 3.10- Effet des paramètres géométriques sur les bandes interdites

Pour mettre en évidence l'influence des paramètres géométriques qui caractérisent la cellule de base (lit de béton, cylindres métalliques et élastomères) sur les structures de bande de fréquence, nous allons varier la hauteur, le rayon du résonateur, le facteur de remplissage et l'épaisseur du substrat, essayer à chaque fois d'expliquer les mécanismes physiques derrière les observations qui seront faites.

### 3.11- Courbes de dispersion pour $h_1/a = h_2/a = 0,5$

La même hauteur du massif de béton, soit  $h_1/a = h_2/a = 0,5$  ; les rayons relatifs  $r_1/a$  et  $r_2/a$  sont toujours égaux respectivement à 0,45 et 0,35. L'évolution des bandes interdites est donnée par la figure 4.9.



**Fig. 3.11** Courbes de dispersion des fréquences, ( $r_1/a=0,45$   $r_2/a=0,35$  ;  $h_1/a= h_2/a=0,5$ ) ; gaps situés entre 50 - 63 m/s, 93 - 215 m/s et 262 - 293 m/s

Diagramme de bandes de la figure 4.9 fait apparaître d'une part une troisième bande interdite supplémentaire, mais d'autre part, l'émergence de l'élastomère provoque un élargissement des bandes interdites avec un glissement vers les basses fréquences notamment de la deuxième bande gap. Ce résultat est potentiellement intéressant pour les applications de génie civil. Bien que les bandes interdites restent relativement élevées, l'effet de contraste entre les matériaux peut être utilisé pour les ajuster.

Alors pour un résonateur a section carrée en trouve que les mêmes étapes de résonateur a section circulaire

### 3.12 La définition de la physique et le choix du type d'analyse

Dans cette étape, nous avons ajouté la physique Mécanique structurale (structural Mechanics) et on a choisi Mécanique solide (solide mechanics).

### 3.13 Géométrie de la structure cristaux phononiques (PC)

Comsol Multiphysics propose des outils de conception géométrique en (1D, 2D et 3D). Les opérations géométriques sont toujours organisées selon une séquence dans l'arborescence du modèle.

### 3.14 Matériaux constituant la structure

Les paramètres physiques des matériaux, tel que le module de Young, la densité volumique, la permittivité diélectrique, le tenseur d'élasticité et le tenseur piézoélectrique...etc, sont des caractéristiques propres à chaque matériau. Dans cette structure PC on a défini deux matériaux. Le matériau de la matrice est en gomme (Rubber), tandis que les résonateurs et les connecteurs sont constitués à la fois de plomb (plumpum).

Tableau 3. 3 : les propriétés du rober

Name	value	unit
Module de Young	0.125e9	pa
Poisson's ratio	0.4	1
Masse volumique	1300	kg/m <sup>3</sup>

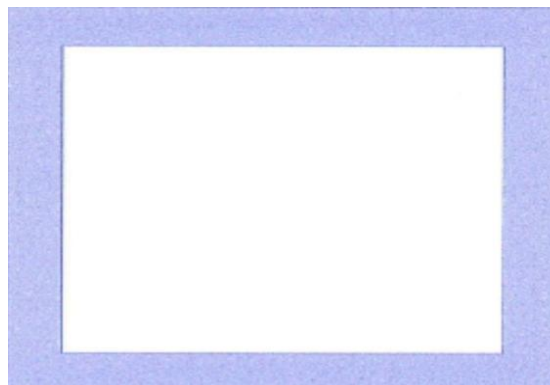


Figure3.14 : position de rubber



### 3.15 Condition aux limites

Afin de permettre aux simulations d'être le plus près possible de la réalité expérimentale et de limiter le nombre de solutions éventuelles, il est impératif de fixer des conditions aux frontières. Ces conditions peuvent être la valeur d'une grandeur physique imposée sur des surfaces ou des lignes ou même des points tel que le module de la vitesse à l'entrée d'un microcanal, la valeur de la pression appliquée sur une surface, la valeur de la tension électrique sur une face d'un dispositif, etc....

Par contre, ces conditions peuvent être un type de comportement imposé sur une frontière tel que le mode de fixation d'une poutre (encastree, libre, ressort,...), périodicité sur une face pour la propagation d'une vibration (Bloch, continue, semi infinie).

### 3.16 Maillage de la structure

Le maillage est un découpage du domaine globale en un nombre fini de sous domaines. Comsol Multiphysics propose plusieurs méthodes pour le maillage, dont le maillage triangulaire libre, extrudé, couche limite...etc.. Le choix du maillage dépend de la nature de la structure, de la géométrie, des conditions aux limites et aussi de la physique. Le maillage de la structure est une étape très critique dans la simulation, le maillage de notre structure est normal.



**Figure 3.16** : maillage de la structure

### 3.17 Les résultats de la simulation

Afin de confirmer l'analyse de la structure de la bande, les spectres de transmission à travers la structure le long de la direction x. Il existe actuellement deux plages de fréquences où l'atténuation est si grande qu'elle peut être traitée comme des bandes.

Modèle à 1 masse

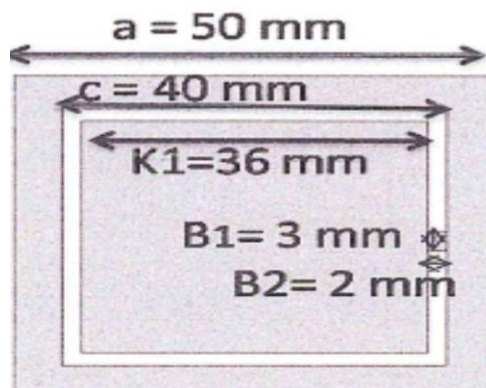
Nous avons utilisé les mêmes étapes de la simulation

Les paramètres géométriques

Name	expression	value	description
kxx	0[rad/m]	<b>0 rad/m</b>	KXX
kyy	0[rad/m]	<b>0 rad/m</b>	Kyy
A	$50e-3[m]$	0.05 m	Lentice periode en x
C	$40e-3[m]$	0.04 m	Length C
W1	$35e-3[m]$	0.015 m	Width W1
K1	$35e-3[m]$	0.036 m	Height k1
H1	$2e-3[m]$	0.002 m	Width h1
B1	$3e-3[m]$	0.003 m	Height b1

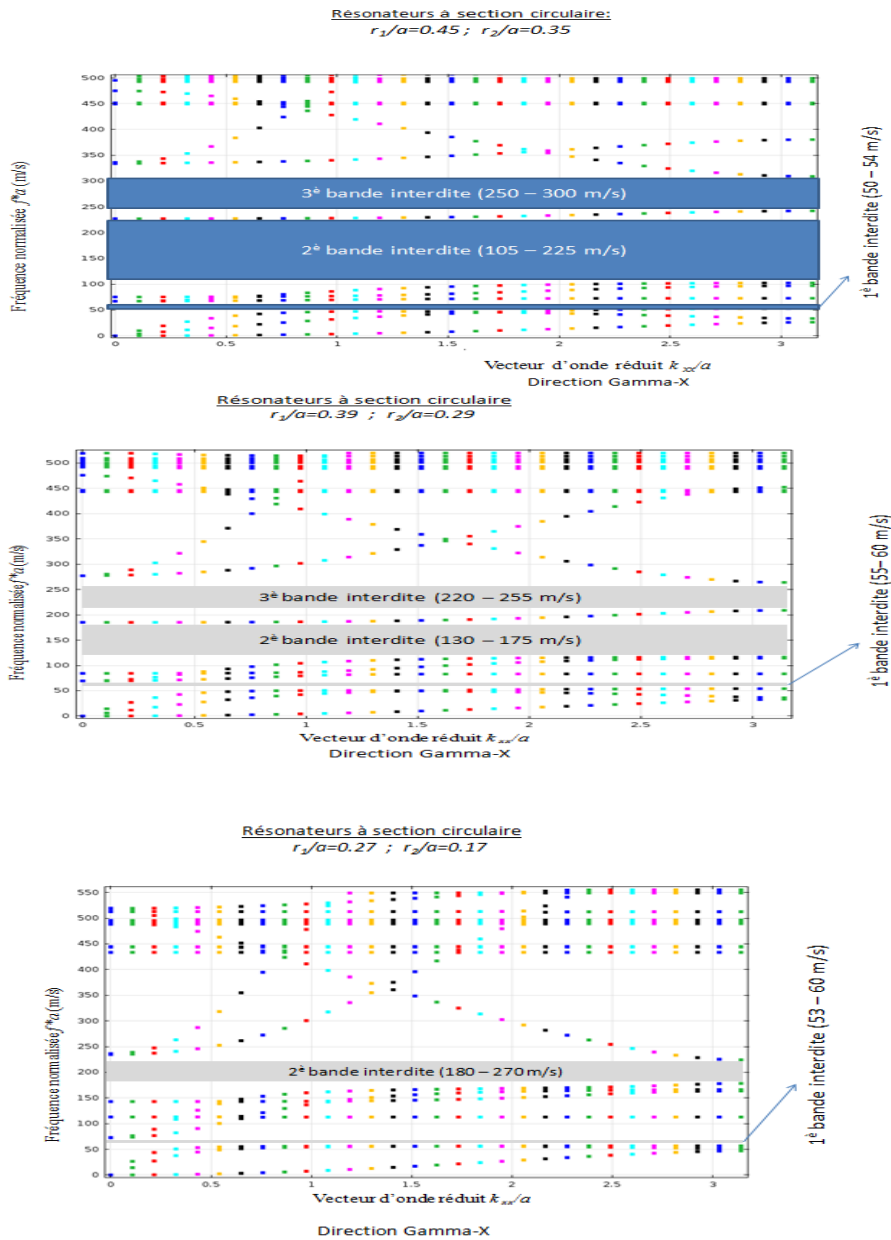
**Tableau 3. 4:** les paramètres géométriques d'une structure (PC)

**Figure 3.17** Géométrie de la structure cristaux phononiques

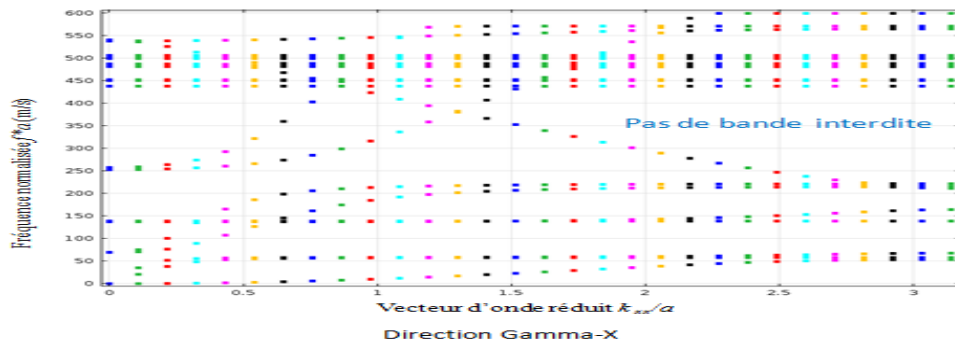


## résonateurs a section circulaire :

### 1- Les graphes des Résonateurs Circ\_Gamma-X :

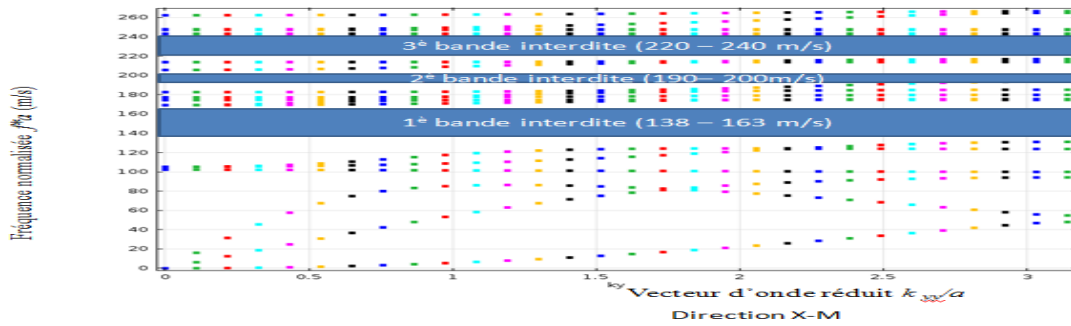


**Résonateurs à section circulaire**  
 $r_1/a=0.21$  ;  $r_2/a=0.11$

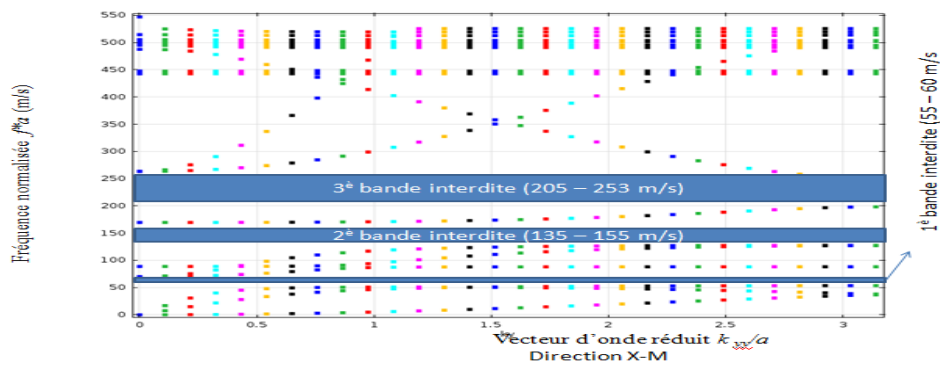


2-les graphes des Résonateurs Circ\_X-M :

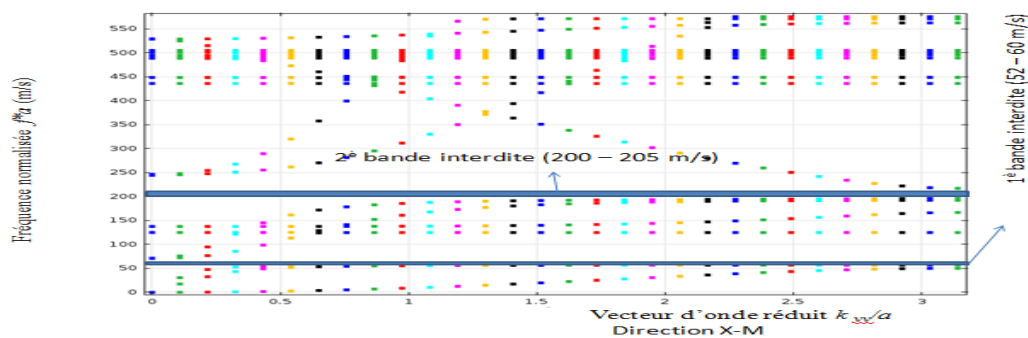
**Résonateurs à section circulaire:**  
 $r_1/a=0.45$  ;  $r_2/a=0.35$

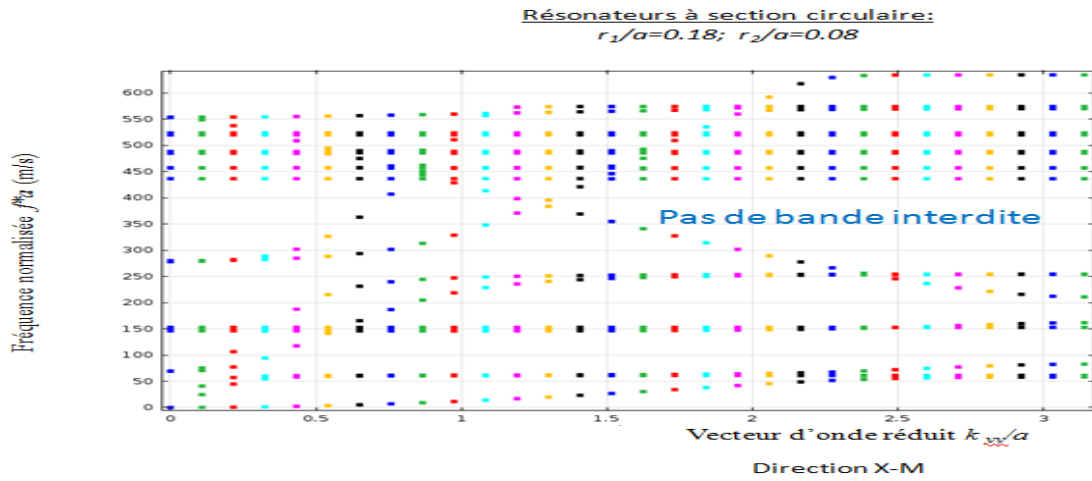


**Résonateurs à section circulaire:**  
 $r_1/a=0.36$  ;  $r_2/a=0.26$

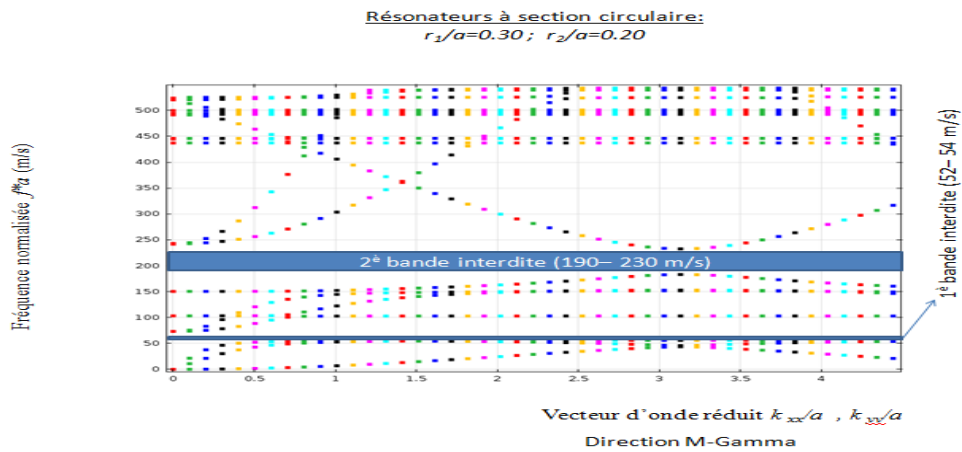
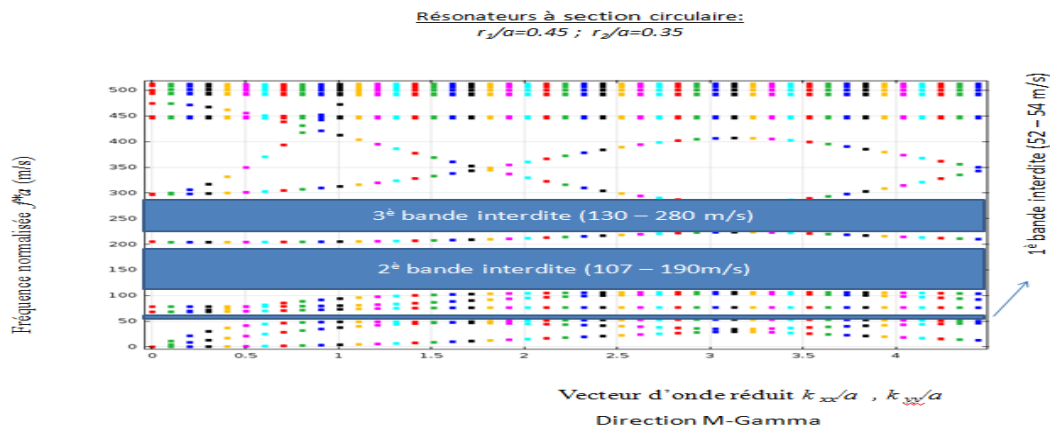


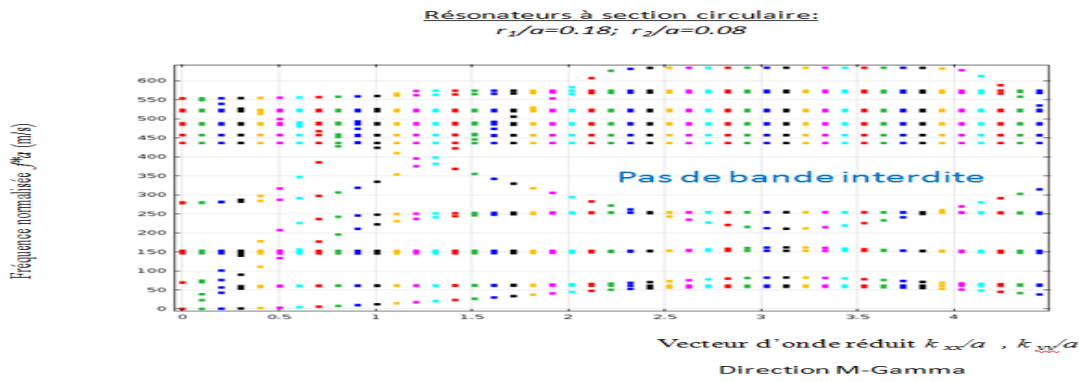
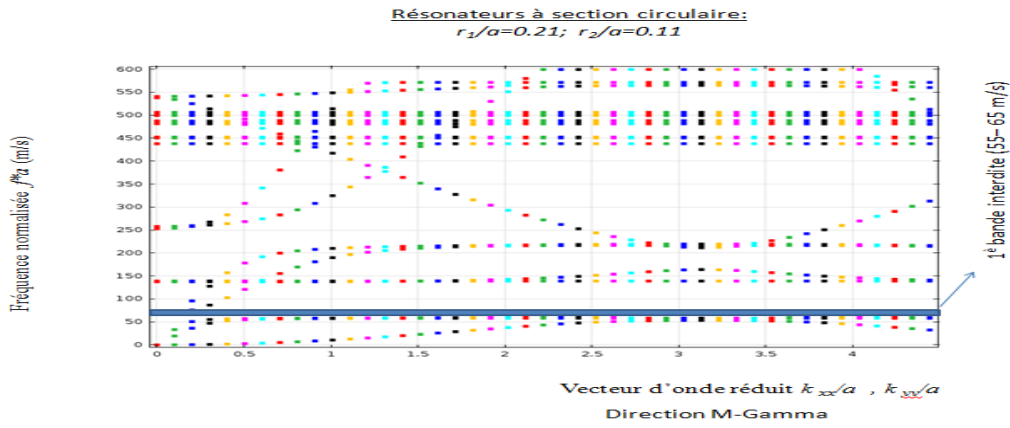
**Résonateurs à section circulaire:**  
 $r_1/a=0.24$  ;  $r_2/a=0.14$





**3-les graphes des Résonateurs CircM-Gamma :**

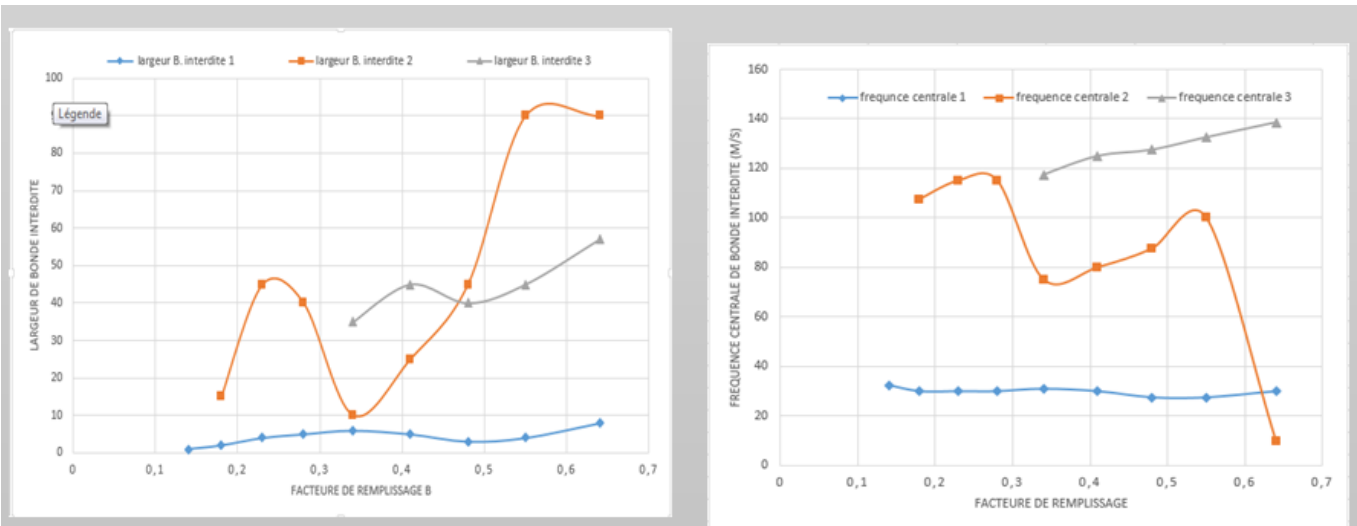




**Tableau Récapitulatif des banes interdites complètes**

Selon les Différents paramètres Géométriques  $r_1/a$  et  $r_2/a$  ( $h_1/a=h_2/a=0.5$ )

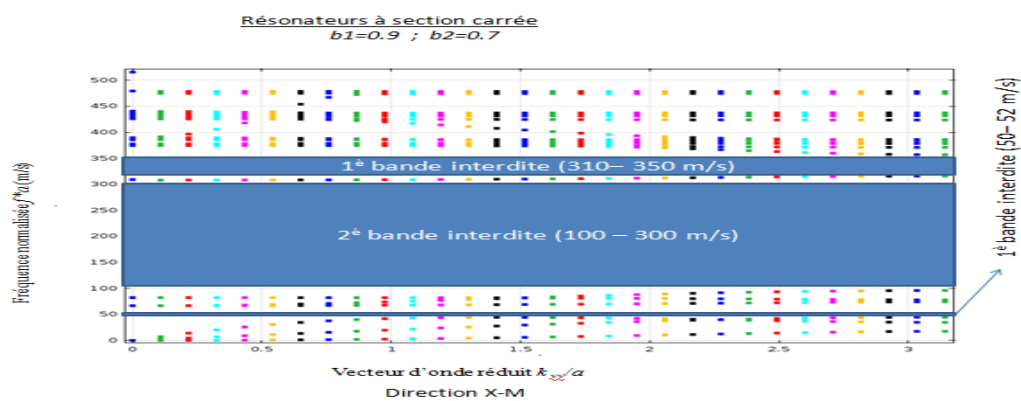
Bandes interdites	1° bande interdite			2° bande interdite			3° bande interdite		
	Fréquences [m/s]	Largeur de la bande [m/s]	Fréquence Central [m/s]	Fréquences [m/s]	Largeur de la bande [m/s]	Fréquences Central [m/s]	Fréquences [m/s]	Largeur de la bande [m/s]	Fréquence Centrale [m/s]
Paramètres Géométriques									
$r_1/a=0.45$ $r_2/a=0.35$	52-60	8	30	110-200	90	100	220-277	57	138.5
$r_1/a=0.42$ $r_2/a=0.32$	51-55	4	27.5	110-200	90	100	230-275	45	2132.5
$r_1/a=0.39$ $r_2/a=0.29$	52-55	3	27.5	130-175	45	87.5	215-255	40	127.5
$r_1/a=0.36$ $r_2/a=0.26$	55-60	5	30	135-160	25	80	205-250	45	125
$r_1/a=0.33$ $r_2/a=0.23$	54-60	6	31	140_150	10	75	200-235	35	117.5
$r_1/a=0.30$ $r_2/a=0.20$	55-60	5	30	190-230	40	115	_____	_____	_____
$r_1/a=0.27$ $r_2/a=0.17$	56-62	4	30	185-230	45	115	_____	_____	_____
$r_1/a=0.24$ $r_2/a=0.14$	58-60	2	30	200-215	15	107.5	_____	_____	_____
$r_1/a=0.21$ $r_2/a=0.11$	64-65	1	32.5	_____	_____	_____	_____	_____	_____
$r_1/a=18$ $r_2/a=0.08$	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____

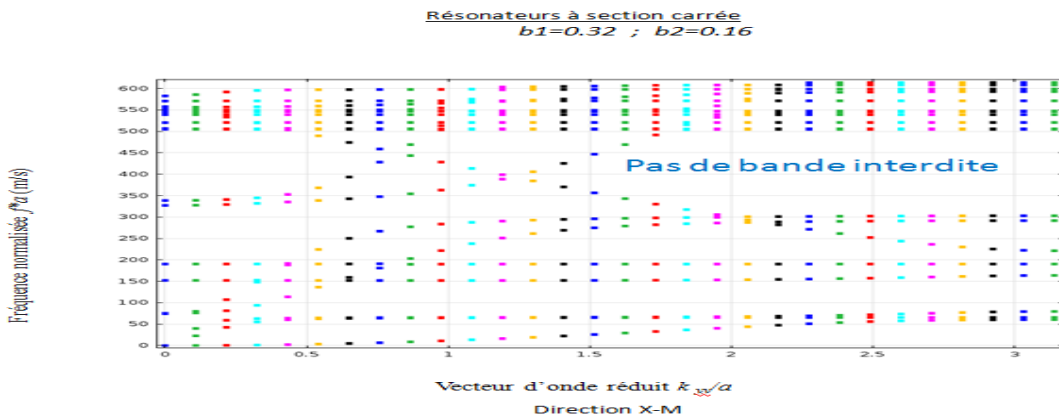
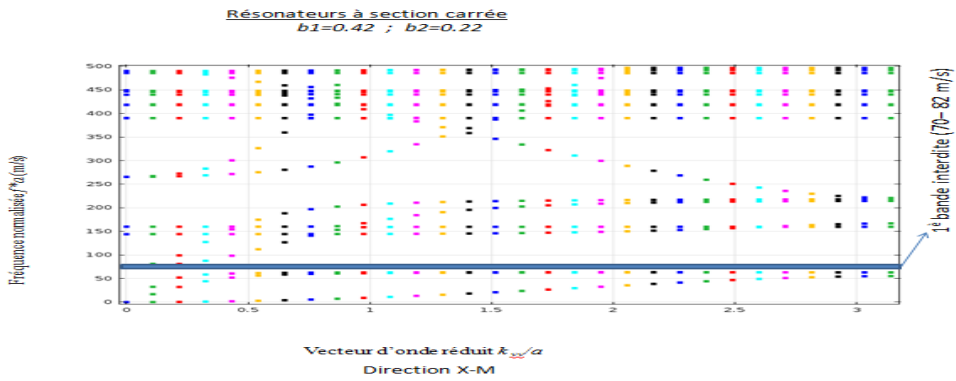
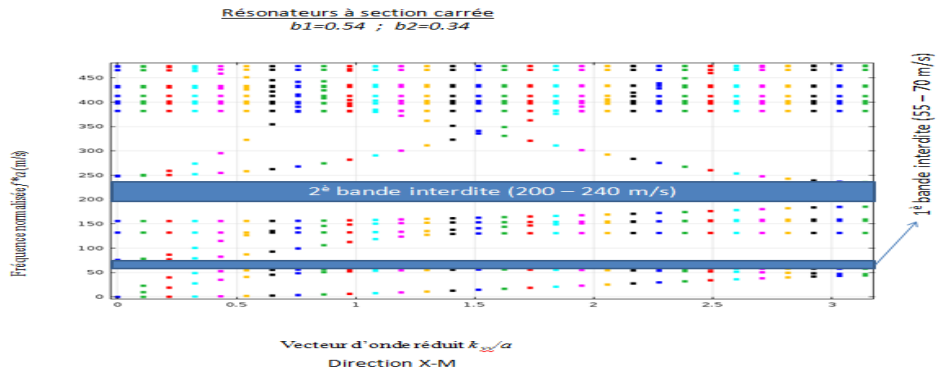


Graphe Variations de la fréquence centrale et largeur de bande interdite en fonction  $\beta$

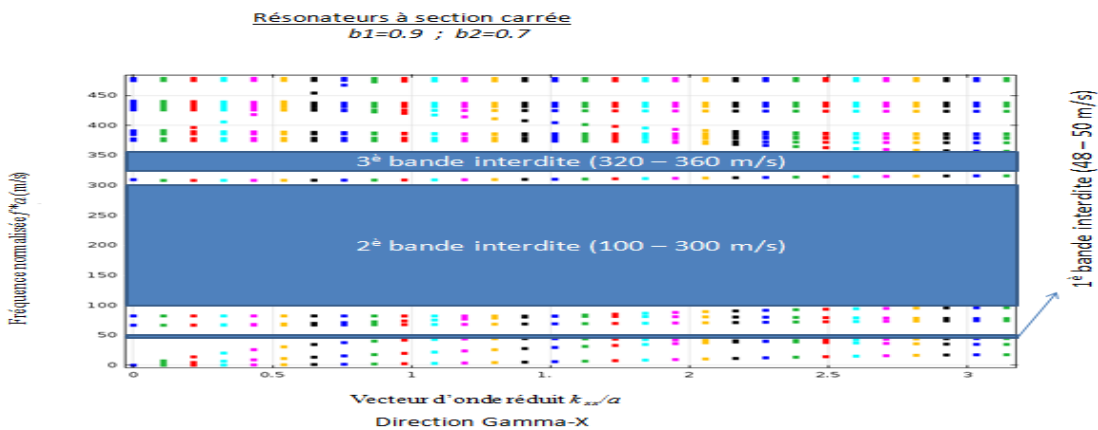
## résonateurs a section carrée

1-les graphes des Résonateurs carrée X-M :



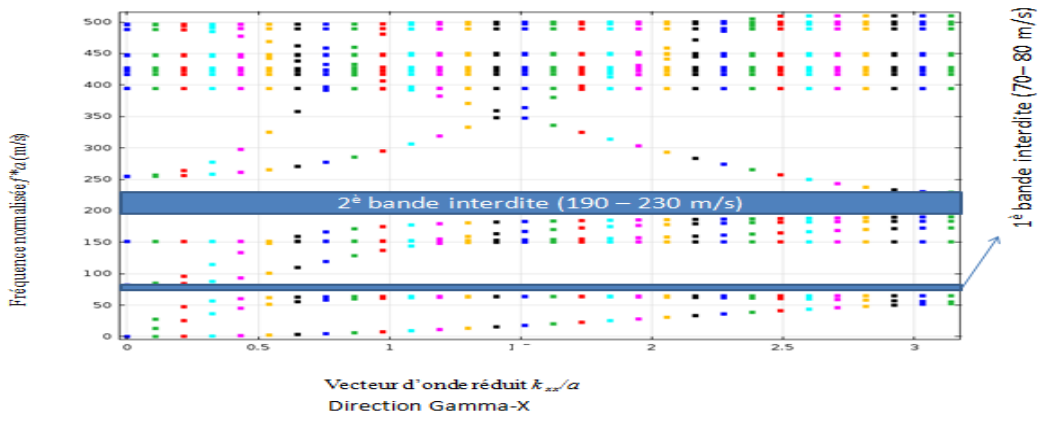


**2- les graphes des Résonateurs carrée\_Gamma-X :**

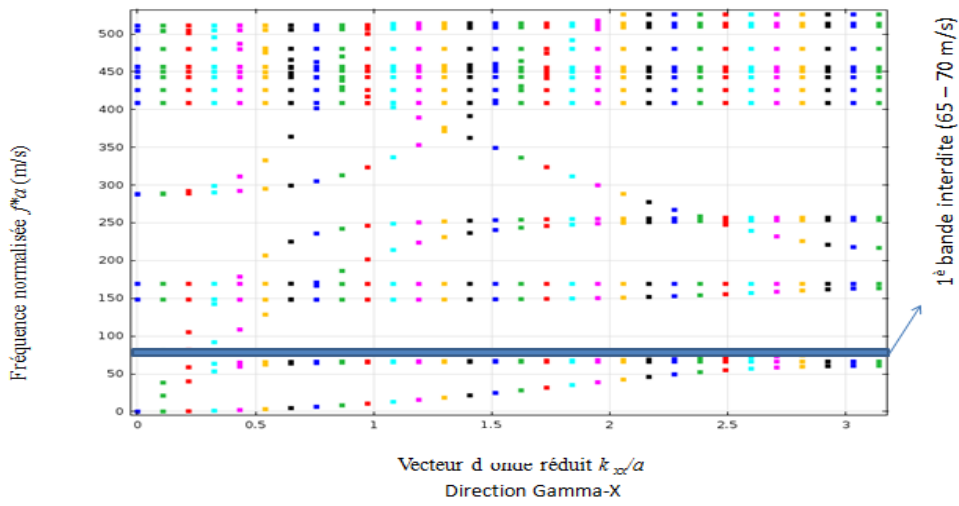




Résonateurs à section carrée  
 $b1=0.48$  ;  $b2=0.28$

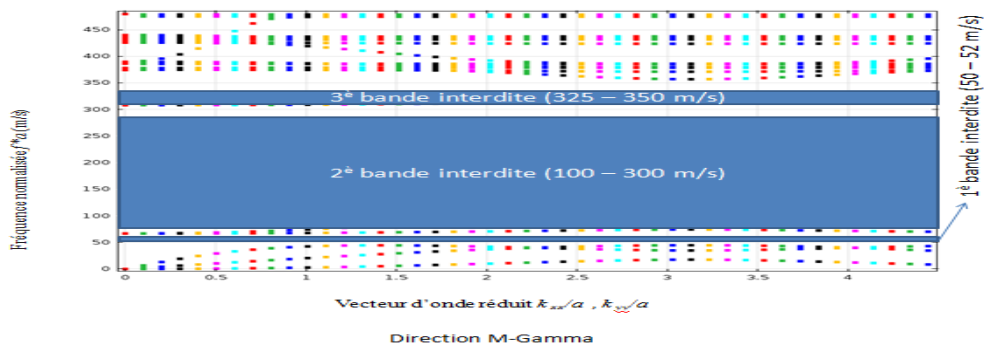


Résonateurs à section carrée  
 $b1=0.32$  ;  $b2=0.16$

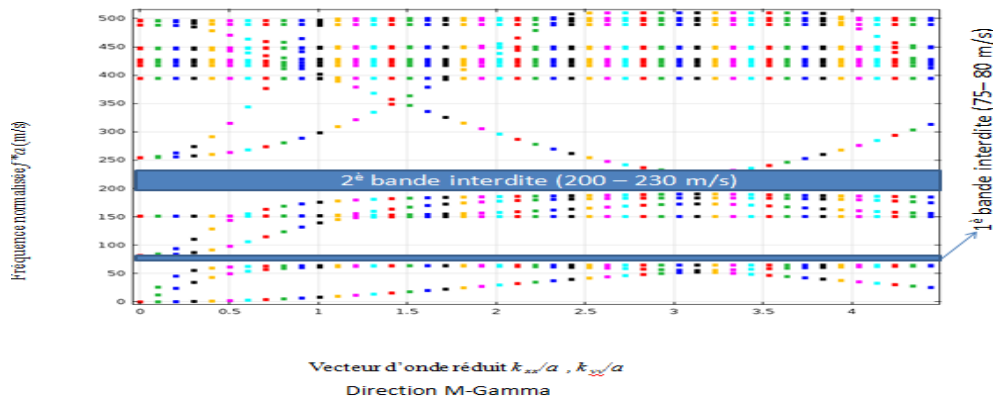


3-les graphes des Résonateurs carréeM-Gamma :

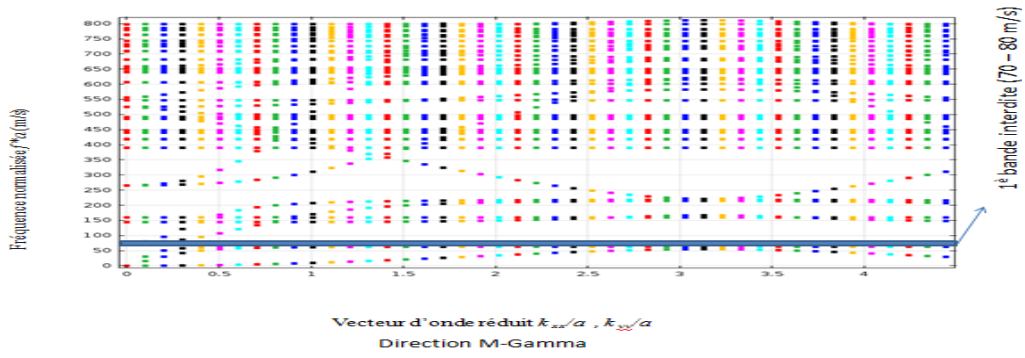
Résonateurs à section carrée  
 $b1=0.9$  ;  $b2=0.7$



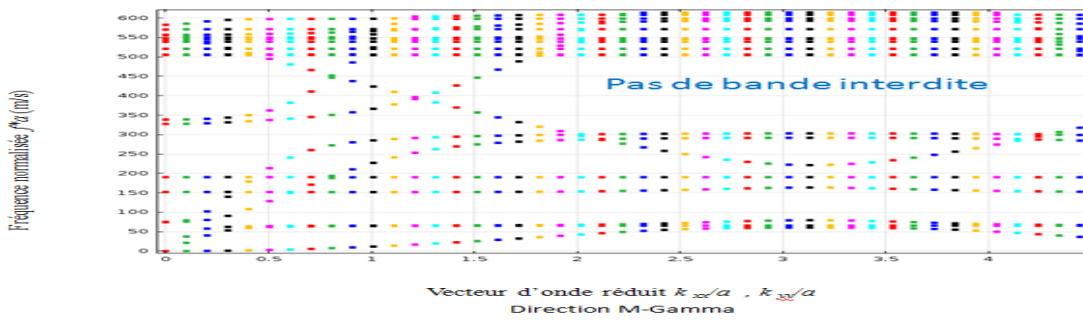
Résonateurs à section carrée  
 $b1=0.48$  ;  $b2=0.28$



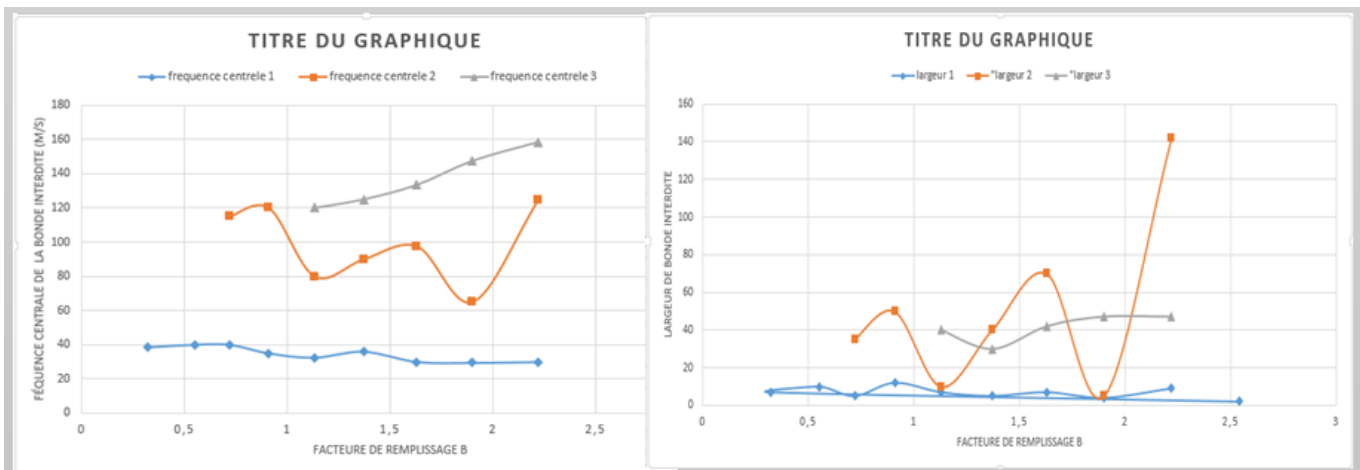
Résonateurs à section carrée  
 $b1=0.42$  ;  $b2=0.22$



Résonateurs à section carrée:  
 $b1=0.32$  ;  $b2=0.16$



Bandes interdites Paramètres Géométriques	1 <sup>o</sup> bande interdite			2 <sup>o</sup> bande interdite			3 <sup>o</sup> bande interdite		
	Fréquences [M /S]	Largeur De la bande [m /s]	Fréquence Central [m /s]	Fréquences [m/s]	Largeur De la bande [m/s]	Fréquence Central [m/s]	Fréquence [m/s]	Largeur De la bande [m/s]	Fréquence Centrale [m/s]
b1=0.84 b2=0.64	51 -60	9	30	108-250	142	125	270-320	47	158.5
b1=0.78 b2=0.58	55-59	4	29.5	125-220	5	65	248-295	47	147.5
b1=0.72 b2=0.52	53-60	7	30	125-195	70	97.5	225-267	42	133.5
b1=0.66 b2=0.46	67-72	5	36	140-180	40	90	220-250	30	125
b1=0.60 b2=0.40	58-65	7	32.5	150-160	10	80	200-240	40	120
b1=0.54 b2=0.34	58-70	12	35	190-240	50	120	_____	_____	_____
b1=0.48 b2=0.28	75-80	5	40	195-230	35	115	_____	_____	_____
b1=0.42 b2=0.22	70-80	10	40	_____	_____	_____	_____	_____	_____
b1=0.32 b2=0.16	70-77	7	38.5	_____	_____	_____	_____	_____	_____
b1=0.9 b2=0.7	48-50	2	25	100-300	200	150	320-352	32	176



Grphe Variations de la fréquence centrale et largeur de bande interdite en fonction  $\beta$

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La première partie de cette mémoire portait principalement sur les recherches menées dans le domaine de la propagation des vagues dans des structures composites. Ces dernières, dans lesquelles on retrouve le concept de bandes interdites, qui définissent des gammes angulaires ou de fréquences pour lesquelles la propagation des ondes est rendue impossible dans certaines conditions.

Depuis que nous avons vu, comment le concept de cristaux phononiques commence à être transposé au domaine du génie civil avec l'apparition de "métamatériaux sismiques", le domaine du génie civil n'est pas resté indifférent à l'utilisation de réseaux périodiques..

le travail que nous avons fait dans cette mémoire concernait initialement une structure bidimensionnelle périodique formée par un solide en béton dans lequel sont incrustés des cylindres en acier recouverts d'une couche de chlorure de polyvinyle (PVC). Nous avons décrit toutes les configurations obtenues en changeant les paramètres géométriques du modèle initial ainsi que la nature du métal (acier) et du polymère dans ce dernier (PVC).

Grâce aux résultats, de ce travail a pu mettre en évidence l'existence de bandes interdites dans les basses fréquences, dont la largeur et la position varient en fonction de la configuration étudiée (rayons et hauteurs des cylindres métalliques et élastomères et épaisseur du substrat en béton).

Un métal avec une densité et un module Young plus élevés que l'acier pour le noyau lourd du résonateur serait très utile pour vraiment apprécier le glissement des bandes d'espacement vers les basses fréquences. La prise en compte du caractère viscoélastique de la couche élastomère permettrait également d'améliorer ce travail de mémoire.

Il serait également intéressant de voir comment les résultats évoluent lorsqu'un arrangement différent est utilisé, comme les résonateurs dans la masse de béton pour atteindre une périodicité triangulaire.

Enfin, on espère que ces travaux aideront à jeter les bases de la mise en évidence des diverses fonctionnalités des structures périodiques dans le régime de basse fréquence au profit du génie civil.

## Refirance

- [1] L. Rayleigh. On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of wavesthrough a medium endowedwith a periodic structure. Philosophical Magazine, 24(147) :145–159, 1887.
- [2] y.penner,B.Djafari-j vasseur ,H. larabi, A. Choujaa, S.Benchabane, V.Laude, channel drop of elastiquewave in a towdimensionalphononiccrystal, iEEEultrasonics symposium 1.69 (2005)
- [3] [www.crystal-fibre.com](http://www.crystal-fibre.com)
- [4]F. Gacia-Santamaria et al.Adv. Mat. Lett. 14, 1144 (2002)
- [5] H.larabi y. pennec, B, djafari-rouhani, and j.o.vasseure, locallyresonantphononiccristalswithultilayeyerscylindrical, journal of physics C 92 012112(2007)
- [6] H.larabi y. pennec, B, djafari-rouhani, and j.o.vasseure, locallyresonantphononiccristalsPhys.rev .E75,066601(2007)
- [7] Thèse de Hocine Larabi, Lille 1, 2011 : cristaux phononique et Meta matériau acoustique application aux domaines du guidage filtrage et de l'isolation phonique
- [8] R. Martinez-sala, sancho .j. v. sanchez , v. Gomez, J. Llinrez et F. Mese-Guer ; soundattenuation by senlptur. Nature.378.211.1995
- [9] JoséSánchez-Dehesaand ArkadiiKrokhin"IntroductiontoAcousticsof PhononicCrystals. HomogenizationatLowFrequencies".AbdelkrimKhelif•AliAdibi, Editors PhononicCrystalsFundamentalsandApplications
- [10] B.djafariRouhani, Y.pennec, H.larabi bonde structure and waveguiding in a phononic cristal constituted a périodique array of dots detesited en a homogeneous plate trec . Spie, vol « 7223 » (photonic and phononiccrystalmaterials and devices IX).2230F (2009) ;Dol :10.1117 /12.816985.
- [11] y.Elhassouani,Li, Y.Ppennec El Boudoutih.larabi, A.Akjouj , O. bouMatar, vlaudeN.papanikolaou, A.martines, and B.djafariirouhani.

- [12] Photonic-crystals-book, Molding the flow of light, Second Edition. John D.Joannopoulos,StevenG.Johnson,JoshuaN.WinnandRobertD.Mead
- [13] mémoire de magistère – Sedik KHEFFACHE –propagation d’ondes élastique dans cristaux phononique bidimensionnel
- [14] S.Y. Lin, J.G.Fleming,D.L.Hetherington, B.K.Smith, R. Biswas,K.M.Ho,M.M.Sigalas, W. Zubrzycki, S.R. Kurtz, and J. Bur. A three-dimensionalphotoniccrystaloperatingatinfraredwavelengths.Nature,394(6690):251–253,19
- [16] MOISEYNLO RayisaP.Science pour l’ingénieur institut FEMTO-ST (UMR6174).université de franche comte Ecole doctorale sciences pour l’ingéniere et microtechnique
- [17] R. Martínez-Sala, C. Rubio, L. M. García-Ra\_, J. V. Sánchez-Pérez, E. A. Sánchez-Pérez et J. Llinares, Control of noise by treesarrangedlikesoniccrystals. J. Sound Vib.,291,100 (2006)
- [18] R. Houwink, ElasticityPlasticity and structure of matter, Cambridge UniversityPress,London,(1971)
- [19] E.yablonovitch. inhibitedspontaneous Emission in solid-starephysics and Electronics.physicalReviewLetters, 58 :2059-2062.[S johne. Stronglocalization of photons in certain disordeDielectricSuperlattices. physicalreviewletteres, 58 :2489, 19987]
- [20] Z.Y.LIE ,Y.W.ZhangX.and mao, yang C.T .chan, and p.sheng.locallyresonantSonicMaterials.Science, 289 :1734-6, 2000.
- [21] laetitiaraguin .résonateursphononique couples par la surface.Micro et nanotechnologies /microélectronique .Université Bourgogne franche-comté, 2019. Français. NNT/2019UBECDO47. Tel-02733053
- [22] T.Wu,G.Hung, and S.Y.Kristallogr.220, 840,(2005).
- [23] Kushwaha,M.S.,Halevi,P.,Dobrzynski,L.etDjafari-Rouhani,B, "Acousticbandstructureof periodicelasticcomposites", Phys.Rev.Lett. 71, 2022–2025(1993).

[24] Rémi Marchal. Méta matériaux acoustique actifs. Acoustiques [physics : class-ph]. Université Pierre.

[25] Kushwaha, M.S., Halevi, P., Dobrzynski, L. et Djafari-Rouhani, B., "Acoustic band structure of periodic elastic composites", Phys. Rev. Lett. 71, 2022–2025 (1993)

[26] Z. Hou, and B. M. Assouar, Phys. Lett. A **372**, 2091 (2008).

[27] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, and P. Sheng, Science **289**, 1734 (2000).

[28] Dr. Amine Amrane these de doctorat perspectives d'utilisation des réseaux périodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mécaniques

[29] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, and I. Youngs. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. Physical Review Letter, 76 :4773–4776, 1996.

[31] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, and I. Youngs. Extremely low frequency D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. Composite

[32] medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Physical

[33] M. Dubois, M. Farhat, E. Bossy, S. Enoch, S. Guenneau, and P. Sebbah. Flat lens

for pulse focusing of elastic waves in thin plates. Applied Physics Letters, 103, 2013

Review Letter, 84(18), May 2000

[34] C. T. Chan, Q. L. Yu, and K. M. Ho, Phys. Rev. B **51**, 16635 (1995)

[35] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, and Ping Sheng. Locally

[36] . Ying Wu, Yun Lai, and Zhao-Qing Zhang.

Elastic metamaterials with simultaneously negative effective shear modulus and mass density. arXiv:1102.4679, 2011.

- [37]** X.N. Liu, G.K. Hu, G.L. Huang, and C.T. Sun. An elastic metamaterial with simultaneously negative mass density and bulk modulus. *Applied Physics Letters*, 98, 2011
- [38]** O. Richoux, V. Tournat, and T. Le Van Suu. Acoustic wave dispersion in a one-dimensional lattice of nonlinear resonant scatterers. *Physical Review E*, 75, 2007
- [39]** N. Fang, D. Xi, J. Xu, M. Ambati, W. Srituravanich, C. Sun, and X. Zhang. Ultrasonic metamaterials with negative modulus. *Nature*, 452, 2006
- [40]** S. Benchabane, A. Khelif, J.-Y. Rauch, L. Robert, and V. Laude. Evidence for Complete Surface Wave Band Gap in a Piezoelectric Phononic Crystal. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 73 :065601, 2006.
- [41]** F.-C. Hsu, C.-I. Lee, J.-C. Hsu, T.-C. Huang, C.-H. Wang, and P. Chang. Acoustic Band Gaps in Phononic Crystal Strip Waveguides. *Applied Physics Letters*, 96 :051902–051902, 2010.
- [42]** H. Zhu and J. Lee. Design of Phononic Crystal Tethers for Frequency-Selective Quality Factor Enhancement in AlN Piezoelectric-on-Silicon Resonators. In *Procedia Engineering*, volume 120, pages 516–519, 2015.
- [43]** L. Sorenson, J. Fu, and F. Ayazi. One-Dimensional Linear Acoustic Bandgap Structures for Performance Enhancement of AlN-on-Silicon Micromechanical Resonators. In *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS)*, pages 918 – 921, 2011
- [44]** M. GORISSE, Réalisation de filtres RF à base de cristaux phononiques, docteur de l'université de grenoble, 17 Novembre 2011.
- [45]** S. kheffache, memoire de magister, université mouloud mammeri, tizi-ouzou, propagation d'ondes élastiques dans les cristaux phononiques bidimensionnels, 2011.
- [46]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques
- [47]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques



**[48]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[49]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[50]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[51]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[52]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[53]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[54]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[55]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[56]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[57]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[58]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[59]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[60]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[61]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques

**[62]** These de doctorat (DR AMRANE AMINE) , perspectives d'utilisation des reseaux periodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques