

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la**

**Recherche Scientifique**

**Université Saad Dahleb -Blida 1-**



**Faculté de science**

**Département de physique**

**Mémoire fin d'étude**

**Pour l'obtention du diplôme de master en physique**

**Option : nano physique**

**Thème**

**Effet du coefficient de remplissage sur  
les bandes interdites de structures  
phononiques uni et bidimensionnelles  
en basses fréquences**

Présenté par :

Mokrane Mohammed

Soutenu le 24 / 10 / 2021 devant le jury composé de :

Mr. A.Benhaffaf	MAA U Blida 1	president
Dr. A.Amrane	MCB U Blida 1	encadreur
Dr. A.Hassein –Bey	MCB U Blida 1	Examineur

Blida -1- 2020-2021

## Dédicace

Tout d'abord, je veux rendre grâce Allah, le clément et le très Miséricordieux pour son amour éternel, c'est ainsi que je dédie ce mémoire à :

Ma mère pour sa tendresse et mon père pour sa patience et encouragement

- Mes très chers frères et ma seule sœur
- Mes cousins et cousines
- Tous que j'aime
- Toutes mes amies

A toute ma famille

A vous tous....

**M.Mohammed**

# REMERCIEMENTS

A Dieu, le tout puissant, nous rendons grâce pour nous avoir donné santé, patience, volonté et surtout raison.

En premier lieu, je tiens à remercier mon encadreur **Mr. Amine amrane** qui m'a aidé et conseillé durant ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres de jury pour m'avoir honoré par leur évaluation de ce travail.

Je remercie également tous les enseignants du département de l'électronique de l'université de **blida1** pour leur aide et encouragement.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu, encouragé et donné l'envie de mener à terme ce travail



## Résumé

La propagation des ondes dans les matériaux composites, spécialement les structures périodiques, est un sujet signifiant qui se trouve au confluent de nombreuses disciplines de la physique. En particulier, les cristaux phononiques sont structure artificielles périodiques (1D, 2D ou 3D) formés d'au moins de deux matériaux élastiques.

Ces matériaux présentent en effet sous certaines conditions des bandes de fréquences pour lesquelles la propagation des ondes élastiques ou acoustiques est interdite, alors, on se les appelle les bandes interdites, bien sûr dans certaines directions et gammes de fréquences.

Notre travail consiste à l'étude théorique des bandes interdites acoustiques d'un cristal phononique unidimensionnels structuré périodiquement (sans default), ou par l'addition d'un default afin de contrôler la propagation des ondes acoustiques.

**Les mots clé:** cristaux phononiques, bandes interdites, acoustique, périodique, default.

### الملخص:

من للعديد التقاء نقطة يمثل مهمًا موضوعًا دورية، الهياكل وخاصة المركبة، المواد في الأمواج انتشار يعتبر ثنائية البعد، أحادية) دورية اصطناعية بنى الصوتية البلورات تعتبر الخصوص، وجه على. الفيزياء تخصصات معينة ظروف ظل في الواقع في المواد هذه تحتوي. الأقل على مرتين مادتين من مكونة (الأبعاد ثلاثية أو الأبعاد وهذه محظورة، نطاقات عليها يطلق لذلك الصوتية، أو المرنة الموجات انتشار عليها يحظر تردد نطاقات على معينة تردد ونطاقات معينة اتجاهات في بالطبع.

بدون) دوري بشكل منظمة البعد أحادية صوتية لبلورة الصوتية للنطاقات النظرية الدراسة في عملنا يتمثل

.الصوتية الموجات انتشار في للتحكم (عيب) تشويه إضافة طريق عن أو، تشويه

.تشوه دورية، صوتية، محظورة، نطاقات صوتية، بلورات: **المفتاحية الكلمات**

### Abstract

The propagation of waves in composite materials, especially periodic structures, is a significant subject at the confluence of many disciplines of physics. In particular, phononic crystals are periodic artificial structures (1D, 2D or 3D) formed of at least two elastic materials. These materials have in fact under certain conditions frequency bands for which

the propagation of elastic or acoustic waves is prohibited, so they are called forbidden bands, of course in certain directions and ranges of frequencies.

Our work consists theoretical study of the acoustic bands prohibited of onedimensional phononic crystal structured periodically (without default), or by the addition of a default in order to control the propagation of the acoustic waves.

**Keywords:** phononic crystals, forbidden bands, acoustic, periodic, default.

# TABLE DES MATIERES

## CHAPITRE 1 : CRISTAUX PHONONIQUES GENERALITES ET

### APPLICATIONS.....1

<u>1.1Introduction :</u> .....	15
<u>-1.2Les cristaux phononiques.....</u>	15
<u>1.2.1Historique et concept des cristaux phononiques/photoniques :</u> .....	15
<u>1.2.2Définition d'un cristal phononique/photonique .....</u>	16
<u>1.2.3.1- CRISTAUX PHONONIQUES UNIDIMENSIONNELS .....</u>	17
<u>1.2.3.2 CRISTAUX PHONONIQUES BIDIMENSIONNELS :</u> .....	18
<u>1.2.3.3 les cristaux phononiques tridimensionnelles .....</u>	18
<u>1.2.4 –COMPARAISON ENTRE CRISTAUX PHONOQUES ET PHOTONIQUES:.....</u>	19
<u>1.3 Propagation des ondes élastiques/ acoustique :</u> .....	21
<u>1.3.1ondes élastiques et acoustiques :</u> .....	21
<u>1.3.2Cristaux phononiques à résonance locale :</u> .....	21
<u>1.3.3Ouverture des bandes interdites par résonance locale :</u> .....	22
<u>1.4.1 Cristaux phononiques à bandes interdites de Bragg :</u> .....	22
<u>1.4.2Loi de Bragg :</u> .....	23
<u>1.4.3 La notion de bande interdite :</u> .....	24
<u>1.4. STRUCTURE DE BANDES INTERDITES et STRUCTURE CRISTALLINE .....</u>	25
<u>1.4.1. ESPACE REEL ET ESPACE RECIPROQUE .....</u>	25
<u>1.4.2. ZONE DE BRILLOUIN :</u> .....	25
<u>1.5.1. DIAGRAMMES DE BANDES :</u> .....	27
<u>1.6 Application des cristaux phononiques :</u> .....	28
<u>1.6.1 Guides d'ondes :</u> .....	28
<u>1.6.2 - Exemples de réalisations expérimentales :</u> .....	29
<u>1.7Conclusion :</u> .....	31

## CHAPITRE 2.....

### MODELISATION ET METHODE DE SIMULATIONS D'UNE STRUCTURE PHONONIQUE A BASE

### DE BETON ..... **32**

<u>2.1introduction .....</u>	33
<u>2.2 Présentation du logiciel - Comsol multiphysics- .....</u>	33
<u>2.3 - Modélisation par éléments finis sous Comsol Multiphysics.....</u>	34

<b><u>3.4 - Modélisation et Simulation d'une cellule de base phononique à un résonateur pour le calcul des courbes de dispersion :</u></b>	<b>36</b>
<b><u>2.4.1 - Choix de la cellule de base - Modèle numérique :</u></b>	<b>36</b>
<b><u>2.4.2 - Implémentation des équations</u></b>	<b>37</b>
<b><u>2.4.3 - Conditions aux limites (CL)</u></b>	<b>38</b>
<b><u>2.4.4 - Maillage</u></b>	<b>39</b>
<b><u>2.4.5-La convergence</u></b>	<b>40</b>
<b><u>2.5 - Choix des matériaux utilisés</u></b>	<b>41</b>
<b><u>2.6 – Conclusion</u></b>	<b>42</b>
<b>CHAPITRE 3</b>	<b>43</b>
<b><u>PERFORMANCES ET OPTIMISATION D'UNE CELLULE PHONONIQUE A UN RESONATEUR LOCAL POUR L'ISOLATION DE STRUCTURES A BASE DE BETON</u></b>	<b>43</b>
<b><u>3.1 – Introduction</u></b>	<b>43</b>
<b><u>3.2 – Géométrie du modèle étudié et conditions de calculs</u></b>	<b>44</b>
<b><u>3.2.1 - Opérations d'optimisation des paramètres géométriques sur les bandes interdites</u></b>	<b>44</b>
<b><u>3.2.2-Courbes de dispersion pour le couple de matériaux ( fer- silicone)</u></b>	<b>47</b>
<b><u>4.3 - Effet des paramètres géométriques sur les bandes interdites</u></b>	<b>48</b>
<b><u>3.3.1 - Effet de la hauteur des cylindres sur les bandes interdites</u></b>	<b>48</b>
<b><u>3.3.2 - Effet du facteur de remplissage <math>\beta</math> sur les bandes interdites</u></b>	<b>49</b>
<b><u>3.3.2.1-Cas du couple de matériaux "fer-silicone"</u></b>	<b>50</b>
<b><u>3.3.2.1.1 - Fréquences centrales</u></b>	<b>50</b>
<b><u>3.3.2.1.2 - Largeur des bandes interdites</u></b>	<b>51</b>
<b><u>3.4.1 - Effet du module d'élasticité de l'élastomère</u></b>	<b>51</b>
<b><u>3.4.2Effet du module des Bandes Interdites Complètes</u></b>	<b>56</b>
<b><u>3.5Conclusion</u></b>	<b>57</b>

# Liste des Figures

Figure 1.1 – représentation schématique des cristaux phononiques 1D, 2D, et 3D.....

Fig. 1.2 – Réseau carré et sa zone de Brillouin associée, b) Réseau triangulaire et sa Zone de Brillouin associée. ....

Fig. 1.3. : Exemples de structures 3D : structure cubique (a), tas de bois(b), structure multicouches (c), opales ou opales inversées(d) [7].  
.....

Fig. 1.4 Domaines fréquentiels des ondes élastiques [7].....

Fig.1.5(A) résonateur sphérique constitué d'un coeur en plomb enrobé par un élastomère très mou. (B) Cristal phononique tridimensionnel à résonance locale conçu par Liu et al. [12].....

Fig. 1.6 schéma expliquant la loi de Bragg .....

Fig. 1.7(a) 1ere, (b) 2eme, (c) 3eme zone de Brillouin d'un réseau carré [5].

Fig. 1.8 diagramme de bandes d'un cristal phononique constitués de trous D'airs percés dans une membrane AlN/SiO<sub>2</sub>, avec un remplissage de 60 % [15].  
.....

Fig. 1.9 Guides d'ondes phononiques linéaire et coudé.....

Fig.1.10 Cette œuvre d'art moderne de E. Sempere représente un cristal phononique à deux dimensions de tiges d'acier d'un diamètre de 2,9 cm disposées en réseau carré avec une période égale à 10 cm [20].....

Fig. 2.1 Les étapes suivies dans Comsol Multiphysics pour l'analyse d'un modèle.....

Figure 2.2 : 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 .....

Fig.2.3 3Différentes étapes pour la conception géométrique d'un modèle.....

Fig. 2.4 Conditions aux limites périodiques appliquées aux quatre faces latérales du massif de béton .....

Fig. 2.55 Maillage fin pour les différentes cellules de base

(a) cylindres non émergents, (b) seul le cylindre de métal émerge du substrat, (c) cylindres émergents, (d) modèle après grugeage.....

**Fig. 3.1** Structure périodique composée d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindres métalliques enrobés d'une couche de polymère

.....

**Fig. 3.2** Courbes de dispersion des fréquences, matériaux utilisés "fer-silicone", ( $r_1/a = 0.45$   $r_2/a = 0.35$ ,  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ); gap situé entre 50 et 63

m/s.....  
.....

**Fig. 3.3** Courbes de dispersion des fréquences, matériaux utilisés «acier-caoutchouc», ( $r_1/a = 0.45$   $r_2/a = 0.35$ ,  $h_1/a = h_2/a = e/a = 0.1$ ); gaps situés entre 155 - 160 m/s et 230 - 245 m/s..... 85

**Fig. 3.4** Variation des fréquences centrales normalisées en fonction du facteur de remplissage, matériaux utilisés "fer-silicone"

.....

**Fig. 3.5** Evolution de la largeur des bandes gaps en fonction du facteur de remplissage, matériaux utilisés "fer-silicone"

.....

**Fig. 3.6** Courbes de dispersion des fréquences, (a) ( $r_1/a = 0.45$ ;  $r_2/a = 0.35$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 80 - 100 m/s, 105 - 228 m/s et 242 - 309 m/s

(b) pour ( $r_1/a = 0.225$ ;  $r_2/a = 0.125$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 78 - 93 m/s, 150 - 350 m/s et 365 - 480 m/s

c) pour ( $r_1/a = 0.2$ ;  $r_2/a = 0.1$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" aucune bande

gap.....  
.....

**Fig. 3.7** Courbes de dispersion des fréquences, (a) ( $r_1/a = 0.45$ ;  $r_2/a = 0.35$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 80 - 100 m/s, 105 - 228 m/s et 243 - 309 m/s

(b) pour ( $r_1/a = 0.225$ ;  $r_2/a = 0.125$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 78 - 93 m/s, 150 - 350 m/s et 365 - 480 m/s

c) pour ( $r_1/a = 0.2$ ;  $r_2/a = 0.1$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" aucune bande gap.....

**Fig. 3.8** Courbes de dispersion des fréquences, (a) ( $r_1/a = 0.45$ ;  $r_2/a = 0.35$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 54 - 68 m/s, 101 - 227 m/s et 242 - 309 m/s

**(b) pour ( $r_1/a = 0.225$ ;  $r_2/a = 0.125$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 78 - 93 m/s, 150 - 350 m/s et 365 - 480 m/s**

.....

## INTRODUCTION GENERALE

A l'image des cristaux photoniques qui ont la propriété d'empêcher la lumière de se propager dans certaines gammes de fréquences, il est possible de concevoir des nouveaux matériaux périodiques qui réfléchissent totalement les ondes acoustiques. Ces structures permettent d'élaborer des isolants phoniques bien plus efficaces que les isolants usuels et d'améliorer les caractéristiques acoustiques de certains types de transducteurs utilisés en imagerie médicale par exemple [1]. Pour cela, ces dernières années, la propagation des ondes élastiques dans une structure périodique appelée cristal phononique (PnC) est largement étudiée.

Les cristaux phononiques sont des structures constituées d'assemblages périodiques d'inclusions dans une matrice. Ils sont caractérisés par leur capacité d'orienter, de contrôler et de manipuler la propagation des ondes élastiques et acoustiques. La principale propriété de ces matériaux est l'apparition des bandes interdites. Ces matériaux permettent alors sous certaines conditions géométriques et physiques d'interdire la propagation des ondes acoustiques. Il s'agit alors, comme en physique des solides et des cristaux photoniques, d'un phénomène de bande interdite. Les structures multicouches sont formées par l'empilement d'une série de couches minces avec un décalage d'impédance acoustique important entre les couches consécutives et avec grandes dimensions latérales par rapport à leur épaisseur [2].

Les cristaux phononiques 1D permettent la réflexion sélective des ondes et la génération de bandes interdites, ils peuvent être utilisés pour développer un nouveau type de technologie acoustique résonnante pour l'application dans le domaine de détection. En effet, la propagation des ondes élastiques et acoustiques à travers ces structures sont modulées pour créer des écarts de fréquence qui peuvent être utilisés pour développer différentes applications de détection [3].

Nous présentons dans le premier chapitre, la définition, l'historique, le concept et les propriétés fondamentales des cristaux phononiques/ photoniques ainsi que sur l'origine des bandes interdites en partant des premiers travaux fondateurs de Lord Rayleigh. Un rappel sur la formulation des équations d'ondes, du théorème de Bloch--Floquet et de la zone de Brillouin est également évoqué dans ce chapitre.

Aussi nous présentons dans le deuxième chapitre, Nous décrivons également en détails les différentes configurations de modèles adoptées, tant au niveau du choix des matériaux que des paramètres géométriques. Ainsi, on présentera le modèle de base comme étant un massif en béton avec des cylindres en acier enrobés dans un élastomère représenté par du polychlorure de vinyle (silicium).

Le troisième chapitre est consacré à la description de toutes les phases et toutes les étapes qui constituent l'essentiel de ce travail de thèse. On fera en sorte de souligner dans ce chapitre que toutes les structures étudiées dans toutes les configurations, sont supposées infinies dans leur plan. Cette périodicité infinie dans les deux directions orthogonales du plan, induit implicitement l'application des conditions de Bloch-Floquet aux frontières des cellules de base.

En fin, Une conclusion générale et des perspectives seront portées en fin de thèse.

## CHAPITRE 1

### CRISTAUX PHONONIQUES GENERALITEAPPLICATIONS

## 1.1 Introduction

La recherche sur les cristaux photoniques (pc) a fait de grands progrès au cours ces dernières années, tant au niveau de base qu'au niveau appliqué. Après des recherches au début des années 1990, des cristaux dits (cristaux phononique) sont apparus dans de nombreux domaines. La propagation d'ondes acoustiques ou élastiques dans les milieux hétérogènes dotés d'une structure périodique dans l'espace fait l'objet d'un grand intérêt depuis quelques décennies.

Ce chapitre revient dans sa première partie, sur le concept des cristaux phononiques et leur historique. Les propriétés fondamentales des structures périodiques à travers les conditions d'obtention des bandes interdites de Bragg, ainsi que le choix des matériaux pour les remplir. Quelques rappels généraux sur la propagation des ondes élastiques dans les milieux homogènes sont également évoqués. Aussi nous avons fait une comparaison entre les cristaux phononiques et cristaux photoniques dans ce chapitre. Puis des rappels sur la zone de Brillouin et la bande interdite. Dans l'avant dernière partie du chapitre, en fin par les cristaux phononiques ont fournir des applications dans divers domaines particulièrement dans celui de l'isolation en fin de chapitre. Dans l'avant dernière partie du chapitre, on met en exergue les possibilités et les potentialités offertes par les cristaux phononiques et leurs applications dans divers domaines particulièrement dans celui de l'isolation. Un rappel sur le théorème de Bloch-Floquet et sur la zone de Brillouin est donné en fin de chapitre.

## -1.2 Les cristaux phononiques

### 1.2.1 Historique et concept des cristaux phononiques/photoniques

Historiquement, A partir des années 1970 et pour des raisons aussi fondamentales qu'appliquées, les structures périodiques acoustiques sont apparues. On peut citer par exemple les travaux de L.P. Solie [4] sur les filtres à ondes de surface, ceux de J. D Achenbach [5] concernant le calcul des relations de dispersion de matériaux possédant des inclusions sphériques périodiques ou encore ceux de V. Narayanamurti [6] relatifs à des filtre phononiques utilisant des super réseaux en arséniure de gallium (AsGa). Au début des années 1990, devenues de plus en plus intéressantes par la communauté des opticiens pour des

matériaux composites formés des structures périodiques de diffuseurs diélectriques, appelées cristaux photoniques.

Les cristaux phononiques forment alors une nouvelle voie dans le domaine des ondes acoustiques et élastiques qui reçoit un grand intérêt depuis 20 ans [5].

Le concept de cristal phononique, bi- ou tridimensionnel permettant l'ouverture de bandes interdites pour les ondes élastiques, a été introduit de façon quasiment simultanée par Kushwaha et al. [7] d'une part, et Economou et Sigalas [8] d'autre part en 1993.

Concernant l'application, les cristaux phononiques ont été utilisés en plusieurs systèmes : structures antivibratoires ou encore transducteurs. D'autres applications évidentes sont rapidement envisagées : systèmes d'isolation phonique [9,10] structures parasismiques [8], filtrage et traitement du signal acoustique. S.M. Kushwaha publie un article présentant le calcul de la structure de bandes d'un matériau composite périodique constitué de cylindres de nickel dans une matrice d'aluminium. Il met ainsi en évidence, pour la première fois, un matériau composite présentant une bande interdite absolue pour les ondes transverses, c'est-à-dire capable de bloquer la propagation des ondes incidentes quelle que soit leur direction [5].

### 1.2.2 Définition d'un cristal phononique/photonique

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont le constant diélectrique est modulable de façon périodique. La périodicité peut être unidimensionnelle (miroir de Bragg), bidimensionnelle ou encore tridimensionnelle (Fig. 1.1). Une bande interdite photonique s'ouvre dans une ou plusieurs directions de l'espace selon les cas.

Les cristaux phononiques (CP) forment une branche nouvelle et dynamique dans le domaine des ondes sonores et élastiques, qui a suscité un grand intérêt pour certains

Année. [5]

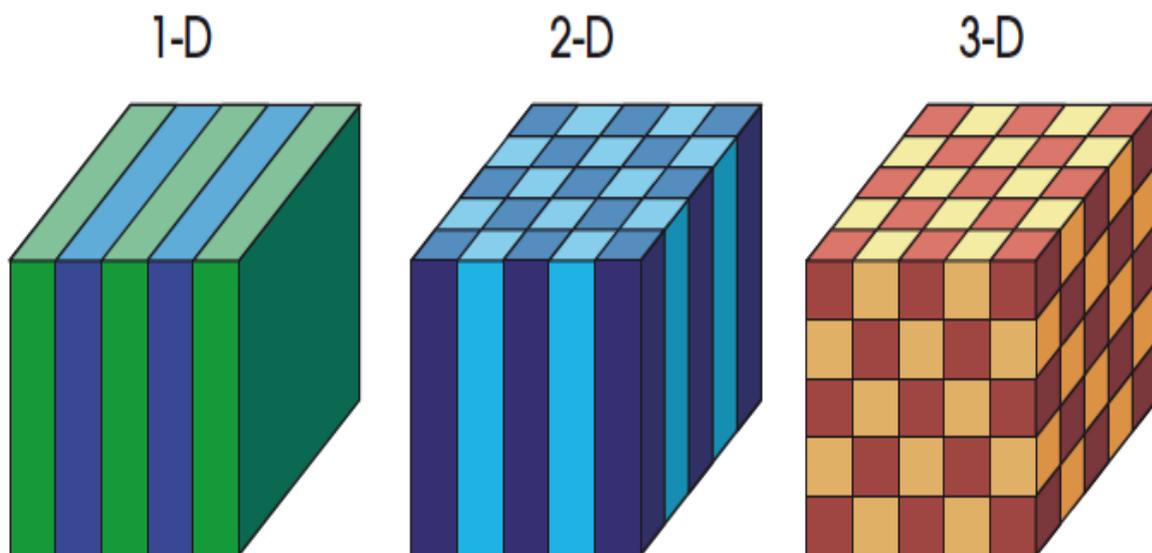
Les diverses bandes élastiques consistent généralement en une répartition périodique d'inclusions ou Éditeurs intégrés à la matrice.

Ces nouveaux matériaux sont appelés cristaux Les phononiques sont principalement conçus pour moduler la propagation des ondes sonores ou

élastique de la même manière que le potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur

Il affecte le mouvement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites. Les Constitués de sa structure périodique, les cristaux phononiques sont également appelés cristaux acoustiques Il peut apparaître, dans certaines conditions techniques et physiques. Dans cette image Exemples de Structures périodiques à deux constituants organisées 1D ,2D et 3D.

**Figure 1.1** – représentation schématique des cristaux phononiques 1D, 2D, et 3D [4]



#### 1.2.3.1- CRISTAUX PHONONIQUES UNIDIMENSIONNELS

Les structures à cristaux phononiques unidimensionnels sont les plus anciennes, elles ont été déjà longuement étudiées et utilisées comme miroirs ou filtres acoustiques. D'un point de vue pratique, les structures à une dimension (1D) sont constituées de couches élastiques empilées les unes sur les autres suivant une alternance périodique.

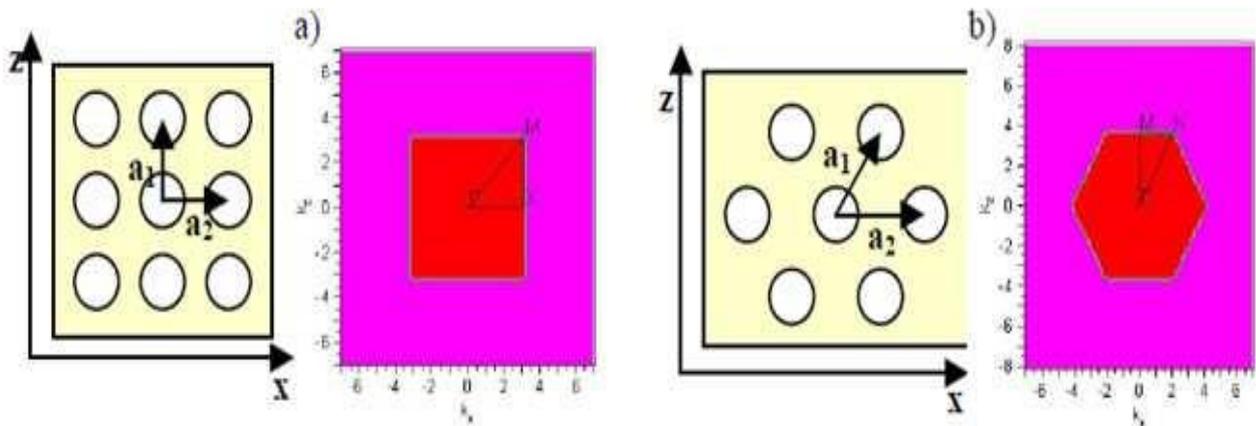
Les bandes interdite de cette structure(1D), appelées miroir de Bragg, sont sensibles à l'angle d'incidence de l'onde. Afin de maîtriser les bandes interdites quel que soit l'angle

de chute, il est nécessaire d'étendre la patrouille de la structure à deux voire à trois dimensions.

### 1.2.3.2 CRISTAUX PHONONIQUES BIDIMENSIONNELS :

A deux dimensions, les cristaux phononiques sont composés d'un réseau périodique des inclusions d'un matériau élastique dans l'air ou de cylindres d'air percés dans une matrice. Les cristaux phononiques bidimensionnels 2D [5,9] sont des structures dont les propriétés élastiques varient périodiquement suivant deux dimensions de l'espace et reste invariante dans la troisième dimension. Elles se regroupent principalement suivant trois types de réseaux qui sont le réseau carré, le réseau triangulaire et le réseau hexagonal. La figure 1.4, présente ces deux réseaux avec leurs zones de Brillouin respectives.

**Figure 1.2** a) Réseau carré et sa zone de Brillouin associée, b) Réseau triangulaire et sa Zone de Brillouin associée.



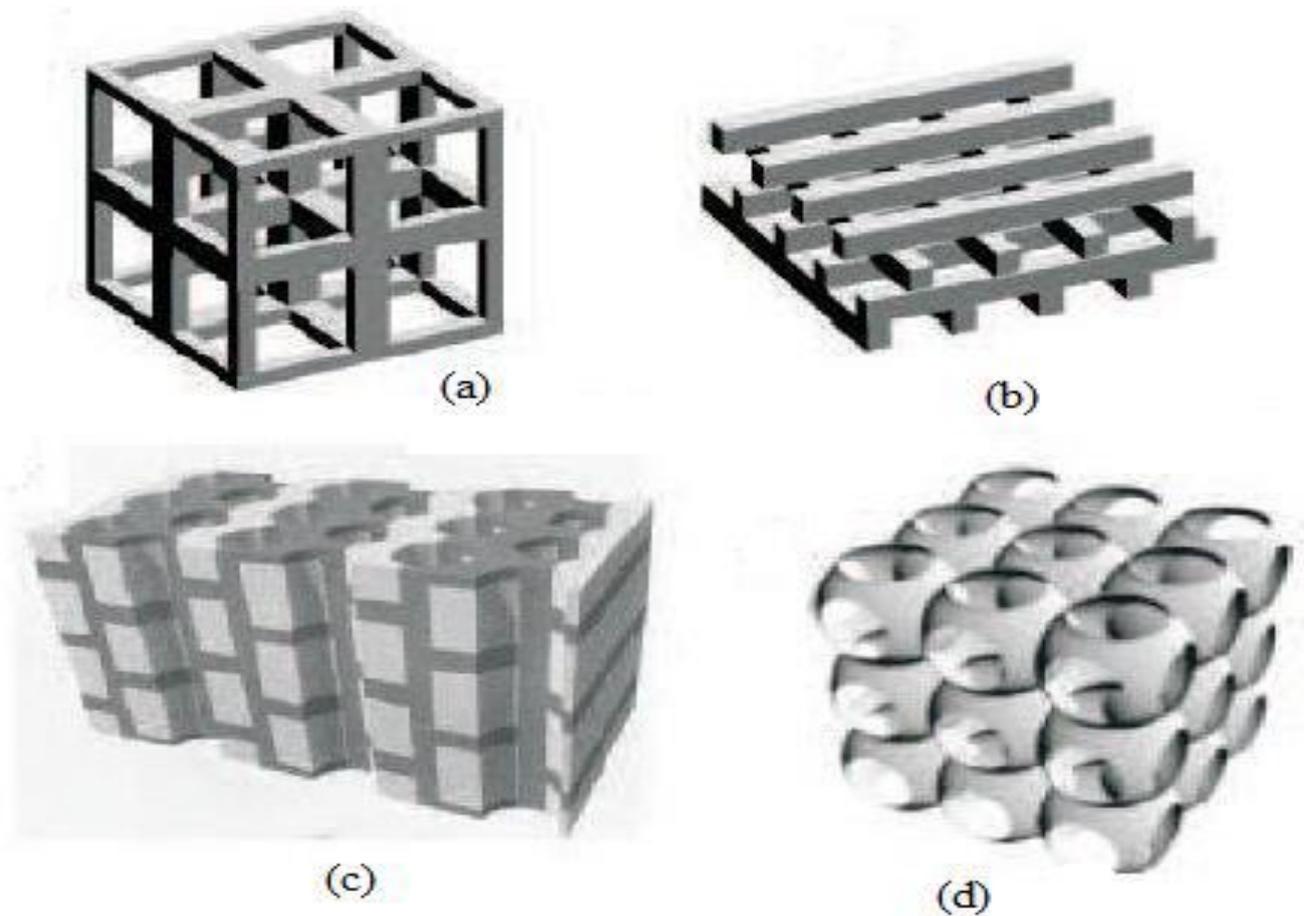
### 1.2.3.3 les cristaux phononiques tridimensionnelles

Les cristaux acoustiques 3D sont des structures artificielles

Périodiques qui suivent les trois directions de l'espace. Par contre, dans les structures 2D et 3D il est possible d'obtenir des bandes absolument interdites ou omnidirectionnelles, c'est-à-dire qu'une onde incidente de fréquence appartenant à une telle bande interdite ne peut se propager quel que soit son angle. Malheureusement, l'inconvénient des structures 3D est qu'elles peuvent être difficiles à réaliser expérimentalement.

La figure 1.3 montre quelques exemples de structure tridimensionnelle.

**Figure 1.3** : Exemples de structures 3D : structure cubique (a), tas de bois(b), structure multicouches (c), opales ou opales inversées(d) [7].



#### 1.2.4 –COMPARAISON ENTRE CRISTAUX PHONIQUES ET PHOTONIQUES:

Les cristaux acoustiques sont des structures périodiques. Cependant, il existe de fortes similitudes entre la diffusion des électrons

Dans les cristaux ordinaires (semi-conducteurs) la propagation des ondes électromagnétiques est élastique respectivement dans les cristaux optiques et acoustiques respectivement. Le tableau 1.1 résume les propriétés fondamentales qui

régissent la propagation des ondes électroniques, électromagnétiques et élastiques dans une structure périodique tridimensionnelle isotrope [5].

**Tableau 1.1.** Propriétés clés pour l'étude des structures de bandes dans les matériaux tridimensionnels isotropes [5].

propriétés	Cristal <i>électronique</i>	Cristal <i>photonique</i>	Cristal <i>phononique</i>
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	$w \leq qq \text{ GHz}$

Les propriétés des cristaux acoustiques et des cristaux acoustiques sont similaires, en tout cas il y a une légère différence entre eux. Les cristaux photoniques peuvent être décrits par deux paramètres indépendants, à savoir le rapport de la fraction isolante et de la fraction le volume occupé par l'un de ces composants ; Ensuite pour plusieurs

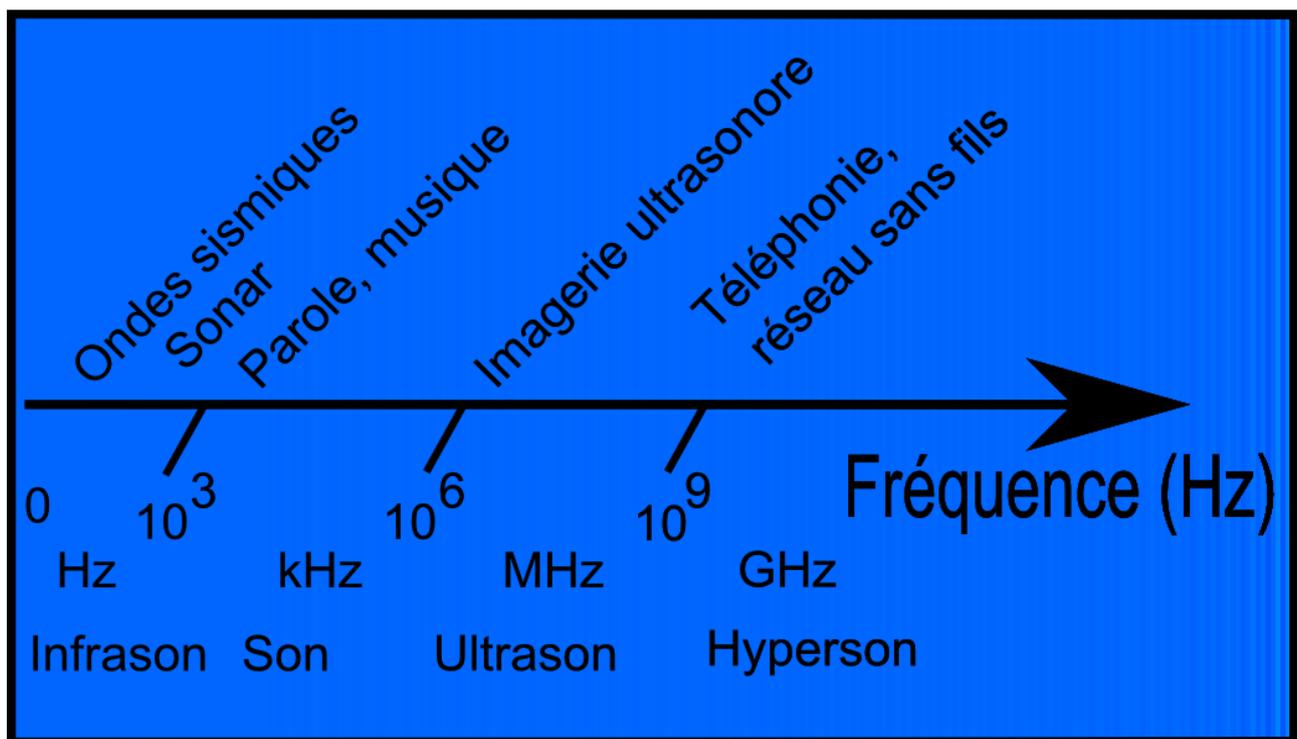
cristaux acoustiques les paramètres peuvent déterminer la propagation des ondes élastiques ou acoustiques. [6]

### 1.3 Propagation des ondes élastiques/ acoustique

#### 1.3.1 ondes élastiques et acoustiques

Les ondes élastiques et acoustiques font partie de notre environnement, Les ondes sonores se propagent dans l'atmosphère, elles sont utilisées dans des domaines aussi bien diversifiés tels que l'imagerie échographique du corps humain, la détection et la localisation d'objets sous-marins (le sonar, l'étude des séismes et dans la téléphonie mobile. Le schéma ci-dessous indique les principales applications des ondes sonores, acoustiques et élastiques en fonction de la fréquence des signaux employés (figure 1.4)

**Figure 1.4** Domaines fréquentiels des ondes élastiques [7]



La propagation d'une onde acoustique se traduit par des vibrations progressives des atomes composant le milieu élastique.

#### 1.3.2 Cristaux phononiques à résonance locale

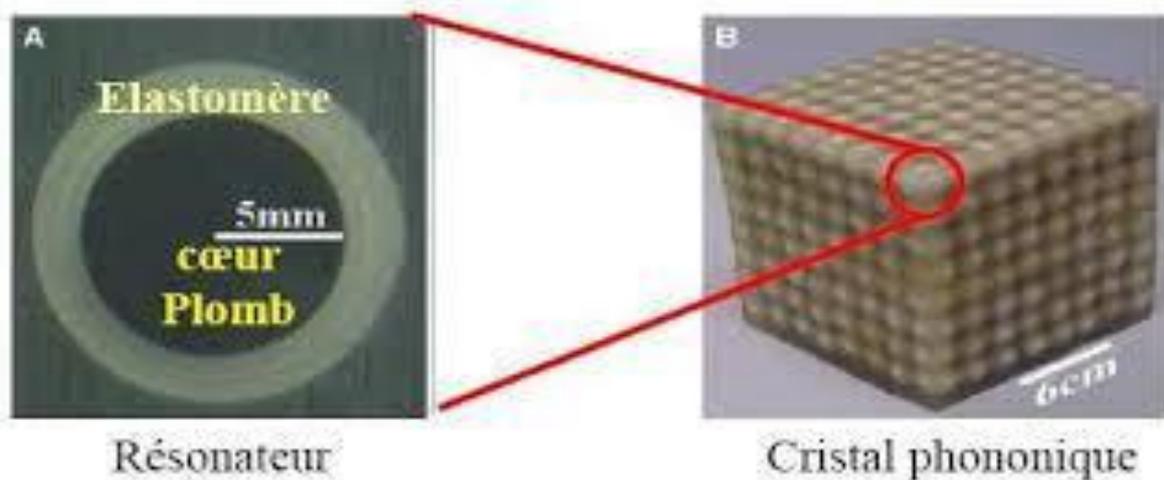
en 2000, Liu et al ont mis en œuvre une nouvelle structure phononique aux propriétés dispersives qui sortent de l'ordinaire. Sur le mécanisme de Bragg ils comparée les autre cristaux phononiques classiques. Liu et al ont montré qu'il y a une bande interdite pour

des ondes ayant une longueur d'onde largement supérieure à la périodicité du cristal, lequel comportement est dû au phénomène de résonance locale. Les longueurs d'ondes associées à ces gaps présentent alors un ordre de grandeur équivalent au paramètre de maille du cristal. Ces matériaux très particuliers que sont les cristaux phononiques à résonances locales ou Méta matériaux. [11]

### 1.3.3 Ouverture des bandes interdites par résonance locale :

Dans le CP conçu par Liu *et al*, les éléments de périodicité sont constitués de résonateurs ayant des modes de résonance propres qui se situent à de très basses fréquences en raison de l'utilisation d'un matériau très mou. Chaque résonateur est constitué d'un cœur massif en plomb enrobé par un élastomère élastiquement très mou, comparé aux autres matériaux constituant le CP. Ces résonateurs sont arrangés périodiquement suivant une structure cubique simple dans une matrice en époxy (figure 1.5).

**Figure.1.5** (A) résonateur sphérique constitué d'un coeur en plomb enrobé par un élastomère très mou. (B) Cristal phononique tridimensionnel à résonance locale conçu par Liu et al. [12]



### 1.4.1 Cristaux phononiques à bandes interdites de Bragg :

La propagation d'ondes acoustiques ou élastiques dans des milieux hétérogènes composés d'une structure périodique a fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières

années. Par conséquent, un grand nombre de structures périodiques ont été étudiées et de nombreuses approches théoriques ont été utilisées. Toutes ces méthodes et techniques ont démontré l'existence de propriétés physiques telles que la présence de bandes sonores interdites à des fréquences (band gap) correspondant à une bande passante à forte atténuation et à faible atténuation. [13].

L'étude de la propagation des ondes dans les structures périodiques est un champ d'investigations commun à plusieurs domaines de la physique, a permis de mettre évidence des angulaires et des différences. Dans ce tableau 1.2 On remarque la propagation des ondes d'après référence [14]

Le principe de base de l'émergence des bandes interdites de toute nature (électronique, électromagnétique ou encore élastique) est la diffraction de la loi de Bragg.

#### 1.4.2 Loi de Bragg :

En 1913, W.H. et W.L. Bragg établissent la loi dite de Bragg [14], basée sur l'observation de la diffraction des rayons X sur un cristal, mais pouvant s'appliquer plus généralement à la diffraction d'une onde plane dans un milieu périodique. Si on considère que le cristal est un arrangement périodique d'atomes, les rayons X qui frappent chaque atome avec une phase (ou un chemin optique) différente subissent une diffusion (dite de Rayleigh) : il y a réémission d'ondes de même fréquence. Si la distance entre les atomes respecte la loi de Bragg, énoncée sous la forme :

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

Où :  $n$  : est un entier naturel.

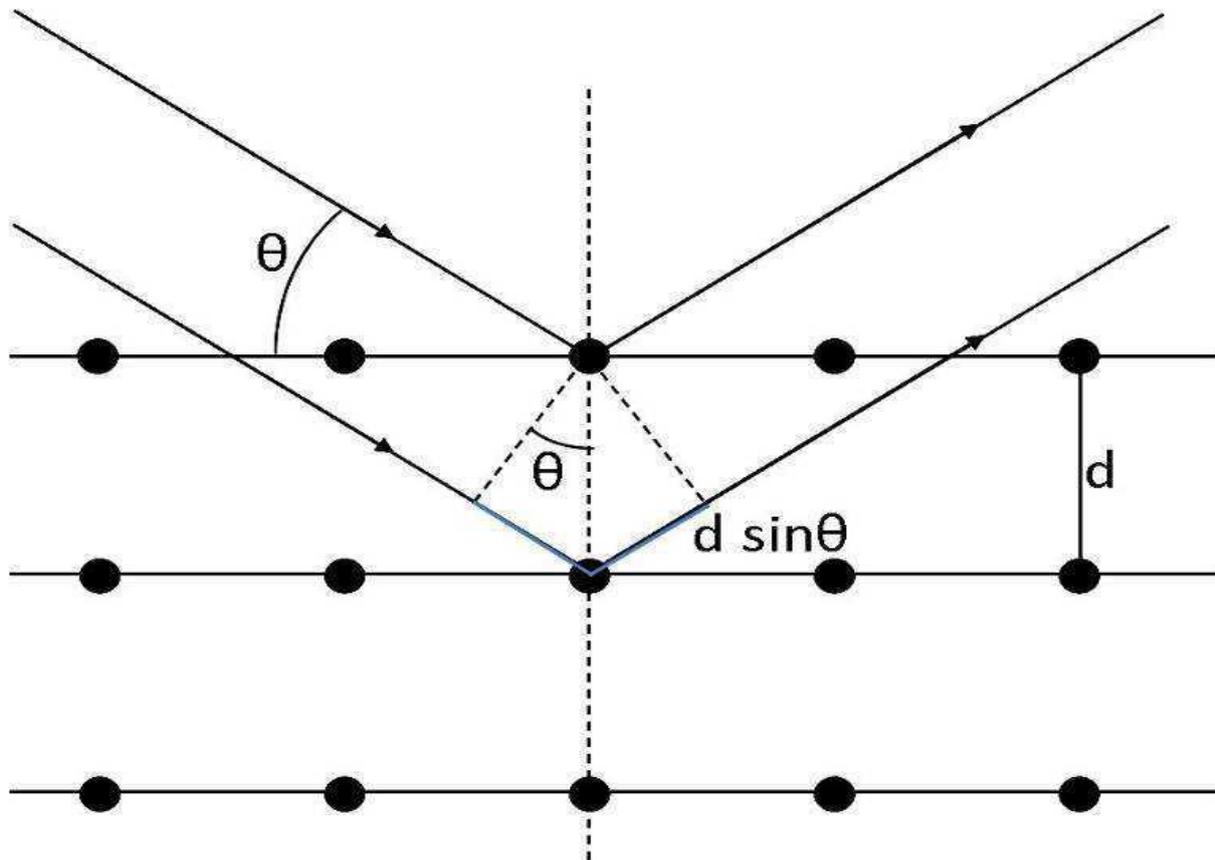
$\lambda$  : la longueur d'onde.

$d$  : la distance entre deux plans cristallographiques

$\theta$  : 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 1-1.

Figure 1-6 : schéma expliquant la loi de Bragg



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 (1-1).

#### 1.4.3 La notion de bande interdite :

Idée de bande interdite il peut avoir certaines bandes de fréquences dans lesquelles  $k$  prend des valeurs complexes ou imaginaires, et l'onde ne se propage pas, elle est atténuée. Ces bandes de fréquences sont appelées bandes interdites. Lorsqu'elles existent quelle que soit la direction de propagation, on parle de bandes interdites multidirectionnelles. Dans le cas des champs vectoriels, cette bande est dite sienne complète ainsi qu'elle existe quelle que soit la polarisation.

## 1.4. STRUCTURE DE BANDES INTERDITES et STRUCTURE CRISTALLINE

Déterminer la structure de bande interdite d'un cristal acoustique bidimensionnel, c'est trouver la correspondance entre l'énergie et le vecteur d'onde en tout point de la première région de Brillouin

### 1.4.1. ESPACE REEL ET ESPACE RECIPROQUE

A toute structure cristalline est associée deux réseaux : le réseau direct et le réseau réciproque. Une figure de diffraction d'un cristal est une carte du réseau réciproque du cristal, quand nous faisons subir une rotation, nous faisons subir la même rotation au réseau direct et au réseau réciproque [6].

Si,  $a, b, c$  et sont les vecteurs primitifs du réseau cristallin, un nœud de ce réseau est repéré par un vecteur  $\vec{r} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$  tel que :  
**(1.1)**

Et si  $A, B, C$ , sont les vecteurs primitifs du réseau réciproque, un nœud de ce réseau est repéré par un vecteur tel que :

$$\vec{G} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C} \quad (1.2)$$

Ou  $u, v, w$  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 :

$$\vec{a} \cdot \vec{A} = 2\pi, \vec{b} \cdot \vec{B} = 2\pi \quad \text{et} \quad \vec{c} \cdot \vec{C} = 2\pi$$

Avec :

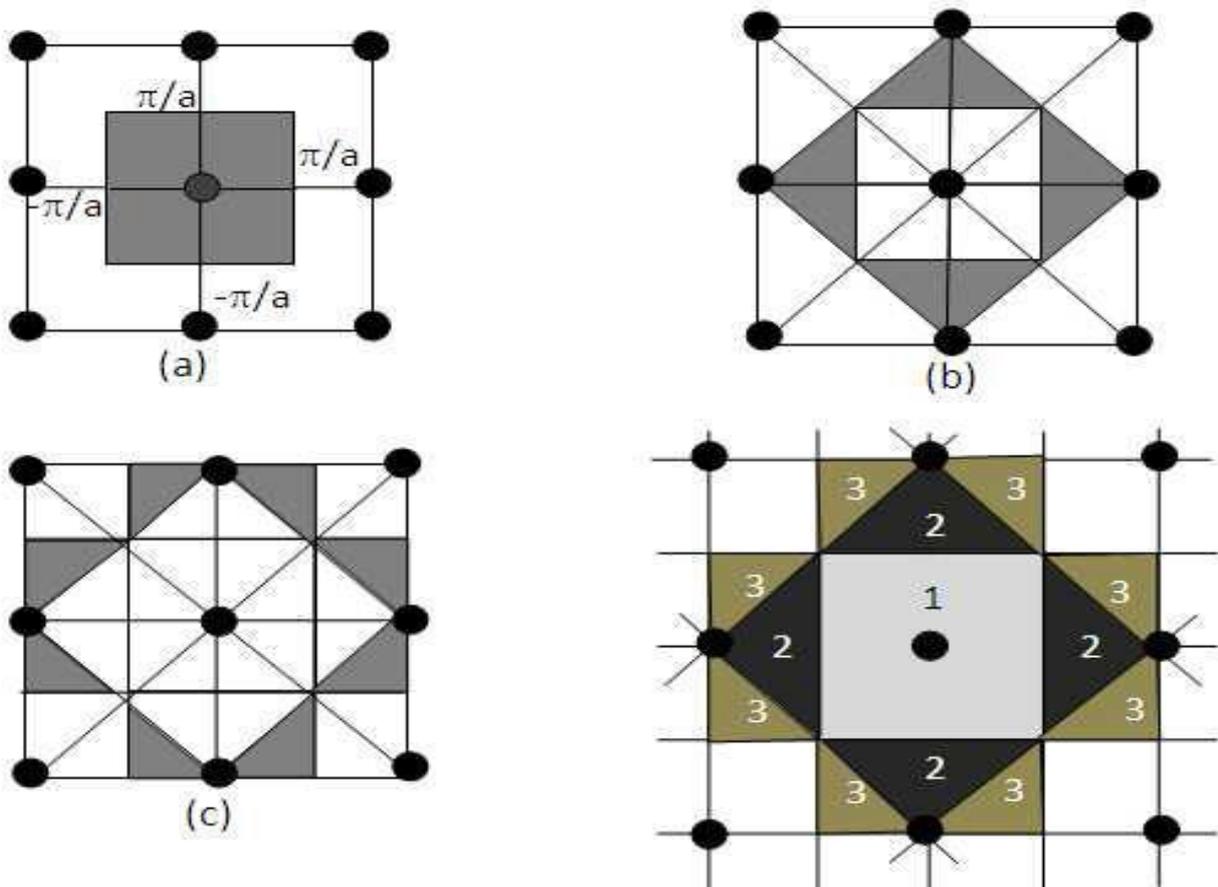
$$\vec{A} = \frac{2\pi}{V}(\vec{b} \times \vec{c}), \vec{B} = \frac{2\pi}{V}(\vec{c} \times \vec{a}) \quad \text{et} \quad \vec{C} = \frac{2\pi}{V}(\vec{a} \times \vec{b}) \quad \text{avec} \quad V = (\vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}). \quad (1.3)$$

Le facteur 2 n'est pas utilisé par les cristallographes mais il est pratique en physique du solide. Les vecteurs du réseau cristallin (direct) ont les dimensions d'une [longueur] ; les vecteurs du réseau réciproque ont les dimensions d'une [longueur]<sup>-1</sup>.

### 1.4.2. 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 l'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 joignant un site du réseau réciproque à tous les sites voisins, puis on dessine les plans bissecteurs perpendiculaires à ces vecteurs. Le volume le plus petit autour du site choisi limité par ces plans est appelé la première zone de Brillouin. Nous pouvons construire les zones supérieures de Brillouin de la même manière, la 1<sup>ème</sup> zone de Brillouin est l'espace limité d'une part par les plans bissecteurs perpendiculaires aux vecteurs joignant le site à l'origine aux 1<sup>ères</sup> sites voisins et d'autre part les plans bissecteurs des zones de Brillouin inférieures.

La figure II.10 montre les premières zones de Brillouin du réseau réciproque dans le cas d'une structure carrée [5]. Figure 1.7 : (a) 1<sup>ère</sup>, (b) 2<sup>ème</sup>, (c) 3<sup>ème</sup> zone de Brillouin d'un réseau carré [5].

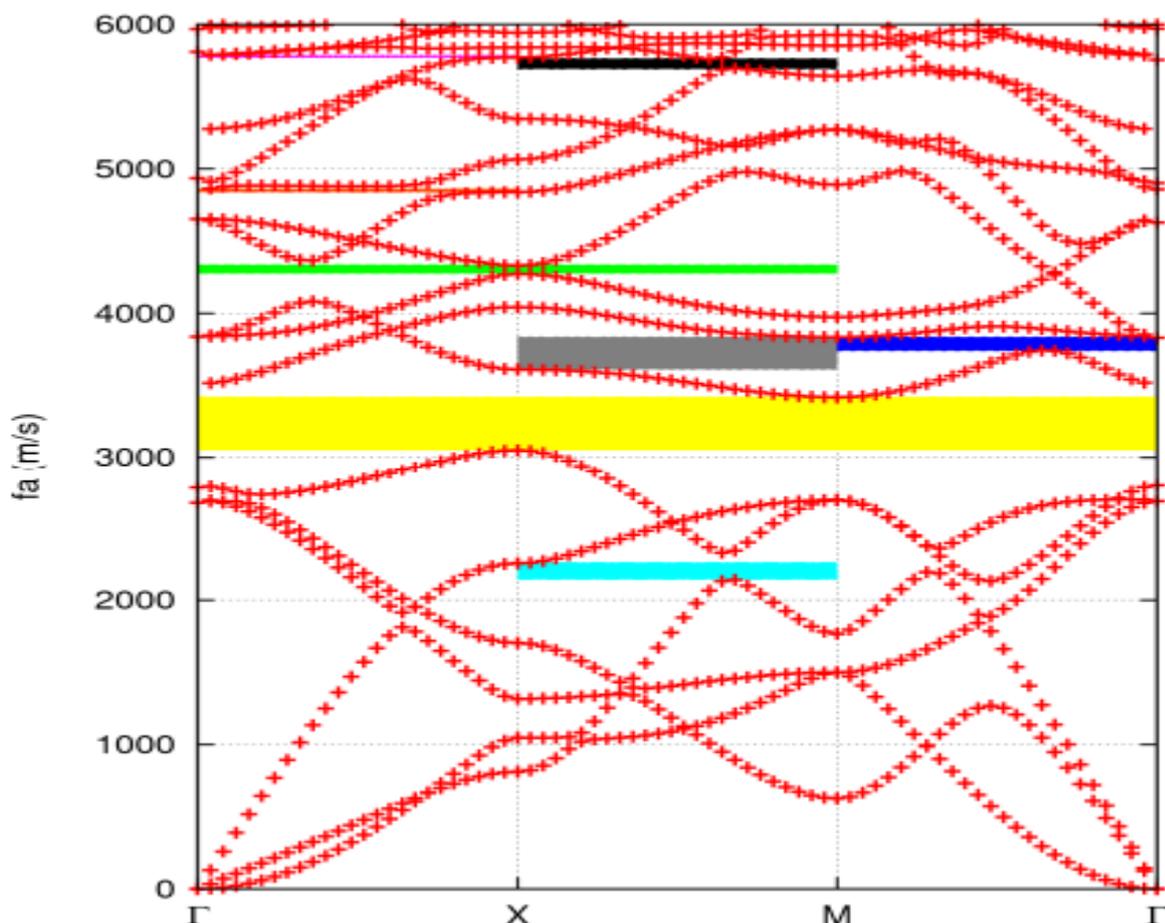


### 1.5.1. DIAGRAMMES DE BANDES :

Les diagrammes de bandes sont parmi les outils les plus utilisés pour illustrer les propriétés de propagation d'une onde acoustique ou élastique au sein des cristaux. Le comportement des ondes dans la zone irréductible de Brillouin pour décrire entièrement le comportement des ondes dans un milieu périodique. On peut donc se contenter de tracer les courbes de dispersion pour différentes orientations en faisant varier le nombre d'onde entre 0 et l'extrémité de la zone irréductible de Brillouin dans la direction

concernée. Les conditions de périodicité créent, de plus, des bandes d'arrêt, ce qui se traduit par un décalage en fréquence des repliements. Un exemple de diagramme de bandes, calculé avec la méthode des éléments finis pour un cristal de maille carrée, constitué de trous d'air percés dans une membrane AlN /SiO<sub>2</sub>, est présenté sur la Figure 1.6

**Figure 1.8** : diagramme de bandes d'un cristal phononique constitués de trous D'airs percés dans une membrane AlN/SiO<sub>2</sub>, avec un remplissage de 60 % [15].



Ces alias, symétries et interférences de Bragg induisent des bandes interdites dans les cristaux acoustiques, qui sont des bandes de fréquences auxquelles les ondes dans le cristal acoustique s'estompent. Ces bandes interdites, ou bandes d'arrêt, correspondent ainsi à des bandes de fréquences dans lesquelles le coefficient de réflexion à l'entrée du cristal acoustique est proche de 1.

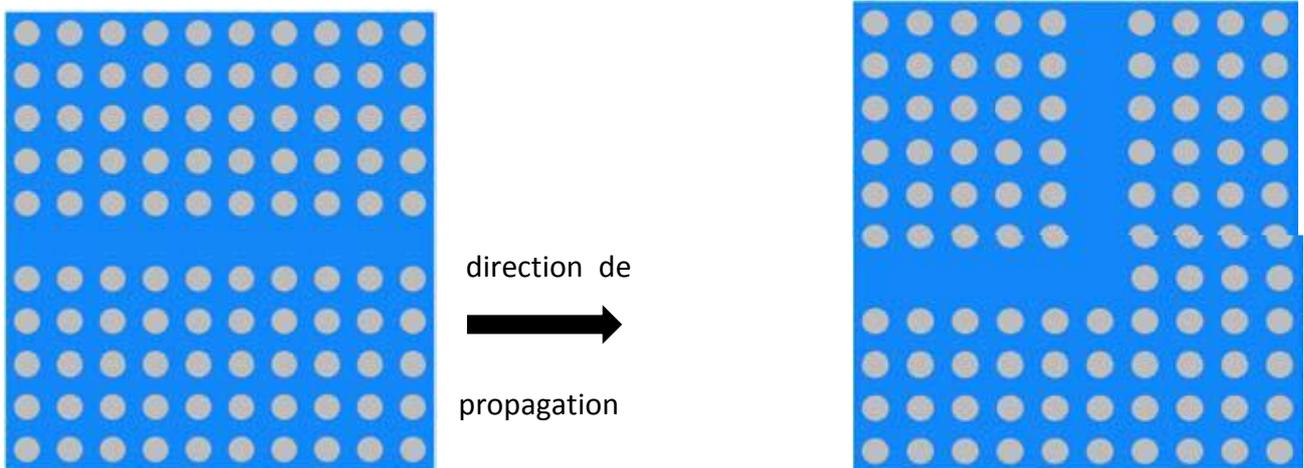
### 1.6 Application des cristaux phononiques

De nombreuses applications des cristaux phononiques sont mis en évidence, parmi ces applications on peut citer :

#### 1.6.1 Guides d'ondes :

Il est possible de réaliser à partir d'un cristal phononique 2D des guides d'ondes simples ou complexes par la suppression ou la modification d'une simple rangée d'inclusions cylindriques selon la direction de propagation.[15]

**Figure 1.9** : Guides d'ondes phononiques linéaire et coudé



(a) Guide d'onde linéaire  
coudé

(b) Guide d'onde

Des guides droits W1 ont ainsi été réalisés dans le cristal 2D par suppression d'une rangée d'inclusions cylindriques colinéairement à la direction de propagation [16]. En effet, si on enlève ou on modifie une ligne d'inclusions dans le sens de propagation, on s'attend à ce que les ondes, bloquées dans le cristal parfait, soient guidées par ce défaut dans laquelle peuvent se propager. Khélif nous confirme en 2004 que c'est

effectivement le cas [17,18], appuyé par le bilan dressé par Miyashita [19]. En utilisant un montage assez simple constitué de cylindres d'acier immergés dans l'eau et organisés selon une maille carrée, il montre que l'omission d'une ligne de cylindres provoque, dans la bande d'arrêt, une remontée de la transmission à certaines fréquences. L'expérience est en accord avec le calcul théorique (réalisé en FDTD) qui prédisait l'apparition d'un mode guidé dans le défaut, localisé à l'intérieur de la bande d'arrêt. Le calcul de la distribution de pression dans l'eau indique aussi que l'onde est rapidement atténuée dans le cristal phononique, mais qu'elle se propage correctement dans la ligne de défauts créée.

#### 1.6.2 - Exemples de réalisations expérimentales :

Les premières mesures ont été réalisées sur une structure objectivement non prévue pour cela, puisqu'il s'agit d'une sculpture minimaliste de l'artiste Eusebio Sempere exposée dans les jardins de la Juan March Foundation à Madrid. Cette sculpture représentée sur la figure 1.8 est constituée de cylindres d'acier de 2,9 cm de diamètre répartis selon un réseau carré simple de période égale à 10 cm. La structure présente des bandes interdites pour les ondes sonores entre 1,7 KHz et 2,4 kHz. Ces atténuations du signal sont reliées à la diffraction sur les plans cristallographiques [20].

**Figure 1.10** : Sculpture minimaliste de l'artiste Eusebio Sempere, qui a servi de support à la première démonstration expérimentale de bandes interdites pour les ondes élastiques



Cette œuvre d'art moderne de E. Sempere représente un cristal phononique à deux dimensions de tiges d'acier d'un diamètre de 2,9 cm disposées en réseau carré avec une période égale à 10 cm [20].

Cette structure n'admet toutefois que des bandes interdites partielles c'est à dire des fréquences interdites uniquement dans certaines directions de l'espace. Or les cristaux phononiques sont considérés comme étant des structures ayant la possibilité de présenter des bandes interdites absolues donc dans toute direction de l'onde incidente.

### 1.7 Conclusion :

Les cristaux phononiques sont des structures périodiques présentant des propriétés acoustiques très importantes. Ils sont le sujet de nombreux travaux de recherche et suscitent beaucoup d'intérêt dans le cadre de l'isolation phonique et l'imagerie médicale par exemple. En effet, cette périodicité est l'origine de l'ouverture d'une bande interdisant la propagation des ondes acoustiques dans le cristal. C'est cette propriété qui nous intéresse et que nous voulons de mettre en évidence. Tout d'abord, nous avons présenté les cristaux phononiques en commençant par quelques concepts fondamentaux : tels que les différentes classes des cristaux phononiques ainsi que les structures cristallines 1,2 et 3D différentes. Puis, nous avons expliqué les bandes d'arrêt des cristaux phononiques et l'influence de quelques paramètres sur les propriétés de ces bandes. Et leur application de cristaux phononique.

## **Chapitre 2**

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

## 2.1 introduction

Depuis près d'une décennie, plusieurs ouvrages ont fait l'objet d'études de propagation des ondes par simulations numériques afin de proposer des fondations périodiques susceptibles d'éviter la propagation des ondes sismiques dans les superstructures. En utilisant la théorie de l'élastodynamique et le théorème de Bloch-Floquet, ces structures présentent un phénomène de bande interdite absolue ou omnidirectionnelle, quelle que soit la direction de l'onde incidente.

Dans ce chapitre on va commencer à définir le choix des modèles que nous nous proposons d'étudier dans cette thèse, en expliquant autant que possible, notamment par des figures, les différentes phases par lesquelles nous sommes passés. Nous décrivons également les étapes de modélisation par Comsol Multiphysics, qui nous a permis d'aboutir aux résultats finaux. En fin, nous donnerons un exemple de résultat de simulation sous forme d'une courbe de dispersion en fréquence et d'un spectre de transmission en fréquence.

## 2.2 Présentation du logiciel - Comsol Multiphysics-

Le logiciel Comsol Multiphysics 3.4, anciennement appelé FEM Lab est utilisé pour la simulation des différents modèles proposés à partir d'une analyse 2D dans le module : mécanique des structures.

Ce logiciel est un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) par éléments finis, sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser divers phénomènes physiques, tels que la déformation des matériaux, l'écoulement des fluides ou l'électrostatique électrostatique [17].

Ce logiciel permet d'effectuer différents types d'analyses, notamment :

\*Analyse modale

\*Analyse stationnaire et temporelle

\*Analyse linéaire et non linéaire

Pour résoudre les EDP, Comsol Multiphysics utilise la méthode des éléments finis. Le logiciel effectue une analyse par éléments finis avec adaptation du maillage et contrôle d'erreur Contrôle des erreurs en utilisant différentes variétés de solveurs numériques.

Dans la description de cette base mathématique et numérique se trouve dans le manuel de l'utilisateur de guide d'utilisation de Comsol Multiphysics et le guide de modélisation de Comsol Multiphysics.

### 2.3 - Modélisation par éléments finis sous Comsol Multiphysics

Dans cette thèse les modèles étudiés et utilisés à partir de logiciel Comsol Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis (FEM) sont :

- Des équations aux fréquences propres
- Dérivées partielles PDE (Partial Differential Equations)

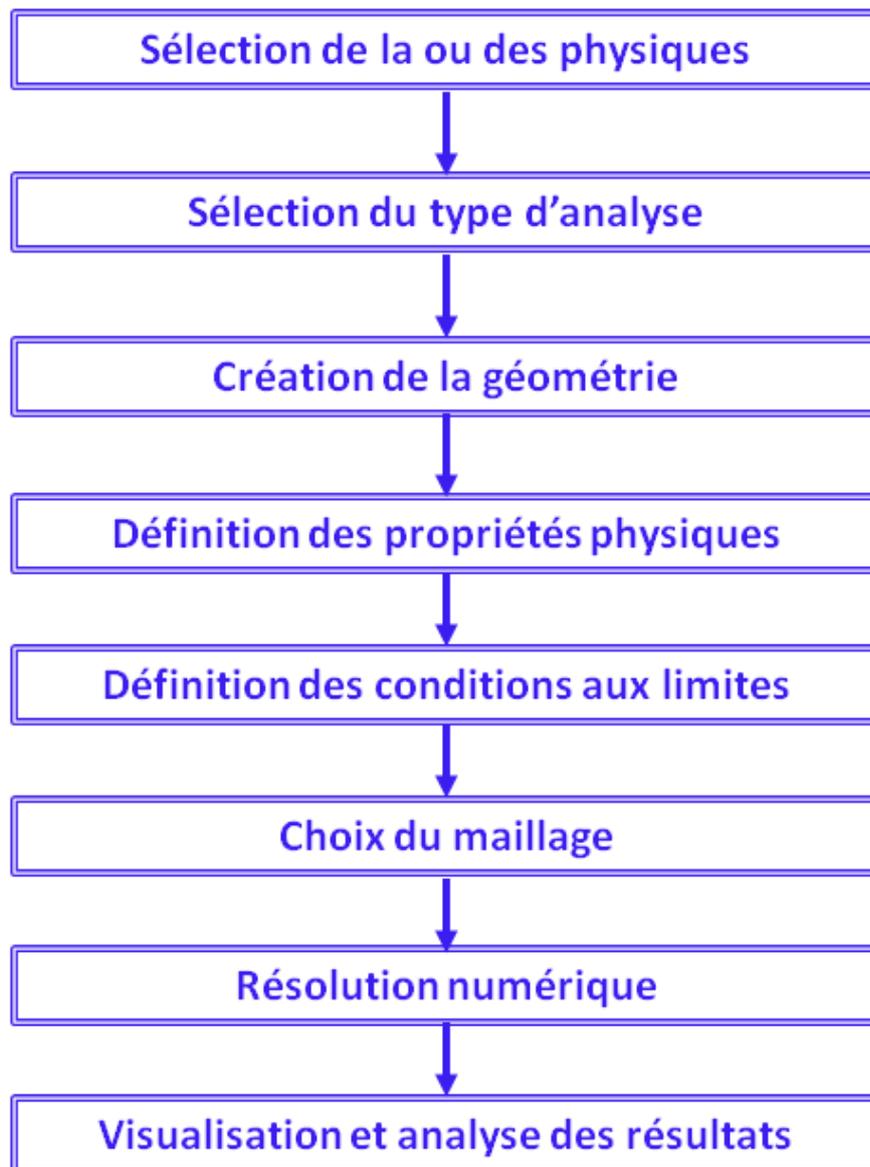
Ensuite Les équations de mouvements sont transformées afin qu'elles puissent être implémentées dans le logiciel.

Et enfin, les structures des bandes les structures de bandes sont calculées en utilisant l'analyse en fréquences propres (Eigenfrequency analysis) proposée dans le modèle utilisé.

Le théorème de Bloch c'est le théorème qui détermine le domaine de résolution à une cellule élémentaire du cristal phononique.

Dans la figure 2.1 présente les étapes séparées par La résolution et l'analyse complète d'une structure périodique par la méthode des éléments finis sous Comsol Multiphysics.

**Figure. 2.1** Les étapes suivies dans Comsol Multiphysics pour l'analyse d'un modèle



La première étape de notre conception de la simulation sur Comsol consiste à choisir la physique adaptée à notre problème, le choix est porté sur la structure mécanique 3D, en suite le calcul des fréquences et modes propres est obtenu par une analyse en fréquences propres (Eigenfrequency).

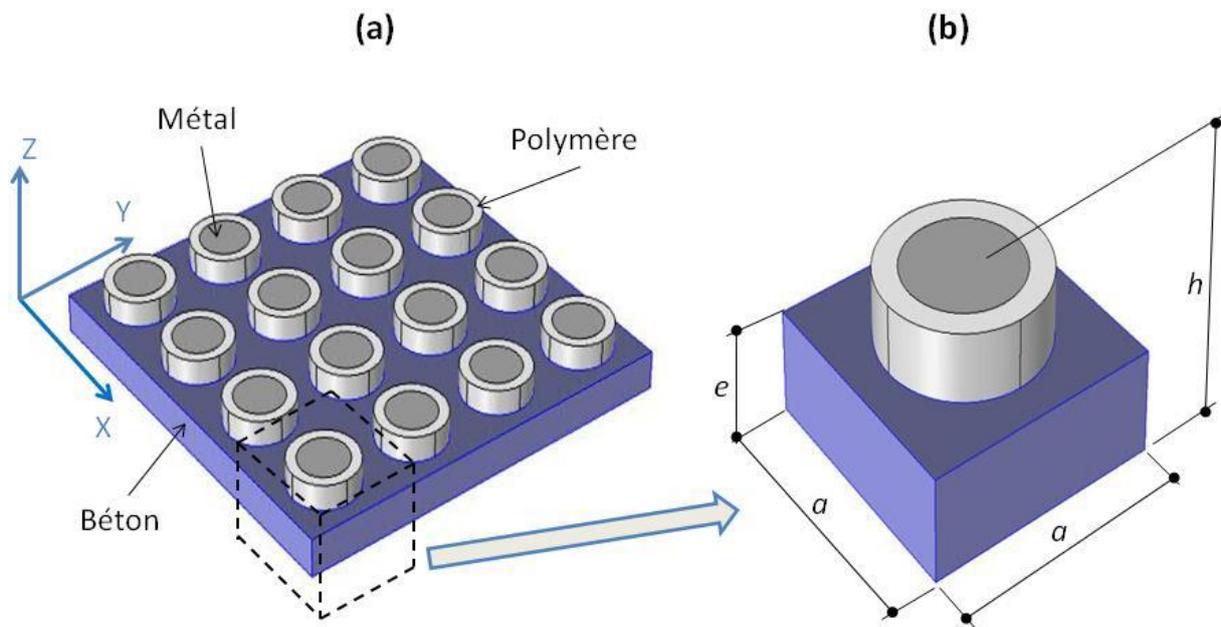
Les autres étapes de la simulation seront écrites dans la section 2.4

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

2.4.1 - Choix de la cellule de base - Modèle numérique :

Après la première étape qui consiste à choisir la physique adaptée et la structure mécanique 3D, on a commencé le travail sur une cellule de base comme il est présenté sur la figure 2.2 (b) en utilisant les conditions limite de Bloch-Floquet aux limites de la cellule [18].

**Figure. 2.2 (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



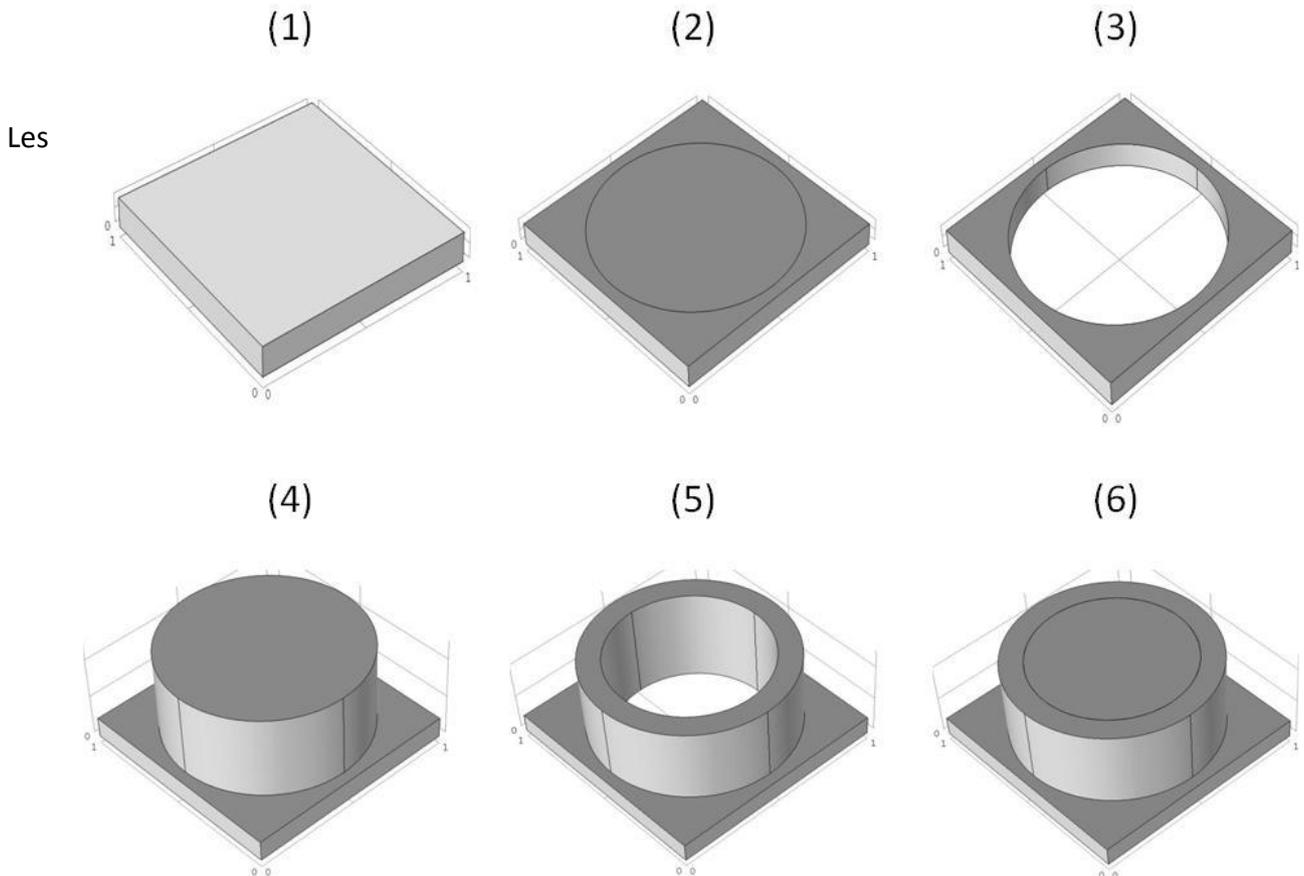
Au début, nous définissons les formes et les dimensions géométriques qui composent le modèle de base selon les étapes montrées dans la figure 2.3

Nous pouvons même entrer :

- Des géométries paramétrées afin de faciliter

- Le balayage d'une large gamme de paramètre (dimension) possible à notre géométrie.
- Paramètre que nous avons effectué lors des opérations de mappage des écarts.

**Figure. 2.3** Différentes étapes pour la conception géométrique d'un modèle



Cellules élémentaires sont constituées de trois sous domaines :

- le massif de béton.
- le noyau métallique
- l'élastomère.

#### 2.4.2 - Implémentation des équations

Grâce aux simulations Comsol Multiphysics, plusieurs équations sont produites et qui nous permettent de les utiliser, Nous utilisons une loi dynamique simple pour décrire le mouvement de Propagation d'une onde harmonique dans un milieu isotrope. Extraire la relation suivante :

$$F = -p\omega^2 ui = \partial T_{ij} \partial X_j \quad (2.1)$$

Sache que :  $\rho$  : masse volumique ,  $U_i$  : le champ de déplacement

$\Omega$  : fréquence angulaire ,  $T_{ij}$  : tenseur des contraintes

$X_j$  : vecteur coordonnées dans le repère cartésien

Sur la base de la loi de Hooke l'équation du tenseur des contraintes  $T_{ij}$  est écrite :

$$T_{ij} = C_{ijkl} \times S_{kl} \quad (2.2)$$

Où  $C_{ijkl}$  est le tenseur d'élasticité.

Aussi En appliquant la loi d'Einstein pour la répétition des indices, la loi de Hooke entre les contraintes et les déformations peut se réécrire avec les coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$  sous la forme :

$$T_{\alpha} = C_{\alpha\beta} \times S_{\beta} \quad (2.3)$$

#### 2.4.3 - Conditions aux limites (CL)

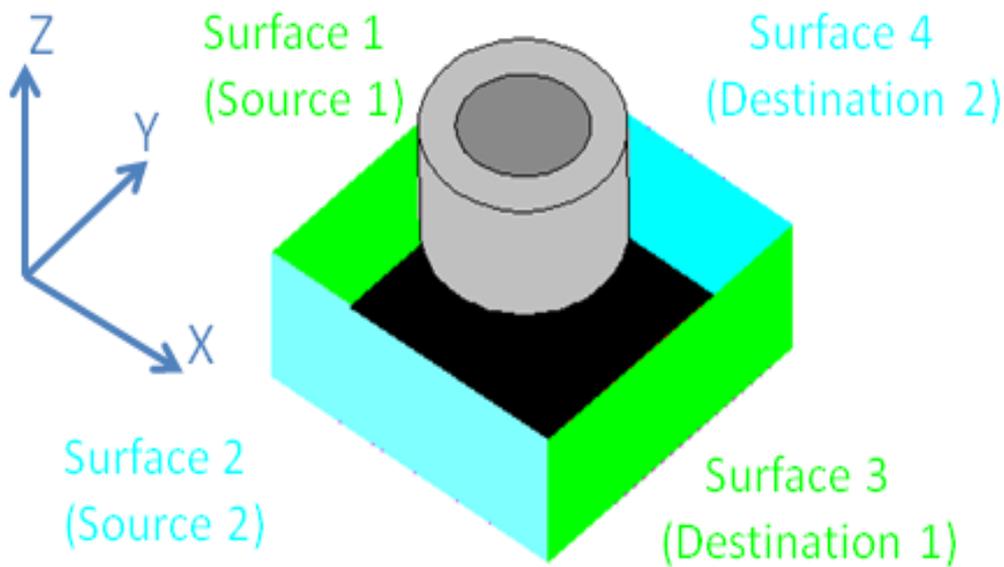
Après avoir introduit le mouvement de propagation des ondes, nous nous tournons vers les termes des conditions aux limites. Cela nous permet d'orienter les solutions souhaitées. Au niveau du terrain (cellule centrale), des termes de Bloch sont introduits sur les surfaces latérales du bloc de béton, ainsi Périodicité de la structure selon les directions X et Y. il devrait être dans le plan (O, X, Y), alors on s'intéressera à la propagation des ondes dans les directions X et Y.

Le vecteur d'onde  $\vec{K}$  est écrit :  $\vec{K} = (k_x, k_y, 0)$  (2.4)

Les déplacements mécaniques peuvent donc être déduits pour tous les nœuds situés aux limites de la cellule avec le théorème de Bloch-Floquet.

Où les surfaces sources et destinations sont définies dans la figure 2.4

**Figure.2.4** Conditions aux limites périodiques appliquées aux quatre faces latérales du massif de béton



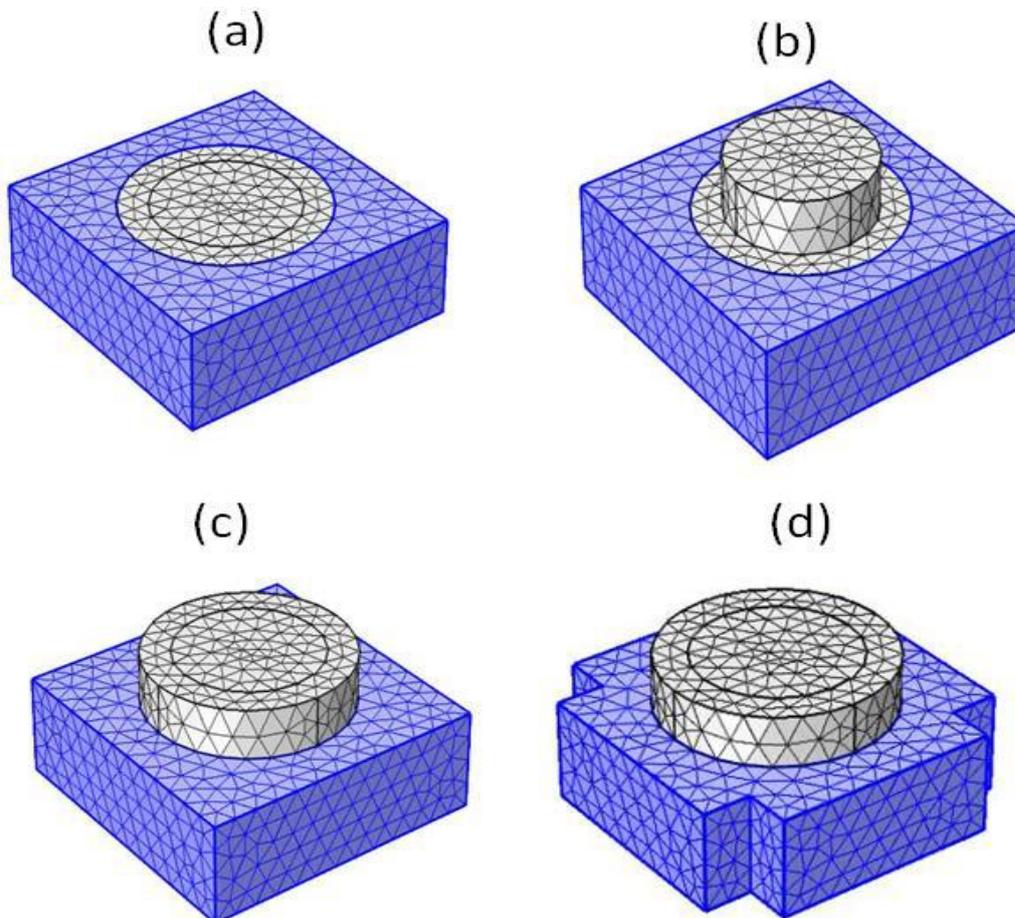
#### 2.4.4 - Maillage

Le maillage est une division du domaine de résolution  $W$  en un nombre fini de sous-domaines disjoints deux à deux et définis par des points appelés nœuds, c'est une discrétisation géométrique, Cette méthode est basée sur la construction systématique d'une approximation  $u_h$  du champ variable  $u$  par sous domaine.

A partir de Comsol Multiphysics, une fenêtre de maillage apparaît, dans laquelle se trouvent différentes réalisations de la cellule de base appel (physics-controlled mesh) qui peut se faire automatiquement, le degré de raffinement que nous avons choisi est de type "extra coarse", que nous considérons comme optimal afin d'éviter une consommation excessive de temps et d'espace de la simulation. Dans notre cas, le modèle 3D est maillé (maillage fin) en éléments solides de formes tétraédriques et qui semble le mieux adapté à nos structure, dans la figure 2.5 un exemple de (maillage fin) qui apparaisse nos modèles

**Figure. 2.5** Maillage fin pour les différentes cellules de base

(a) cylindres non émergents, (b) seul le cylindre de métal émerge du substrat,  
(c) cylindres émergents, (d) modèle après grugeage



#### 2.4.5-La convergence

La convergence des calculs par éléments finis dépend du maillage de la structure étudiée, en particulier du nombre d'éléments tétraédriques et de leur répartition dans le domaine. Plus le maillage est fin, plus les fonctions de forme sont définies et meilleure est l'approximation de la fonction de solution. Plus l'approximation de la fonction solution est bonne. Cependant, le temps de calcul augmente avec le raffinement du maillage et les limites de la machine à calculer peuvent être atteintes rapidement. Pendant les opérations de résolution du modèle, on peut obtenir des graphiques d'affinité qui indiquent la diminution de l'erreur estimée entre les itérations

de Newton-Raphson. Idéalement, si l'erreur est convergente, elle devrait diminuer de façon monotone.

## 2.5 - Choix des matériaux utilisés

Les simulations dépendent de l'étude d'un modèle initial représenté par :

- Une structure périodique bidimensionnelle constituée d'un bloc solide de béton

Le bloc de béton est recouvert d'un cylindres métalliques disposés périodiquement dans les directions X et Y, à travers de notre mémoire on étudiera deux types de métalliques :

- le fer
- la silicone

Les noyaux métalliques et les couches d'élastomère ont des dimensions relatives (les dimensions indiquées sur le substrat) égales respectivement à  $r_2/a$ ,  $h_2/a$ ,  $r_1/a$  et  $h_1/a$ . Dans notre étude, tous les milieux choisis prennent en compte les propriétés isotropes des différents matériaux (densités  $\rho$ , coefficients de jeunesse E, coefficients de Poisson  $\nu$ .)

Le tableau 2.1 présente les masses volumiques, les densités, coefficients de jeunesse et coefficients de poisson de chaque matériau utilisé.

Tableau 2.1. Caractéristiques des matériaux

	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$E$ (GPa)	$\nu$	$C_{11}$ (GPa)	$C_{12}$ (GPa)	$C_{44}$ (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

## 2.6 – Conclusion

La méthode FEM est devenue un outil essentiel pour simuler le comportement mécanique des structures cristallines acoustiques pendant la propagation des ondes sonores dans les milieux élastiques, on n'a commencé ce chapitre par la présentation de logiciel Comsol Multiphysics .

### **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, la statistique acoustique provient de sa capacité à bloquer la propagation des ondes sonores ou élastiques. Il est donc fortement recommandé de travailler avec un cristal qui offre la bande interdite la plus large possible. La création d'hypothèses se produit dans le cas des cristaux phononiques a été mise en œuvre Dans ce chapitre sont rapportés les principaux résultats de ce travail, représentés par la modélisation et la simulation sur plusieurs maillages élémentaires composés d'un bloc de béton ou d'un substrat contenant des noyaux métalliques cylindriques recouverts d'une couche d'élastomère. Les effets géométriques (rayons des cylindres, hauteurs et épaisseurs du substrat) et les paramètres physiques tels que la densité et le module d'élasticité sur la structure de la bande interdite ont été étudiés. C'est en examinant les différentes configurations. Premièrement, sont rapportés les principaux résultats de ce travail de thèse, représenté par la modélisation et simulation sur plusieurs cellules unitaires constituées par un massif ou substrat en béton dans lequel sont incrustés des noyaux cylindriques en métal enrobés dans une couche d'élastomère. Les effets des paramètres géométriques (rayons et hauteurs des cylindres et épaisseur du substrat) et physiques tels que la densité et le module d'élasticité sur la structure des bandes interdites ont été étudiés

### 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 aux frontières de la cellule qui s'adapte très bien à la résolution des équations aux dérivées partielles.

La simulation a été effectuée par logiciel Comsol Multiphysics. En faisant varier le vecteur d'onde  $K$  dans la zone de Brillouin suivants les deux directions, la résolution du système d'équations nous permet d'obtenir les valeurs propres et les fréquences propres du modelé pour chaque fréquence donnée, les vecteurs propres peuvent être calculés afin de montre la distribution et les déformations spatiales de chaque mode.

#### 3.2.1 - Opérations d'optimisation des paramètres géométriques sur les bandes interdites

On sait de façon générale dans les cristaux phononiques 2D, pour le mécanisme de Bragg, qu'on observe les bandes interdites les plus larges lorsque les constituants ont des caractéristiques physiques très différentes. Dans le cas particulier des systèmes

solide/solide, il est plus favorable que les inclusions soient faites d'un matériau de haute densité avec des constantes élastiques les plus élevées [21].

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 en charge dans le tableau la valeur correspondante à la variable qu'on veut modifier et il sera tenu en compte automatiquement dans tout modèle de simulation, les valeurs des paramètres géométriques sont listées dans le tableau dans le modèle Buidier, lorsque on veut définir une nouvelle variable, les unités doivent être mises en crochets, par exemple, pour spécifier une épaisseur écrire sous Expression [m], aussi leur description. Le tableau 3.1 représente les différents changements de paramètres géométriques.

**Tableau 3.1**-paramètre du modèle

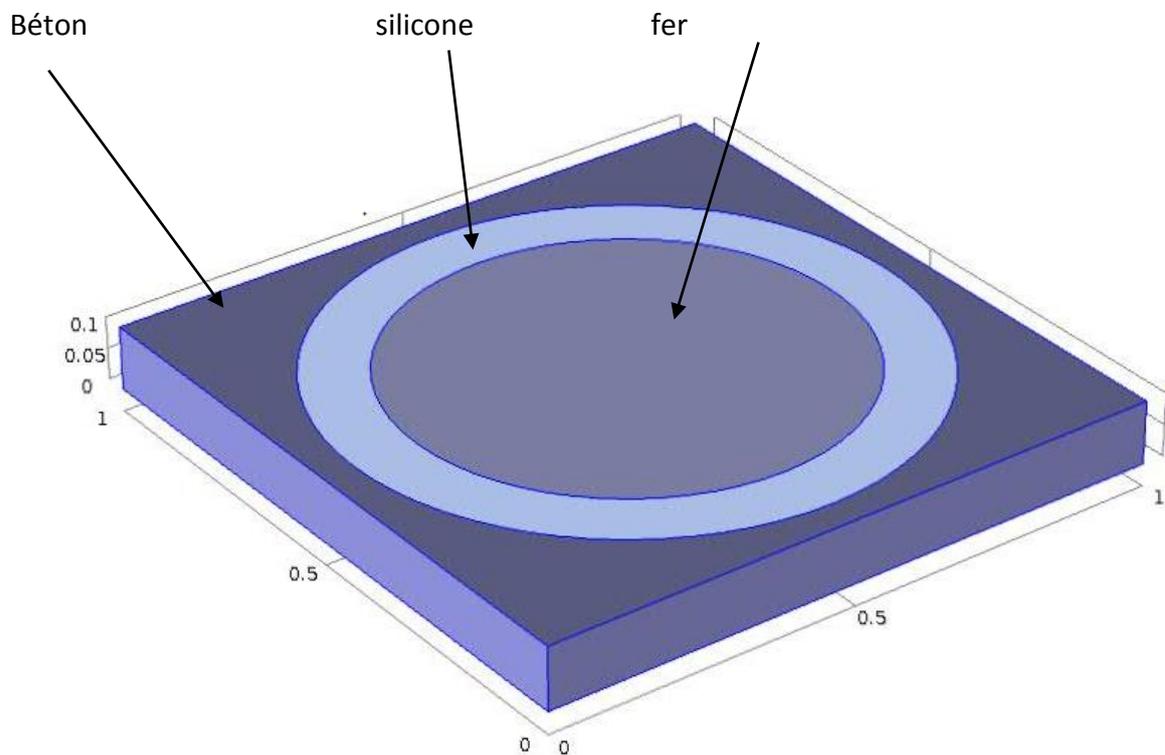
Name	Expression	Description
Kxx	0[rad/m]	Kx
Kyy	0[rad/m]	Ky
Kzz	0[rad/m]	Kz
R1	0.45 [m]	elastomère radius
h1	0.5 [m]	elastomère heigh
R2	0.35 [m]	métal radius
h2	0.5 [m]	métal heigh

Dans notre conception on a choisi de modéliser une partie du plaque fine sous forme de cube 3D avec un plot sous forme d'un cylindre. L'unité de longueur utilisée est le  $\mu m$  et L'unité de angles est degré, L'essentiel de la thèse repose sur un travail qui sera scindé seul phases comme la figure 3.1 :

- Phase 1 : Le noyau est en acier et l'élastomère en caoutchouc. Les deux matériaux n'émergent pas du substrat de béton (les deux cylindres ont la même hauteur que celle du massif).

**Figure. 3.1** -Modèles représentant la cellule de base dans la phase étude

Phase 1

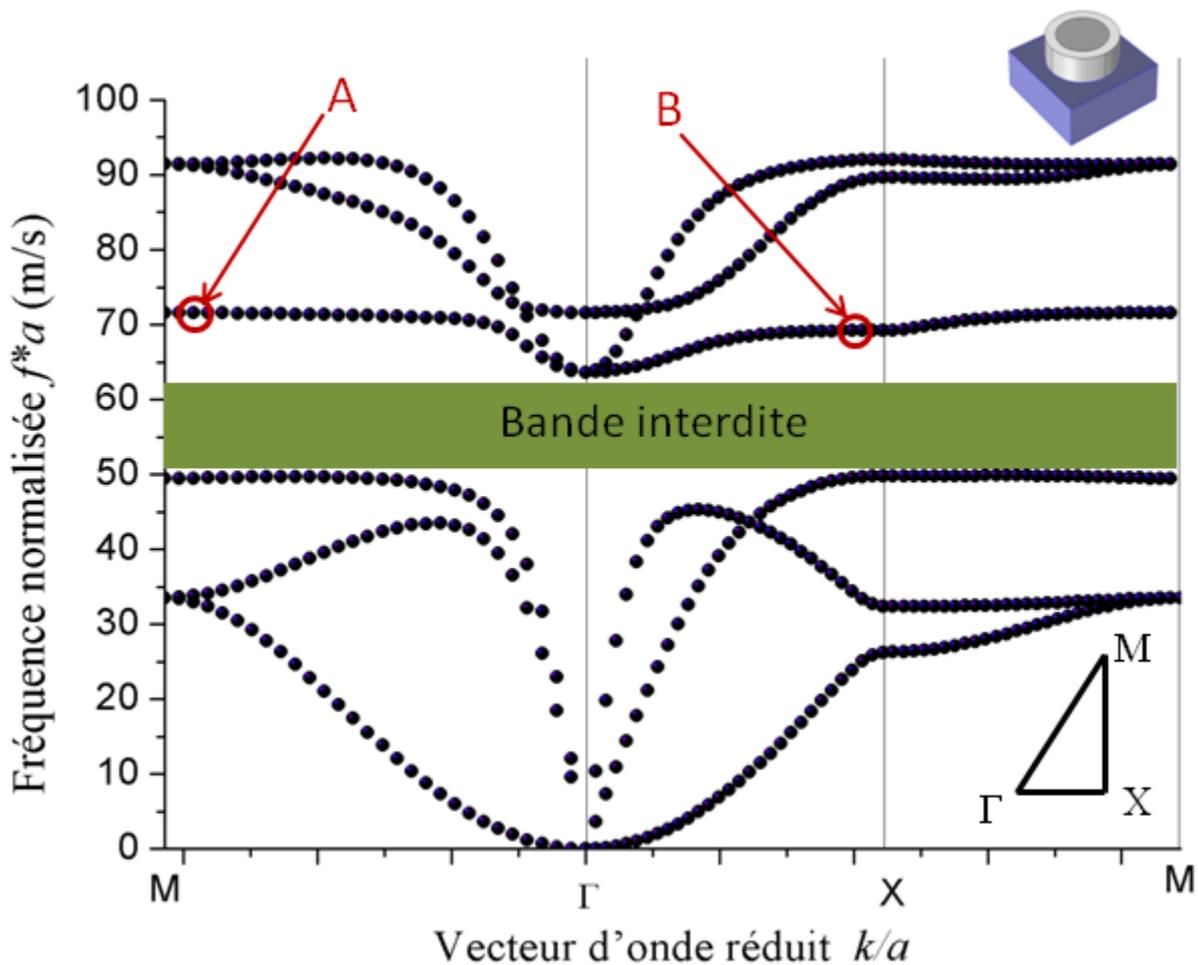


En faisant varier le vecteur d'onde  $k = (k_x, k_y)$  dans la première zone de Brillouin selon les trois directions  $M\Gamma$ ,  $\Gamma X$  et  $XM$ , la résolution du système d'équations par Comsol permet d'obtenir les valeurs propres et les fréquences propres du modèle. Nous tracerons ensuite les courbes de dispersion de fréquence en fonction des vecteurs d'onde  $k$ .

### 3.2.2-Courbes de dispersion pour le couple de matériaux ( fer- silicone)

Les paramètres d'ingénierie suivants seront sélectionnés  $R1/a=0.45$ ,  $h1/a=0.5$  pour la silicone et  $R2/a=0.35$ ,  $h2/a=0.5$  pour le fer (le noyau métallique). Afin de prendre en compte la réponse du milieu pour tous les vecteurs d'onde compris dans la première zone de Brillouin, on représente la dispersion du milieu sur les segments formés à partir des points critiques de la zone irréductible, la figure 3.2; on donne l'exemple du couple de matériaux « fer-silicone » pour une maille cylindrique.

**Figure 3.2**-Courbes de dispersion des fréquences, matériaux utilisés "fer-silicone", ( $r1/a = 0.45$   $r2/a=0.35$ ,  $h1/a=h2/a=0.5$ ); gap situé entre 50 et 63 m/s.



Les courbes de diffusion sont calculées par la méthode des éléments finis et sont tracées dans chaque direction à partir de la région irréductible de Brillouin représentée dans la partie inférieure de la figure 4.3. L'aplatissement des courbes est indispensable pour obtenir la juxtaposition des structures d'échelle calculées. La zone colorée correspond à un domaine absolument interdit où l'onde ne peut se propager. Sur cette figure, où l'on se limite à la gamme de fréquence comprise entre 0 et 100 m/s, on observe l'apparition et la mise en évidence du phénomène de bande interdite située entre 50 et 63 m/s et qui correspond à une absence totale de propagation de l'onde quelle que soit la direction de l'onde incidente.

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

Afin de mettre en évidence l'influence des paramètres géométriques qui caractérisent la cellule de base (masse de béton, cylindres métalliques et élastomères) sur les structures des bandes de fréquences, nous ferons varier la hauteur, le rayon des résonateurs, le facteur de Remplissage et l'épaisseur du substrat, en essayant à chaque fois d'expliquer les mécanismes physiques qui sous-tendent les observations réalisées.

##### 3.3.1 - Effet de la hauteur des cylindres sur les bandes interdites

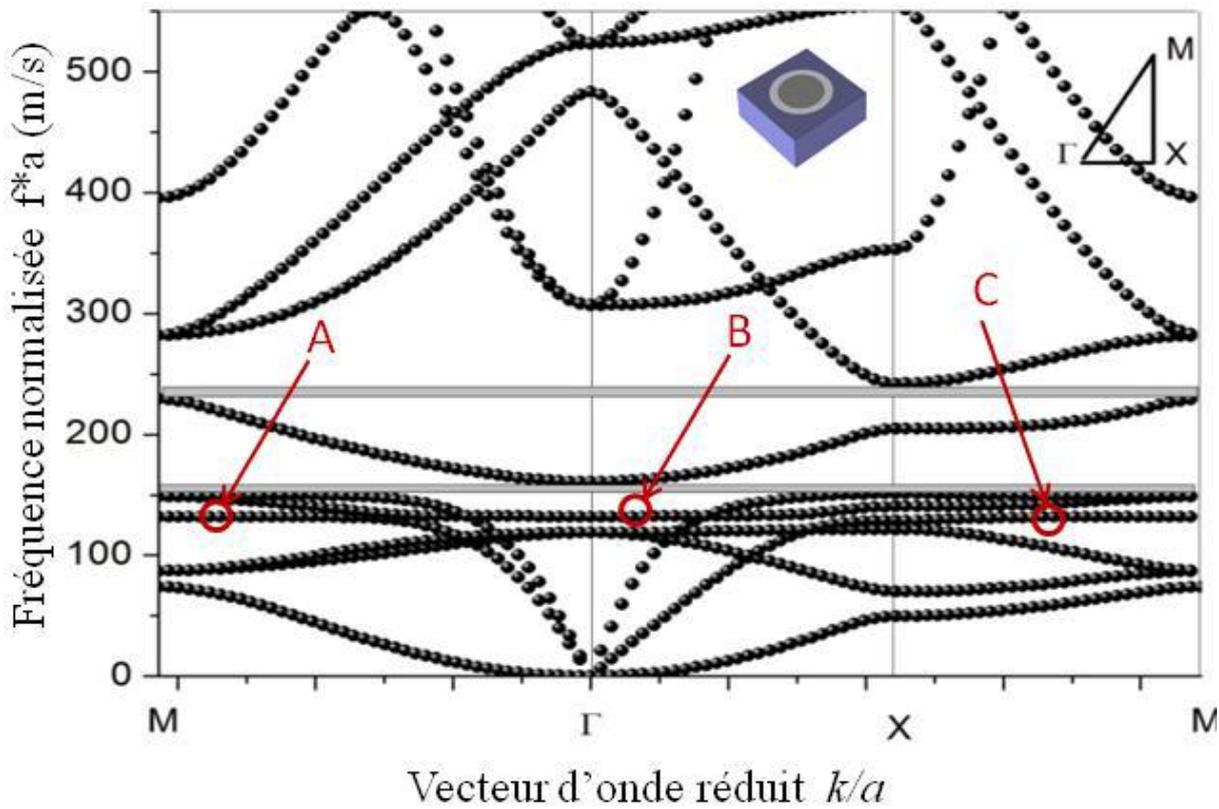
Le modèle du noyau est en acier et l'élastomère en caoutchouc. Les deux matériaux n'émergent pas du substrat de béton (les deux cylindres ont la même hauteur que celle du massif). (Le courbe de dispersion pour  $h=h_1=h_2$ ).

Le premier modèle étudié est celui d'un massif en béton de section carrée "axa" (a représentant le paramètre de maille) et d'épaisseur "e" incrusté d'un noyau cylindrique en si fer. Ce dernier est enrobé d'une couche d'élastomère en silicone. Les cylindres en silicone et en fer ont des rayons relatifs respectifs de «  $r_1/a$  » et «  $r_2/a$  » et des hauteurs relatives "h1/a" et "h2/a" respectivement ( $h_1=h_2=h=e$ ) comme il est indiqué dans la figure 3.1.

Les courbes de dispersion de fréquences réduites  $f^*a$  (m/s) en fonction du vecteur d'onde

réduit  $k/a$  dans la zone irréductible de Brillouin pour le couple de matériaux "fer-silicone" sont illustrées à la figure 3.3

**Figure 3.3**-Courbes de dispersion des fréquences, matériaux utilisés «acier-caoutchouc», ( $r_1/a=0.45$   $r_2/a=0.35$ ,  $h_1/a=h_2/a=e/a=0.1$ ); gaps situés entre 155 - 160 m/s et 230 - 245 m/s



### 3.3.2 - Effet du facteur de remplissage $\beta$ sur les bandes interdites

Le facteur ou coefficient de remplissage  $\beta$  représente la fraction entre la surface occupée par le résonateur (cylindre d'acier avec la couche d'élastomère) et la surface totale de la masse de béton. et la surface totale de la masse de béton. Soit donc :

$$\beta = \frac{\pi r_{ext}^2}{a^2} \quad (3.1)$$

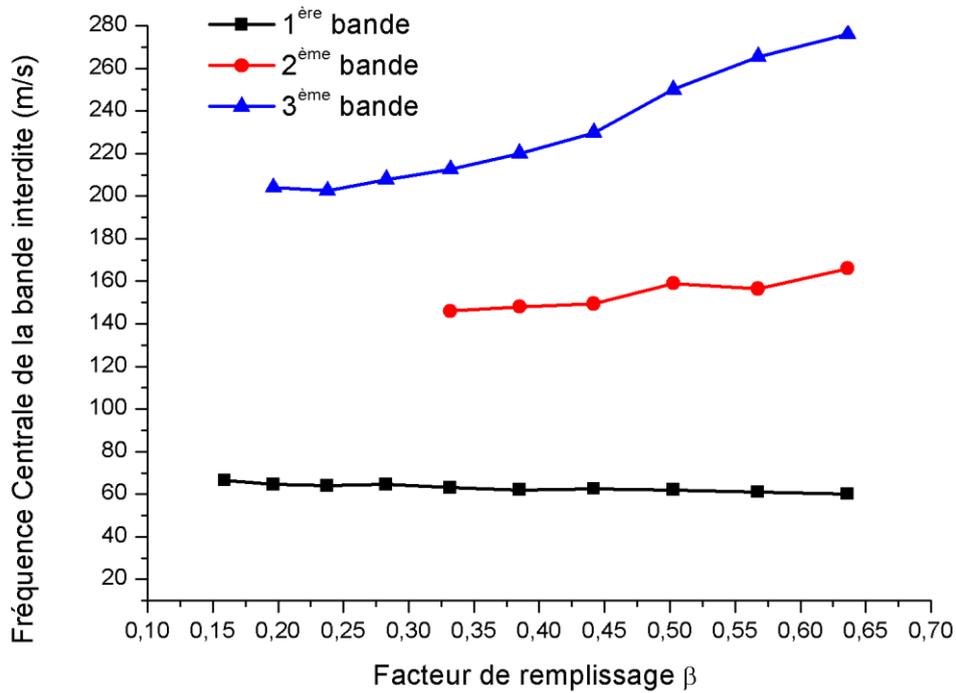
$r_{ext}$  étant le rayon du cylindre d'élastomère (rayon du cylindre métallique + épaisseur de la couche d'élastomère).

On se limitera dans cette section aux couples de matériaux "fer-silicone".

### 3.3.2.1-Cas du couple de matériaux "fer-silicone"

#### 3.3.2.1.1 - Fréquences centrales

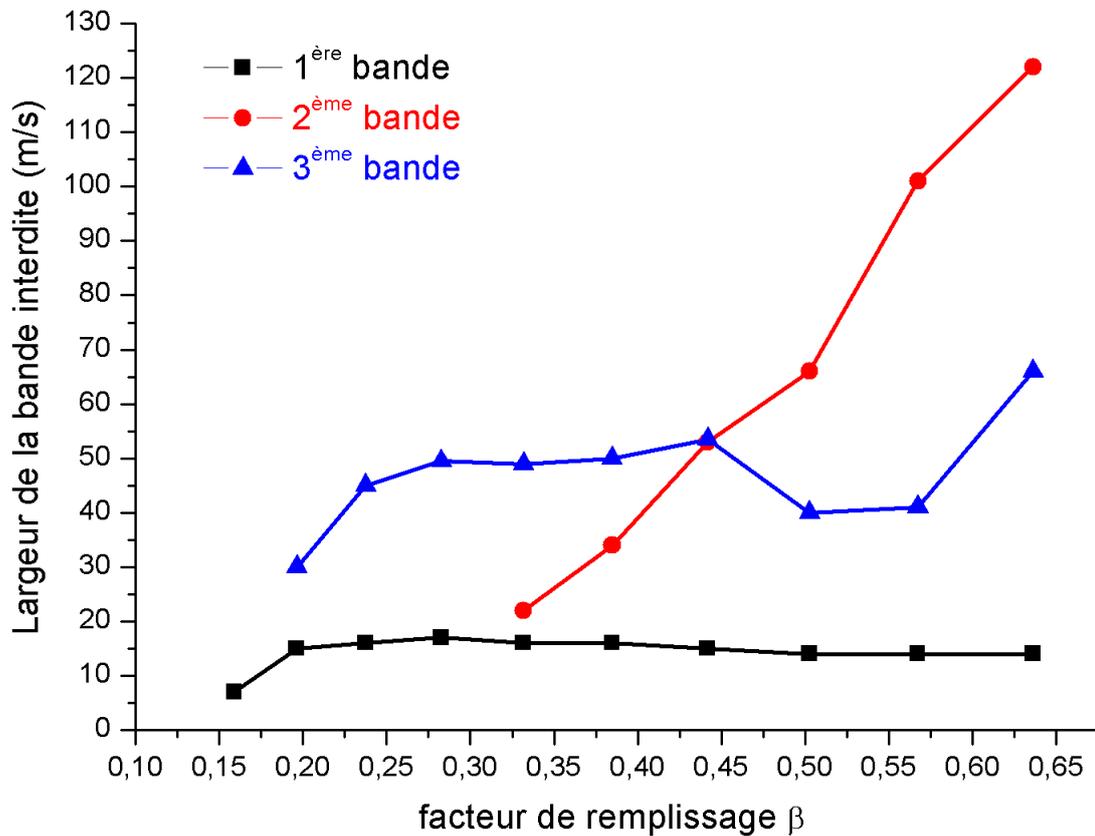
**Figure 3.4** Variation des fréquences centrales normalisées en fonction du facteur de remplissage, matériaux utilisés "fer-silicone"



On peut le voir sur la fig. 3.4 Que les fréquences centrales soient constantes avec le facteur de remplissage, en particulier pour les première et deuxième largeurs de bande. Par conséquent, les facteurs de remplissage sont supérieurs à 0,65 et correspondent au rayon extérieur relatif des résonateurs supérieur à 0,15

### 3.3.2.1.2 - Largeur des bandes interdites

**Figure 3.5** Evolution de la largeur des bandes gaps en fonction du facteur de remplissage, matériaux utilisés "fer-silicone"



La figure 4.19 montre une variation des largeurs nettement différentes entre les trois bandes gap. La largeur de la première bande gap semble peu sensible à la variation du facteur de remplissage. Et pour le 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> bande gap L'ouverture de la deuxième bande gap se fait de plus en plus pour des facteurs compris entre 0.325 et 0.65 pour 2<sup>ème</sup> bande et 0.20-0.65 pour la 3<sup>ème</sup> bande gap.

#### 3.4.1 - Effet du module d'élasticité de l'élastomère

Étudier l'effet du module d'élasticité de l'élastomère sur l'ouverture et la position des bandes de l'entrefer. Dans la seule phase de courbe de fer et silicone Les résultats dans la première zone de Brillouin suivant les trois directions  $M\Gamma$ ,  $\Gamma X$  et  $XM$  sont résumés et représentés dans les figures a ; b ; c

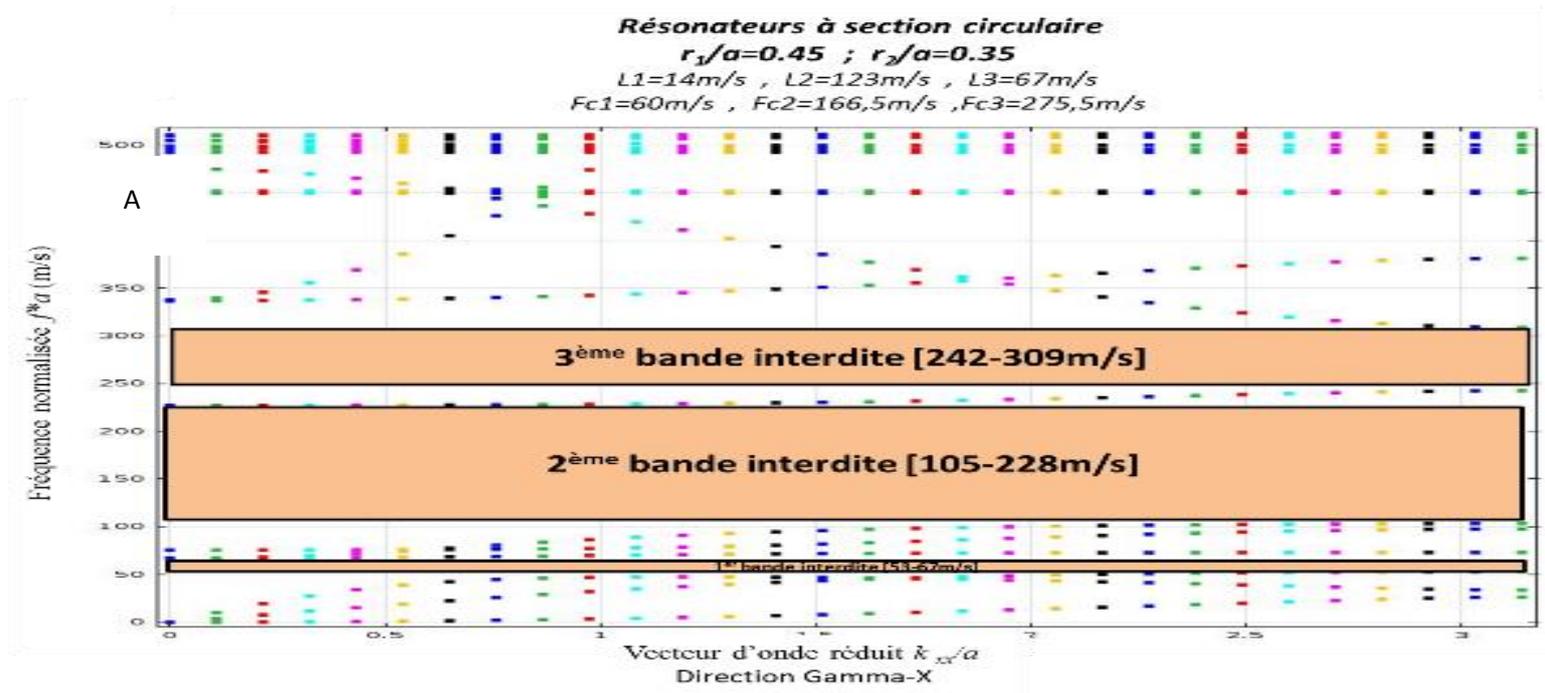
Pour MF

Figure 3.6 Courbes de dispersion des fréquences, (a) ( $r_1/a = 0.45$ ;  $r_2/a = 0.35$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 54 - 67 m/s, 105 - 228 m/s et 242 - 309 m/s

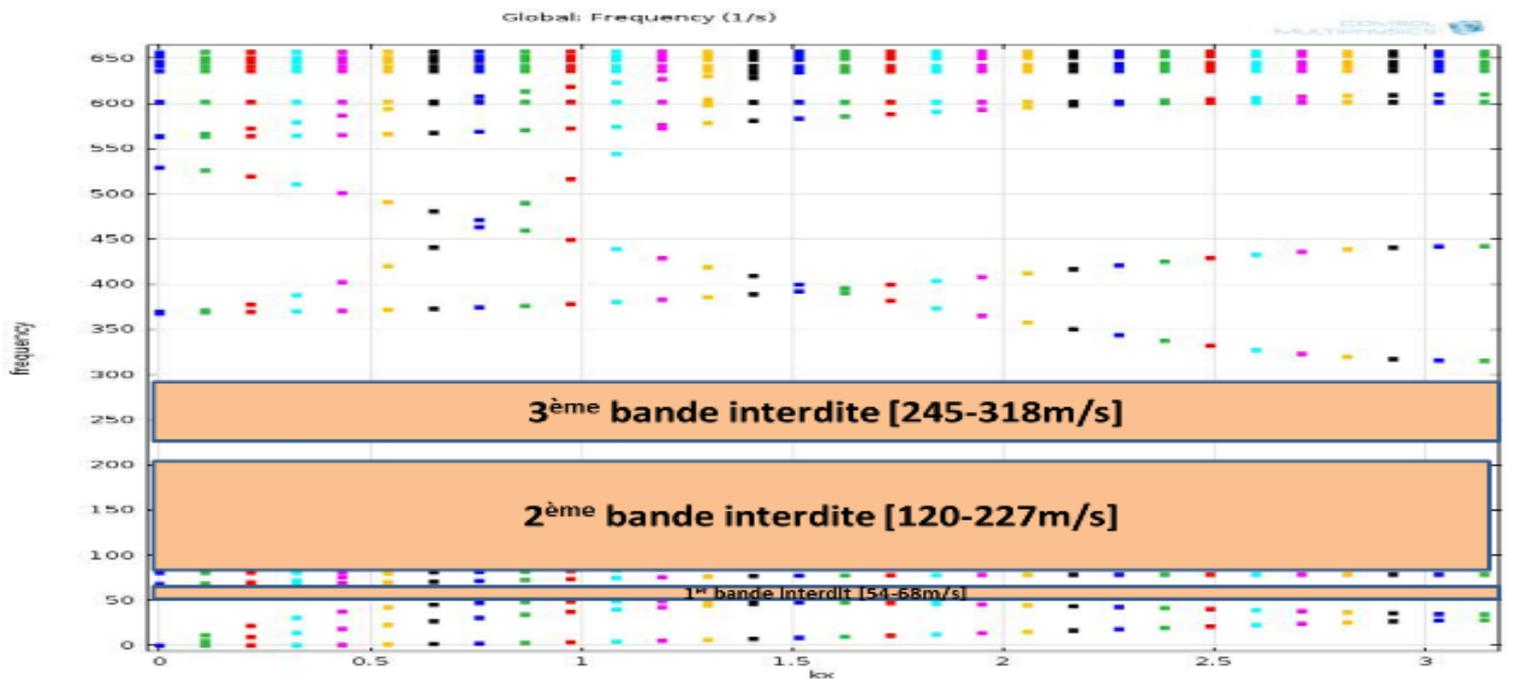
(b) pour ( $r_1/a = 0.225$ ;  $r_2/a = 0.125$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 78 - 93 m/s, 150 - 350 m/s et 365 - 480 m/s

(c) pour ( $r_1/a = 0.2$ ;  $r_2/a = 0.1$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" aucune bande gap

a



b



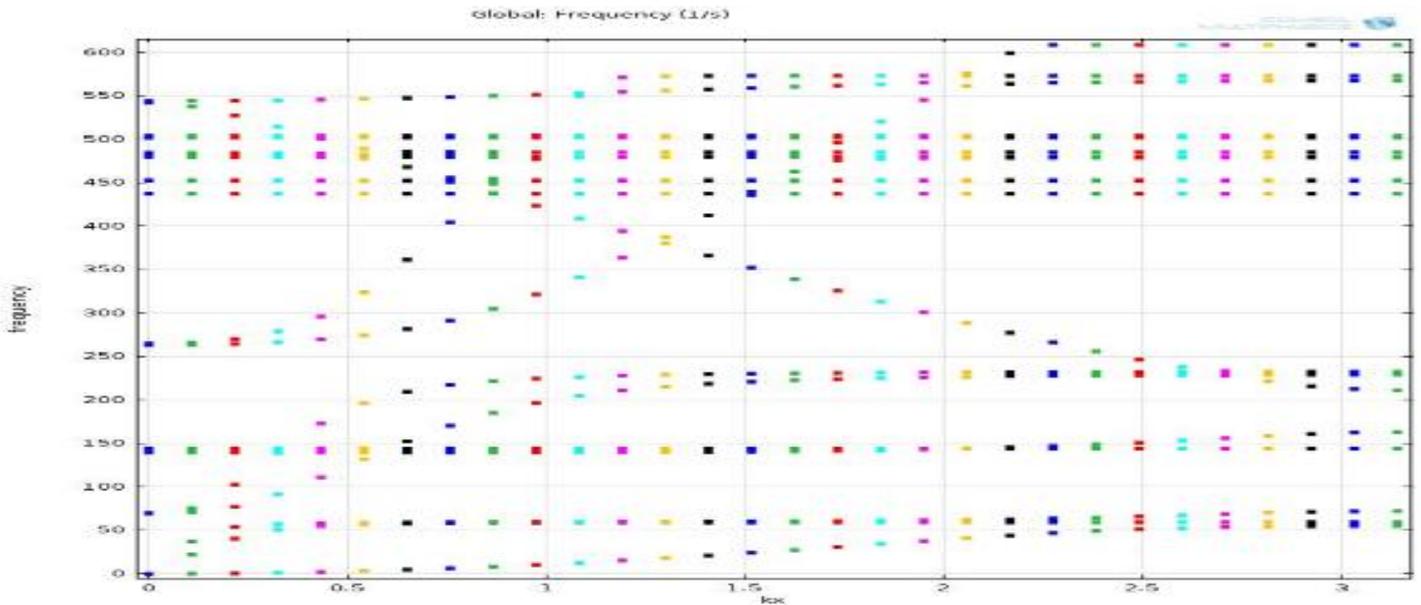
### Résonateurs à section circulaire

$$r_1/a=0.225 ; r_2/a=0.125$$

$$L1=7m/s$$

$$Fc1=66,5m/s$$

c



Pour my

Figure3.7-Courbes de dispersion des fréquences,(a) ( $r_1/a = 0.45$ ;  $r_2/a=0.35$ ;  $h_1/a= h_2/a=0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 80 - 100 m/s, 105 - 228 m/s et 243 - 309 m/s

(b) pour ( $r_1/a = 0.225$ ;  $r_2/a=0.125$ ;  $h_1/a= h_2/a=0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 78 - 93 m/s, 150 - 350 m/s et 365 - 480 m/s

c) pour ( $r_1/a = 0.2$ ;  $r_2/a=0.1$ ;  $h_1/a= h_2/a=0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" aucune bande gap

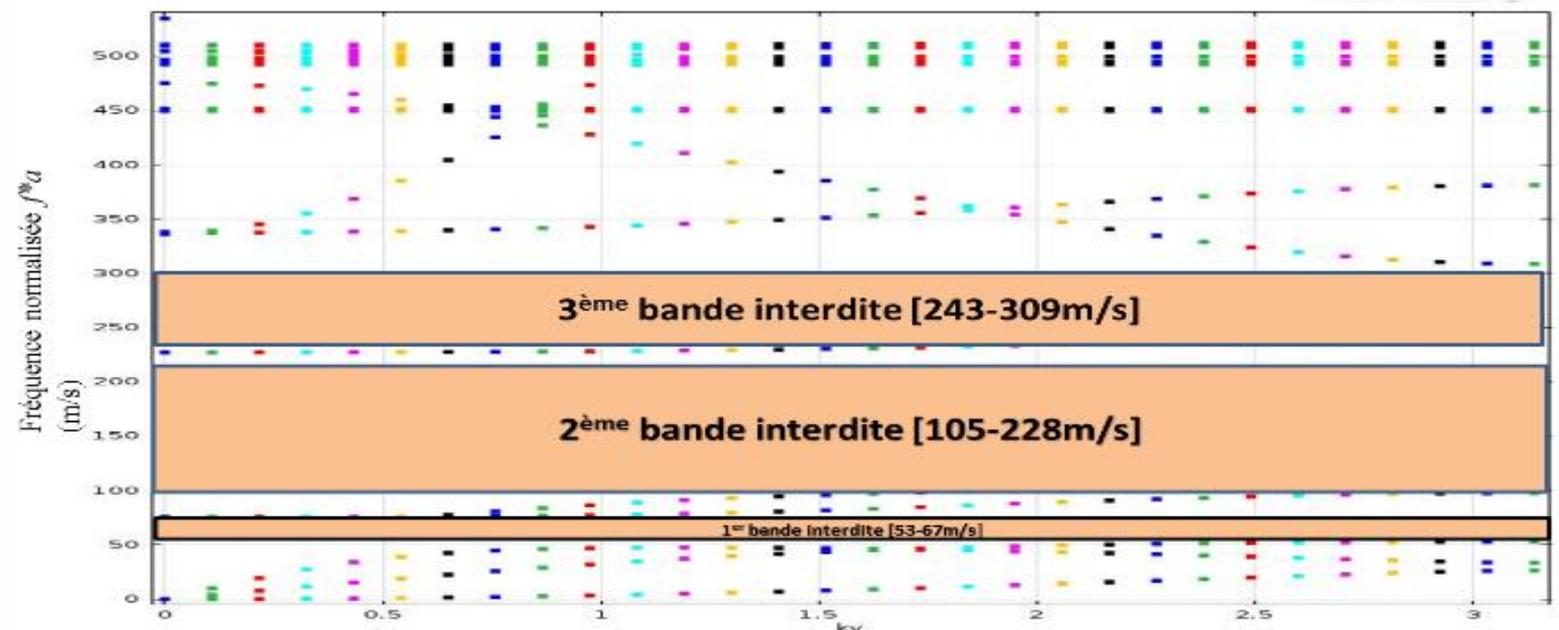
a

### Résonateurs à section circulaire

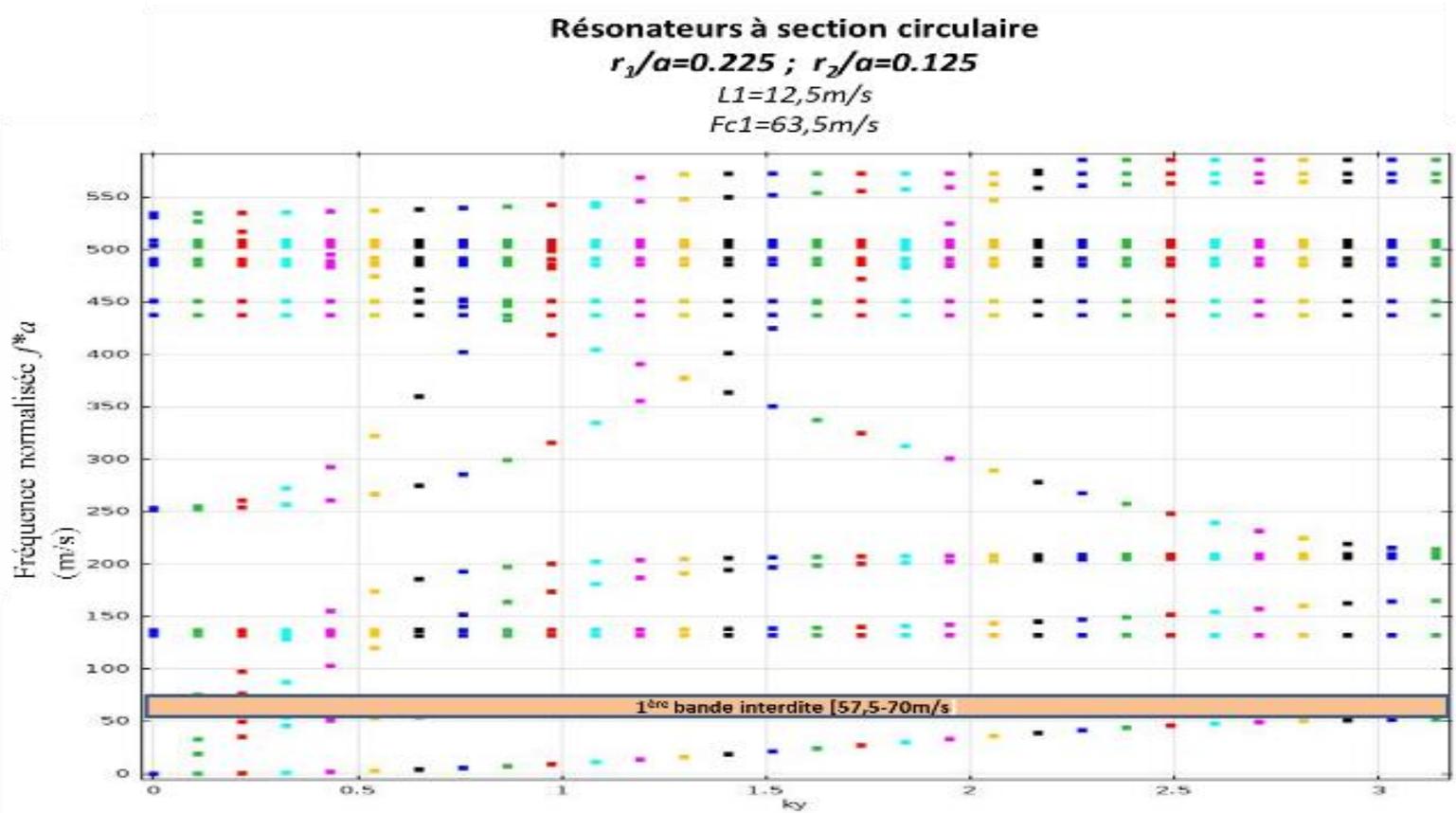
$$r_1/a=0.45 ; r_2/a=0.35$$

$$L1=14m/s , L2=123m/s , L3=66m/s$$

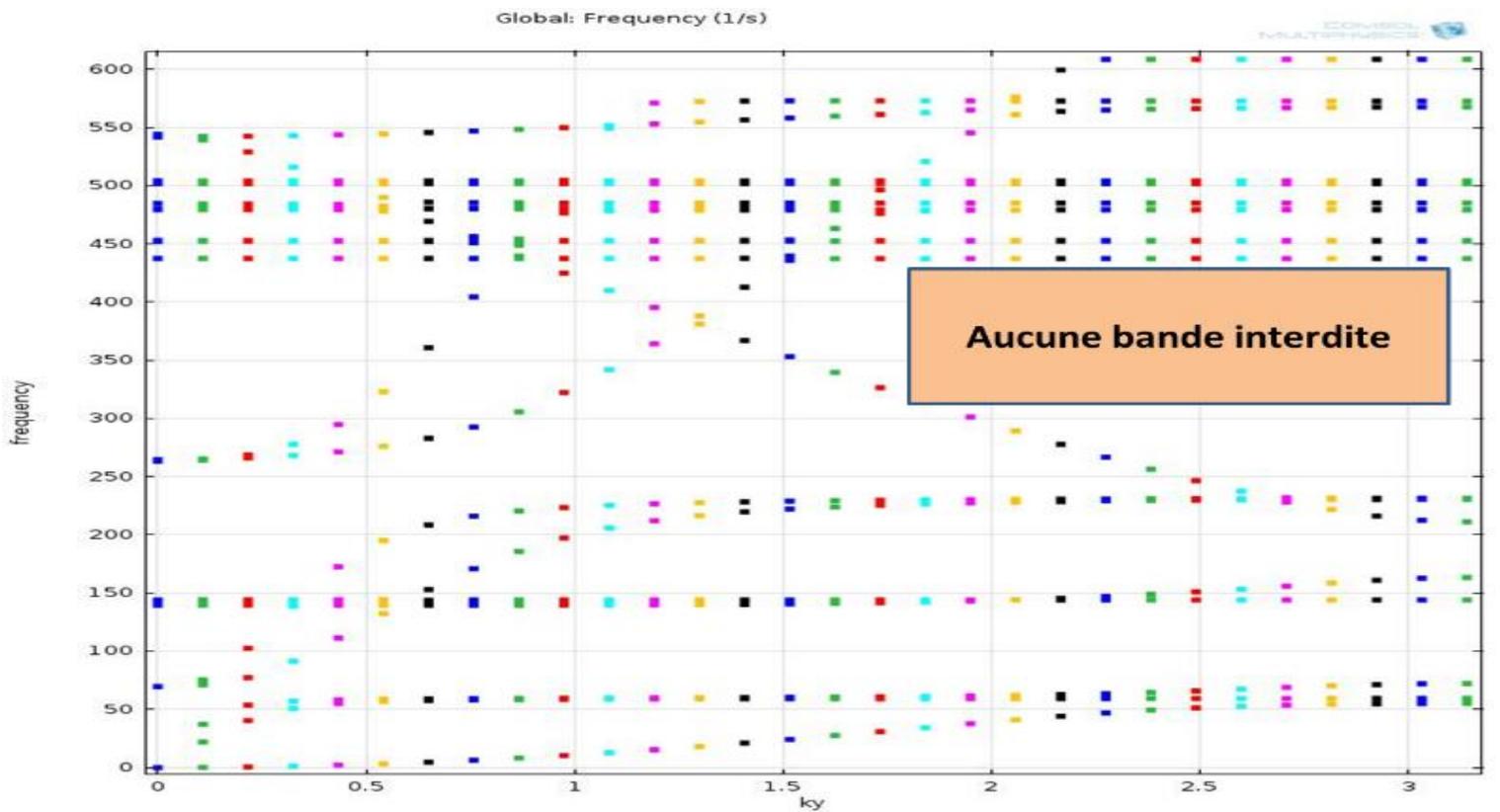
$$Fc1=60ms , /Fc2=166,5m/s , Fc3=276m/s$$



b



c



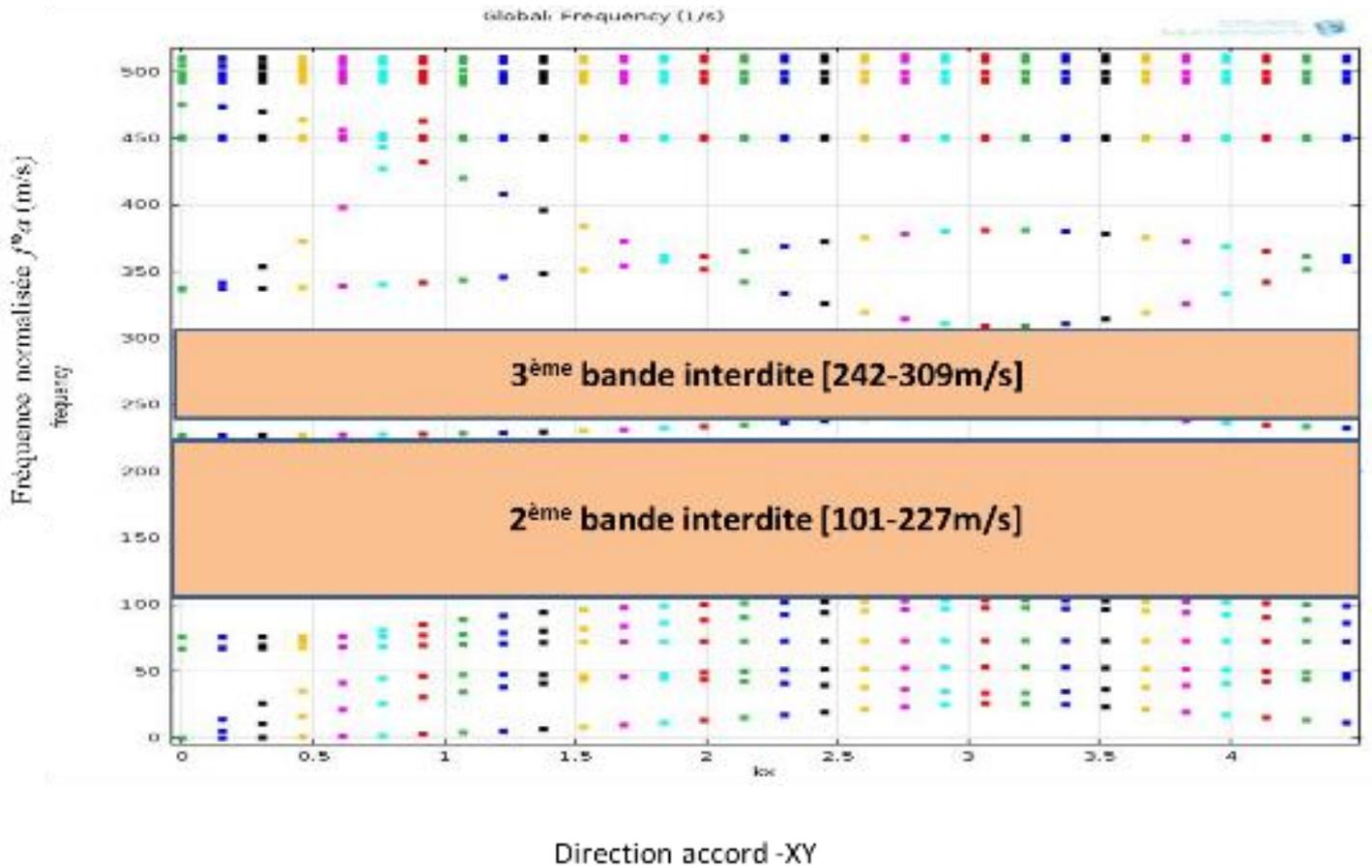
Pour XM

Figure 3.8 Courbes de dispersion des fréquences, (a) ( $r_1/a = 0.45$ ;  $r_2/a = 0.35$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 54 - 68 m/s, 101 - 227 m/s et 242 - 309 m/s

(b) pour ( $r_1/a = 0.225$ ;  $r_2/a = 0.125$ ;  $h_1/a = h_2/a = 0.5$ ) matériaux utilisés "fer-silicone" gaps situés entre 78 - 93 m/s, 150 - 350 m/s et 365 - 480 m/s

a

**Résonateurs à section circulaire**  
 $r_1/a = 0.45$  ;  $r_2/a = 0.35$   
 $L_1 = 21\text{m/s}$ ;  $L_2 = 126\text{m/s}$ ;  $L_3 = 67\text{m/s}$   
 $Fc_1 = 62\text{m/s}$ ;  $Fc_2 = 164\text{m/s}$ ;  $Fc_3 = 275,5\text{m/s}$



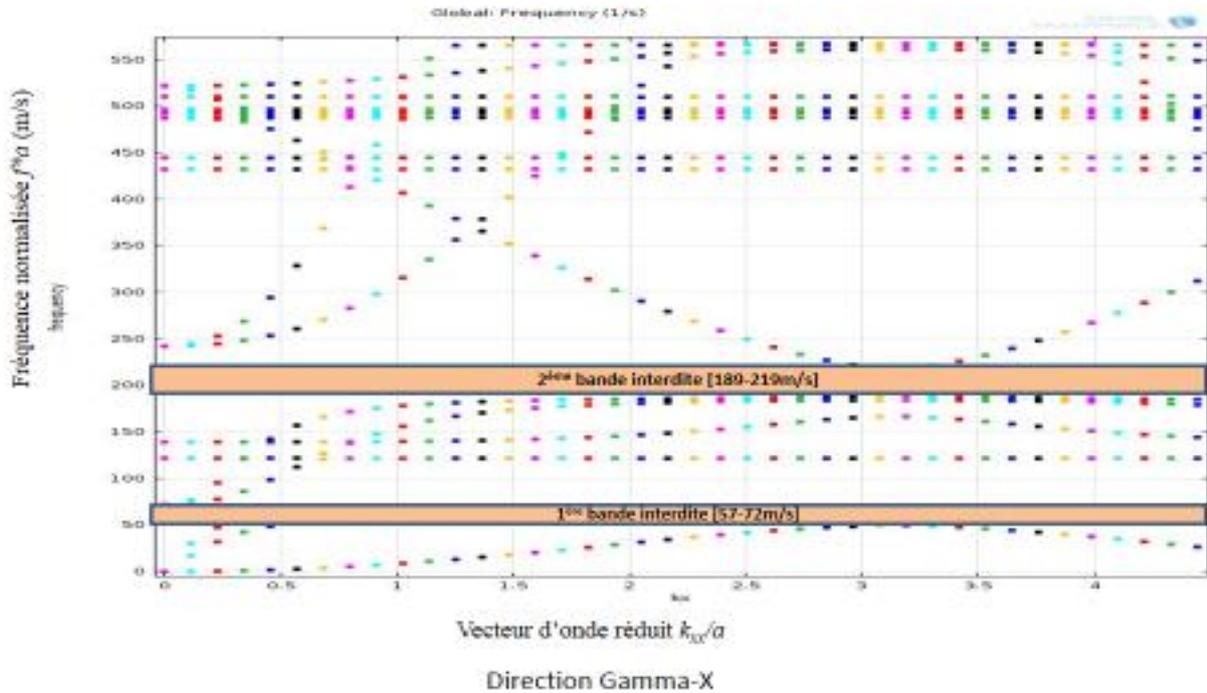
b

**Résonateurs à section circulaire**

$$r_1/a=0.25 ; r_2/a=0.15$$

$$L1=15m/s; L2=30m/s$$

$$Fc1=64,5m/s; Fc2=204m/s$$



**3.4.2 Effet du module des Bandes Interdites Complètes**

Tableau 3.2 Récapitulatif des Bandes Interdites Complètes Selon les Différents Paramètres Géométriques  $r_1/a$  et  $r_2/a$  ( $h_1/a=h_2/a=0,5$ ) Le tableau 3.2 montre les bandes interdites dans les trois directions  $\Gamma\Gamma$ ,  $\Gamma X$  et  $X\Gamma$  la première zone de Brillouin Dans notre thèse et après les simulations, nous avons travaillé sur le changement de diamètre du fer et du silicone, de (0,45 à 0,20  $\mu m$ ) pour le silicone et de (0,35 à 0,1  $\mu m$ ) pour le fer, en montrant les changements qui se sont prod

**Tableau 3.2** Tableau Récapitulatif des Bandes Interdites Complètes Selon les Différents Paramètres Géométriques  $r_1/a$  et  $r_2/a$  ( $h_1/a=h_2/a=0,5$ )

	1 <sup>ère</sup> bande interdite			2 <sup>ème</sup> bande interdite			3 <sup>ème</sup> bande interdite		
	Fréquences [m/s]	Largeur de la bande [m/s]	Fréquence centrale [m/s]	Fréquences [m/s]	Largeur de la bande [m/s]	Fréquence centrale [m/s]	Fréquences [m/s]	Largeur de la bande [m/s]	Fréquence centrale [m/s]
$r_1/a=0.45$ $r_2/a=0.35$	53-67	14	60	105-227	122	166	243-309	66	276
$r_1/a=0.425$ $r_2/a=0.325$	54-68	14	61	106-207	101	156,5	245-286	41	265,5
$r_1/a=0.4$ $r_2/a=0.3$	55-69	14	62	126-192	66	159	230-270	40	250
$r_1/a=0.375$ $r_2/a=0.275$	55-70	15	62.5	123-176	53	149.5	203-256,5	53,5	229,75
$r_1/a=0.35$ $r_2/a=0.25$	54-70	16	62	131-165	34	148	195-245	50	220
$r_1/a=0.325$ $r_2/a=0.225$	55-71	16	63	135-157	22	146	188-237	49	212,5
$r_1/a=0.3$	56-73	17	64.5	-----	-----	-----	183-232,5	49,5	207,75

$r_2/a$ =0.2									
$r_1/a$ =0.275 $r_2/a$ =0.175	56-72	16	64	-----	-----	-----	180-225	45	202,5
$r_1/a$ =0.25 $r_2/a$ =0.15	57-72	15	64.5	-----	-----	-----	189-219	30	204
$r_1/a$ =0.225 $r_2/a$ =0.125	63-70	7	66.5	-----	-----	-----	-----	-----	-----
$r_1/a$ =0.2 $r_2/a$ =0.1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

### 3.5 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre, un seul type de cellule formé par un massif en béton

De section carrée incrusté d'un cylindre en métal recouvert d'une couche de d'élastomère,

Le tout faisant partie d'une structure périodique d'épaisseur assez faible devant les dimensions en plan. Le cylindre métallique formant le noyau dur du modèle de base est constitué, L'élastomère est formé dans un premier temps de polychlorure de vinyle (pvc) avant d'être substitué par du caoutchouc et de la silicone

## CONCLUSION GENERALE

Les cristaux phononiques sont des matériaux composites constitués de réseaux périodiques d'inclusions à une, deux ou trois dimensions de l'espace. Cette nouvelle classe de matériaux pouvant agir fortement sur la propagation d'ondes élastiques ou acoustiques représente un domaine de recherche d'actualité. Durant ces dernières années un grand nombre de structures a été étudié et plusieurs approches théoriques ont été développées. Toutes ces études ont montré l'existence de propriétés physiques importantes, en particulier l'ouverture de bandes de fréquences interdites où aucune propagation d'onde n'est permise dans ces structures. En effet, du fait que les ondes acoustiques s'étendent sur un large spectre en fréquence. Cela offre de nombreuses applications potentielles allant de l'isolation sonore au filtrage et traitement du signal acoustique en passant par les guides et les capteurs.

Le travail présenté dans ce mémoire, s'inscrit dans le cadre d'une contribution à l'étude théorique et numérique d'ondes élastiques ou acoustiques dans les cristaux phononiques bidimensionnels. En utilisant la méthode des ondes planes en expansion, nous avons étudié la bande interdite phononique à travers les relations de dispersion d'un cristal phononique 2D, constitué d'inclusions carrées en Silicium (respectivement en air) disposés suivant un réseau carré insérés dans l'air (respectivement dans le silicium).

Dans la première partie de cette thèse, nous avons surtout mis en avant les travaux de recherches effectuées dans le domaine de la propagation des ondes dans les structures composites. Ces dernières, dans lesquelles, sous certaines conditions, on retrouve la notion de bandes interdites, qui définissent des gammes angulaires ou fréquentielles pour lesquelles toute propagation d'ondes est rendue impossible. Nous avons vu que le principe fondateur à l'apparition des bandes interdites de quelque nature qu'elles soient (électroniques, électromagnétiques ou encore élastiques), est la diffraction de Bragg et qui résultent de la périodicité du cristal phononique. Les travaux que nous avons entrepris dans cette thèse, ont concerné dans un premier temps une structure périodique bidimensionnelle formée d'un massif en béton dans lequel sont incrustés des cylindres en acier recouverts d'une couche de polychlorure de vinyle (silicone) comme il est souligné au 2<sup>ème</sup> chapitre. Ce travail a permis de mettre en évidence à travers les résultats donnés au 3<sup>ème</sup> chapitre.

## **BIBLIOGRAPHIE**

[1] Jean-Jacques Rousseau et Alain Giraud : Cristallographie géométrique et radiocristallographie. Sciences Sup, Dunod, 2007.

[2] S. kheffache : propagation d'onde élastique dans les critaux phononiques Bidimensionnels, TIZI\_ OUZOU, 2011.

[3] B.ali : application du concept des réseaux acoustiques à bondes interdites pour l'isolation sismique d'un site, TIZI\_ OUZOU, 2013.

- [4] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares, F. Meseger, "Sound Attenuation by Sculpture", Nature, 378, pp. 241, 1995. –

[5] 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).

- [6] S. kheffache, memoire de magister, université mouloud mammeri, tizi-ouzou, propagation d'ondes élastiques dans les cristaux phononiques bidimensionnels, 2011.

- [7] Jaffre, T., "Caractérisation des matériaux à bande interdite électromagnétique multipériodiques et leurs applications aux antennes", Thèse de doctorat - Université de Limoges, (2005).

- [8] Ho, K.M., Chan, C.T. et Soukoulis, C. M., Phys. Rev. Lett. 65, 3152, 1990.

-[9] Van Der Biest, F., "Diffusion multiple et renversement du temps ultrasonore dans des milieux périodiques et désordonnés ", Thèse de doctorat - Université de Paris 7, (Janvier 2006).

- [10] A. Khelif, A. Choujaa, B. Djafari-Rouhani, M. Wilm, S. Ballandras, and V. Laude, "Trapping and guiding of acoustic waves by defect modes in a full-band-gap

- [11] D. A. Sinclair, D. A. Smith, Dark Field Acoustic Microscopy, Electron. Lett. 16, (1980)

- [12] A. bougressi, mémoire de magister, universite mouloud mammeri de tizi-ouzou, Application du concept des réseaux acoustiques à bandes interdites pour l'isolation sismique d'un site, Année 2013
- [13] S.Benchabane, Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques. Décembre 2006
- [14] duclos, A, "Diffusion multiple en fluide visco-thermique, cas du cristal phononique à deux dimensions" These de doctoral-Ecole doctorale de l'université du Maine, le Mans, France, (juin 2007).
- [15] A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, B. Djafari-Rouhani et V. Laude, Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides. Appl. Phys. Lett., 84, 4400 (2004).
- [16] A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, B. Djafari-Rouhani, and V. Laude, "Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides", Applied Physics Letters, 84 (22), 4400-4402 (2004).
- [17] A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, V. Laude, and B. Djafari-Rouhani, "Guiding and filtering acoustic waves in a two-dimensional phononic crystal", Ultrasonics Symposium, 2004 IEEE, 654-657 Vol.1 (2004).
- [18] T. Miyashita, "Sonic crystals and sonic wave-guides", Measurement Science & Technology, 16 (5), R47-R63 (2005).
- [19] José Sánchez-Dehesa and Arkadii Krokhin "Introduction to Acoustics of Phononic Crystals. Homogenization at Low Frequencies". Abdelkrim Khelif • Ali Adibi, Editors Phononic Crystals Fundamentals and Applications
- [20] José Sánchez-Dehesa and Arkadii Krokhin "Introduction to Acoustics of Phononic Crystals. Homogenization at Low Frequencies". Abdelkrim Khelif • Ali Adibi, Editors Phononic Crystals Fundamentals and Applications
- [21] J.O Vasseur, "Vers de nouveaux matériaux et dispositifs Des matériaux composites pour de nouveaux isolants phoniques", Revue: Vers de nouveaux matériaux et dispositifs