

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية -1-

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 en basses fréquences des structures périodiques utilisant le polystyrène et celles des structures utilisant le PVC

Présenté par : Aziri Omar et EsserhaneNihad

Soutenu le 23 / 07/ 2023 devant le jury composé de :

Président :	N-Belgroune	MCB	USDB1
Examineur :	Hassein- Bey	MCB	USDB1
Promoteur :	A-Amrane	MCB	USDB1

Blida -- 2022/2023

Dédicace :

Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance :

A mon père et ma très chère mère pour leurs affections et leur amour Que Dieu les garde et les protège.

À mes frères et sœurs.

A mes très chers amis et Camarades.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

AZIRI OMAR

Dédicace :

Je dédie cette thèse de recherche

A mes chers parents ma mère et mon père.

A ma sœur Rania et mon frère pour sa patience, son amour, son soutien et ses encouragements.

Sans oublier tous mes professeurs que ce soit du primaire du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

ESSERHANE

NIHAD

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir donné la force, la santé et la patience pour faire ce travail.

Nous voulons exprimer notre gratitude sincère envers nos parents, dont nous sommes très fiers, car ils nous ont apporté le courage, la foi, la patience et l'amour.

*Notre profonde gratitude va à notre promoteur, **M. A. AMRANE**, qui nous a aidés, soutenus et bien orientés et formés afin que nous puissions rédiger et terminer ce mémoire. Nous apprécions vos précieux conseils, votre aide et votre disponibilité.*

De plus, nous exprimons notre gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. À tous nos collègues et amis, sans exception.

*Nos remerciements à notre chef d'option, **M. A. HASSEIN-BEY**, qui nous a toujours orientés et mis sur le bon chemin.*

*Nos remerciements vont aussi, à **M. N. BELGROUNE** qui nous fait l'honneur de présider le jury.*

RESUME

En physique, le concept de bandes de fréquences interdites dans les cristaux phononiques est largement utilisé. Ce mémoire présente la faisabilité et l'efficacité de l'application de ce principe d'amortissement ou d'interdiction de la propagation des ondes induites par des vibrations de diverses origines mécanique ou autres à l'échelle réelle. Les résultats de la modélisation numérique et de l'analyse d'un substrat en béton contenant des éléments en acier (résonateurs) enrobés d'un polymère en polystyrène ou en pvc ont révélé l'existence de trois bandes interdites distinctes, synonymes d'absence de propagation des ondes de vibration à travers la structure. La substitution du pvc à l'acier a amélioré la largeur relative des bandes interdites et les a dirigées vers les basses fréquences. Ces résultats démontrent la possibilité d'utilisation des réseaux périodiques pour réduire les effets des vibrations mécaniques ou autres sur les structures phononiques à grande échelle

ملخص

في الفيزياء ، يستخدم مفهوم فجوات النطاق في البلورات الصوتية على نطاق واسع. تقدم هذه الأطروحة جدوى وكفاءة تطبيق مبدأ التخميد هذا أو حظر انتشار الموجات التي تحدثها اهتزازات من أصول ميكانيكية مختلفة أو أصول أخرى على نطاق حقيقي. كشفت نتائج النمذجة العددية وتحليل الركيزة الخرسانية المحتوية على عناصر فولاذية (رنانات) مطلية بالبوليسترين أو pvc عن وجود نطاقات ممنوعة مميزة ، مرادفة لعدم انتشار موجات الاهتزاز. عند استخدام البولبيسترين لاحظنا ظهور فجوات نطاق صغيرة عند الترددات المرتفعة وعند استخدام pvc أدى ذلك إلى تحسين العرض النسبي لفجوات النطاق وتوجيهها نحو الترددات المنخفضة. توضح هذه النتائج إمكانية استخدام pvc لتقليل تأثيرات الاهتزازات الميكانيكية أو الاهتزازات الأخرى على الهياكل الصوتية واسعة النطاق.

ABSTRACT

In physics, the concept of forbidden frequency bands in phononic crystals is widely used. This paper presents the feasibility and effectiveness of the application of this principle of damping or prohibiting the propagation of waves induced by vibrations of various origins, mechanical or otherwise, on a real scale. The results of numerical modeling and analysis of a concrete substrate containing steel elements (resonators) covered with polystyrene or PVC polymer revealed the existence of three distinct band gaps, synonymous with absence of propagation vibration waves through the structure. The substitution of PVC for steel improved the relative width of the band gaps and oriented them towards low frequencies. These results demonstrate the possibility of using periodic gratings to reduce the effects of mechanical or other vibrations on large-scale phononic structures.

Table des matières

Liste des acronymes	2
Liste des figures.....	4
Liste des tableaux.....	6
-CHAPITRE 1 : CRISTAUX PHONONIQUES - GENERALITES ET APPLICATIONS.....	8
-Introduction:.....	8
- Historique des structures périodiques.....	9
- Cristaux phononiques (1D, 2D, 3D).....	11
-Introduction du concept des cristaux phononiques.....	11
-Définition d'un cristal phononique.....	13
-Propriétés fondamentales des cristaux phononique.....	13
- Comparaison entre les cristaux phononique et les cristaux photonique....	14
- Notion de Bandes interdites.....	15
-Origine des bandes interdites de Bragg.....	15
-Origine des bandes interdites à résonances locales.....	16
-Formulation d'onde.....	17
- Equation d'onde.....	17
-Développement en série de Fourier d'une fonction périodique.....	18
- Théorème de Bloch-Floquet.....	18
-Réseau direct, réseau réciproque.....	19
-Zone de Brillouin.....	19
CHAPITRE2 :MODELISATION ET METHODED SIMULATIONS D'UNESTRUCTURE PHONONIQUE.....	21
-Introduction.....	21
-Définition et choix des modèles étudiés.....	21
-Choix et étude de la cellule de base - modèle numérique.....	22
-Modélisations par éléments finis sous ComsolMultiphysics.....	24

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET ANALYSE.....	28
-Introduction:.....	28
-Calcul des courbes de dispersion:.....	28
-Courbes de dispersion pour le couple de matériaux "Acier- pvc".....	28
-Courbes de dispersion pour le couple de matériaux "Acier- polystyrène "	30
-CONCLUSION	40

Liste des acronymes :

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé quelques abréviations dont nous rappelons la signification ci-dessous:

CPh: Cristaux phononiques

BI: Bande Interdite

λ :Longueur d'onde

λ_0 :Longueur d'onde de résonance

a:Période du cristal photonique

r:Rayon des motifs du cristal photonique

n:Indice de réfraction

$k \vec{}$:Vecteur d'onde.

$G \vec{}$:Vecteur du réseau réciproque

c:Célérité de la lumière dans le vide.

ϵ : Permittivité diélectrique.

BIP:Bande Interdite Photonique

RI: Refractive Index

Q:Facteur de Qualité

LD: Limite de Détection

CPRL: Cristaux Phononiques à Résonance Locale

LRPC: *Locally Resonance of Phononic Crystals.*

FEM : Finie Elément Méthode.

Liste des Figures

Figure 1.1 : C Cristaux phononiques constitués de répétitions périodiques d'inclusions de matériau B dans unematrice en matériau A. (a) CP tridimensionnel, (a') CP bidimensionnel à ondes de volume, (b) CP à ondes de surface et(c) CP à ondes de Lamb [49]	10
Figure1. 2 : CP à ondes de Lamb constitué d'un arrangement périodique de cylindres disposés sur une plaque	
Figure 1.3: Représentation schématique d'un CP unidimensionnel constitué deux matériau A et B[38].....	10
Figure1.4 :structure 2D ; et carrée et triangulaire et hexagonale.....	11
Figure1.5: exemple sur structure 3D.....	12
Figure1.6: Schéma expliquant la loi de bragg[48].....	15
Figure1.7 :(A) Résonateur sphérique constitué d'un cœur en plomb enrobé par élastomère mou. (B) Cristal phononique tridimensionnel à résonance local.....[50]	
Figure1.8: passage de l'espace réel à l'espace réciproque pour une maille carré et maille hexagonale [57]	20
Figure2.1 : structure périodique composée d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindresmétalliques émergents enrobés d'une couche de polymère [57]. ...	22
Figure2.2 :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 (m'étale de polymère)émergent du substrat,(d)un grugeages effectué aux quatre coins de la cellule de base	
Figure 2.3: (a) structure périodique composée d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindresmétalliques enrobés d'une couche de polymère (b) Modèle représentant une cellule de base [57].....	23
Figure2.4: Différentes étapes pour la conception géométrique d'un modèle..	23
Figure2.5: Les condition s aux limites périodiques appliquées aux quatre surfaces la térales du massif debéton [49]	27
Figure2.6: Modes des vibrations et répartition des champs de déplacements ...	27
Figure (3.1) : courbe de dispersion de pvc pour (r1=0.45 et r2=0.35).....	28
Figure (3.2) : courbe de dispersion de pvc pour (r1=0.35 et r2=0.2.....	28
Figure (3.3) : courbe de dispersion de pvc pour (r1=0.25 et r2=0.15)	28

Figure (3.4) distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche pvc pour ($r_1=0.45$ et $r_2=0.35$ et $h=0.5$).....29

Figure (3.5) : distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche pvc pour ($r_1=0.35$ et $r_2=0.25$ et $h=0.5$).....29

Figure (3.6) : distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche pvc pour ($r_1=0.25$ et $r_2=0.15$ et $h=0.5$).....30

Figure (3.7) : courbe de dispersion de polystyrène pour ($r_1=0.25$ et $r_2=0.15$ et $h=0.5$).....31

Figure (3.8) : distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche polystyrène pour ($r_1=0.25$ et $r_2=0.15$ et $h=0.5$).....31

Figure 3.9 : Histogramme montrant l'évolution des largeurs des bandes gap

En fonction des couples de matériaux utilisés "acier- pvc " et "acier-polystyrène ", avec **pvc1**= ($r_1/a=0.45$ et ; $r_2/a=0.35$).et **pvc2**= ($r_1/a=0.35$ et ; $r_2/a=0.25$) et **pvc3**= ($r_1/a=0.25$ et ; $r_2/a=0.15$).....32

Figure 3.10 : Histogramme montrant l'évolution des fréquences centrales en basses et hautes fréquences en fonction des couples de matériaux utilisés "acier- pvc " et "acier-polystyrène ", avec **pvc1**= ($r_1/a=0.45$ et ; $r_2/a=0.35$).et **pvc2**=($r_1/a=0.35$ et ; $r_2/a=0.25$) et **pvc3**=($r_1/a=0.25$ et ; $r_2/a=0.15$).....32

Figure 3.11 : Histogramme montrant l'évolution des Largeurs relatives en basses et hautes fréquences en fonction des couples de matériaux utilisés "acier - pvc " et "acier -polystyrène".....33

Liste des tableaux

Tableau1: Caractéristique des matériaux	24
Tableau2: Paramètres et grandeurs géométriques.....	25
Tableau 3 : Caractéristiques des courbes de dispersion pour les couples matériaux "Acier pvc "et "Acier-polystyrène"	32
Tableau 4 : Largeurs relatives exprimées par le rapport $\Delta f / f_0$	38

Introduction générale :

L'environnement humain est rempli de systèmes et de phénomènes réguliers dont il profite ou subit l'influence.

Les cristaux phononiques (CP) sont des structures artificielles périodiques composées de divers matériaux. L'objectif de cette structuration périodique d'un matériau à une, deux ou trois dimensions est d'influencer considérablement les propriétés de propagation des ondes acoustiques. Plus précisément, les courbes de dispersion des ondes acoustiques peuvent, sous certaines conditions de géométrie et de composition, présenter des bandes interdites de fréquences pour lesquelles la propagation des ondes élastiques est interdite quelque soit la direction de propagation. De nombreuses applications, telles que la création de miroirs sélectifs ou semi-transparentes, la création de filtres fréquentiels par couplage de défauts ou de résonateurs, peuvent bénéficier de l'existence de bandes interdites. Également des barrières phoniques de basse fréquence. Pour illustrer numériquement les phénomènes de guide d'onde et de séparation de fréquence dans les structure phononiques, nous effectuerons une étude d'introduction.. Mettre en évidence les possibilités de séparation de fréquences dans les guides d'onde 2D en plaques par des simulations numériques, afin que des études expérimentales de validation puissent être menées dans un avenir très proche. [1].

CHAPITRE1: cristaux phononiques-généralités et applications.

11.1-Introduction:

Les cristaux phononiques (CP) sont des environnements composites composés une combinaison périodique de matériaux ayant des caractéristiques élastiques et/ou des densités distinctes. Plusieurs de leurs propriétés acoustiques remarquables ont été révélées par de nombreuses études sur les CP. Leur capacité à disperser les ondes acoustiques et élastiques est fortement influencée par le choix des matériaux utilisés dans le cristal, ainsi que par son "design" et sa conception, c'est-à-dire l'agencement et l'espacement entre ses éléments constitutifs. La principale caractéristique de ces milieux périodiques, qui ont attiré tant de chercheurs, est la possibilité d'existence d'intervalles de fréquences où le CP se comporte comme une barrière pour les ondes acoustiques/élastiques. Ces intervalles de fréquence sont appelés bandes interdites phononiques ou bandes gap, par analogie avec les bandes interdites des électrons dans les semi-conducteurs, ou encore celles des cristaux photoniques. La plupart des travaux consacrés aux effets dispersifs dans les CP sont de nature théorique et se basent sur différents outils de simulations numériques [2] complexes. Cela a permis aux chercheurs de couvrir un large éventail de structures phononiques ainsi que le comportement physique des individus. Une nouvelle classe de matériaux appelés métamatériaux acoustiques a été créée grâce à la persévérance des scientifiques qui ont créé de nouvelles structures avec des comportements physiques inhabituels. Ce chapitre offre une présentation générale des CP étudiés par les chercheurs ainsi que de leurs caractéristiques acoustiques.

1.2 : Historique des structures périodiques :

Les arrangements périodiques des cristaux phononiques peuvent inclure des éléments périodiques de différentes formes. La conception d'un cristal phononique est influencée par le type d'onde et le niveau d'interaction avec le milieu phononique. Les premières structures phononiques bidimensionnelles étudiées pour les ondes de volume sont illustrées à la figure 1.1. Ces structures sont considérées comme périodiques dans les directions X et Y, tandis que dans la direction Z, elles sont supposées infiniment longues. En 1993, Siggalas et Economou [3-4] et Kushwaha et al. ont examiné ce type de CP avec des inclusions cylindriques. Un certain nombre d'études ont ensuite examiné le même type de CP dans différents contextes. Un exemple de cela était les inclusions cylindriques. Plusieurs études ont ensuite examiné le même type de CP dans divers milieux. Les inclusions solides dans les matrices solides [5- 13] et les inclusions solides dans les matrices fluides [14-20] ont été les structures bidimensionnelles les plus étudiées, particulier pour souligner de nouvelles caractéristiques dispersives. Depuis l'introduction du concept par Yablonovitch au 19ème siècle en 1987 et les premières études numériques en 1990, des progrès considérables ont été réalisés avec les prototypes pour les longueurs ondes microondes en 1991, puis pour les longueurs ondes optiques en 1995, les premiers dispositifs commercialisés en 1999 et les premiers appareils vendus en 1999. Actuellement, diverses méthodes de lithographie sont disponibles pour créer des structures périodiques bidimensionnelles pour des matériaux tels que le silicium et les semiconducteurs III-V. Grâce à leur avantage en termes d'étude théorique, à savoir la simplicité de résolution du système des équations de propagation des ondes, qui deviennent moins liées dans ce cas. Les ondes de volume ont également été propagées dans les CP tridimensionnels [25-21]. Comme le montre la figure 1.1(a), ces systèmes phononiques ont des arrangements de configuration cubique simple ou cubique à faces centrées inclusions dans une matrice solide ou fluide. Des études ont également été menées sur la distribution des ondes superficielles dans des structures similaires à celles indiquées à la figure 1.1 [33-26]. Ce type de structures est considéré comme semi-infini, ce qui signifie qu'elles ont une surface libre dans la direction Z positif (figure 1.1). Et infini dans l'autre sens. Ces structures présentent des ondes de volume et de surface, qui peuvent être séparées à l'aide de techniques telles que le cône du son, la distribution des champs de déplacement et les milieux absorbants pour les ondes de volume. Les CP sont présentés sous forme de plaques terminées.

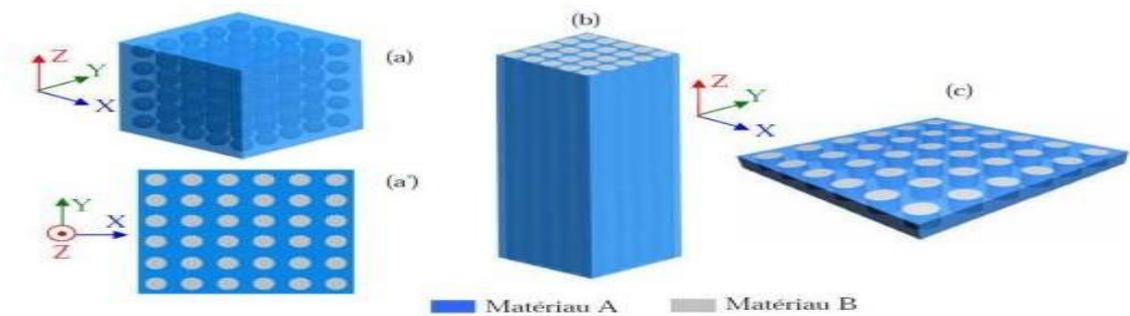


figure 1.1 Les cristaux phononiques sont constitués de répétitions régulières d'inclusions de matériau A dans une matrice de matériau B. a) CP à ondes de volume, b) CP à ondes de surface et c) CP à ondes de Lamb [34]

.Ils ont ainsi montré qu'en jouant sur l'épaisseur de la plaque, ils peuvent créer une bande interdite complète pour les ondes de Lamb. Depuis lors, différents travaux avaient porté sur ces structures avec la mise en place de nouveaux moyens de calcul numérique [38-35]. D'autres études sur les structures phononiques à ondes de Lamb ont aussi vu le jour en adoptant des arrangements périodiques de cylindres disposés sur une plaque [40-39] (voir figure (1.2)).

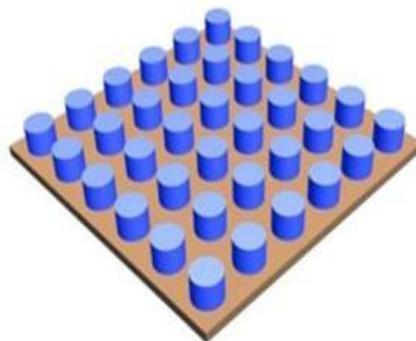


Figure1.2:Le CP à ondes de Lamb est composé d'une combinaison régulière de cylindres placés sur une plaque [41]

1.3 : Cristaux phononiques (1D, 2D, 3D)

Structures périodiques unidimensionnelles (1D) :

Un composite stratifié appelé cristal phononique unidimensionnel est obtenu en empilant en alternance des couches de matériaux ayant des caractéristiques physiques différentes (propriétés élastiques différentes). Les domaines de fréquence où apparaissent les bandes interdites dans ces structures unidimensionnelles dépendent de la direction de propagation de l'onde incidente. De nombreuses applications dans l'isolation acoustique à basse fréquence peuvent être trouvées avec ces cristaux

phononiques unidimensionnels. Il est facile d'obtenir de larges bandes interdites en raison de leurs structures. Un cristal phononique unidimensionnel composé de deux matériaux distincts, A et B, est illustré à la figure 1.3 [42].

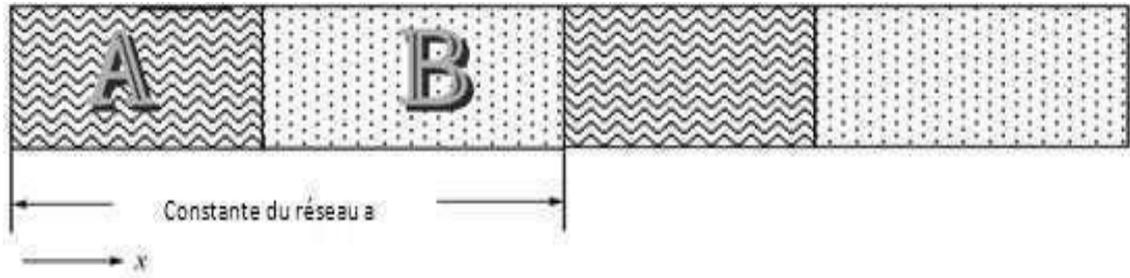


Figure 1.3: Représentation schématique d'un cristal phononique Unidimensionnel constitué de deux matériaux A et B.

Structures périodiques bidimensionnelles (2D) :

Les cristaux phononiques à deux dimensions sont constitués d'un réseau périodique d'inclusions d'une substance élastique dans l'air ou de cylindres d'air percés dans une matrice. Les cristaux phononiques 2D [43] sont des structures dont les propriétés élastiques changent périodiquement selon deux dimensions de l'espace.

- Les inclusions ou les diffuseurs, qui sont plongés dans une matrice hôte, sont les principaux composants de ces structures. Cela est dû au fait que la géométrie simple de ce type de structure facilite leurs recherches théoriques et expérimentales.

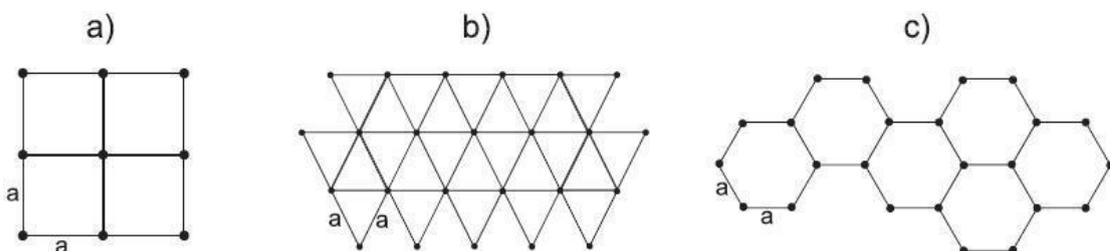


Figure 1.4: Structure 2D : a) Structure carrée, b) triangulaire et c) hexagonale.

- Structures périodiques tridimensionnelles (3D) :

L'espace et restent invariables dans la troisième dimension. Comme le montre la figure 3.3, ils se regroupent principalement en fonction des trois types de réseaux : le réseau carré, le réseau triangulaire et le réseau hexagonal.

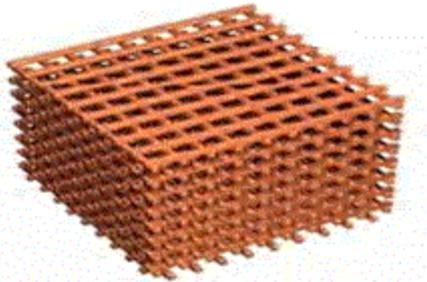


Figure 1.5 : Exemples de structures 3D.

1.3.1. Introduction du concept des cristaux phononiques:

La cristallographie est essentielle au concept de cristal phononique. L'objectif de cette branche de la physique est d'étudier les conditions les plus régulières de la matière solide. Les réseaux périodiques tridimensionnels sont formés par les atomes des cristaux. Les distances entre les atomes dans un cristal sont généralement d'environ 1 Å, soit un dix mil homme, ont des dimensions beaucoup plus importantes. Les plus imposantes mesurent de quelques mètres à cent nanomètres. À cette échelle, la matière semble continue et les lois de la mécanique classique peuvent être utilisées avec confiance. Le cristal phononique consiste à créer un matériau artificiel structuré régulièrement en combinant au moins deux matériaux différents. Plus les propriétés acoustiques des matériaux en jeu sont contrastées, plus les phénomènes d'interférence d'ondes sont importants selon l'intuitif.

Le principal composant d'un cristal phononique est composé d'inclusions disposées régulièrement dans une matrice. Les inclusions d'un cristal phononique bidimensionnel sont des cylindres de différentes sections qui peuvent être disposés dans un réseau carré ou triangulaire.

Au lieu de matériaux différents de ceux de la matrice, les inclusions peuvent être constituées de simples trous. En 1993, Kushwaha et ses pairs de l'Université de Lille ont proposé que la diffusion de la bande interdite peut se produire de différentes manières. C'est une bande complètement interdite dans ce cas. Un cristal phononique avec une bande interdite complète fonctionne comme un miroir parfait, réfléchissant toutes les ondes incidentes. Un cristal phononique ne peut pas propager des ondes. Selon la

même affirmation, un transducteur (qui peut également être utilisé comme source d'émission ou détecteur d'ondes acoustiques) est complètement résistant aux ondes extérieures lorsqu'il est entouré d'un cristal phononique très épais. Cependant, ces caractéristiques remarquables ne sont pas applicables aux fréquences qui Ces dernières années, les chercheurs ont établi plusieurs règles générales pour définir les conditions dans lesquelles les phénomènes de bande interdite se produisent.. Lorsque la longueur d'onde (ou la période de répétition spatiale de l'onde) est supérieure à celle du cristal phononique, on parle de bandes interdites de Bragg. La largeur des bandes interdites est principalement influencée par le contraste de vitesse acoustique et le contraste de densité entre la matrice de propagation et les inclusions diffusantes. Les inclusions qui mettent l'accent sur la nature isotrope de la diffusion sont préférées.

De plus, la taille de ces inclusions doit être correctement ajustée par rapport au temps de fonctionnement du réseau. De plus, tous les réseaux périodiques diffèrent. Par exemple, pour les structures bidimensionnelles comme la sculpture de Sempere constituée de tiges d'acier mentionnée précédemment, le réseau carré est plus approprié pour ouvrir les bandes interdites que le réseau triangulaire.. Dans les réseaux tridimensionnels, de larges bandes interdites complètes sont créées par des empilements de sphères lourdes (comme l'acier) placées dans une matrice légère qui imite la structure du diamant, qui est un réseau cubique à faces centrées. Cependant, l'exploration de toutes les possibilités offertes par le choix de l'arrangement périodique, des matériaux composants la matrice et les inclusions diffusantes, et de la forme de ces inclusions, est loin d'être complète et occupera les chercheurs de longues années encore [44].

1.3.2-Définition d'un cristal phononique:

La façon dont les ondes élastiques se propagent en leur sein est profondément modifiée par des structures périodiques appelées cristaux phononiques. Les ondes élastiques couvrent une variété de phénomènes ondulatoires dans différents états de la matière. Les cristaux phononiques sont des structures périodiques qui modifient profondément la façon dont les ondes élastiques se propagent en leur sein. De nombreux phénomènes ondulatoires dans différents états de la matière sont couverts par les ondes élastiques, tels que le son dans l'air, les ondes acoustiques dans l'eau et les liquides, les phonons dans les cristaux naturels, etc. Des exemples de matière comprennent le son dans l'air, les ondes acoustiques dans l'eau et les liquides, les phonons dans les cristaux naturels, etc. Des cristaux phononiques peuvent piéger les ondes dans l'espace et le temps ou les inverser soudainement. Les cristaux phononiques peuvent être utilisés simultanément, ce qui ouvre la voie à une nouvelle optoacoustique dans laquelle l'ingénierie des nanostructures peut magnifier l'interaction de la lumière et du son. Par conséquent, on peut considérer une structure périodique comme un cristal phononique ou photonique. Ce type de structure est désigné sous le nom de cristal phoXonique [45].

1.4-Propriétés fondamentales des cristaux phononique:

Les cristaux phononiques sont plus importants pour être utilisés dans les études scientifiques car ils permettent de concevoir le matériau en fonction des besoins et présentent des bandes interdites absolues qui peuvent bloquer la propagation des ondes incidentes quel que soit leur direction. Les cristaux phononiques sont des structures artificielles formées d'une distribution périodique d'au moins deux matériaux,

1.5 : Comparaison entre les cristaux phononiques et les cristaux photoniques:

De nombreux phénomènes ondulatoires dans les matériaux Les structures périodiques appelées cristaux phononiques modifient en profondeur la façon dont les ondes élastiques se propagent en leur sein. Rents états de la matière sont recouverts par les ondes élastiques, tels que le son dans l'air, les ondes acoustiques dans l'eau et les liquides, les phonons dansables des cristaux naturels, etc. Les cristaux phononiques peuvent piéger les ondes dans l'espace et le temps ou inverser brusquement leur course. Si l'échelle est bien choisie, ils peuvent être simultanément des cristaux photoniques, ce qui ouvre la voie à une nouvelle optoacoustique dans laquelle l'ingénierie des nanostructures peut magnifier l'interaction de la lumière et du son [46].

L'interaction d'un cristal phononique avec une onde élastique est assez similaire à celle des cristaux photoniques avec une onde électromagnétique, et on s'attend à ce que les mêmes phénomènes se produisent : ouverture de bandes interdites, localisation sur un défaut, dispersion... avec comme corollaires des applications potentielles dans le domaine du filtrage acoustique, du guidage ou de la focalisation sélective en fréquence d'ondes élastiques [47].

Les cristaux phononiques sont les suivants :

En 1993, les cristaux phononiques ont vu le jour.

- Les équivalents élastiques des cristaux photoniques
- Structures 3D/2D composées de deux matériaux différents.
- Des comportements similaires.

Très bon miroir.

- Protection de l'énergie.
- Guides.

Les cristaux photoniques comprennent :

En 1978, les cristaux photoniques ont vu le jour.

- Expériences expérimentales en 3D et 2D.
- Éléments optiques viables [48]

1.6-Notion de Bandes interdites.

-Origine des bandes interdites de Bragg.

L'existence de bandes de fréquences interdites, appelées bandes de Bragg, dans lesquelles les ondes acoustiques ou élastiques sont évanescentes est une caractéristique des cristaux phononiques. Dans le cas d'un cristal phononique à une dimension, les bandes interdites de Bragg sont directement liées au rapport d'impédance entre les couches successives et à la période spatiale de l'empilement de couches.

L'observation de la diffraction de rayon X sur un cristal, génialement en peut appliqué, a la diffraction d'une onde plane dans un milieu périodique. Dans le cas d'un cristal phononique, l'arrangement périodique des atomes de rayon X entraîne une diffraction de Rayleigh. La réémission d'ondes de même fréquence se produit. Si la distance entre les atomes est conforme à la loi de Bragg, la forme suivante se produit :

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

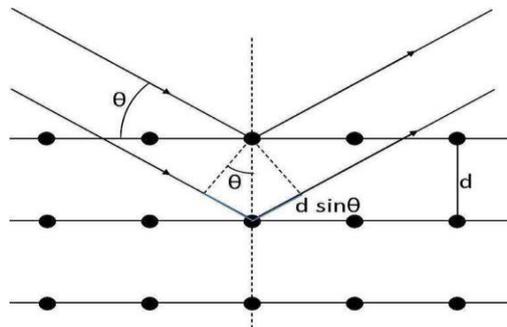


Figure1.6 : schéma expliquant la loi de Bragg [49]

La loi de Bragg peut être géométriquement déduite de cette figure en prenant en compte la différence de chemin optique entre les deux rayons impliqués. Les rayons peuvent se combiner pour créer une interférence constructive lorsque cette différence est égale à un nombre entier de la longueur d'onde incidente, ce qui donne l'équation (1).

Les résultats théoriques et expérimentaux présentés démontrent l'existence de bandes interdites de Bragg dans des barreaux piézoélectriques homogènes soumis à des conditions aux limites électriques libres périodiques apparaissant sur les électrodes, créant des ondes réfléchies. L'impédance électrique associée à cette condition peut modifier les caractéristiques de ces ondes à basse fréquence et longueur d'onde [50].

1.6.2-Origine des bandes interdites à résonances locales:

Au XXI^e siècle des scientifiques ont développé une structure phononique innovante avec des caractéristiques dispersives inhabituelles. Cette structure a été comparée aux autres cristaux phononiques traditionnels fondés sur le mécanisme de Bragg. Grâce à leur structure périodique, ils ont démontré qu'il peut y avoir une bande interdite pour des ondes qui ont une longueur d'onde beaucoup plus longue que la périodicité du cristal, ce qui est dû au phénomène de résonance locale. Les métamatériaux acoustiques ont été le premier pas réel vers la création d'une nouvelle classe de matériaux acoustiques aux comportements inhabituels. Par conséquent, les « cristaux phononiques à résonance locale » ou « cristaux phononiques à résonance locale » (LRPC) sont nés : Les structures munies d'unités localement résonantes (résonateurs) peuvent atténuer efficacement des fréquences dont les longueurs d'onde sont de deux ordres de grandeur supérieures au pas ou au paramètre de maille ($\lambda > 2a$) de la structure. En raison de l'utilisation d'un matériau très mou, ces résonateurs ont leurs propres modes de résonance qui se situent à de très basses fréquences. Comparé aux autres matériaux utilisés pour les cristaux phononiques, chaque résonateur est composé d'un cœur massif en plomb enrobé d'un élastomère élastiquement très mou.

Une structure cubique simple est utilisée dans la matrice en époxy pour arranger périodiquement ces résonateurs [51].

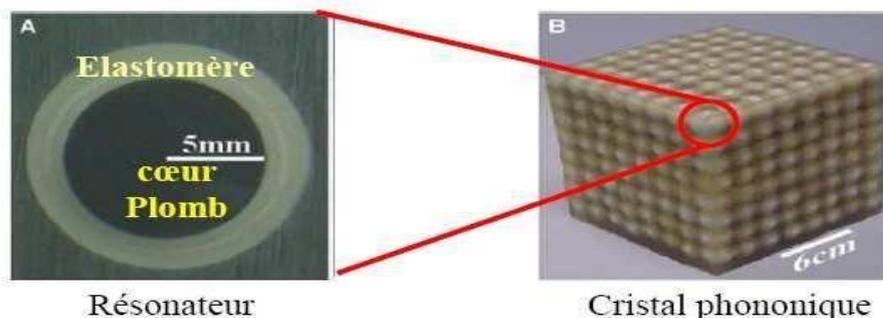


Figure1.7: (A) Résonateur sphérique constitué d'un cœur en plomb enrobé par Elastomère mou.(B)Cristal phononique tridimensionnel à résonance locale[52]

La combinaison élastomère-plomb fonctionne comme un système de ressort attaché à une masse, formant ainsi un résonateur avec des modes de résonance spécifiques à de très basses fréquences. Dans ce type de structures, le principe d'ouverture des bandes interdites est basé sur la combinaison des modes de résonance des résonateurs (modes

localisés) et des modes de volume qui se propagent dans le CP. Lorsqu'une onde élastique traverse un milieu phononique avec

Une fréquence qui correspond à la fréquence avec laquelle les résonateurs interagissent. Dans certaines circonstances, ce mélange peut entraîner une diminution de l'onde.

En utilisant ce mécanisme de résonance, il est possible de créer des bandes interdites situées à des fréquences extrêmement basses, où les longueurs d'ondes de l'époxy (la matrice) dépassent considérablement la périodicité. Du cristal phononique [53].

1.7. -Formulation théorique

1.7.1-Equation d'onde.

Les équations suivantes indiquent la propagation d'une onde élastique dans un milieu composite et isotrope dans le cadre de l'élasticité linéaire

$$\rho(\vec{r}) \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}(\vec{r}, t) \quad (1.1)$$

$$\sigma_{ij}(\vec{r}, t) = C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}(\vec{r}, t) + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}(\vec{r}, t) \right) \quad (1.3)$$

Dans lesquelles $\rho(\vec{r})$ est la masse volumique du cristal au point repéré par le vecteur, \vec{r} $u_i(\vec{r}, t)$ représente le déplacement suivant la direction i , au point (\vec{r}) , ε_{ij} désigne le tenseur des déformations, C_{ijkl} le tenseur des constantes élastiques et $\sigma_{ij}(\vec{r}, t)$ le tenseur des contraintes localement par le cristal au point \vec{r} [54].

1.7.2-Développement en série de Fourier d'une fonction périodique.

La répartition de la masse volumique et des paramètres élastiques démontre une variation périodique selon la position. Autrement dit, la densité (ρ) et les coefficients élastiques (C_{ij}) évoluent en fonction des coordonnées x et y , tandis que l'axe z définit la direction parallèle aux axes des cylindres dans notre contexte. En raison de la double périodicité présente dans le plan xOy , il devient envisageable de représenter la densité (ρ) et les coefficients élastiques (C_{ij}) sous la forme de séries de Fourier.

$$p(r) = \rho(x, y) = \sum_G \rho(G) e^{iG \cdot r} \quad (1.4)$$

$$C_{ij}(r) = C_{ij}(x, y) = \sum_G C_{ij}(G) e^{iG \cdot r} \quad (1.5)$$

1.7.3-Théorème de Bloch-Floquet.

La transformation fonctionnelle de la théorie de Bloch-Floquet sert d'outil pour analyser des équations avec des dérivées partielles et des coefficients périodiques. La plupart du temps, elle est utilisée pour simuler la propagation des ondes traversant des structures périodiques dans une ou plusieurs directions.

De plus, les diagrammes de dispersion de structures périodiques peuvent être créés en utilisant la méthode de Bloch-Floquet. Il est supposé que la loi de comportement du matériau est linéaire, élastique et isotrope.

Le théorème de Bloch, qui a été présenté pour la première fois en 1928, a été utilisé pour décrire les propriétés des ondes électroniques dans un potentiel périodique. En physique des semi-conducteurs, il est possible d'obtenir la structure de bande d'un solide cristallin en résolvant le problème lié à un corps (un électron) de l'équation de Schrödinger dans le réseau réciproque. Le théorème de Bloch-Floquet peut être utilisé pour déterminer la périodicité de l'énergie potentielle dans un cristal. Selon cela, la solution de l'équation de Schrödinger est la fonction d'onde $\Phi_k(r)$ si l'énergie potentielle $E(r)$ est périodique avec la période de la structure :

$$\Phi(r) = u(r) e^{jk \cdot r} \quad (1.6)$$

1.7.4-Réseau direct, réseaux réciproque

Afin de représenter de manière précise et complète les propriétés des milieux périodiques, on utilise les techniques de la cristallographie et de la physique du solide. Bravais utilise un

réseau direct pour créer une structure cristalline 1D, 2D ou 3D. La répétition d'un motif élémentaire est effectuée à l'aide d'une base de vecteurs de translations appelés vecteurs primitifs \vec{a}_i , avec $i = [1, 2, 3]$. Un réseau réciproque est lié à ce réseau direct, Dont les vecteurs primitifs \vec{b}_j sont définis comme $\vec{b}_i \cdot \vec{a}_j = 2\pi\delta_{ij}$ (δ_{ij} étant le symbole de Kronecker).

Si \vec{a}, \vec{b} et \vec{c} sont les vecteurs primitifs du réseau cristallin, un nœud de ce réseau est repéré par un vecteur \vec{r} tel que :

$$\vec{r} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c} \quad (1.7)$$

Si \vec{A}, \vec{B} et \vec{C} sont les vecteurs primitifs du réseau réciproque, un nœud de ce réseau est repéré par le vecteur \vec{G} tel que :

$$\vec{G} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C} \quad (1.8)$$

Où : 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 :

Et
$$\vec{a} \cdot \vec{B} = 2\pi, \vec{b} \cdot \vec{B} \quad (1.9)$$

Avec

$$\vec{c} \cdot \vec{C} = 2\pi \quad (1.10)$$

$$\vec{A} = \frac{2\pi}{v}(\vec{b} \times \vec{c}), \vec{B} = \frac{2\pi}{w}(\vec{c} \times \vec{a}), \vec{C} = \frac{2\pi}{u}(\vec{a} \times \vec{b}), \text{ avec } \vec{v} = (\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{c} \quad (1.11)$$

Le facteur 2π n'est pas utilisé par les cristallographes mais il est pratique en physique du solide. Les vecteurs du réseau réciproque ont les dimensions d'une [longueur]⁻¹[56].

1.7.5-Zone de Brillouin:

La première zone est considérée comme la maille primitive du domaine fréquentiel en mathématique et en physique du solide. Elle est identifiée dans l'espace réciproque avec la maille de Wigner-Seitz dans le réseau de Bravais en utilisant la même méthode de **définition**.

La première zone de Brillouin est importante en raison de la description de Bloch des ondes dans un milieu périodique, qui montre que les solutions peuvent être caractérisées entièrement par leur comportement dans cette zone [57]. Le concept de zone de Brillouin fut développé par Léon Brillouin (1889-1969), physicien français.

Brillouin a fait l'énoncé le plus significatif sur la condition de diffraction pour la physique de l'état solide. C'est la seule construction utilisée dans l'expression des excitations élémentaires des cristaux et dans la théorie des bandes d'énergie pour les électrons d'un cristal. La zone de Brillouin est définie comme la maille de Wigner-Seitz du réseau réciproque en raison de sa symétrie. 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 zone de Brillouin est l'espace limité d'une part par les plans bissecteurs perpendiculaires aux vecteurs joignant le site à l'origine aux $l^{\text{ème}}$ sites voisins et d'autre part les plans bissecteurs des zones de Brillouin inférieures [58]

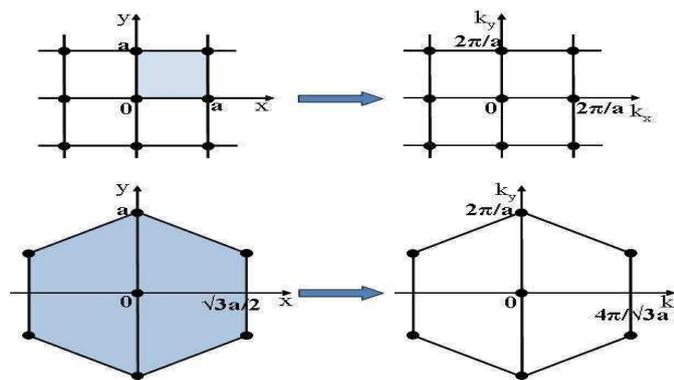


Figure 1.8 : passage de l'espace réel à l'espace réciproque pour une maille carrée et une maille hexagonale.

-CHAPITRE 2 : MODELISATION ET METHODES DE SIMULATIONS D'UNE STRUCTURE PHONONIQUE

2.1-Introduction:

Depuis des décennies, il y a eu une avancée dans le domaine des ondes acoustiques et de leurs utilisations. Il est désormais possible de représenter la substance pour créer des structures périodiques comme les cristaux phononiques qui présentent des caractéristiques acoustiques uniques.

Il est désormais envisageable de concevoir des structures ayant une action discriminante envers les fréquences des ondes qui les traversent. Certaines ondes sont transmises sans changement, tandis que d'autres sont bloquées.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord définir le choix des modèles que nous allons étudier dans ce mémoire en expliquant autant que possible les différentes étapes par lesquelles nous avons été. Les résonateurs doivent être présents afin d'attirer les bandes interdites vers les basses fréquences. La structure des courbes de diffusion peut varier en fonction de la taille ou de la nature des matériaux utilisés dans cette période. De plus, nous utilisons Comsol Multiphysics pour décrire les étapes de modélisation, ce qui nous permet d'obtenir les résultats finaux.

2.2-Définition et choix des modèles étudiés:

Le modèle de simulation étudié dans notre travail est formé par une cellule appelée (cellule unitaire) faisant partie d'une structure périodique bidimensionnelle constituée d'un substrat en béton muni de résonateurs sous forme d'un noyau en acier enrobé d'un polymère en polystyrène ou en pvc. Comme indiqué dans la figure (2.1).

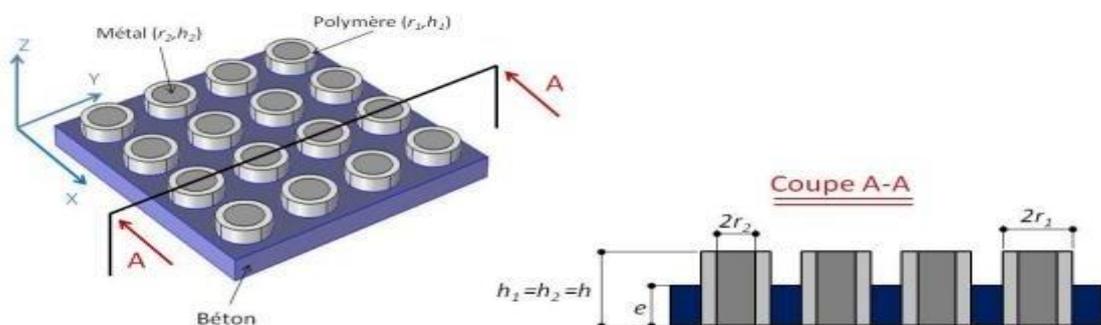


Figure 2.1: Structure périodique composée d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindres métalliques émergents enrobés d'une couche de polymère [59]

Les matériaux utilisés pour fabriquer les cylindres sont sélectionnés pour leur capacité à vibrer grâce à leurs propriétés élastiques. Cela permet un équilibre entre les modes de résonance locaux des cylindres, qui se produisent à de très basses fréquences, et les ondes de surface à créer. L'objectif principal du domaine du génie civil est le bloc de béton.

.

2.3-Choix et étude de la cellule de base –modèle numérique.

Pour le calcul des structures de bandes, nous nous sommes concentrés sur une seule cellule, la cellule de base, également connue sous le nom de cellule élémentaire de plaque du cristal phononique, comme illustré dans la figure (2.2), aux limites de laquelle sont ajoutées les conditions de Bloch-Floquet. Il est donc présumé que les dimensions de cette structure de modèle sont infinies dans les deux directions X et Y.

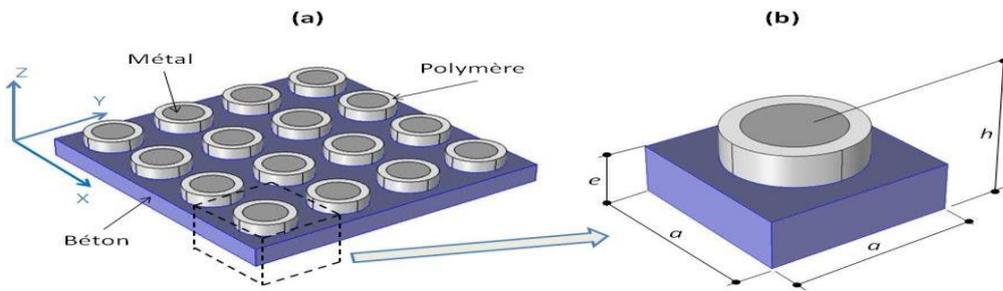


Figure 2.2 : (a) structure périodique composée d'un massif en béton et d'un arrangement carré de cylindres métalliques enrobés d'une couche de polymère, (b) Modèle représentant une cellule de base[60].

La première étape consiste à définir les formes et les grandeurs géométriques qui composent le modèle de base,. Nous pouvons même entrer des géométries paramétrées afin de faciliter le balayage d'une large gamme de dimensions possibles à notre géométrie.

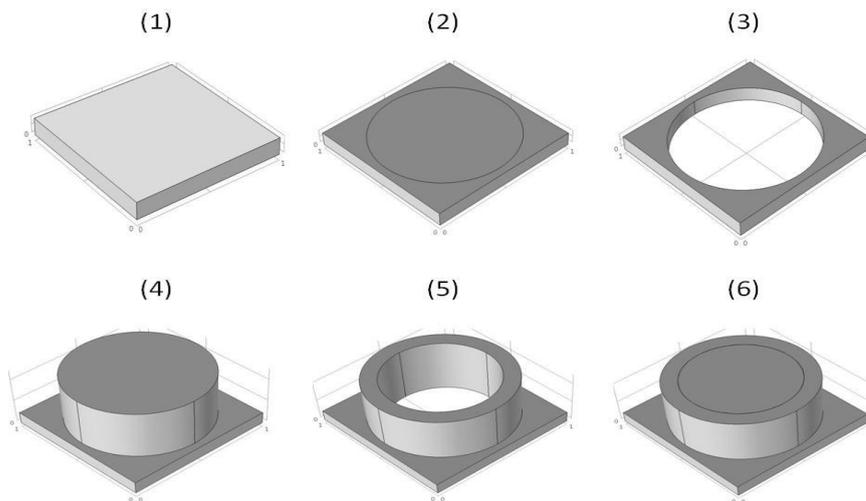


Figure 2.3 : Différentes étapes pour la conception géométrique d'un modèle.

La bibliothèque ComsolMultiphysics permet de choisir la nature des matériaux constituant la structure périodique ainsi que leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Les caractéristiques d'homogénéité, d'isotropie L'orthotropie et l'anisotropie peuvent être introduites et le programme est alimenté par une base de données appropriée. En remplissant les valeurs appropriées (, module de Young, coefficient

De Poisson, etc.), d'autres matériaux ou autres propriétés peuvent être introduits manuellement si elles sont souhaitées. Notre étude s'articule donc autour d'un modèle (cellule de base) initial représenté par une structure périodique bidimensionnelle (voir figure 2.3)

L'épaisseur relativement faible par rapport à ses dimensions en plan. Les cylindres en acier en forme de X et Y sont disposés sur le massif à intervalles réguliers. Les cylindres en acier sont recouverts d'un polymère en polystyrène ou en (PVC). Ainsi, la cellule de base est un substrat en béton de section carrée "a" avec un noyau cylindrique en acier enrobé d'un polymère. En remplaçant l'acier par du PVC ou du polystyrène, un autre couple de matériaux a été étudié.

Les dimensions relatives des noyaux métalliques et des polymères sont égales à r_2/a , h_2/a et r_1/a , h_1/a respectivement. Dans notre étude, le caractère viscoélastique des polymères n'est pas pris en compte et tous les milieux choisis sont considérés comme isotropes. Le Tableau suivant (tableau 1) contient les caractéristiques des différents matériaux, telles que la densité, les modules de Young E et les coefficients de Poisson

Tableau 1 : tableau des paramètres

	Masse volumique(kg.m ⁻³)	Module de young(GPa)	Coefficient de poisson
Béton	2400	30	0.3
Acier	7800	210	0.3
Pvc	1350	0.35	0.30
Polystyrène	1050	2.8 - 3.4	~ 0

2.5-Modélisations par éléments finis sous ComsolMultiphysics.

Le logiciel ComsolMultiphysics est utilisé pour concevoir et résoudre les structures des modèles étudiés dans notre mémoire.

Un logiciel appelé ComsolMultiphysics peut être utilisé pour simuler diverses applications en physique, notamment la simulation de phénomènes couplés ou de simulation multi physique. Ce programme de simulation numérique qui utilise la méthode des éléments finis (FEM).

Les diagrammes de dispersion des structures périodiques peuvent être créés en utilisant la technique de Bloch-Floquet. Il est supposé que la loi de comportement du matériau est linéaire, élastique et isotrope. est d'abord déterminé en utilisant le théorème de Bloch, qui limite le CP à une seule cellule élémentaire. Les équations de mouvement sont ensuite modifiées pour être utilisées dans le logiciel. Enfin, les structures des bandes sont calculées en utilisant l'analyse des fréquences propres proposée dans le modèle utilisé.

Pour résoudre et analyser complètement une structure périodique, la méthode des éléments finis sous ComsolMultiphysics nécessite une succession d'étapes distinctes et représentées comme suite :

Première étape : sélection de la ou des physiques

Au cours de cette étape, nous devons choisir la physique la plus appropriée à notre problème. Nous avons choisi une structure mécanique trois dimensions pour notre exemple.

Deuxième étape : sélection du type d'analyse

Le choix d'une analyse de fréquence propre pour calculer les fréquences et les modes propres fait partie de cette étape.

Troisième étape : création de la géométrie

Avant de choisir les formes géométriques dans notre cas, nous devons définir les paramètres des grandeurs géométriques dans Tableau 2.

Les différentes étapes nécessaires à la création du modèle étudié sont illustrées dans la figure précédente (figure2.3)

Tableau 2 : tableaux de paramétrage

Name	Expression	Value	Description
Kxx	0 [rad.m ⁻¹]	0 rad.m ⁻¹	k _x
Kyy	0[rad.m ⁻¹]	0 rad.m ⁻¹	k _y
Kzz	0 [rad.m ⁻¹]	0 rad.m ⁻¹	k _z
r ₁	0.45[m]	0.4500 m	Radius
h ₁	0.10[m]	0.5 m	Heightpillar
r ₂	0.35[m]	0.3500 m	
h ₂	0.10[m]	0.5 m	

Quatrième étape : définitions des propriétés physiques

En supposant que les matériaux sont homogènes et isotropes, les propriétés physiques ou mécaniques (, module de Young, coefficient de poisson, etc.) sont saisies.

Cinquième étape : Définition des conditions aux limites

Une fois que le domaine de résolution est établi et que les équations de mouvement ont été utilisées, les conditions sont ajoutées aux limites pour guider les solutions envisagées. Les conditions de Bloch sont appliquées aux surfaces latérales du massif de béton au niveau du domaine (cellule de base). Cela indique la périodicité de la structure selon les directions X et Y. Si la structure est considérée comme infinie dans le plan (O,X,Y), on se concentrera sur la répartition des ondes qui suivent les lignes X et Y ; Le vecteur d'onde k sera de la forme suivante :

$$u_{destination1}(x+a, y, z) = u_{source1}(x, y, z)e^{i(a.k_x)}$$

$$u_{destination2}(x, y+a, z) = u_{source2}(x, y, z)e^{i(a.k_y)}$$

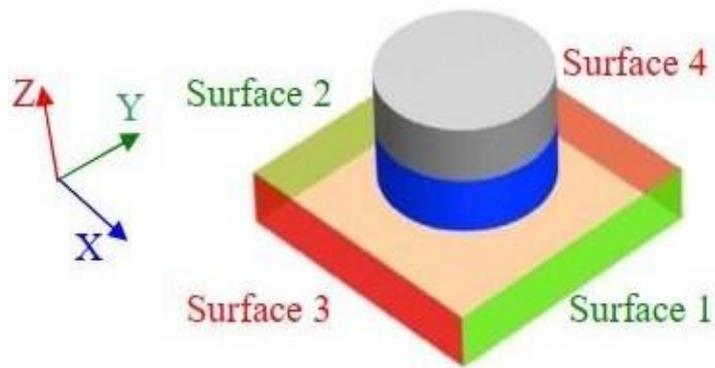


Figure 2.4: Les conditions aux limites périodiques appliquées aux quatre surfaces latérales du massif de béton [61].

Sixième étape : Résolution numérique

Les résultats numériques sont obtenus dans cette étape en faisant des simulations après avoir cliqué sur la sous-commande "Comput" présente dans la commande "Study".

La figure (2.5) suivante montre les premiers résultats des différents modes de vibrations obtenus pour une cellule unitaire.

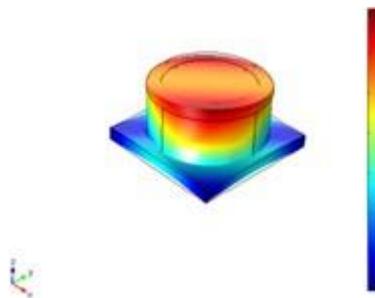


Figure2 .5: Modes des vibrations et répartition des champs de déplacements

-CHAPITRE3: RESULTATS ET ANALYSE.

3.1–Introduction:

Les différents types de modèles étudiés dans ce mémoire sont définis dans ce chapitre. La modélisation et la simulation d'une cellule de base phononique à un résonateur décrit les étapes de l'analyse par éléments finis utilisées par ComsolMultiphysics. Il y a également une courbe illustrant la dispersion des fréquences dans les trois directions de la zone irréductible de Brillouin, ainsi qu'une courbe illustrant le spectre de transmission des fréquences correspondant aux couples des matériaux "acier-pvc" et "acier-polystyrène".
en fonction du vecteur d'onde.

3.2-Calcul des courbes de dispersion:

La variabilité du vecteur d'onde k modifie les courbes de dispersion pour différentes orientations. La résolution du système d'équations dans la zone de Brillouin qui suit les trois directions ($\Gamma X, XM$ et $M\Gamma$). nous permet d'obtenir les valeurs et les fréquences propres du modèle. Les vecteurs propres peuvent être calculés pour chaque fréquence donnée afin de représenter la distribution et les déformations spatiales de chaque mode. Les champs de déplacement modaux sont représentés par des vecteurs propres. Ensuite, les courbes de dispersions des fréquences seront tracées en fonction des vecteurs d'ondes k .

3.2.1- Courbes de dispersion pour le couple de matériaux "Acier-pvc" :

On représente les courbes de dispersions des fréquences en fonction des vecteurs d'ondes pour tous les vecteurs d'onde compris dans la première zone de Brillouin.

Partir des points critiques de la première zone de Brillouin, $\Gamma X, XM$ et $M\Gamma$ respectivement, pour une maille carrée.

Les résultats des simulations ont été présentés dans les figures suivantes .

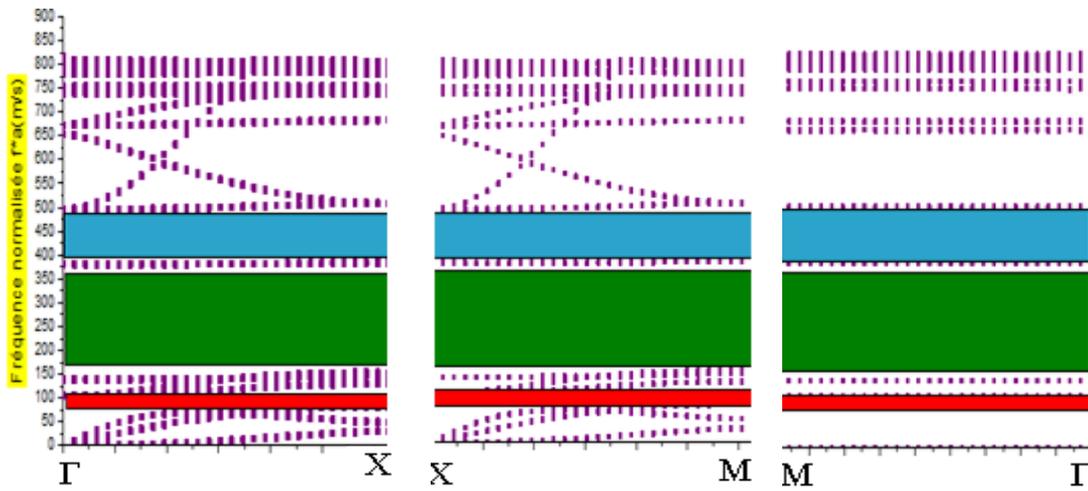


Figure (3.1) : courbe de dispersion de pvc dans les trois directions pour ($r_1/a=0.45$ et $r_2/a=0.35$ et $h=0.5$)

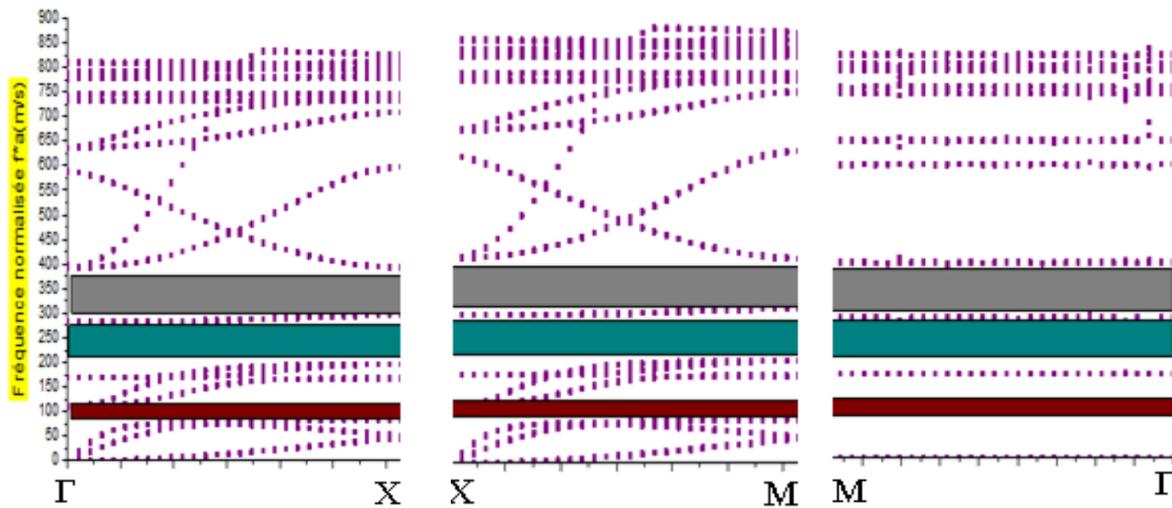


Figure (3.2) : courbe de dispersion de pvc dans les trois directions pour ($r_1/a=0.35$ et $r_2/a=0.25$ $h=0.5$)

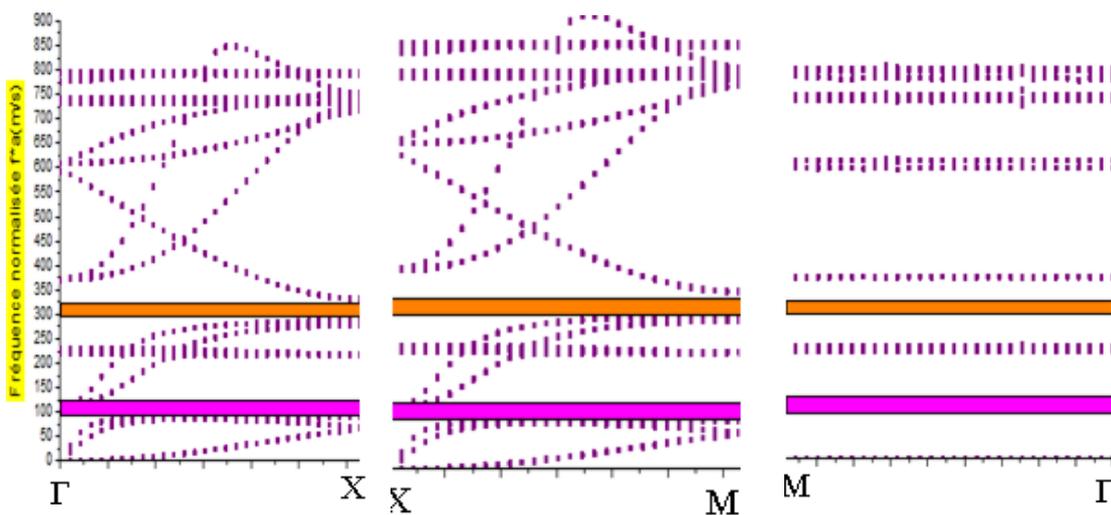


Figure (3.3) : courbe de dispersion de pvc dans les trois directions pour ($r_1/a=0.25$ et $r_2/a=0.15$ et $h=0.5$)

En se limitant au domaine de fréquences de 0 à 900 m/s, nous avons remarqué dans la figure (3.1) souligné les bandes interdites sont en couleurs. où l'on remarque ces bandes interdites dans l'intervalle de fréquence [75-110] m/s dans la première bande tel que la largeur de ce bande est relativement petite, puis la deuxième bande se situe dans l'intervalle de fréquence [175-360] m/s dans la deuxième bande tel que la largeur de ce bande est grande, après la troisième bande interdite dans l'intervalle de fréquence [397-490] m/s il est de largeur moyenne, ainsi que la première courbe de dispersion [$r_1=0.45$ et $r_2=0.35$]. la figure (3.2) montre également les bandes interdites indiquées en trois couleurs différentes c'est dans les intervalles suivantes. dans l'intervalle de fréquence [85-120] m/s dans la première bande tel que la largeur de ce bande est petite, [220-275] m/s dans la deuxième bande tel que la largeur de ce bande est moyenne. et [300-375] m/s dans la troisième bande tel que la largeur de bande est grande, avec une répartition de [$r_1=0.35$ et $r_2=0.25$], quant à la figure (3.3) que les bandes interdites sont entre l'intervalle de fréquence [95-125] m/s dans la première bande et [297-325] m/s dans la deuxième bande avec une répartition de [$r_1=0.25$ et $r_2=0.15$], sur la base des figures (3.1).(3.2).(3.3) nous concluons que les bandes interdites changent si on change les paramètres géométriques du massif (r_1/a . r_2/a) et la fréquence. la figure (3.4) montre la distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche pvc où nous notons que lorsque la valeur de fréquence est de 383.84131 m/s, la distribution de champs se déplace au niveau de la masse de béton.

lorsque la valeur de fréquence est de 153.4454 m/s et 146.926147 m/s béton tandis que la distribution de champs au niveau de la résonateur

, et nous notons également dans la figure(3.5) comment le champ se déplace, au niveau de la couche extérieure du cylindre à la fréquence 196.82130 m/s, et le champ est réparti au niveau de la masse de béton à une fréquence de 296.0910 m/s, et nous remarquons également dans la figure (3.6) que la distribution de champs est au niveau de la résonateur dans la fréquence 218.272719 m/s et à 230.7308 m/s tout en se déplaçant au niveau de la masse de béton à la fréquence 218.08199 m/s,

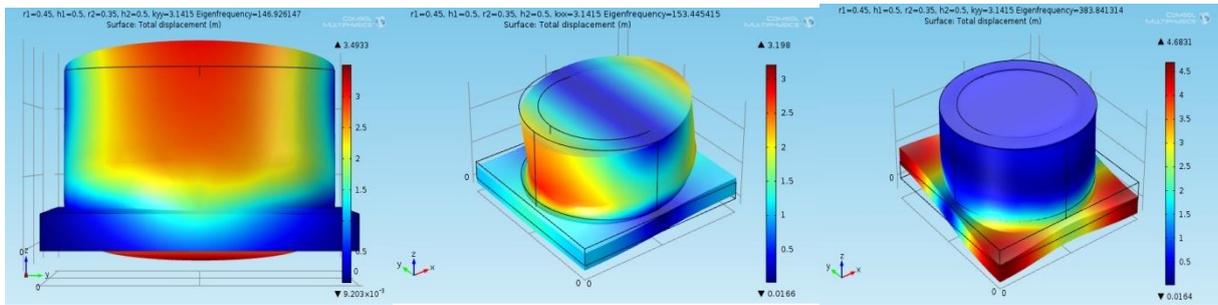


Figure (3.4) : distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche pvc pour ($r1/a=0.45$ et $r2/a=0.35$ et $h=0.5$)

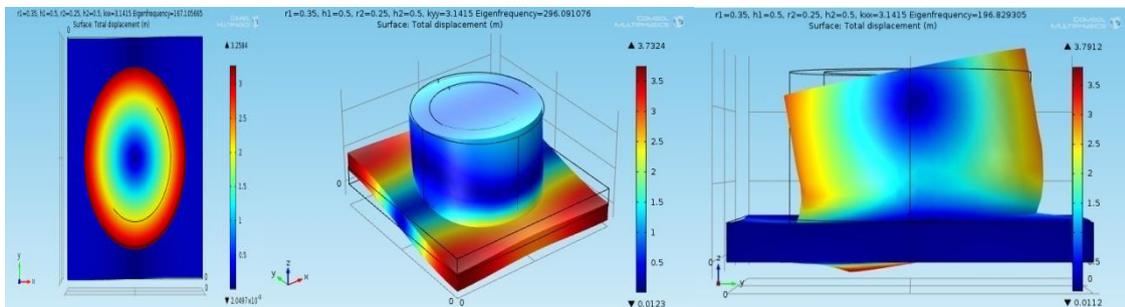


Figure (3.5) : distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche pvc pour ($r1/a=0.35$ et $r2/a=0.25$ et $h=0.5$)

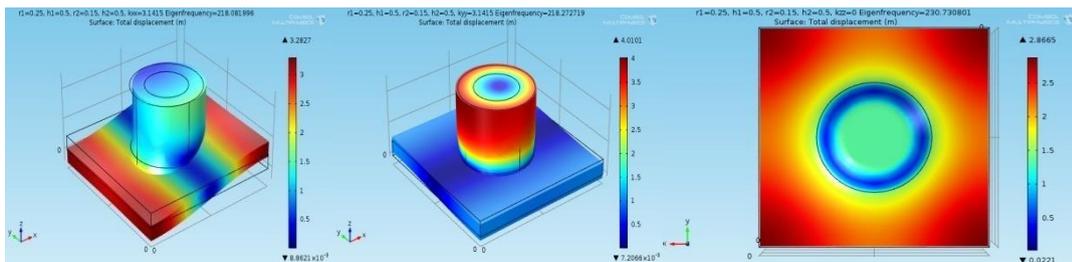


Figure (3.6) : distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche pvc pour ($r1/a=0.25$ et $r2/a=0.15$ et $h=0.5$)

basé sur les figures (3.4, 3.5 et 3.6) ,

On observe dans ces représentations situées au milieu de bandes interdites que les déformations ou les déplacements se manifestent non seulement au niveau des

résonateurs, mais également dans certains cas sur le massif de béton. En effet, un champ de déplacement en dehors des cylindres indique une interaction entre le substrat et les résonateurs ; cela suggère que cette bande interdite à basse fréquence peut également être influencée par les paramètres géométriques du massif.

3.4 : Courbes de dispersion pour le couple de matériaux "Acier-Polystyrène"

On représente les courbes de dispersions des fréquences en fonction des vecteurs d'ondes pour tous les vecteurs d'onde compris dans la première zone de Brillouin.

Partir des points critiques de la première zone de Brillouin, Γ , X, M et $M\Gamma$ respectivement, pour une maille carrée.

. Les résultats des simulations effectuées sont illustrés à la figure (3. 7).

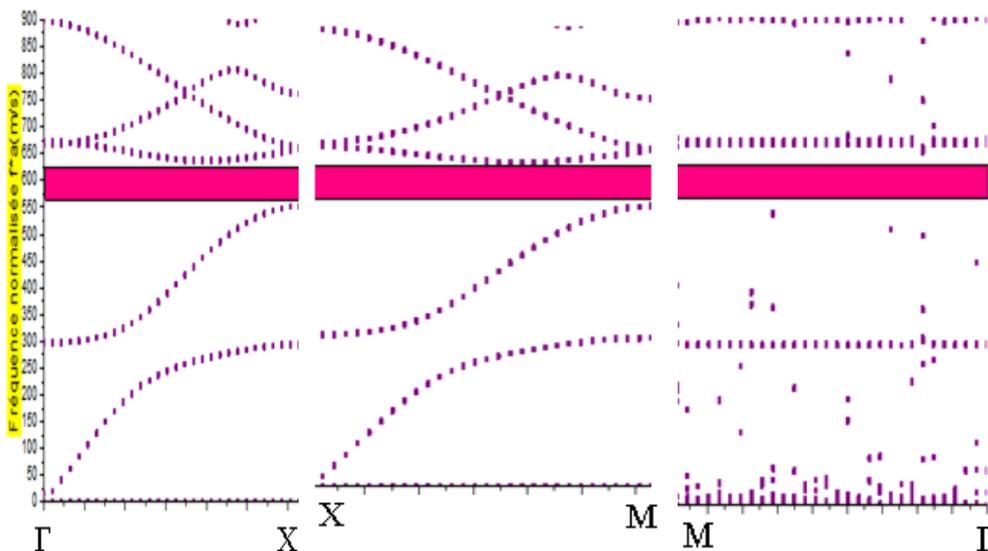


Figure (3.7) : courbe de dispersion de polystyrène dans les trois directions pour ($r_1/a=0.25$ et $r_2/a=0.15$ et $h=0.5$)

Avant d'obtenir une juxtaposition des structures de bandes calculées, une normalisation des courbes est nécessaire. Les zones colorées sont des bandes interdites où aucune propagation d'ondes n'est possible, en d'autres termes, les modes de vibration Z ou XY ne peuvent pas se propager, quelle que soit la direction de propagation dans le plan du massif de béton ou dans le plan perpendiculaire aux cylindres.

L'apparition et la mise en évidence du phénomène de bandes interdites ou bandes de rupture entre l'intervalle [750 - 610] m.s-1, qui correspondent à une absence totale de propagation d'onde quel que soit la direction de l'onde incidente, sont observées dans cette figure, qui se limite au domaine de fréquences compris entre 0 et 900 m/s.

nous avons pu visualiser la distribution du champ de déplacement hors du plan au niveau de la plaque pour différentes fréquences de mesure grâce au logiciel ComsolMultiphysics. Ce avantage a été utilisé pour mener une brève étude dans le quartier de la bande. Par conséquent, la figure 3.9 montre la distribution du champ

de déplacement hors du plan au niveau de la plaque de l'échantillon 2 pour les valeurs de fréquence 548.99469 m.s-1, 551.937686 m.s-1 et 661.194802 m.s-1, qui se trouvent respectivement au-dessous, au milieu et au-dessus de la deuxième bande interdite.

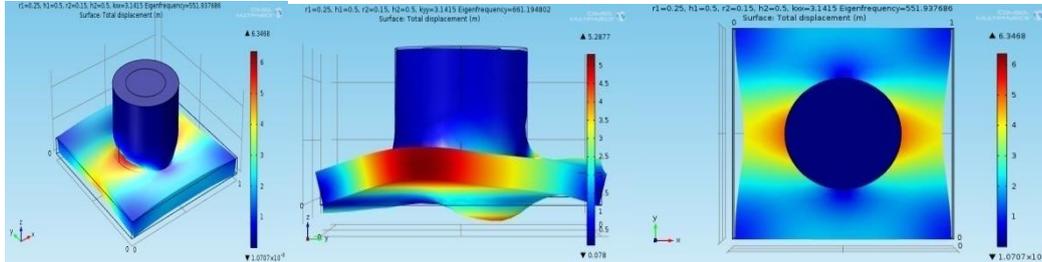


Figure (3.8) : distribution du champ de déplacement dans la zone occupée par les cylindres de couche polystyrène pour ($r_1=0.25$ et $r_2=0.15$ et $h=0.5$).

On peut avoir dans ces présentations situées au milieu de bande interdite que le champ de déplacement se manifeste au niveau de massif, mais d'un autre côté on remarque qu'il n'y a pas de propagation de champ au niveau des résonateurs.

Nous remarquons qu'à travers notre examen des courbes de chacun des polystyrène et pvc : il y a trois bandes interdites à pvc au premier et deuxième diamètre de couche pvc , tandis qu'au troisième diamètre de couche Les deux bandes sont d'une grande largeur au niveau du premier diamètre, puis ils commencent à diminuer au niveau du deuxième et troisième diamètre de la couche de PVC. En ce qui concerne la première bande, sa largeur ne subit pas de changement. Cependant, dans le cas du polystyrène, on remarque qu'il existe une bande interdite de largeur assez faible lorsque le diamètre de la couche de polystyrène est faible, et cette bande interdite est à haute fréquence.

Tableau 3 : Caractéristiques des courbes de dispersion pour les deux couple "Acier- pvc et "Acier-polystyrène".

Couple de matériaux	Paramètre Géométrique	1 ^{er} bande gap			2 ^{eme} bande gap			3 ^{eme} bande gap		
		Intervalle de bande	Largeur	Largeur relative	Intervalle de bande	Largeur	Largeur relative	Intervalle de bande	Largeur	Larg eur relative
Pvc	r1=0.45 r2=0.35	[75-90]m/s	15m /s	18.53%	[150-360] m/s	210m/s	87.13%	[390-475]m/s	85m/s	20.89%
	r1=0.35 r2=0.25	[75-100]m/s	25m/s	27.33%	[210-250]m/s	40m/s	18.14%	[300-370]m/s	70m/s	21/91%
	r1=0.25 r2=0.15	[70-80]m/s	10m/s	14.51%	[300-320]m /s	20m/s	8.25%			
polystyrène	r1=0.25 r2=0.15							[570-610]m/S	40m/s	8.77%

- En ce qui concerne le couple acier-pvc, une bande comparativement large se situe entre [150 – 360] m.s-1 en suite entre l'intervalle [390 -475] m.s-1 ;et entre l'intervalle[75-100] m.s-1. Les largeurs relatives respectivement sont 87, 13 %, de la deuxième bande ; et 20,89 % dans la troisième bande et 18, 53 % dans la première bande

- pour Le couple "acier-polystyrène" il ya une bande interdite entre l'intervalle [570-610] m.s-1 et une largeur relative (8,77%).

- Les résultats montrent que le PVC a une plus grande largeur relative que le polystyrène. En substituant le pvc par du polystyrène, la première et deuxième bandes interdites s'effacent.

Ce résultat pourrait être intéressant pour diverses applications de vibrations. Même si les bandes interdites restent relativement larges, l'effet de contraste entre les matériaux peut être utilisé pour les ajuster.

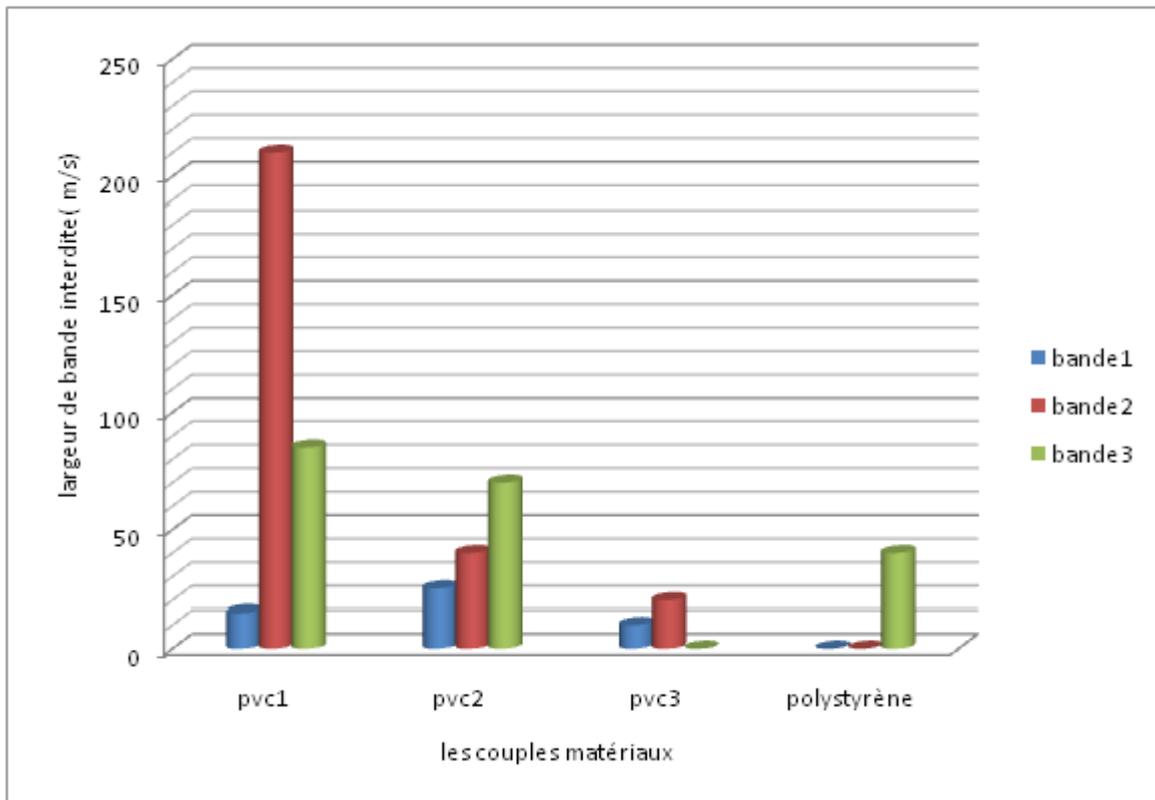


Figure3.9 : Histogramme montrant l'évolution des largeurs des bandes gap En fonction des couples de matériaux utilisés "acier- pvc " et "acier-polystyrène ", avec **pvc1**= ($r_1/a=0.45$ et ; $r_2/a=0.35$).et **pvc2**= ($r_1/a=0.35$ et ; $r_2/a=0.25$) et **pvc3**= ($r_1/a=0.25$ et ; $r_2/a=0.15$)

Sur l'histogramme de la figure (3.9), on remarque que les largeurs de bandes interdites de pvc1 et pvc2 sont plus larges par rapport au polystyrène dans toutes les bandes interdites

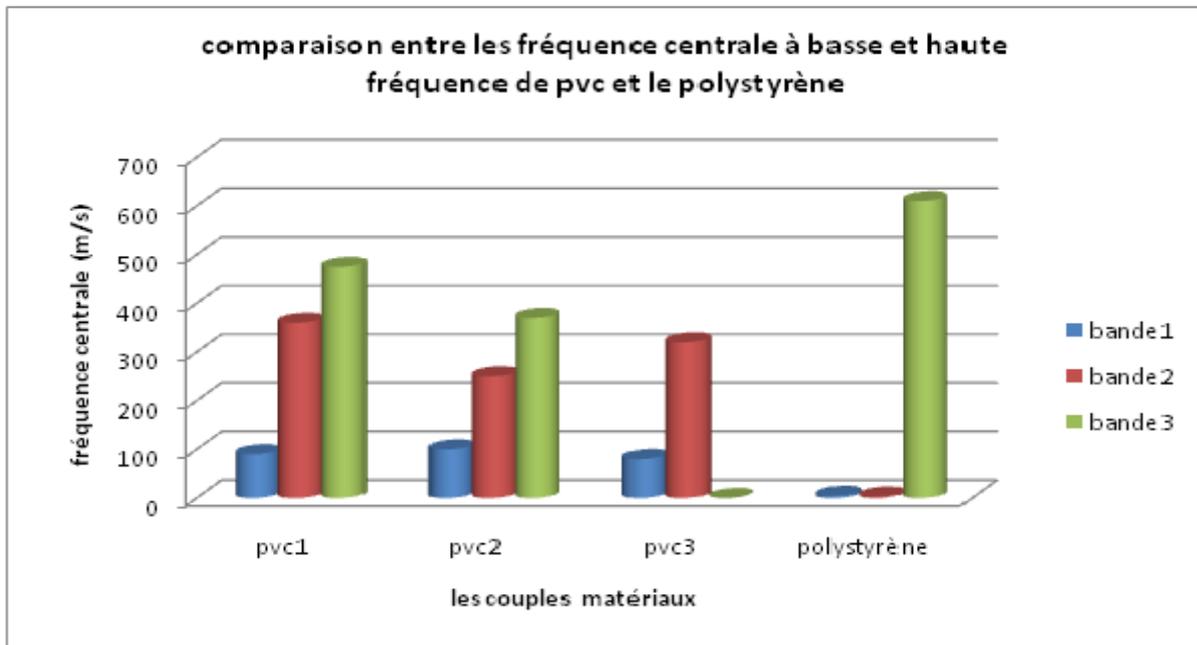


Figure 3.10 : Histogramme montrant l'évolution des fréquences centrales en fonction des couples de matériaux utilisés "acier- pvc " et "acier-polystyrène ", avec **pvc1**= ($r_1/a=0.45$ et ; $r_2/a=0.35$).et **pvc2**=($r_1/a=0.35$ et ; $r_2/a=0.25$) et **pvc3**=($r_1/a=0.25$ et ; $r_2/a=0.15$)

Les résultats montrent que le PVC a les plus grandes fréquences centrales que le polystyrène dans la première et la deuxième bande. Mais dans la troisième bande le polystyrène a une plus grande fréquence centrale que le pvc. En substituant le pvc par du polystyrène, à la fois pour les bandes à hautes fréquences (HBF) et pour les bandes à basses fréquences, comme le montre l'histogramme de la figure (3.10).

Les valeurs des largeurs relatives pour les trois bandes interdites et pour les deux couples étudiés sont indiquées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Largeurs relatives exprimées par le rapport $\Delta f / f_0$

	LBF (1 ^{er} bande gap)			HBF				
				2eme bande gap			3eme bande gap	
$\Delta f / f_0$ (acier-pvc)	18.53%	27.33 %	14.51 %	87.1 %	18.14% %	8. 25 %	20.89%	21.91 %
$\Delta f / f_0$ (acier-polystyrène)							8.77%	

Enfin nous avons accompagné le tableau 4 d'un histogramme.

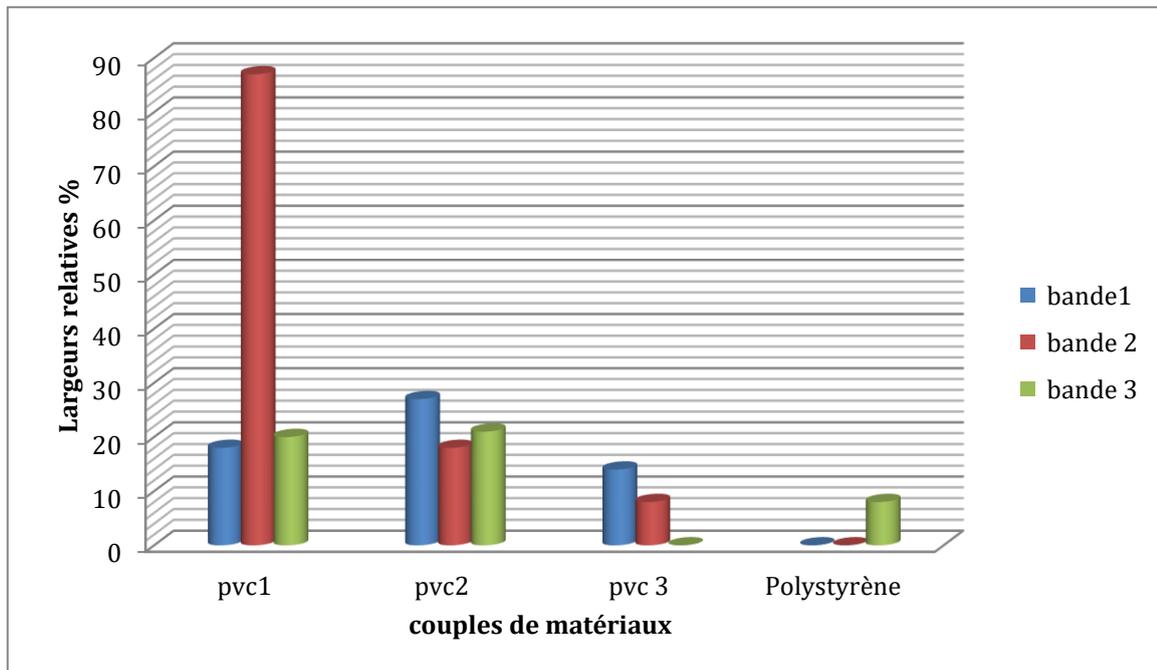


Figure 3.11: Histogramme montrant l'évolution des Largeurs relatives en fonction des couples de matériaux utilisés "acier - pvc " et "acier - polystyrène".

Les résultats montrent que le PVC est plus grande largeur relative que le polystyrène dans la première et la deuxième bande. Mais dans la troisième bande le polystyrène a une plus grande largeur relative que le pvc. On remplace le pvc par du polystyrène, à la fois pour les bandes à hautes fréquences (HBF) et pour les bandes à basses fréquences, comme le montre l'histogramme de la figure (3.11).

Le tableau 4 présente des largeurs relatives calculées pour les deux couples étudiés. On peut noter que le pvc enregistre la meilleure largeur relative aussi bien en basses fréquences (LBF) qu'en hautes fréquences (HBF) avec respectivement 27.33% et 87.1%.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons travaillé sur une structure bidimensionnelle périodique constituée d'un solide en béton dans lequel des cylindres en acier ont été incrustés, puis recouverts d'une couche de polystyrène. Nous avons décrit toutes les configurations qui ont été obtenues en modifiant les paramètres géométriques du modèle initial, ainsi que les types de polymère (PVC) et de polystyrène utilisés.

Les résultats de ce travail ont permis de mettre en évidence l'existence de bandes interdites à basse fréquence, dont la largeur et la position varient en fonction de la configuration étudiée (rayons et hauteurs des cylindres métalliques et polymères et épaisseur du substrat en béton).

Pour le noyau lourd du résonateur, un métal ayant une densité et un module Young plus élevés que l'acier serait très utile pour apprécier le glissement des bandes interdite vers les basses fréquences. En tenant compte du caractère viscoélastique de la couche polymère, ce travail de mémoire pourrait également être amélioré.

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

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. S. Kushwaha, and P. Halevi, *J. Phys. : Condens. Matter*, 6, 8759 (1994)
- [2] S. kheffache : propagation d'onde élastiques dans les cristaux phononiques bidimensionnels, TIZI_ OUZOU, 2011..
- [3] 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). M. Sigalas, and E.N. Economou, *Solid State Commun.* 86, 141 (1993)
- [4] M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, and B. Djafari-Rouhani, *Phys. Rev. Lett.* 71, 2022 (1993)
- [5] M. S. Kushwaha, P. Halevi, G. Martinez, L. Dobrzynski, and B. Djafari-Rouhani. *Phys. Rev. B* 49, 2313 (1994) 18 J. O. Vasseur, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, M. S. Kushwaha, and P. Halevi, *J. Phys. : Condens. Matter*, 6, 8759 (1994).
- [8] M. M. Sigalas and E. N. Economou, *J. Appl. Phys.* 75, 2845 (1994)
- [9] Y. Tanaka, and S-I. Tamura, *Phys. Rev. B* 58, 7958 (1998).
- [10] A. khelif, M. Wilm, V. Laude and S. Ballandras, *Phys. Rev. E* 69, 067601 (2004)
- [11] V. Laude, Y. Achaoui, S. Benchabane, and A. Khelif, *Phys. Rev. B* 80, 092301 (2009).
- [12] Y. Tanaka, Y Tomoyasu, and S-I Tamura, *Phys. Rev. B* 62, 7387 (2000)
- [13] Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, and H. Larabi, *Appl. Phys. Lett.* 87, 261912 (2005)
- [14] M. M. Sigalas and E. N. Economou, *Europhys. Lett.* 36, 241 (1996).
- [15] L-Y.Wu, L-W.Chen and C-M.Liu, *Phys. Lett. A* 373, 1189 (2009).
- [16] V. Romero-Garcia, J. V. Sanchez-Pérez, and L. M. Garcia-Raffi, *J. Appl. Phys.* 108, 044907 (2010)
- [17] C. Qiu, and Z. Liu, *Appl. Phys. Lett.* 89, 063106 (2006).
- [18] X. D. Zhang, and Z. Y. Liu, *Appl. Phys. Lett.* 85, 341 (2004).
- [19] L. Feng, X-P. Liu, Y-B. Chen, Z-P. Huang, Y-W. Mao, Y-F. Chen, J. Zi, and Y-Y. Zhu, *Phys. Rev. B* 72, 033108 (2005)
- [20] L. Feng, X-P. Liu, M-H. Lu, Y-B. Chen, Y-F. Chen, Y-W. Mao, J. Zi, Y-Y. Zhu, S-N. Zhu, and N-B. Ming, *Phys. Rev. B* 73, 193101 (2006).
- [21] Z. Liu, C. T. Chan, P. Sheng, A. L. Goertzen, and J. H. Page, *Phys. Rev. B* 62, 2446 (2000).
- [22] P-F. Heisch, T-T. Wu, and J-H Sun, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr. Freq. Control*, 53, 148 (2006).
- [23] S. Yang, J. H. Page, Z. Liu, M. L. Cowan, C. T. Chan, and Ping Sheng, *Phys. Rev. Lett.* 93, 024301 (2004)
- [24] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, and P. Sheng, *Science* 289, 1734 (2000)
- [25] Z. Liu, C. T. Chan, and Ping Sheng, *Phys. Rev. B* 71, 014103 (2005)
- [26] Y. Tanaka, and S. I. Tamura, *Phys. Rev. B* 60, 13294 (1999).
- [27] T-T. Wu, Z-G. Huang and S. Lin, *Phys. Rev. B* 69, 094301 (2004)
- [28] V. Laude, M. Wilm, Sarah Benchabane, and A. Khelif, *Phys. Rev. E* 71, 036607 (2005) [29] J-C. Hsu, and T-T. Wu, *Phys. Rev. B* 74, 144303 (2006).

- [30] J-H.Sun and T-T.Wu, Phys. Rev. B 74,174305 (2006).
- [31] B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, A. C. Hladky-Hennion, P. Deymier, F. Duval, B. Dubus, and Y. Pennec, Photonics Nanostruct. Fund.Appl. 6, 32 (2008).
- [32] T-C.Wu, T-T.Wu, and J-C Hsu, Phys. Rev. B 79, 104306 (2009).
- [33] X. Hu, Y. Shen, X. Liu, R. Fu, and J. Zi, Phys. Rev. E 69, 030201 (2004).
- [34] M. Wilm, S. Ballandras, V. Laude, and T. Pastureaud, J. Acoust. Soc. Am. 112, 943 (2002)
- [35] J. O. Vasseur, P. A. Deymier, B. Djafari-Rouhani, Y. Pennec, and A-C.Hladky-Hennion. Phys. Rev. B 77, 085415 (2008)
- [36] Z. Hou, and B. M. Assouar, Phys. Lett. A 372, 2091 (2008). 41
- [37] Z. Hou, and B. M. Assouar, J. Phys. D :Appl. Phys. 42, 085103 (2009).
- [38] uploaded by Vincent Laude
- [39] T.-T.Wu, Z.-G.Huang, T.-C.Tsai, and T.-C. Wu, Appl. Phys. Lett. 93, 111902 (2008).
- [40] Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, H. Larabi, J.O. Vasseur, and A. C. Hladky-Hennion, Phys. Rev. B 78, 104105 (2008).
- [41] Mourad Oudich Contribution à l'étude des cristaux phononiques à résonance locale dans les ré
- [42] Laude, Vincent, Sarah Benchabanet, and Jean-Charles Beugnot. "Cristaux phononiques et phoXoniques: son et lumière pris au piège-Que peuvent apporter à l'optoacoustique des cristaux artificiels pour les ondes acoustiques?." *Photoniques* 54 (2011): 49-53.
- [43] phononics-microscopy/fr/vulgarisation-une-introduction-aux-cristaux-phononiques
- [44] cristaux-phononiques-et-phoxoniques-son-et-lumiere-pris-au-piege_pdf
- [45] Laude, Vincent, Sarah Benchabanet, and Jean-Charles Beugnot. "Cristaux phononiques et phoXoniques: son et lumière pris au piège-Que peuvent apporter à l'optoacoustique des cristaux artificiels pour les ondes acoustiques?." *Photoniques* 54 (2011): 49-53.
- [46] B. Bonello, C. Charles, T. Brunet (INSP-Paris), J. Vasseur, B. Djafari-Rouhani (IEMN-Lille).
- [47] Sarah Benchabane ``Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques``soutenance de thèse, Institut FEMTO-ST, Département LPMO 2006.
- [48] Dubusa, B., et al. "Bande interdite de Bragg d'origine électrique dans les cristaux phononiques piézoélectriques une dimension. Article, " *12ème Congrès Français d'Acoustique, CFA 2014*. 2014.
- [49] Le silicium nanoporeux: microstructuration diélectrique et application aux structures photoniques avancées
- Scientific Figure on ResearchGate. Availablefrom: https://www.researchgate.net/figure/a-Schema-dun-milieu-dielectrique-periodique-fini-b-Spectre-de-reflectivite-typique_fig4_243382550 [accessed 25 Oct, 2022].
- [50] Oudich, Mourad. *Contribution à l'étude des cristaux phononiques à résonance locale dans les régimes sonique et hypersonique: approches théorique et expérimentale*. Soutenance de These . Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2011.
- [51] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, and P. Sheng, locally resonant sonic materials, Science 289, 1734 (2000).
- [52] Pennec, Yan. *Propagation et localisation des ondes élastiques et électromagnétiques dans les matériaux phononiques, photoniques et plasmoniques*. Mémoire. Université des Sciences et Technologies de Lille, 2010.

- [53] TABTI, Khaoula, and Leyla ALLAL. *Contribution à l'étude des cristaux phononiques pour des applications dans le domaine de la détection d'épaisseur*, Mémoire de master, UnivM'sila, 2020.
- [54] Ashcroft & Mermin 1976, p. 134.
- [55] BEN SAADIA, Ahmed. *Etude et simulation d'une barrière de bruits conçue à base des cristaux phononiques bidimensionnels*, Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.
- [56] Charles Kittel (trad. Nathalie Bardou, Évelyne Kolb), *Physique de l'état solide* [« Solid state physics »], Livre, 1998.
- [57] Walid, H. E. R. I. Z. I. *Etude théorique de la propagation des ondes acoustique dans une membrane à cristal phononique bidimensionnels*, Mémoire de master, universite de mohamedboudiaf m'sila faculte de technologie, 2016.
- [58] B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, A. C. Hladky-Hennion, P. Deymier, F. Duval, B. Dubus, and Y. Pennec, *Photonics Nanostruct. Fund.Appl.* 6, 32 (2008).
- [59] amrane amine perspectives d'utilisation des reseauxperiodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques
- [60] amrane amine perspectives d'utilisation des reseauxperiodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques
- [61] amrane amine perspectives d'utilisation des reseauxperiodiques pour l'isolation de structures soumises aux vibrations d'origines sismiques ou mecaniques