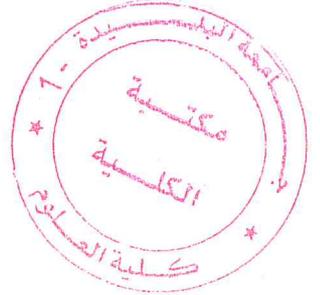


MA 530.164-1

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
البلدية دحلب سعد جامعة 1
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



كلية العلوم - دائرة الفيزياء
Faculté des Sciences
Département de Physique



MEMOIRE
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN PHYSIQUE

Option : Nanophysique

THÈME

MODELISATION ET SIMULATION PAR LA METHODE
DES ELEMENTS FINIS DU SPECTRE DE
TRANSMISSION DES ONDES ELASTIQUES DANS
DES STRUCTURES A BASE DE CRISTAUX
PHONONIQUES A UN RESONNATEUR

Présentée par :

Nassima Belhouari et Wahiba Maataoui

Devant le jury composé de :

Dr. S. Aoudj	MCB U. Blida1	Président
Mr. A. Benhaffaf	MAA U. Blida1	Examineur
Dr. A. Hassein-Bey	MCB U. Blida1	Encadreur
Mr. A. Amrane	MAA U. Blida1	Co-Encadreur

Blida, 14 Octobre 2018

MA-530-164-1

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions ALLAH, le tout puissant, de nous avoir données la force et la patience pour achever ce travail qui permettra de participer In CHAA ALLAH à résoudre beaucoup de problèmes techniques dans le monde dans ce domaine.

Nous adressons nos sincères remerciements au Dr. Abdelkader HASSEIN-BEY (Responsable du Master et groupe NanoPhysique) nous avoir encadrées dans ce travail avec une rigueur scientifique et pour son aide, ses conseils, aide tout au long de notre parcours. De plus, nous remercions vivement Mr. Amine AMRANE pour nous avoir ouvert les portes de ce domaine et nous avoir données l'impulsion nécessaire pour entrer dans ce domaine très pointu.

Nous tenons également à remercier l'équipe de Physique des MEMS au sein du département de Physique qui ont su nous accueillir et nous prodiguer une ambiance studieuse

Nous tenons à remercier M^{lle} A.L.HASSEIN-BEY pour nous avoir aidé au cours de ce travail. Enfin, un remerciement spécial à nos ami(e)s et collègues de la promotion, qui nous ont accompagnés pendant ces deux années qu'a duré cette merveilleuse aventure.

Dédicaces

*Ce travail est dédié à celles et ceux qui m'ont soutenu
tout au long de mon parcours.*

Ma mère

Mon père

A AM'HAMED alah yarhimo

*Mes frères (Rachide, Mohamed, Daouad, Sami) et
mes seours (Mimona Massouda, Mira, Zahra et Fatma
, Bouchra, Nadjwa) et*

A Mon marie Amine

A mes ami(e)s.

Les familles Belhouarie et Messabis

A Wahiba Maataoui



Nassima

Dédicaces

*Ce travail est dédié à celles et ceux qui m'ont soutenu
tout au long de mon parcours.*

Ma mère

Mon père

Mes frères

A mes ami(e)s.

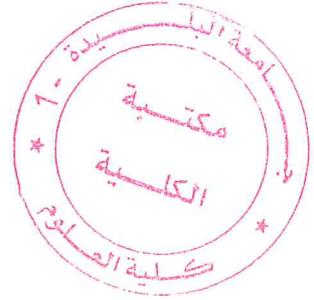
A la famille Maataoui

A Belhouari Nassima

Wahiba

ملخص

مهمتنا هي إجراء عمليات المحاكاة بواسطة طريقة العناصر المحدودة للهيكل الثنائي الأبعاد مع رنان محلي بشكل أكثر دقة قمنا بتنفيذ حساب بنية صوتي طولي و الدائرة .تم تنفيذ هذه المحاكات تحت كومسول مولتي فيزيكس . النتائج واعدة للغاية وسيتم مواصلة هذا العمل لاستكشاف مواد أخرى يمكن أن تعطي نتائج أفضل.



RESUME :

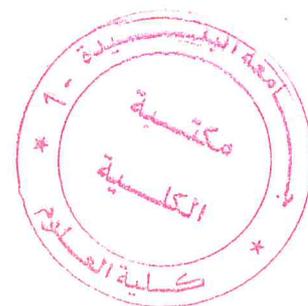
Notre travail consiste à faire des simulations par la méthode des éléments finis de structure 2D avec un résonateur localisé. Plus exactement nous avons implémenté le calcul de spectre de transmission de structure phononique linéaire(1D) et plane (2D). Ces simulations ont été implémentées sous *comsol Multiphysics v4.3a*. Les résultats sont très prometteurs et ce travail devra être continué pour explorer d'autres matériaux pouvant donner de meilleurs résultats.



ABSTRACT

Our job is to make simulations by the finite element method of 2D structure with a localized resonator. More exactly, we have implemented the calculation of linear (1D) and plane (2D) phonon structure transmission spectrum. These simulations were implemented under comsol Multiphysics v4.3a. The results are very promising and this work will have to be continued to explore other materials that can give better results.

Tableau des matières :



Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Tableau de matière	
Liste de ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUE ET TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE1 :LES CRISTAUX PHONONIQUES.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Bref historique.....	3
1.3 Notion de cristal phononique.....	8
1.4 Comparaison entre les cristaux phononiques et photoniques.....	8
1.5 Structure périodiques	9
1.5.1 Structures périodiques unidimensionnelles (1D).....	10
1.5.2 Structures périodiques bidimensionnelles (2D).....	10
1.5.3 Structures périodiques tridimensionnelles(3D).....	10
1.6 Structure de bandes et bandes phononiques.....	11
1.7 Physique des milieux périodiques.....	12
1.8 Loi de Bragg.....	13
1.9 Zone de Brillouin.....	14
1.10 Application.....	15
1.10.1 Un système micro-électromécanique radiofréquence.....	15
1.10.2 Application du concept des réseaux périodiques radiofréquences dans l'isolation sismique.....	16
1.10.3 Fondation périodique.....	17
1.10.4 Systèmes de bandes interdites phononiques dans les structures de génie civil.....	18
1.11 Conclusion.....	18
CHAPITRE3 : LES ONDES ELASTIQUES.....	19
2.1 Introduction.....	19
2.2 Les ondes élastiques.....	19
2.2.1 Les ondes de volume.....	20
2.2.2 Les ondes de surface.....	21
a Ondes de Love.....	21
b Ondes de Rayleigh.....	21
2.3 Onde de polarisation transverse.....	22
2.4 Equation de propagation des ondes élastiques.....	23
2.4.1 Formulation générale.....	23

a Equation de mouvement.....	23
b Condition aux limites.....	25
2.5 Simulation d'un guide phononique à un dimension sous <i>Comsol Multiphysics</i>	29
2.6 Conclusion.....	30

CHAPITRE3 : Simulation par la méthode des MEF de la propagation des ondes élastiques Dans des structures périodiques à un résonateur.....32

3.1 Introduction	
3.2 Simulation de logiciel par la méthode FEM.....	32
3.2.1 Définition de logiciel comsol Multi-physics.....	32
3.2.2 Définition de FEM.....	33
3.3 Simulation d'une structure à base de cristaux phononiques à résonateur pour le calcul de courbe de dispersion.....	33
3.3.1 Procédure de simulation d'un cristal par comsol.....	33
3.3.2 Résultats de simulation des courbes de dispersion de cristal phononique à un seul résonateur.....	41
3.4 Résultats de simulation de spectre de transmission de cristal phononique à un seul résonateur simulation pour les matériaux cas à 2D.....	58
3.5 Conclusion générale.....	110

REFFENCES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure1.1	Courbe de dispersion dans d'un cristal phononique [1].....	5
Figure1.2	Sculpture d'E.Sempere, exposée à la fonction Juan March à Madrid utilisée pour les démonstrations expérimentales par Martinez-Sala[4].....	6
Figure1.3	a)Schéma d'un cristal phononique à deux dimensions,b) filtre à cristaux phononique.[4].....	8
Figure1.4	Exemple de structures périodiques [4].....	9
Figure1.5	Structures 2D (a) structure carrée ,b)triangulaire et c) hexagonale [4].....	10
Figure1.6	Exemple de structure 3D publiées dans : structure cubique (1),tas de bois (2),structure multicouches(3), opales ou inversées (4),Yablonovite (5) [4]....	11
Figure1.7	Exemple de calcul de structure de bande aux axes principaux de symétrie de la première zone de Brillouin pour un CP à ondes de Lamb [1].....	12
Figure1.8	Schéma explique la loi de Bragg [1].....	13
Figure1.9	(a)1ere (b) ^{eme} ,(c) ^{eme} zone de Brillouin d'un réseau carré [1].....	14
Figure1.10	Un commutateur MEMS RF à faisceau fixe capacitif, connecté en dérivation à une ligne CPW. (b) un commutateur MEMS RF en porte-à-faux ohmique , connecté en série à une ligne micro ruban [9].....	15
Figure1.11	Polarisation électrostatique d'un commutateur MEMS RF à faisceaux fixe capacitife,d'un condensateur commuté ou d'un varactor [9].....	16
Figure1.12	Fondation périodiques pour isolation sismique [5].....	17
Figure1.13	Pont volga (a) ,(b) déformation de flexion de la plate-forme du pont , (c) modèle numérique simplifié ,(d) structure 3D de guide d'onde [3].....	18
Figure2.1	Représentation schématique des ondes P [4].....	20
Figure2.2	Représentation schématique des ondes S [4].....	20
Figure2.3	Représentation schématique des ondes L [6].....	21
Figure2.4	Représentation schématique des ondes LR [6].....	22
Figure2.5	Ondes de surfaces de polarisation transverse [6].....	22

Figure2.6	Ondes de Lamb [6].....	23
Figure2.7	Guide d'onde phononique à une dimension.....	27
Figure2.8	Simulation d'un guide phononique à un dimension.....	27
Figure2.9	Courbe de dispersion d'une guide d'onde phonique.....	29
Figure2.10	Etude d'une cellule élémentaire du guide phononique à une dimension sous consol	30
Figure2.11	Exemple de résultats de simulation montrant les courbes de dispersions d'une structure « I » sous consol.....	31
Figure2.12	Exemple de résultats de simulation montrant les courbes de dispersions d'une structure « O » sous consol.....	32
Figure3.1	Logiciel consol.....	34
Figure3.2	Schémas des etapes de simulation d'un cristal phononique.....	34
Figure3.3	Schémas des etapes de simulation d'un cristal phononique sous consol.....	35
Figure3.4	Copie d'écran montrant les paramètres utilisées dans la simulation.....	35
Figure3.5	La geometrie de la structure.....	37
Figure3.6	Model de base pvc-acier-beton.....	41
Figure3.7	Massif en béton	42.
Figure3.8	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc-acier-beton) (γ_x).....	43
Figure3.9	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc-acier-beton) (x_m).....	44
Figure3.10	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc-acier-beton) (γ_m).....	45
Figure3.11	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (rubber-acier-beton) (γ_x).....	47
Figure3.12	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (rubber-acier-beton) (x_m).....	48
Figure3.13	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (rubber-acier-beton) (γ_m).....	49

Figure3.14	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (silicon-acier-beton) (γ_x).....	51
Figure3.15	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (silicon-acier-beton) (x_m).....	52
Figure3.16	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (silicon-acier-beton) (γ_m).....	53
Figure3.17	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc-plomb-beton) (γ_x).....	55
Figure3.18	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc-plomb-beton) (x_m).....	56
Figure3.19	Courbe de dispersion des frequences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc-plomb-beton) (γ_m).....	57
Figure3.20	Courbe de transmission pour matériaux pvc-acier-béton(Mat1) suivant direction U_x0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	59
Figure3.21	Courbe de transmission pour matériaux pvc-acier-béton(Mat1) suivant direction V_y0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	61
Figure3.22	Courbe de transmission pour matériaux pvc-acier-béton(Mat1) suivant direction W_z0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	63
Figure3.23	Courbe de transmission pour matériaux Rubber-acier-béton(Mat2) suivant direction U_x0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	65
Figure3.24	Courbe de transmission pour matériaux Rubber-acier-béton(Mat2) suivant direction V_y0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	67
Figure3.25	Courbe de transmission pour matériaux Rubber-acier-béton(Mat2) suivant direction W_z0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	69
Figure3.26	Courbe de transmission pour matériaux silicon-acier-béton(Mat3) suivant direction U_x0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	71

Figure3.27	Courbe de transmission pour matériaux silicon-acier-béton(Mat3) suivant direction Vy0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	73
Figure3.28	Courbe de transmission pour matériaux silicon-acier-béton(Mat3) suivant direction Wz0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	75
Figure3.29	Courbe de transmission pour matériaux pvc-plomb-béton(Mat4) suivant direction Ux0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	77
Figure3.30	Courbe de transmission pour matériaux pvc-plomb-béton(Mat4) suivant direction Vy0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	79
Figure3.31	Courbe de transmission pour matériaux pvc-plomb-béton(Mat4) suivant direction Wz0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	81
Figure3.32	Courbe de transmission pour matériaux Mat1,Mat2 ,Mat3,Mat4 suivant direction Ux0,Vy0,Wz0.....	83
Figure3.33	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc-acier-béton(Mat1) suivant direction Ux0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	85
Figure3.34	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc-acier-béton(Mat1) suivant direction Vy0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	87
Figure3.35	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc-acier-béton(Mat1) suivant direction Wz0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	89
Figure3.36	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux Rubber-acier-béton(Mat2) suivant direction Ux0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	91
Figure3.37	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux Rubber-acier-béton(Mat2) suivant direction Vy0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	93
Figure3.38	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux Rubber-acier-béton(Mat2) suivant direction Wz0.les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	95

Figure3.39	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux silicon-acier-béton(Mat3) suivant direction U_x0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	97
Figure3.40	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux silicon-acier-béton(Mat3) suivant direction V_y0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	99
Figure3.41	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux silicon-acier-béton(Mat3) suivant direction W_z0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	101
Figure3.42	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc-plomb-béton(Mat4) suivant direction U_x0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	103
Figure3.43	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc-plomb-béton(Mat4) suivant direction V_y0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	105
Figure3.44	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc-plomb-béton(Mat4) suivant direction W_z0 .les déformées de la structure pour chaque point a,b et c référence est ainsi représentée.....	107
Figure3.45	Courbe de transmission(8x8) pour matériaux Mat1,Mat2,Mat3,Mat4 suivant direction U_x0,V_y0,W_z0	109

La liste des abréviations :

CP : Cristaux Phononiques.

GaAs: Gallium Arsonic

GaN: Gallium Azote

SiC: Silicon Carbone

InP: Indium Phosphore

InSb: Indium Andium

MEMS RF : Micro-Electro-Mechanical-systems Radio-Frequency

P: Primaire

S: Secondaire

CFC: Cubique a Face Centre.

FEM :Finit Eléments Méthode

Introduction générale.

INTRODUCTION GENERALE:

L'étude de structures à base de cristaux phononiques est l'un des thèmes traité dans le cadre des activités de l'équipe Nano-Physics Group au sein du département de Physique de l'université de Blida1.

Depuis une quinzaine d'années, une nouvelle voie a été ouverte dans le domaine des ondes acoustiques et de leurs applications : il est possible de modeler artificiellement la matière pour créer des structures périodiques (les cristaux phononiques ayant des propriétés élastiques dans la transmission des vibrations très particulières. En effet, il est maintenant possible d'élaborer des structures possédant un comportement discriminant vis-à-vis des fréquences des ondes qui les traversent : certaines sont transmises inchangées, alors que d'autres sont bloquées ou interdites. Les applications sont variées et s'étendent du macro- au microscopique. Ce thème sera développé : dans le chapitre1 nous expliciterons les notion de base associe aux cristaux photoniques et leurs applications . Dans le Chapitre2 examinera l'état de l'art sur les ondes élastiques. La troisième partie de ce chapitre est réservé à notre travail et résultats de simulation sur les cristaux phononiques bidimensionnelle à deux résonateurs par la méthode des éléments finis sous *Comsol multi-physics*.

Chapite1 :
Les cristaux
phononiques.

CHAPITRE 1: Les cristaux phononiques :

1.1 Introduction :

Ces derniers années ont vu le nombre de publications scientifiques sur les cristaux phononiques croître de façon spectaculaire. Les cristaux phononiques sont des structures périodiques qui pour certains choix de matériaux et de géométries, présentent des bandes interdites acoustiques absolues c'est à dire des bandes de fréquence interdites quelle que soit la direction de propagation de l'onde élastique incidente.

1.2 Bref historique :

Les travaux autour du cristal photonique initiés en 1987 [1] ont montré la possibilité d'obtenir des bandes de fréquences interdites absolues pour des ondes électromagnétiques.

Dans ce contexte, le concept de cristal phononique fut introduit pour la première fois en 1993, presque simultanément par deux équipes, l'une constituée [2] et l'autre [3]. L'idée est de produire des gaps acoustiques absolus pour certaines structures et certains matériaux, c'est-à-dire des bandes interdites quelle que soit la direction de propagation de l'onde élastique incidente. La structure se comporte comme un miroir réfléchissant, pour une onde dont la fréquence est dans le domaine de la bande interdite. L'intérêt premier de ces structures a été de créer des défauts pour confiner et plus généralement pour contrôler la propagation du son. Elles permettent des applications comme le guidage d'ondes, l'isolation acoustique, etc.

L'étude de la propagation des ondes, aussi bien élastique qu'électromagnétiques dans des structures périodiques, a permis de mettre en évidence des analogies et des différences. Ceci est récapitulé dans le tableau d'après la référence [4].

La première étude a porté sur une structure 2D de cylindre d'aluminium incorporé dans une matrice de Nickel [4]. Dans la (figure1.1), la courbe de dispersion représente

la fréquence réduite ($\frac{\omega a}{2\pi c}$) en fonction du vecteur d'onde réduit ($\frac{ka}{2\pi}$) ou ω, a, k, c représentent respectivement la pulsation, le paramètre de maille, le vecteur d'onde et « c » la célérité de l'onde. On observe une bande interdite (hachurée) ou il n'y aucune courbe de dispersion dans une zone de fréquence réduite autour de 0.6.

Les premières investigations ont été de comprendre le mécanisme de formation des bandes interdites et paramètres géométriques et physiques qui contrôlent l'ouverture de ces gaps dans différents types de cristaux phononiques (2D, 3D, liquide/liquide, solide/solide, liquide/solide).

Tableau récapitulatif des analogies et différences entre des structures périodiques pour différents types d'onde [4].

Tableau : structure-bande relation propriété de trois systèmes périodiques			
propriété	Cristal « électronique »	Cristal « photon »	Cristal « phonon »
Matériels	Cristallin (naturel/artificiel)	Construction de deux électriques matérielles	Construction de matériel élastiqué
Paramètres	Nombre atomique, constant universel	Constant diélectrique	Densité de masse,
Constant	1-5Å (microscopie)	0.1um-1cm	Mésoscopique ou macroscopique
Ondes	Broglie (électrons)		Vibration ou longé
Polarisation	Spin	Electromagnétique ou lumière (photon)E,B	($\nabla \cdot u \neq 0, \nabla \times u \neq 0$)
Equation différentiel	$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(\mathbf{r})\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}$	Transverse $\nabla \cdot D = 0$ ($\nabla \cdot E \neq 0$)	Voire réf []
Particule libre	$w = \hbar^2 k^2 / 2m$	$V^2 - V(V \cdot E) = \frac{i(t)}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$ $\omega = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} k(\text{photons})$	$\omega \propto c, i, k(\text{phonon})$

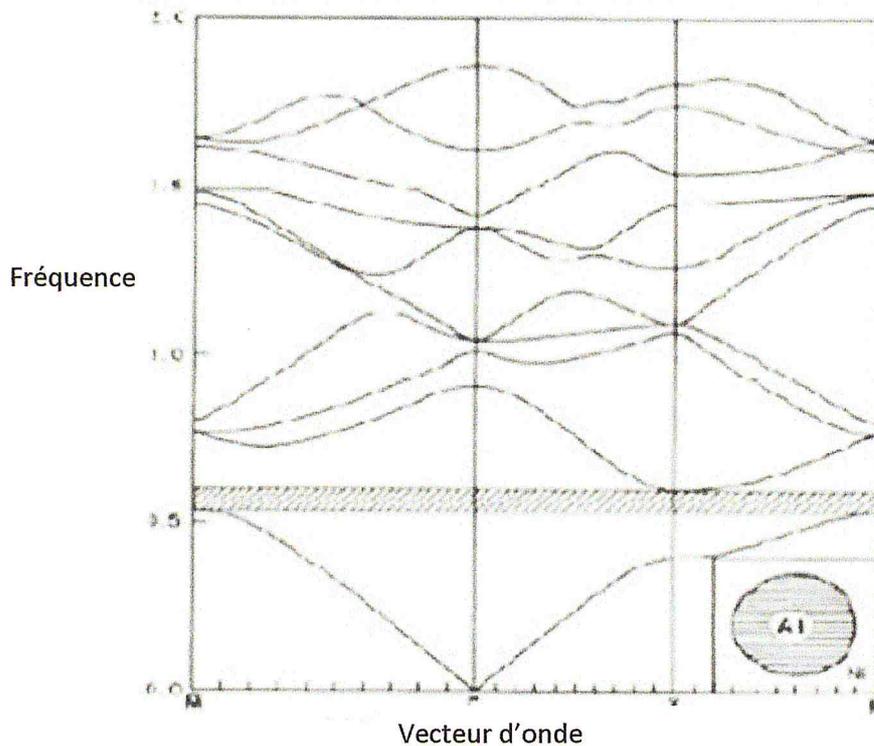


Figure1. 1: Courbe de dispersion dans un cristal phononique [4].

Dans le cas d'un cristal phononique à deux dimensions, les inclusions sont formées de cylindre de section quelconque que l'on peut disposer selon un réseau cristallographique choisi (réseau carré, hexagonal.ect). Les inclusions peuvent être de simples trous mais peuvent aussi être composées d'un autre matériau, différent de celui de la matrice hôte [4].

Par analogie avec le travail effectué sur les cristaux photoniques, où un contraste important entre les indices de réfraction était nécessaire, il a été montré que, dans le cas des cristaux phononique, l'existence et la largeur des bandes interdites absolues dépendaient fortement de la nature des constituants, du contraste entre les paramètres physiques (densité et constantes élastiques) entre les inclusions et la matrice, de la géométrie du réseau d'inclusion, de la forme des inclusions et du facteur de remplissage.

Les premières mesures expérimentales furent effectuées en 1995, sur une sculpture espagnole d'Eusebio Sempere (figure 1.2) [5], Cette sculpture est composée de tubes d'acier dans l'air disposés de manière périodique selon un réseau carré.

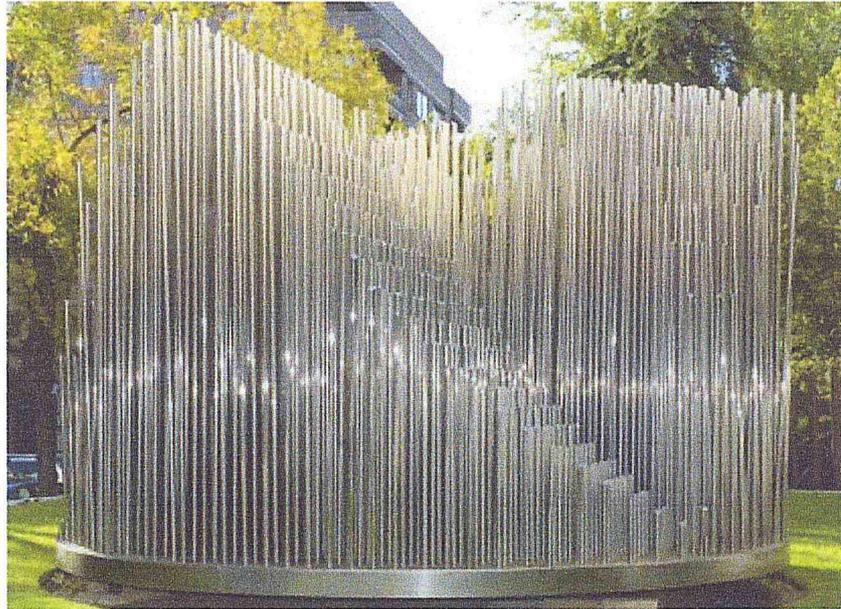


Figure 1. 2: Sculpture d'E. Sempere, exposée à la fonction Juan March à Madrid, utilisée pour les démonstrations expérimentales par Martinez-Sala [5].

Toutefois, cette structure n'admet que des bandes interdites partielles c'est-à-dire des fréquences interdites selon seulement certaines directions de l'espace. Mais les cristaux phononiques se définissent comme des matériaux ayant la possibilité de présenter des bandes interdites absolues, c'est-à-dire quelle que soit la direction de l'onde incidente. Les premières mesures qui ont confirmé la possibilité d'obtenir des bandes interdites absolues, ont été présentées en 1998 [6]. La structure solide/fluide présentée par les premiers est un système 2D carré ou hexagonal de cylindres d'acier dans l'air. Au-delà de la mise en évidence expérimentale d'une bande interdite absolue, ils ont montré dans ces matériaux que certaines bandes de vibration ne conduisaient pas à une transmission de l'onde. Ces bandes, appelées bandes sourdes, ne peuvent pas être excitées avec une onde incidente longitudinale. Parallèlement, [7] ont démontré expérimentalement l'existence d'une bande interdite absolue dans une structure solide/solide de cylindre d'aluminium dans de l'époxy.

Simultanément Montero de Espinosa ont montré la possibilité d'obtenir des bandes interdites absolues sans bandes sourdes dans une structure fluide/solide composée de cylindres de mercure dans une matrice d'aluminium.

Toutes ces structures présentent, sous certaines conditions géométriques et physiques, des bandes interdites qui proviennent de phénomènes de diffractions dits de Bragg qui résultent de la périodicité du cristal phononique. Ces bandes interdites présentent une fréquence centrale autour de $\frac{c}{2a}$, où « c » : c'est la vitesse de propagation dans l'inclusion et « a » : paramètre de maille. L'obtention de bandes interdites dans le domaine audible à basse fréquence peut donc s'obtenir de deux façons : soit en augmentant le paramètre de maille a, soit en diminuant la vitesse de propagation « c ».

Le problème que posent ces structures est l'encombrement spatial qu'elles imposent, dès lors que l'on souhaite obtenir des bandes interdites dans le domaine des fréquences audibles. En effet, elles doivent avoir des tailles de l'ordre de la longueur d'onde du son audible, soit de quelques mètres. Par exemple, pour une structure composée de cylindres d'acier dans l'air, il faudrait un paramètre de maille $a=0.34\text{m}$ pour obtenir une bande interdite autour de la fréquence moyenne 1 KHz.

On peut montrer qu'en combinant plusieurs cristaux phononiques de périodes variables, il est possible d'obtenir une structure qui couvre toute le gamma des fréquences audibles par un chevauchement des gaps. La structure proposée par Kushwaha permet d'obtenir un gap en fréquence compris entre 2 et 11 KHz.

Quelques autres voies ont été explorées comme l'utilisation de rangées d'arbres pour arrêter la propagation du son dans le domaine des fréquences audibles [8].

Cependant, pour expliquer l'existence de certains gaps, on ne peut pas exclure l'influence de résonances qui se produisent dans chaque inclusion et qui, couplée avec leurs voisins, permettent l'ouverture de gaps d'hybridation [8]. ont mis en évidence de manière théorique, vérifié par la suite expérimentalement, le mécanisme hybride de formation d'un gap. Ces travaux ont montré que la largeur des gaps n'est pas due uniquement aux diffractions de Bragg mais qu'elle est due à un couplage entre les résonances particulières de l'inclusion et celles de la structure périodique d'un milieu effectif homogène.

1.3. Notion de cristal phononique :

Les cristaux phononiques sont des matériaux composites macroscopiques présentant une périodicité spatiale dans une ou plusieurs directions de l'espace. En tant que tels, ils sont capables de bloquer la propagation acoustique dans certaines directions et gammes de fréquences, par le biais des réflexions de Bragg. On parle alors de bande de fréquences interdites, que l'on abrège le plus souvent en "bande interdite".

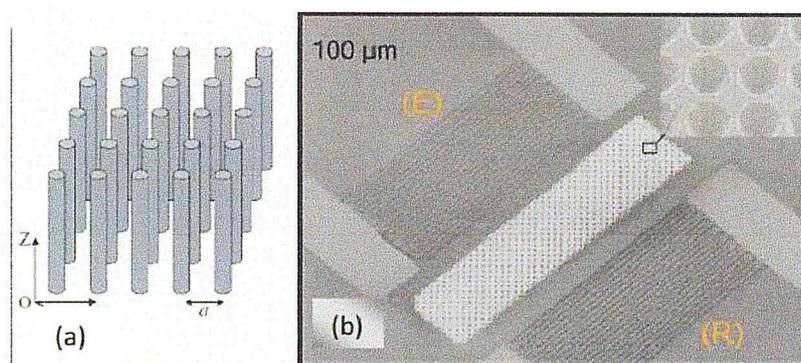


Figure 1.3: a) Schéma d'un cristal phononique à deux dimensions, b) Filtre à cristaux phononique [9].

Ce nom a été choisi par analogie avec les cristaux photoniques, des structures similaires mais agissant sur la lumière. Du point de vue quantique, un phonon est une vibration élastique élémentaire d'un morceau de matière, tout comme le photon est une particule élémentaire de lumière [4].

L'idée du cristal phononique est de fabriquer un matériau artificiel structuré périodiquement, par exemple par assemblage d'au moins deux matériaux différents. Intuitivement, plus les propriétés acoustiques des matériaux mis en jeu sont contrastées, plus les phénomènes d'interférence d'onde sont importants [9].

1.4 Comparaison entre les cristaux phononiques et photoniques :

Les cristaux phononiques tels qu'ils sont définies auparavant, sont des structures périodiques. Cependant, il ya de fortes analogies entre la propagation des électrons dans les cristaux ordinaires et les ondes électromagnétiques et élastiques dans les cristaux phononiques respectivement. Les propriétés fondamentales régissant la

propagation des ondes électroniques, électromagnétiques et élastiques dans les structures périodiques tridimensionnelles isotropes sont résumées sur le tableau (1).

La propagation des ondes électromagnétiques et/ou élastiques dans les matériaux composites a fait l'objet d'une attention particulière. Ces derniers en l'occurrence les cristaux photoniques et phononiques respectivement, existent naturellement, ou sont fabriqués artificiellement. Ils montrent une grande variété d'intérêt de propriétés physique, à la fois sur le plan de la recherche fondamentales et celui de la recherche appliquée.

Les cristaux phononiques ont des propriétés qui concordent avec celles des cristaux photoniques, toute fois il existe une certaine nuance entre eux. Les cristaux photoniques peuvent être caractérisés par deux paramètres indépendants, à savoir le rapport de la fraction diélectrique et la fraction volumique occupée par un de ces composants ; tandis que pour les cristaux phononiques plusieurs paramètres peuvent déterminer la propagation des ondes, tels que : le rapport des vitesses transversales et longitudinales, la densité, la fraction volumique, etc, dans les deux cas la propagation des ondes dépend de la structure.

1.5 Structures périodiques :

Les structures à bandes interdites phononiques sont constituées de matériaux disposées périodiquement suivant une, deux ou trois dimensions.

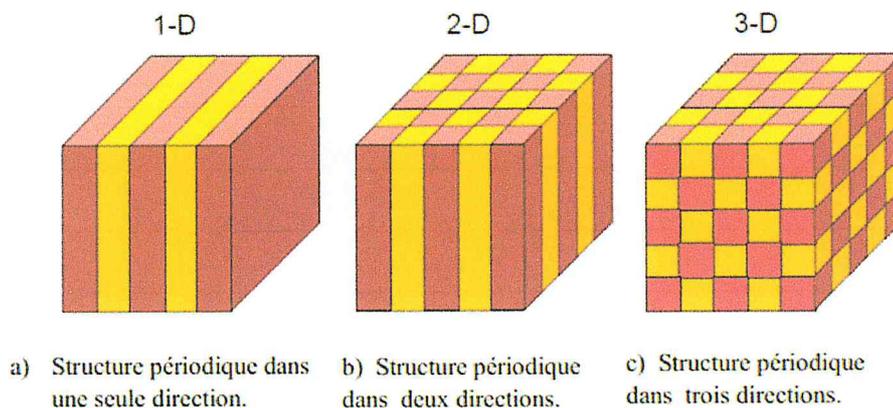


Figure 1.4.: Exemples de structures périodiques [9].

1.5.1 Structures périodiques unidimensionnelles (1D) :

Les structures 1D sont les plus anciennes, elles ont été déjà longtemps étudiées et utilisées comme miroirs diélectriques ou filtres optiques. Elles consistent en une alternance de plans diélectriques d'épaisseur $\lambda/4$ où λ représente la longueur d'onde du rayonnement guidé (figure (1D)). Les bandes interdites de cette structure, appelée également miroir de Bragg, sont sensibles à l'angle d'incidence, il faut étendre la périodicité de la structure à 2 voir 3 dimensions.

1.5.2 Structures périodiques bidimensionnelles (2D) :

Les structures 2D sont des cristaux dont la permittivité diélectrique est périodique dans les deux dimensions et reste invariante dans la troisième dimension (figure (2D)). Elles se regroupent principalement suivant trois familles qui sont les réseaux carré, triangulaire et hexagonal.

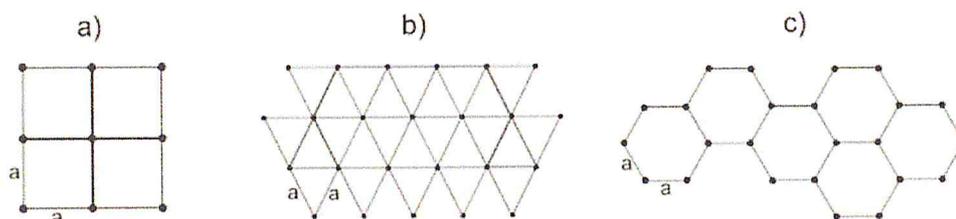


Figure 1. 5 : Structures 2D : a) Structure carrée, b) triangulaire et c) hexagonale [9].

Ces structures bi-périodiques sont généralement composées de cylindres diélectriques. Elles présentent une géométrie simple qui facilite leurs études théoriques et expérimentales.

1.5.3 Structures périodiques tridimensionnelles (3D) :

Les structures périodiques tridimensionnelles sont périodiques suivant les trois directions de l'espace. La figure (1.6) montre quelques exemples de cristaux photoniques artificiels 3D.

En réalité, peu de structures 3D possèdent une bande interdite complète [9]. Ont été les premiers à montrer théoriquement la présence d'une bande interdite complète dans une structure à symétrie cubique à face centrée (CFC) ou communément

appelée structure diamant. L'inconvénient des structures 3D réside dans le fait qu'elles soient difficiles à réaliser expérimentalement.

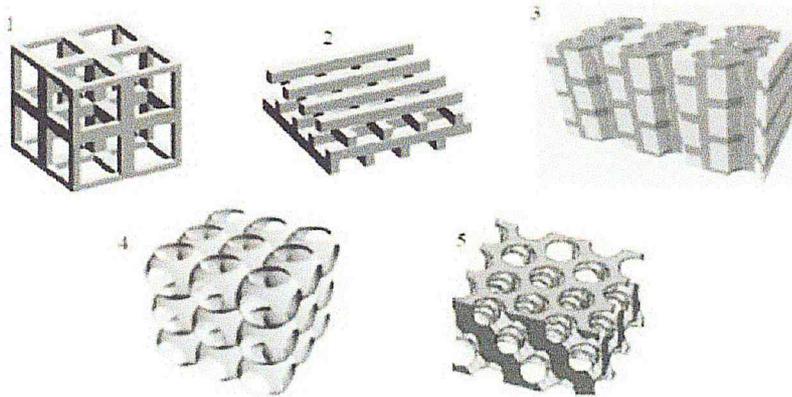


Figure 1.6: Exemples de structures 3D publiées dans : structure cubique (1), tas de bois (2), structure multicouches (3), opales ou inversées (4), Yablonovite (5) [9].

1.6 Structures de bandes et bandes interdites phononiques :

Dans les études qui traitent la propagation des ondes dans un milieu quelconque, l'objectif est de cerner le comportement de celles-ci en termes de relation entre la fréquence et le vecteur d'onde en fonction des autres paramètres liés au milieu de la propagation. Cette relation est appelée relation de dispersion. Dans un milieu élastique homogène, par exemple, cette relation peut être simple et linéaire : $\omega(k) = V.K$, V représentant la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu, qui dépend directement des propriétés élastiques et de la densité de ce dernier; dans ce cas, nous ne sommes pas en présence de dispersion de l'onde. Cette dernière a lieu quand la relation entre la fréquence et le vecteur d'onde devient plus complexe, où la vitesse de phase et celle de groupe peuvent être distinguées.

A fin de comprendre les comportements des ondes élastiques/acoustiques dans les milieux périodiques, les chercheurs se sont depuis toujours intéressés à calculer les relations de dispersion, qu'ils représentent sous forme de courbes reliant la fréquence au vecteur d'onde suivant différentes directions de propagation. Cette forme de visualisation du comportement dispersif est appelée structure de bandes phononiques. En effet, en exploitant la périodicité élastique du CP, le théorème de Bloch précise que chaque onde solution qui se propage dans le CP, est le produit

d'une onde plane et d'une fonction périodique. Le calcul de la structure de bande se limite donc à une zone réduite de l'espace des vecteurs d'onde : une cellule de périodicité appelée zone de Brillouin comme dans le cas des états d'énergies électroniques dans une structure cristalline périodique d'un matériau. Ainsi, la structure de bandes phononiques présente les différents modes de propagation possibles des ondes élastiques qui diffusent dans le CP.

La principale propriété remarquable qu'offrent les CP est la possibilité de création de bandes interdites au niveau de la structure de bande. Une bande interdite se présente dans ce cas sous forme d'un intervalle de fréquences où aucun lien n'est défini entre la fréquence et le vecteur d'onde. La figure (1.7) présente un exemple de structure de bande phononique pour un CP bidimensionnel à ondes de Lamb constitué d'un arrangement carré périodique d'inclusions cylindriques en or dans une plaque d'époxy d'épaisseur $e=0.25a$, a étant la périodicité de la structure. Cette structure de bande est calculée puis représentée suivant les trois directions de propagation ΓX , XM et $M\Gamma$ axes principaux de symétrie de la première zone de Brillouin, déterminés par le vecteur d'onde k .

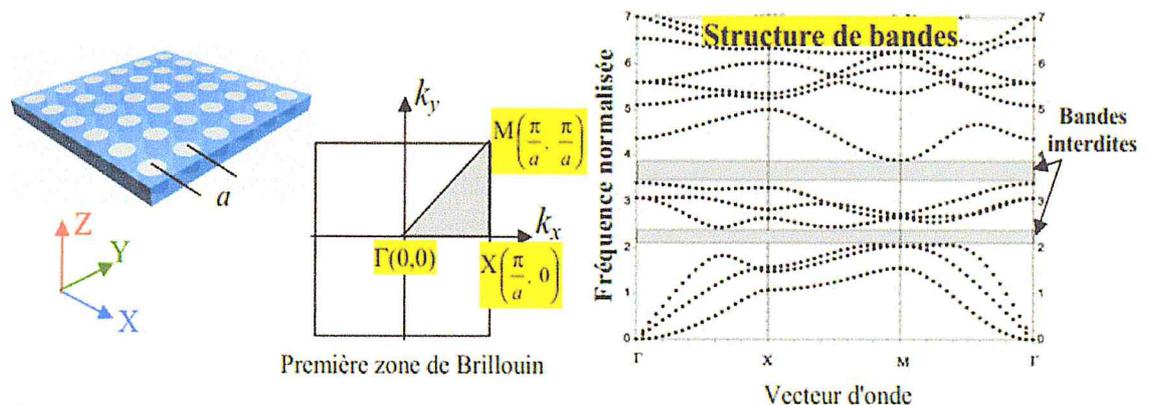


Figure 1.7: Exemple de calcul de structure de bandes aux axes principaux de symétrie de la première zone de Brillouin pour un CP à ondes de Lamb [4].

1.7 Physique des milieux périodiques :

La propagation d'ondes dans un milieu périodique présente des similarités quel que soit le domaine de la physique concerné. La physique des semi-conducteurs est en effet basée sur les interactions entre l'onde représentant la densité de probabilité de présence d'un électron et le réseau périodique de la maille cristalline, mais on

peut aussi s'intéresser à la propagation des phonons dans un tel cristal. A l'échelle macroscopique, des phénomènes analogues apparaissent suite à la diffraction des ondes dans des réseaux multicouches périodiques optiques ou acoustiques. Tous ces phénomènes ont pour principe fondamental la diffraction de Bragg, qui a la particularité d'expliquer la création de bandes de fréquences dites interdites ou d'arrêt dans la propagation des ondes dans le milieu périodique.

1.8 Loi de Bragg :

En 1913, W.H. et W.L. Bragg établissent la loi dite de Bragg [9], 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, λ la longueur d'onde, d la distance entre deux plans cristallographiques et θ 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 .

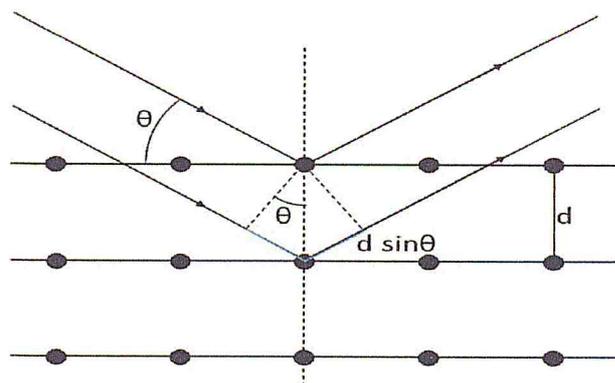


Figure 1.8: Schéma expliquant la loi de Bragg [4].

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).

1.9 Zone de Brillouin :

L'énoncé le plus important de la 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-Seltz du réseau réciproque ; nous représentons les vecteurs joignant un site du réseau réciproque à tous les plans bissecteurs perpendiculaires à ces vecteurs. Le volume le plus petit autour du site choisi limité par ces plans est appelé zone de Brillouin.

Nous pouvons construire les zones supérieures de Brillouin de la même manière, la $l^{\text{ème}}$ 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. La figure montre les zones de Brillouin du réseau réciproque de structure carrée [4].

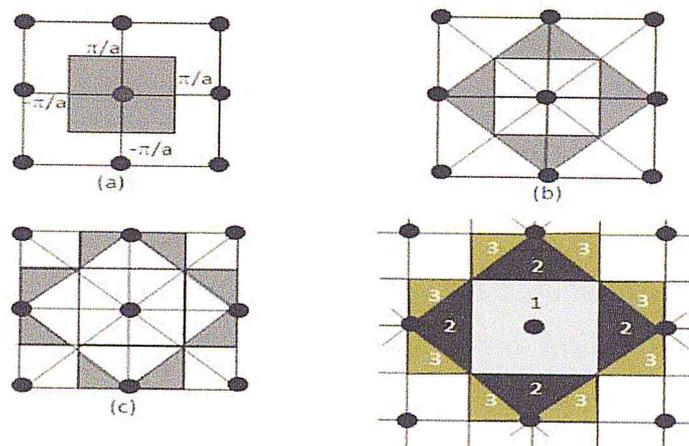


Figure 1.9:(a) 1^{ère}, (b) 2^{ième}, (c) 3^{ième} zone de Brillouin d'un réseau carré [4].

1.10 Application :

Les composants MEMS RF sont polarisés électro-statiquement en utilisant une tension de commande bipolaire NRZ, comme indiqué sur la (Fig1.11), afin d'éviter une charge diélectrique et d'augmenter la durée de vie de l'appareil. Les charges diélectriques exercent une force électrostatique permanente sur le faisceau. L'utilisation d'une tension de commande bipolaire NRZ au lieu d'une tension de commande CC évite la charge diélectrique tandis que la force électrostatique exercée sur le faisceau est maintenue, car la force électrostatique varie de manière quadratique avec la tension de commande CC. La polarisation électrostatique n'implique aucun flux de courant, ce qui permet d'utiliser des lignes de polarisation à haute résistivité à la place des inductances RF.

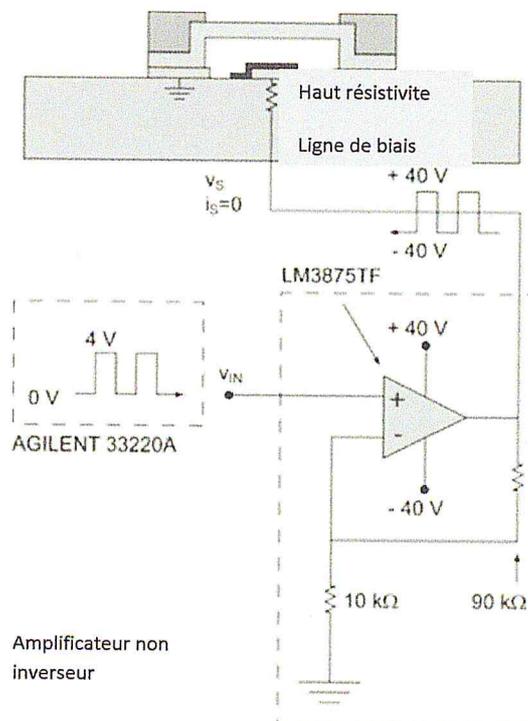


Fig. 1.11: polarisation électrostatique d'un commutateur MEMS RF à faisceau fixe capacitif, d'un condensateur commuté ou d'un varactor [10].

1.10.2 Application du concept des réseaux périodiques dans l'isolation sismique :

Le concept de cristal phononique, c'est-à-dire de matériau composite périodique bi- ou tridimensionnel permettant l'ouverture de bandes interdites pour les ondes élastiques, a été introduit de façon quasiment simultanée [11], d'une part [2] d'autre part en 1993. Pour ces auteurs, si la seule mise en évidence des propriétés liées à la

1.10.1 Un système micro électromécanique radiofréquence (RFMEMS) :

Un système micro électromécanique avec électronique comprenant des pièces de taille inférieure à un millimètre mobile qui fournissent une fonctionnalité de radiofréquence . fonctionnalité RF peut être mise en œuvre à l'aide de diverses technologies RF. Outre la technologie MEMS RF, semi - conducteur composé III-V (GaAs , GaN , InP , InSb), ferrite , ferroélectrique , semi-conducteur à base de *silicium* (RF CMOS , SiCet SiGe), et la technologie des tubes à vide est à la disposition du concepteur RF. Chacune des technologies RF offre un compromis distinct entre le coût, la fréquence , le gain , l' intégration à grande échelle , la vie, la linéarité , la figure de bruit , l' emballage , la manutention de puissance , consommation d'énergie , la fiabilité , la robustesse, la taille, la tension d'alimentation , le temps de commutation et poids.

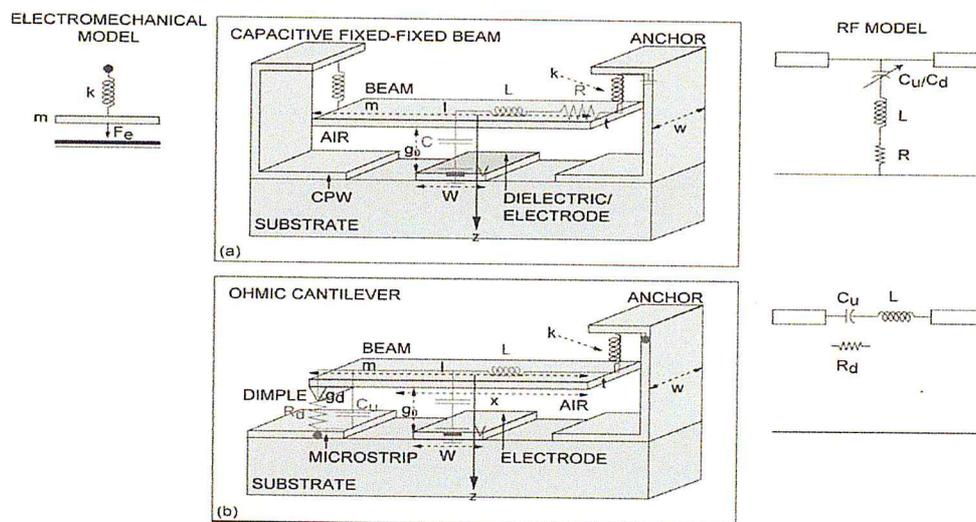


Fig. 1 10: (a) Un commutateur MEMS RF à faisceau fixe capacitif, connecté en dérivation à une ligne CPW. (b) Un commutateur MEMS RF en porte-à-faux ohmique, connecté en série à une ligne micro ruban [10].

1.10.1 Les types de RFMEMS :

Il existe différents types de composants MEMS RF, tels que des résonateurs MEMS RF intégrales CMOS et des oscillateurs auto-entretenus à faible facteur de qualité à faible bruit de phase, inducteurs accordables MEMS RF, commutateurs MEMS RF, capacités commutées et varactors.

périodicité du matériau présente un intérêt certain d'un point de vue purement fondamental, les possibilités d'applications des cristaux phononiques justifient plus encore leur étude : structures antivibratoires ou encore transducteurs figurent parmi les premiers systèmes évoqués [12].

D'autres applications évidentes sont rapidement envisagées : systèmes d'isolation phonique , structures antisismiques [12], filtrage et traitement du signal acoustique, etc.

1.10.2 Fondations périodiques:

Gaoffeng et Zhifei (2010) [13] ont conçu un nouveau système d'isolation 2D appelé « fondations périodiques », il contient un arrangement périodique d'inclusions dans une matrice de béton (figure 12). Les fondations périodiques 2D permettent de bloquer la propagation des ondes sismiques dans une certaine gamme de fréquence. Le modèle est supposé infini dans la direction Z, d'où l'hypothèse de l'analyse en déformations planes. Dans ce cas, seuls les modes dans le plan sont considérés, et la première bande interdite est calculée de telle manière qu'elle devienne l'objectif principal dans l'isolation sismique [12].

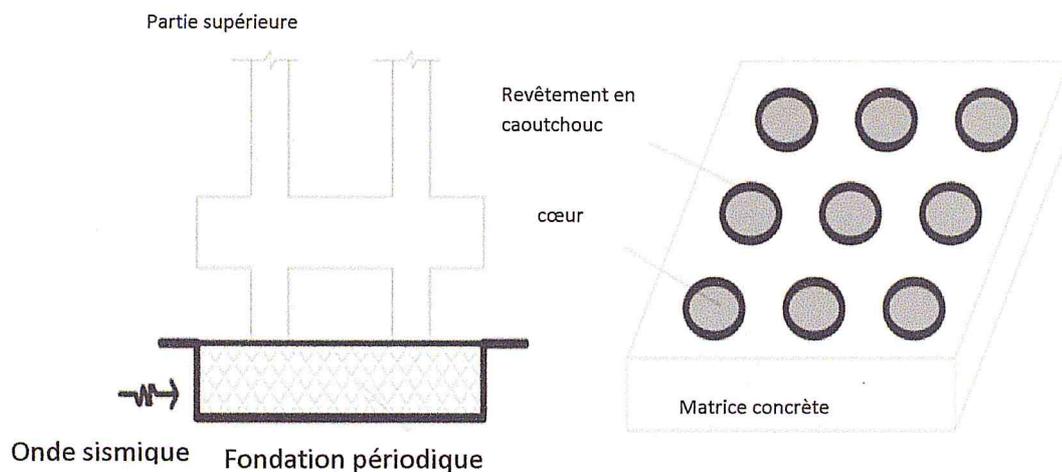


Figure 1.12: Fondations périodiques pour isolation sismique [11].

1.10.3 Systèmes de bandes interdites phononiques dans les structures de génie civil :

Le pont de Volga à Volgograd inauguré en mai 2009 (figure 2.13.a), a subi des déformations importantes de flexion en Mai 2010 dues à des vibrations de résonance Provoquées par des forces extérieures relativement petites (figure 2.13.b).

Dans ce contexte, des chercheurs comme M.Brun, A.B.Movchan et I.S.Jones [14] ont proposé des méthodes mathématiques et des méthodes de conception appropriées pour éliminer les vibrations latérales dans les structures minces, comme un long pont ou un BGH.

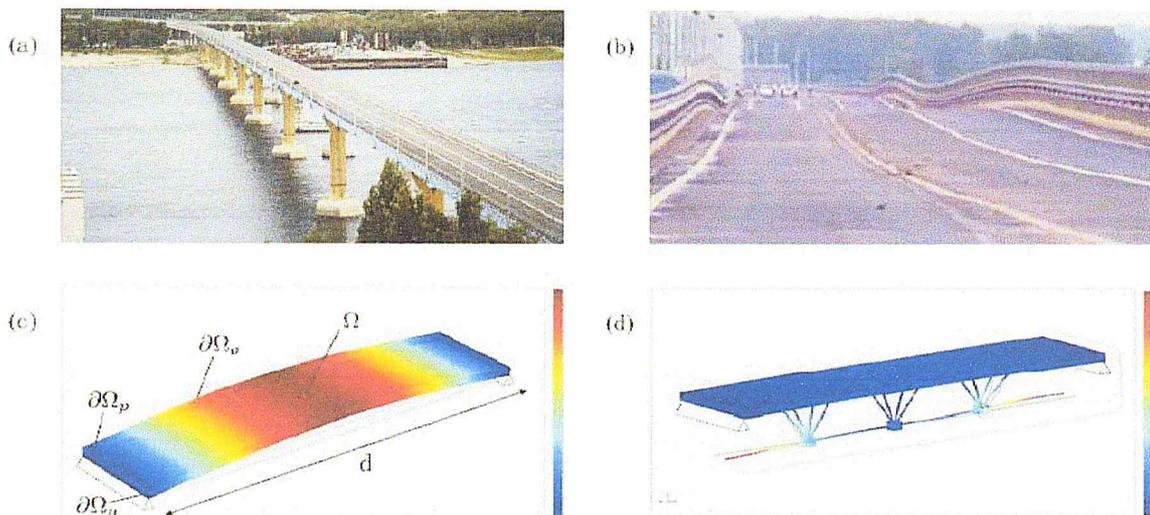


Figure 1.13 : Pont de Volga (a), (b) déformations de flexion de la plate-forme du pont, (c) modèle numérique simplifié, (d) structure 3D de guide d'ondes [13].

1.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les notions de bases associées aux cristaux phononiques et les fondements théoriques et leur application possible.

Chapitre2 :

Les Ondes élastiques.

CHAPITRE 2: Les Ondes élastiques :

2.1 Introduction :

La propagation des ondes acoustiques/ élastiques dans les milieux hétérogènes dotés d'une structure périodique fait l'objet d'un grand intérêt depuis quelques décennies. Un grand nombre de structures périodiques a été étudié et des approches théoriques variées ont été employées. Toutes ces méthodes ont mis en évidence l'existence de propriétés physiques telles que la présence de bandes interdites (*Gap*) correspondant à une forte atténuation et des bandes passantes d'atténuation plus faible. Ainsi dans ce chapitre, une présentation préliminaire sur les caractéristiques principales des différents types d'ondes élastiques.

2.2 Les ondes élastiques :

Une onde élastique correspond à la propagation de la déformation locale d'un milieu qui s'appuie sur la matière. Les ondes sismiques sont également des ondes élastiques, Elles se propagent à la surface ou à l'intérieur de la planète après le déclenchement d'un tremblement de terre .Il existe deux grandes types d'ondes élastiques : de surface et de volume.

Les ondes de volume qui traversent la terre et les ondes de surface qui se propagent à sa la surface.

2.2.1 Ondes de volume :

Elles se propagent dans la masse terrestre depuis la source. Lorsqu'elles arrivent à la surface elles provoquent les déformations des constructions sous l'effet des forces d'inertie. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et, d'une manière générale, cette dernière augmente avec la profondeur car le matériau traversé devient plus dense.

En 1899 les ondes [9] P et S sont identifiées comme des ondes de compression/dilatation et de cisaillement par R.D Oldham et W. Wiechert.

Les ondes P (Primaires) appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales .Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives. Ces déplacements du sol sont

parallèles à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les plus rapides (6 km s⁻¹ près de la surface) et donc les premières à être enregistrées sur les sismogrammes. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

Onde P (compression)

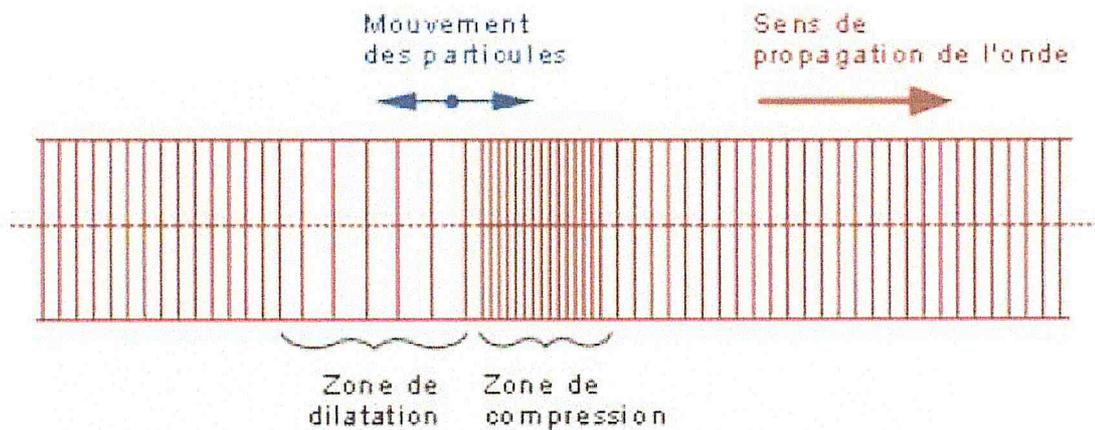


Figure 2.1 : Représentation schématique des ondes P [9].

Les ondes S (Secondaires) [9] qui progressent en cisillant le sol perpendiculairement à leur sens de cheminement. Elles secouent les bâtiments horizontalement dans tous les sens. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, leur vitesse est de 4,06 km/s. Elles apparaissent en second sur les sismogrammes.

Onde S (cisaillement)

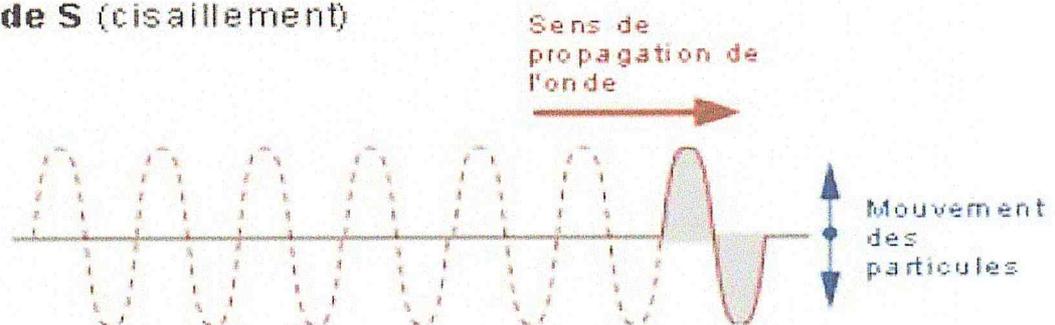


Figure 2.2 : Représentation schématique des ondes S [9].

2.2.2 Ondes de surface :

Ce sont des ondes guidées par la surface de la terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte. Ces ondes sont dispersives. On peut distinguer :

a. L'onde de Love L ou LQ:

Elles déplacent le sol d'un côté à l'autre dans un plan horizontal perpendiculairement à sa direction de propagation. Le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical. On les enregistre uniquement sur les composantes horizontales du sismomètre.

Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices.

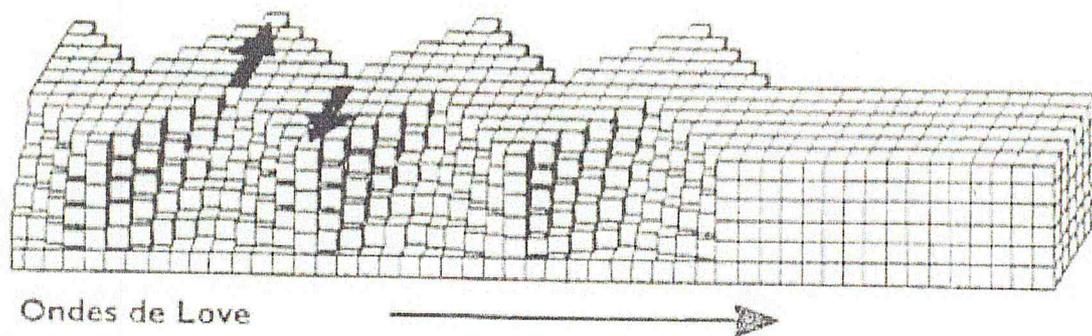


Figure 2.3 : Représentation schématique des ondes L [10].

b. L'onde de Rayleigh ou LR:

Le déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, un mouvement elliptique à la fois horizontal et vertical. Les vibrations engendrées par cette onde durent plusieurs minutes. Cette onde est enregistrée sur les trois composantes du sismomètre.

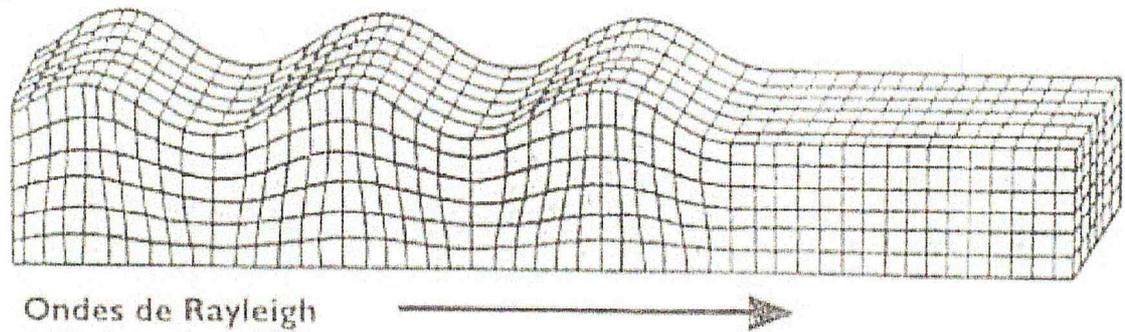


Figure 2.4 : Représentation schématique des ondes LR [10].

c. Ondes de surface de polarisation transverse:

Elles se propagent à la surface d'un milieu ou à l'interface entre deux milieux (ondes d'interface). On parle d'onde de Love en sismologie (ce qui désigne un mode de polarisation transverse d'un substrat composite en ultrasonique). La polarisation est purement transverse. Le déplacement n'est pas lié à une variation de volume. L'amplitude des déplacements décroît exponentiellement dans la profondeur.

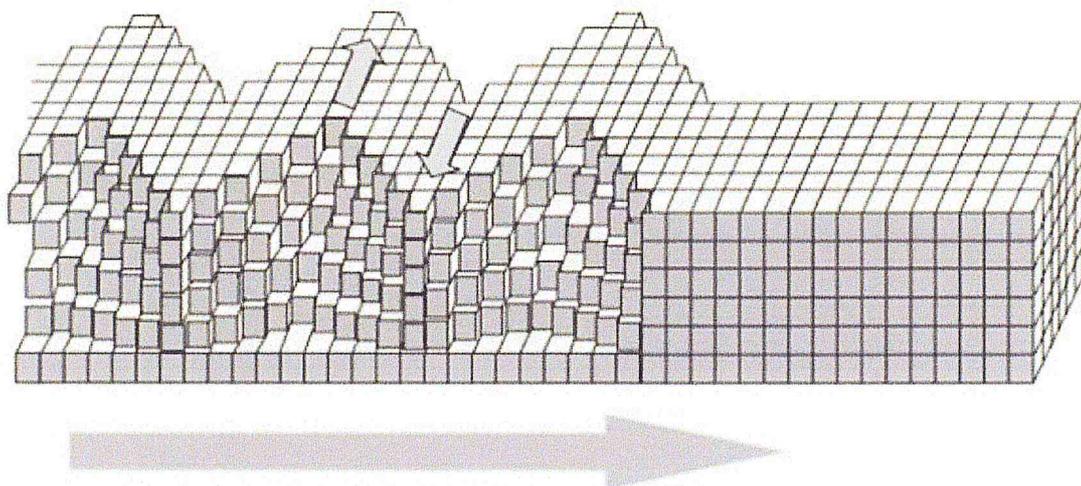


Figure 2.5 : Ondes de surface de polarisation transverse [10].

d. Ondes de Lamb :

Dans un solide isotrope, l'onde de Lamb (nom d'un géophysicien anglais) comprend une composante longitudinale et une composante transversale verticale dont le déplacement est contenu dans le plan sagittal. Elle se propage dans une plaque dont les deux surfaces sont libres. La présence des deux composantes se comprend puisqu'une onde longitudinale qui heurte une surface se transforme partiellement en une onde transversale et réciproquement. Une autre explication découle de la propagation possible sur chaque surface libre d'une onde de Rayleigh. Ces ondes de surface cheminent de façon indépendante tant que la distance entre les surfaces libres (l'épaisseur de la plaque) est grande devant la longueur des ondes. Lorsque l'épaisseur de la plaque n'est plus très grande, alors les ondes de surface se couplent et se transforment en ondes de Lamb [4].

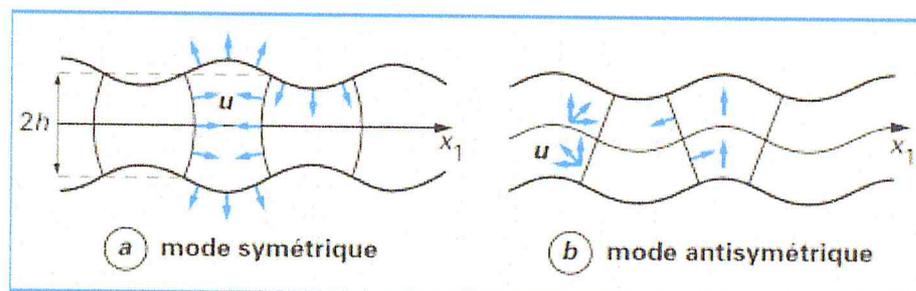


Figure 2.6: Ondes de Lamb [10].

2.4 Equations de propagation des ondes élastique :

2.4.1 Formulation générale :

a Equations de mouvement :

La propagation des ondes élastiques/acoustiques dans les solides est décrite par deux champs d'équations de base : l'équation reliant le tenseur de déformation au champ de déplacement : $s = \nabla_s u$ (2.1)

et l'équation du mouvement $\nabla \cdot T = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ (2.2)

Cette dernière exprime le comportement vibratoire propre d'un milieu libre de toute interaction extérieure, où les forces d'inertie et celles de rappel élastique agissent sur

les particules du milieu pour donner lieu aux mouvements d'oscillation. À ces deux équations, on ajoute la loi de Hooke $T = c: S$ (2.3)

reliant le tenseur des contraintes à celui des déformations, permettant ainsi d'établir le lien entre les forces élastiques de rappel et la déformation du matériau au moyen des constantes élastiques du milieu. Un système d'équations en T , S et u est ainsi défini :

$$\begin{cases} s = \nabla_s u & (2.4) \\ \nabla T = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} & (2.5) \\ T = C: S & (2.6) \end{cases}$$

Où T et S représentent respectivement les tenseurs des contraintes et des déformations, u le vecteur champ de déplacement, et c le tenseur de rigidité élastique (*stiffness tensor*) regroupant les constantes élastiques du milieu.

Le produit désigné par les deux points ":" (*double dot Product*) signifie que les deux tenseurs T et S sont liés par la relation suivante:

$$T_{ij} = \sum_{k,l} c_{ijkl} S_{kl} \quad (2.7)$$

L'expression $S = \nabla_s u$ implique $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, avec $(i, j, k, l) \in \{x, y, z\}^4$, x, y et z étant les trois directions du repère cartésien dans l'espace tridimensionnel. Le système décrit par les équations (2.4), (2.5) et (2.6) peut aussi être écrit sous la forme :

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_j \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = \sum_{j,k,l} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) \quad (2.8)$$

Ces équations peuvent encore être simplifiées par les symétries des tenseurs T et S , à savoir $c_{ijkl} = c_{jikl}$, $c_{ijkl} = c_{ijlk}$ et $c_{ijkl} = c_{klij}$, et en utilisant la notation de Voigt pour le tenseur de rigidité élastique et celui des contraintes : $c_{ijkl} = c_{IJ}$ et $T_{ij} = T_I$, avec :

Tableau 2.1: Notation de Voigt :

ij, kl	xx	yy	zz	yz, zy	xz, zx	xy, yx
I, J	1	2	3	4	5	6

On obtient ainsi:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial T_6}{\partial y} + \frac{\partial T_5}{\partial z} \\ \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\partial T_6}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{\partial y} + \frac{\partial T_4}{\partial z} \\ \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial T_5}{\partial x} + \frac{\partial T_4}{\partial y} + \frac{\partial T_3}{\partial z} \end{cases} \text{Avérer} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial u_x / \partial x \\ \partial u_y / \partial y \\ \partial u_z / \partial z \\ \partial u_y / \partial z + \partial u_z / \partial y \\ \partial u_x / \partial z + \partial u_z / \partial x \\ \partial u_y / \partial x + \partial u_x / \partial y \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Dans un milieu isotrope par exemple, le tenseur élastique se présente sous la forme:

$$c = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \text{avec } c_{44} = \frac{(c_{11} - c_{12})}{2} \quad (2.10)$$

En analyse numérique, la résolution de ces équations permet de simuler le comportement élastique d'un milieu solide quelconque, et donc sa réponse aux différentes sollicitations extérieures qu'il subit, notamment les excitations générant des ondes acoustiques ou élastiques.

2.4.1.2 Conditions aux limites :

Dans une étude numérique, le CP constitue le domaine de résolution des équations (2.5). Celui-ci présente des interfaces et des frontières de différents types, qu'il faut définir en termes de comportement élastique et traduire en équations. Ainsi, des équations de conditions aux limites sur les champs de déplacement u et des contraintes T sont exprimées sur ces frontières selon leur nature qui peut être libre, fixe, ou présenter une propriété de périodicité.

2.4.1.3 Conditions aux limites libres et fixes :

Les conditions aux limites libres ou fixes, sur une ou plusieurs frontières du domaine étudié, doivent être exprimées et jointes aux équations de propagation (2.5). Une surface libre ne subit aucune contrainte en aucun de ses points. Par exemple, dans un milieu présentant une surface plane libre située en $z = z_1$ et dont la

normale n_z est suivant la direction de l'axe (OZ) du repère cartésien, la condition aux limites libres s'exprime par :

$$T|_{z=z_1} \cdot n_z = 0 \quad (2.11)$$

C'est-à-dire :
$$T_{xz}|_{z=z_1} = T_{yz}|_{z=z_1} = T_{zz}|_{z=z_1} = 0 \quad (2.12)$$

Où, avec la notation de Voigt :
$$T_5|_{z=z_1} = T_4|_{z=z_1} = T_3|_{z=z_1} = 0 \quad (2.13)$$

En ce qui concerne une surface fixe, aucun déplacement n'est possible pour les particules du milieu la constituant. La condition aux limites s'exprime dans ce cas par un champ de déplacement nul $\mathbf{u}=\mathbf{0}$, c'est-à-dire $u_x = u_y = u_z = 0$ en tout point de cette surface.

2.4.1.4 Conditions aux limites périodiques :

Les conditions aux limites périodiques ont été élaborées afin de modéliser des systèmes périodiques très larges, supposés infinis. Le principe consiste à réduire le domaine de résolution à un élément de périodicité constituant *une cellule unité* qui sera le nouveau domaine d'étude. Les conditions aux limites périodiques sont introduites sur les frontières de cette cellule suivant les directions de périodicité afin d'exprimer le fait que les propriétés de l'onde acoustique à l'entrée sont les mêmes qu'à la sortie de la cellule, avec un déphasage bien déterminé. Le système simulé est ainsi théoriquement infini. En termes d'équations, une formulation donnée par le théorème de Bloch-Floquet permet d'exprimer ce comportement périodique sur le champ de déplacement et les contraintes, s'agissant des problèmes traitant de la propagation des ondes. Ainsi, pour un domaine périodique infini, l'étude se fait sur une cellule unité en écrivant les conditions périodiques suivantes :

$$u_i(\vec{X} + \vec{a}) = e^{-i\vec{k} \cdot \vec{a}} u_j(\vec{X}) \quad \text{et} \quad T_j(\vec{X} + \vec{a}) = e^{-i\vec{k} \cdot \vec{a}} T_j(\vec{X}) \quad (2.14)$$

Où u_i et T_j sont respectivement le champ de déplacement et les contraintes, \vec{a} le vecteur de périodicité de la structure étudiée, \vec{k} le vecteur d'onde et $\vec{X} = (x, y, z)$ le vecteur coordonnés dans le repère cartésien.

Nous aurons l'occasion de voir en détail l'utilisation de ces conditions périodiques dans les différentes méthodes de calculs présentées dans ce chapitre. Mais d'abord, intéressons nous à quelques cas de systèmes classiques dans lesquels différents types d'ondes élastiques/acoustiques classiques se propagent.

2.5 Simulation d'un guide d'onde phononique à une dimension :

Un guide d'onde à une dimension est un réseau périodique de structures géométriques parallèle à la direction OZ du plan, et insérés le long de la direction OX. Ces structures interdisent la propagation d'une certaine bande de fréquences d'ondes de vibration dans la direction de propagation OX. Le guide d'onde est constitué d'une succession de cellules élémentaires, chaque une d'elles comprend une inclusion sur un substrat porteur (figure 7), qui définit la périodicité du système. Le réseau final est considéré infini dans la direction X.

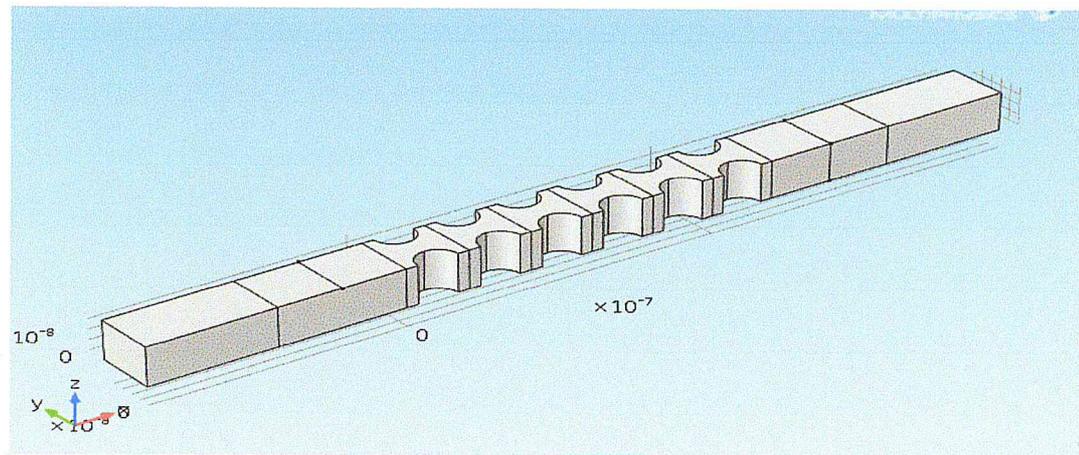


Figure 2.7: Guide d'onde phononique à une dimension.

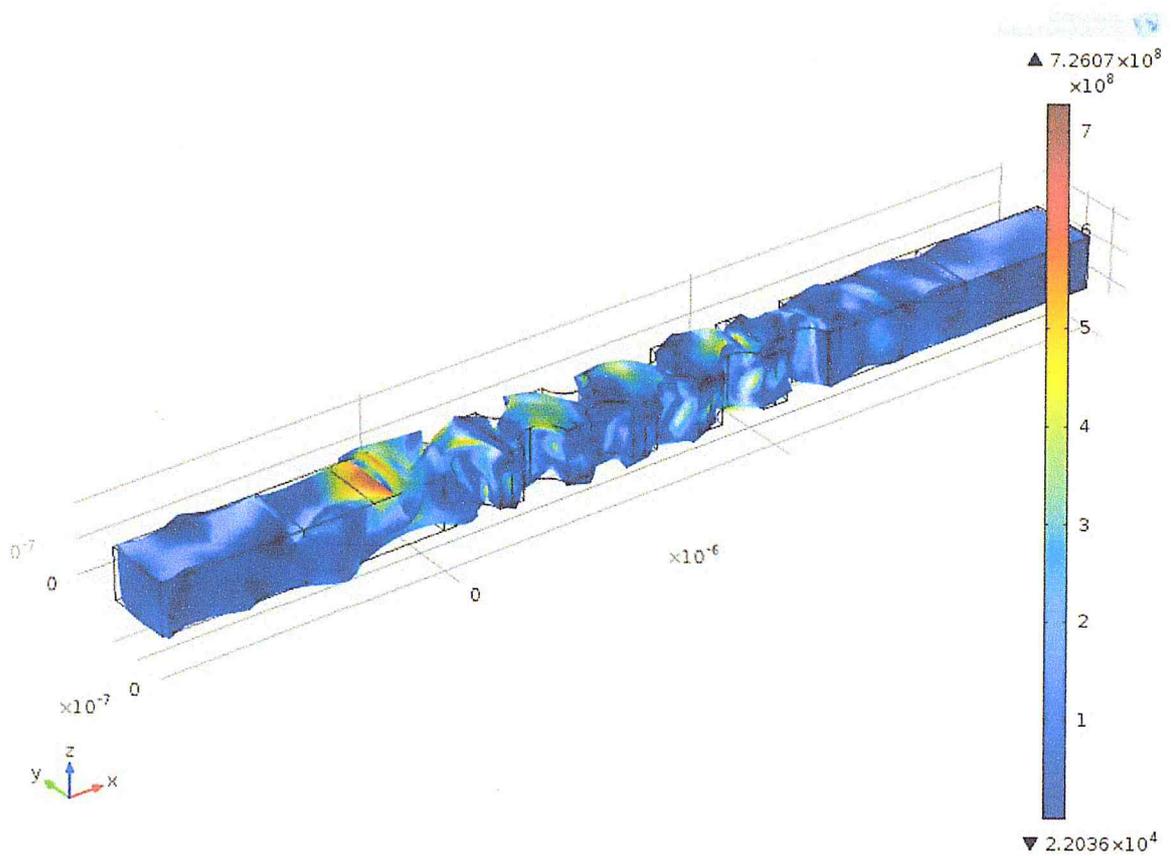


Figure 2.8 : Simulation d'un guide d'onde phononique à une dimension sous *comsol*.

Le système étant périodique il suffit d'étudier le comportement de la cellule élémentaire du guide pour déterminer le comportement de l'ensemble de la structure. La propagation des ondes élastiques est décrite par la relation de dispersion reliant la fréquence, f , au vecteur d'onde, k , de l'onde de propagation.

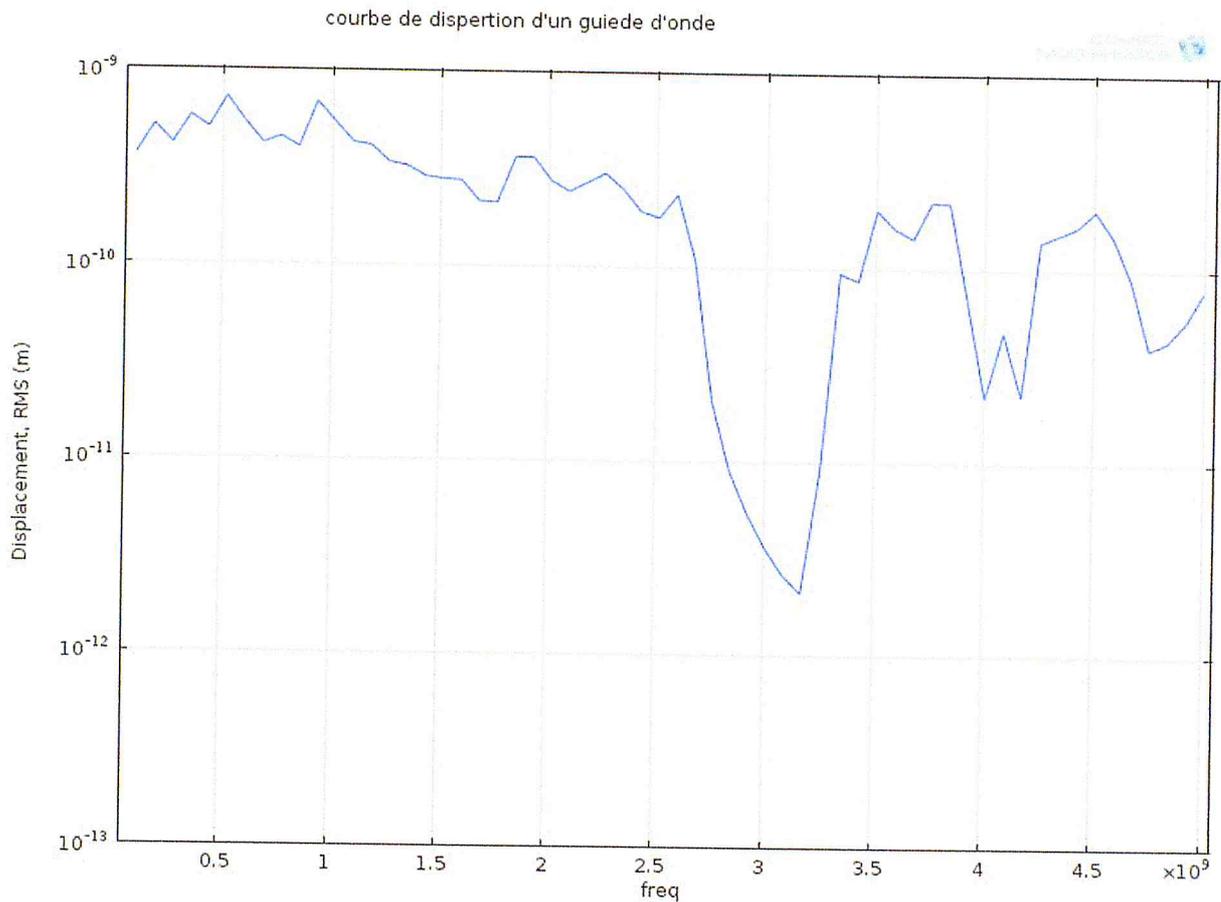


Figure 2.9 : Courbe de dispersion d'un guide d'onde.

2.6 Simulation d'un guide phononique à une dimension sous Comsol Multiphysics :

La simulation est faite sous Comsol (figure 2.7), avec le module solid mechanics, en résolvant l'équation aux valeurs propres (*eigenfrequency*) de la cellule élémentaire du réseau. En considérant que le système est infini dans la direction x et libre dans toutes les autres directions.

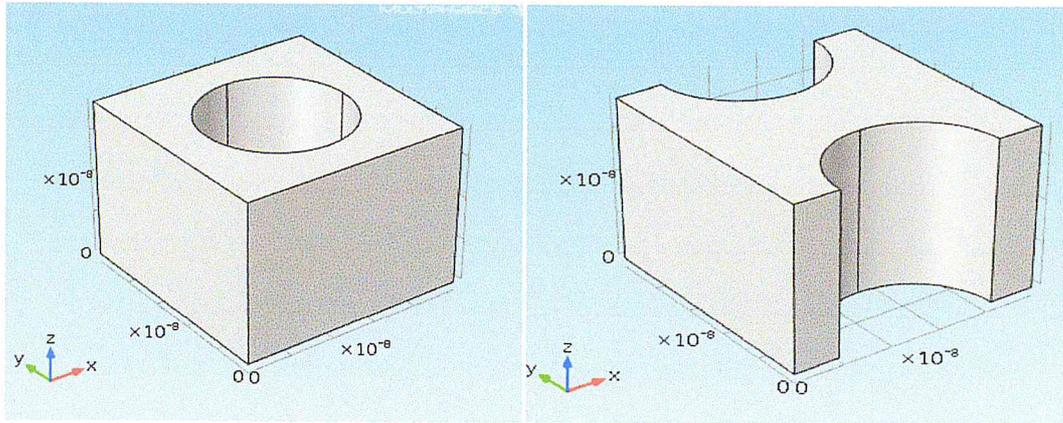


Figure 2. 10: Etude d'une cellule élémentaire du guide phononique à une dimension sur consol.

Le solveur fréquence propre du module MEMS piézoélectriques et de son mode en plus des constantes du matériau anisotrope sont pleinement pris en compte dans nos simulations.

$$u_{x=0} = u_{x=a} \quad (2.15)$$

$$v_{x=0} = v_{x=a}$$

$$u(x) = u(x + a) * \exp(ika) \quad (2.16)$$

$$v(x) = v(x + a) * \exp(ika) \quad (2.17)$$

Nous avons configuré le mode de l'unité comme une cellule du réseau par l'attribution des condition aux limites périodiques (2.15) et nous avons fait varier la solution pour montrer la dispersion par la modulation de la condition au limites avec une exponentielle complexe dépendant ainsi de la valeur de la longueur d'onde de la vibration élastique sans présumer les détails des fonction propres (2.16).

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

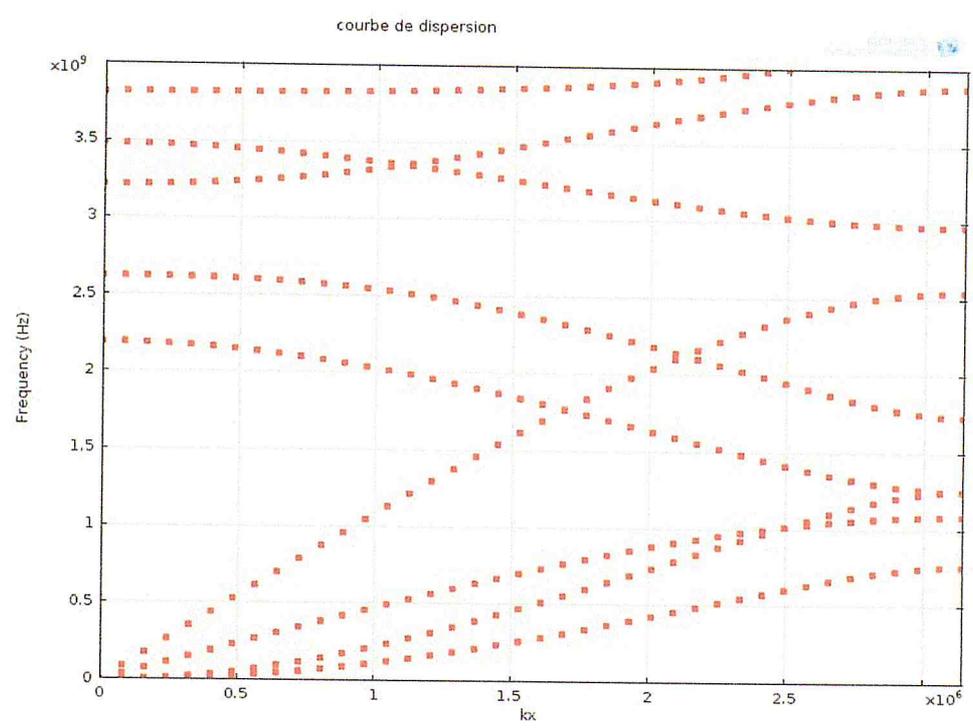
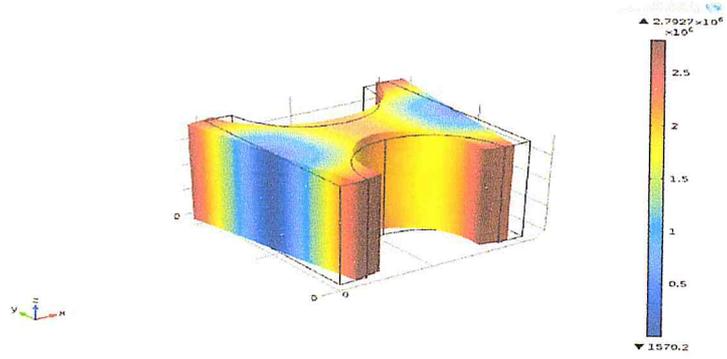


Figure 2. 11 : Exemple de résultats de simulations montrant les courbes de dispersions d'une structure "I" sous *Comsol Multiphysics*.

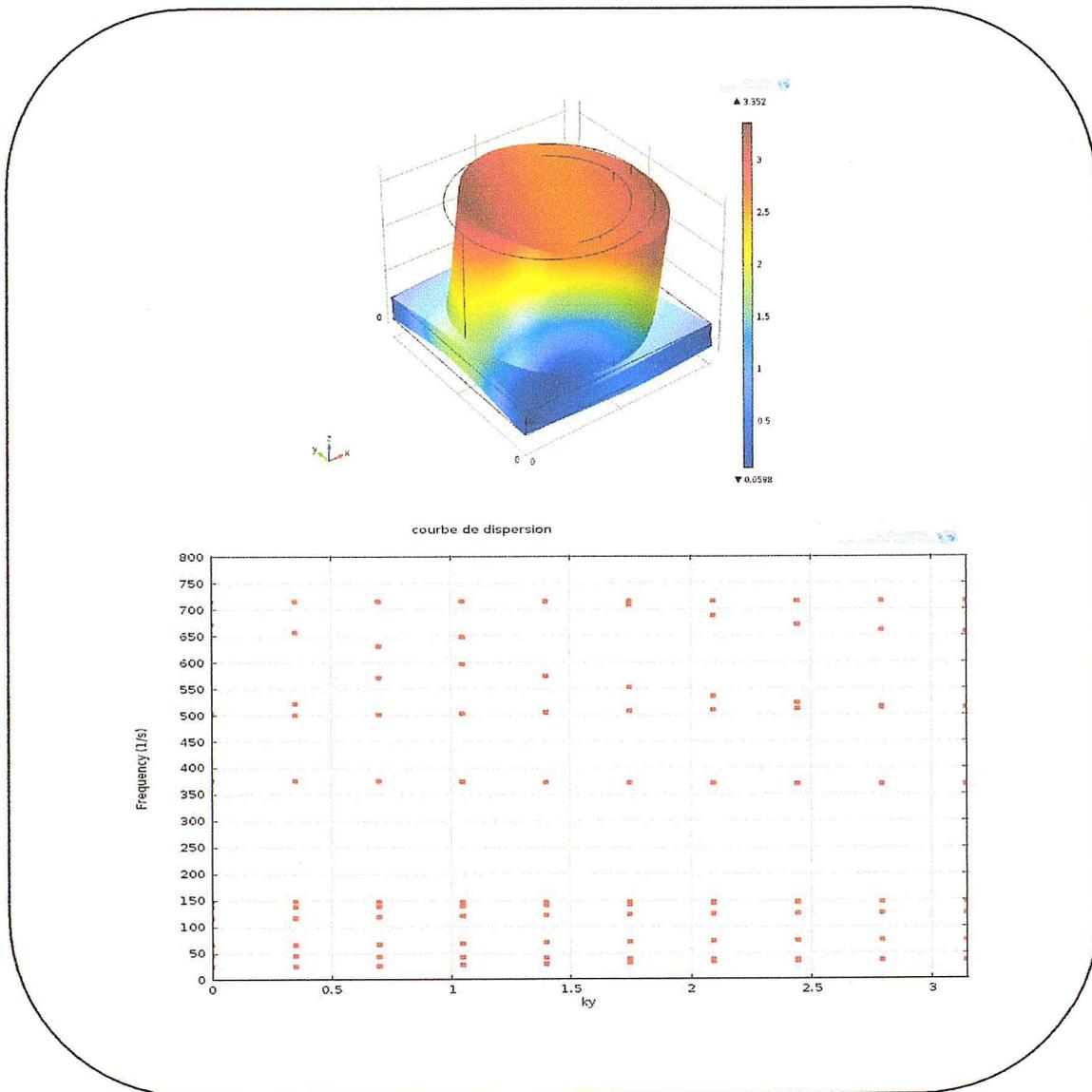


Figure 2. 12 : Exemple de résultats de simulations montrant les courbes de dispersions d'une structure "O" sous *Comsol Multiphysics*.

2.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une introduction sur les ondes élastiques et leurs types ainsi l'équation de propagation et un exemple de résultat des courbes de dispersion.

Chapitre3 :
Simulation par la méthode
des FEM de la
propagation des ondes
élastiques dans des
structures périodiques à
un résonateur.

CHAPITRE3 : simulation par MEF de la propagation des ondes élastique dans structure périodiques à un résonateur.

3.1 Introduction :

Durant les dernières décades, un effort de recherche important a été consacré à l'étude à la propagation des ondes élastiques dans des matériaux artificiels que sont les cristaux phononiques (PC). La plus part de ces structures phononiques sont constitué par des matériaux composites : une répétition d'inclusion dans une matrice avec des géométrie très variées. Ces structures phononiques sont très riches en propriétés tel que la réfraction négative, les modes de défauts localisés, les bande interdites (*Phononic Band Gaps* ou *PBGs*) .

3.2.Simulation par la Méthode des Eléments Finis :

3.2.1 Définition du Logiciel Comsol Multi-physiques :

Comsol *Multiphysics* est un logiciel permettant de résoudre les systèmes d'équations différentielles, décrivant un ou plusieurs phénomènes physiques couplés ou découplés, par la méthode des éléments finis. Avec une bonne adaptation de maillage, on peut contrôler l'erreur par l'utilisation des différents solveurs numériques [4]. On peut ainsi modéliser des phénomènes multi-physiques tels que la déformation élastique des matériaux, l'écoulement des fluides ou encore l'électrostatique etc. Le type d'analyse peut être choisi en fréquences propres, harmoniques ou mêmes transitoires. Les méthodes numériques avancées permettent de résoudre des problèmes avec des physiques « simples » ou d'étudier des phénomènes multi-physiques « couplés ». Comsol *Multiphysics* possède plus de 25 modules ; électrique, mécanique, fluidique et chimique etc. Le temps nécessaire aux simulations (allant de quelques minutes jusqu'à plusieurs heures) est très variable, il est fonction des performances de la machine de calcul et selon la dimension ; 1D, 2D, 3D, ainsi que le type de maillage.

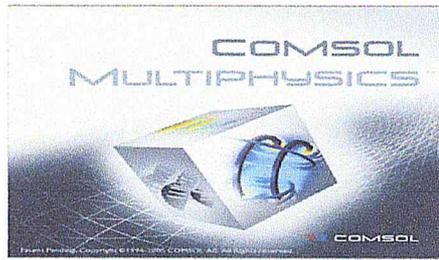


Figure 3.1 : Logiciel *COMSOL MULTIPHYSICS*.

3.2.2. Définition de la méthode de FEM :

La méthode des éléments finis (MEF, ou FEM pour *finite elements méthode*) est utilisée pour résoudre numériquement des équations partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.).

Concrètement, cela permet de prédire le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire (mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique).

3.3 Simulation d'une structure a base de cristaux phononiques à résonateur pour le calcul de la courbe de dispersion :

3.3.1 Procédure de simulation d'un cristal phononique par Comsol :

Nous sommes partie d'un travail antérieur [15]et[16], pour le calcul de la courbe de dispersion implémenté sous *Comsol Multiphysics v4.3a*. Les différentes étapes suivies pour la simulation 2D d'un cristal phononiques à un résonateur par la méthode des éléments finis illustré dans le schéma de la figure suivant :

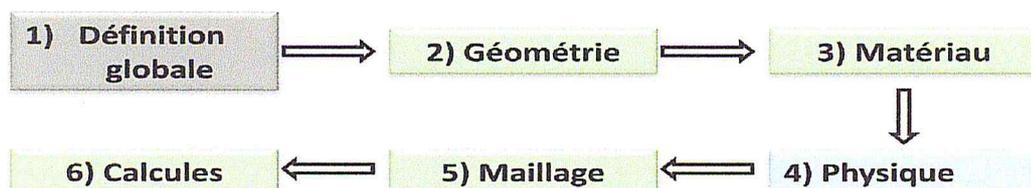


Figure 3.2 : Schémas des étapes de simulation d'un cristal phononique.

3.3.2 Méthode de simulation du spectre de transmission sur *Comsol Multi-physics v4.3a*:

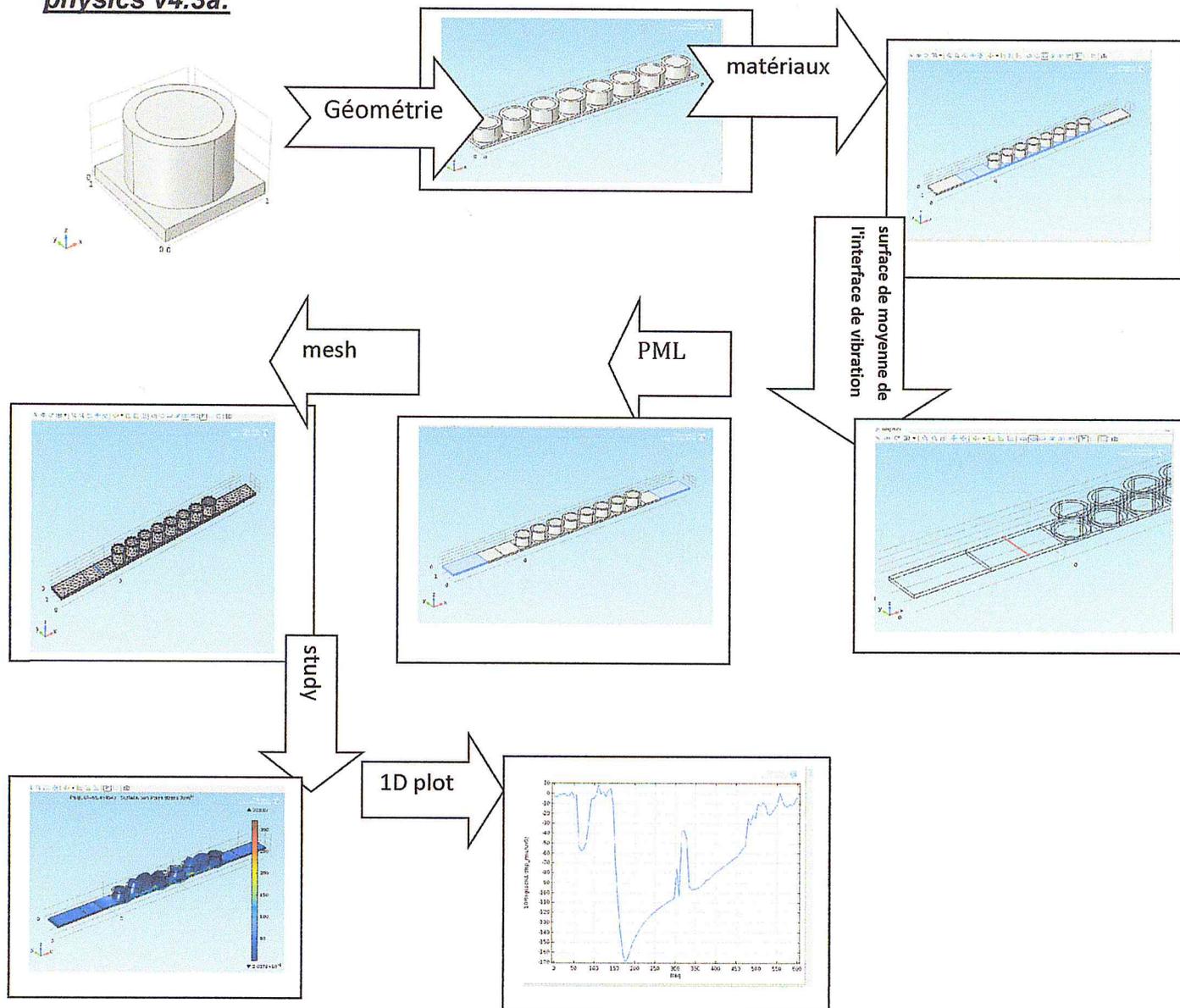


Figure 3.3 : Schémas des étapes de simulation d'un cristaux phononiques sous comsol.

Il est très utile de paramétrer dans un tableau les variables du modèle et les utiliser ensuite dans les différentes étapes de simulation, il suffit ensuite de changer dans le tableau la valeur correspondante à la variable qu'on veut modifier et il sera tenu en compte automatiquement dans tout le modèle.

Dans cette simulation, les valeurs des paramètres géométriques sont listées dans l'image d'écran ci-dessous.

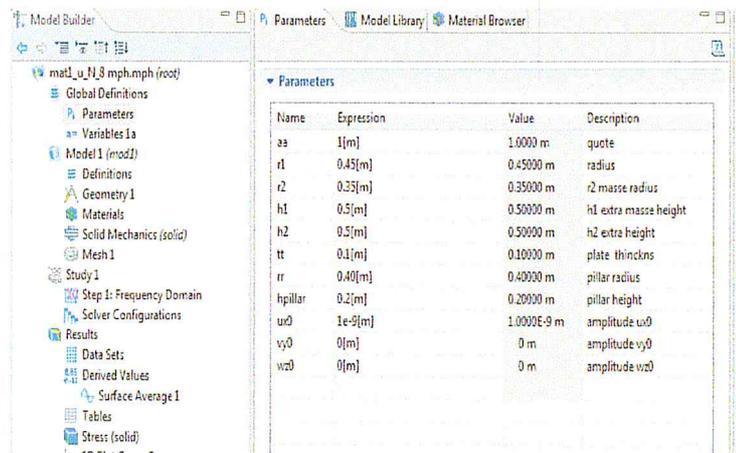
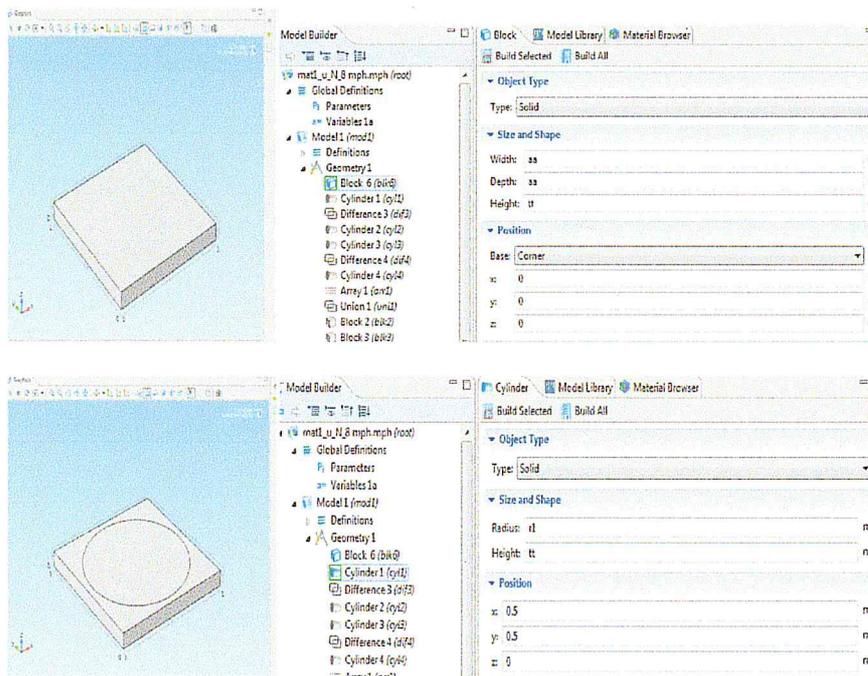
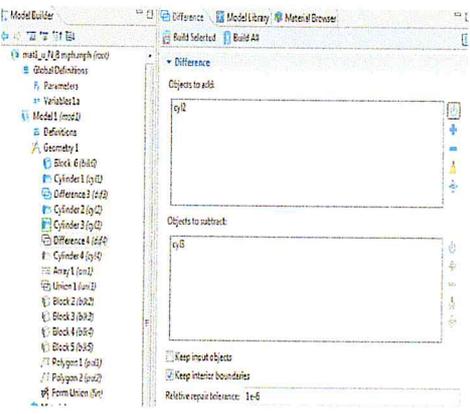
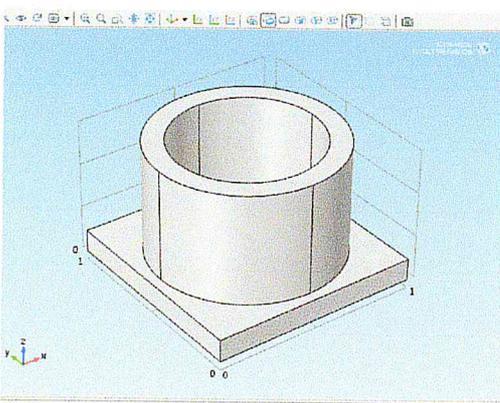
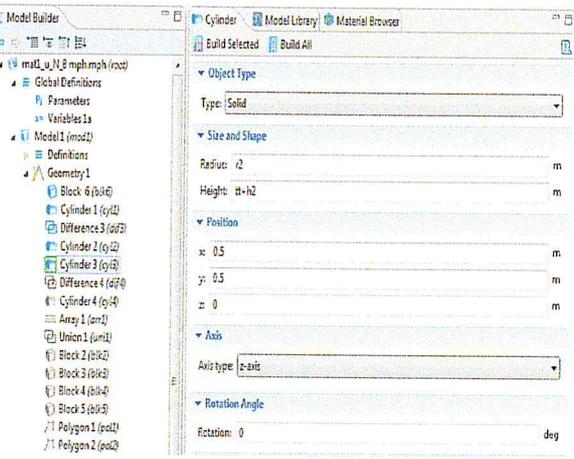
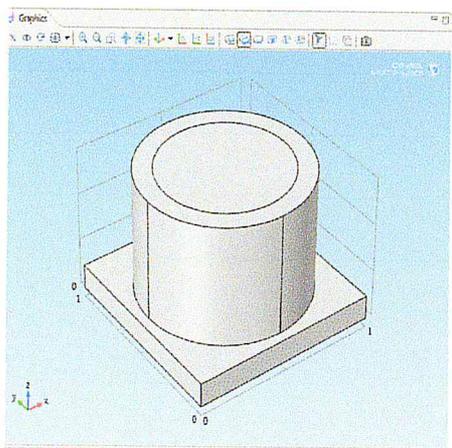
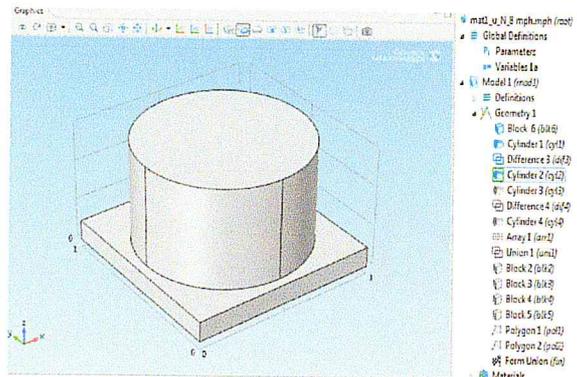
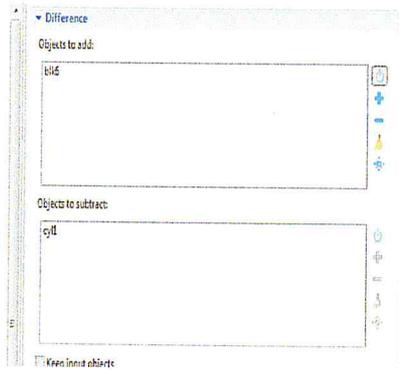
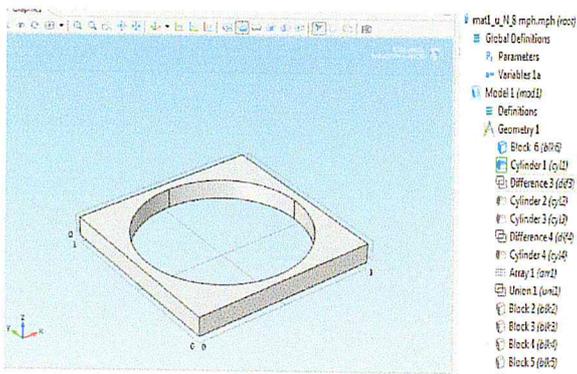


Figure 3.4 : Copie d'écran montrant les paramètres utilisés dans la simulation.

a.Géométrie de la structure cristaux phononiques (PC):

Comsol *Multiphysics* propose des outils de conception géométrique en (1D,2D et 3D). Les opérations géométriques sont toujours organisées selon une séquence dans l'aborecence du modèle. Notre model se compose d'un bloc de section caree incruste par des colones de forment cerculaire. Les différentes étapes nécessaire à la définition d'un modèle pour le lancement d'une simulation :





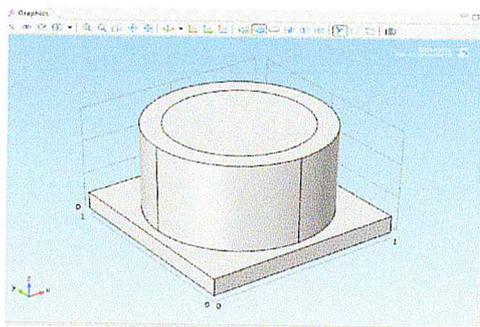


Figure3.5 : Géométrie de la structure.

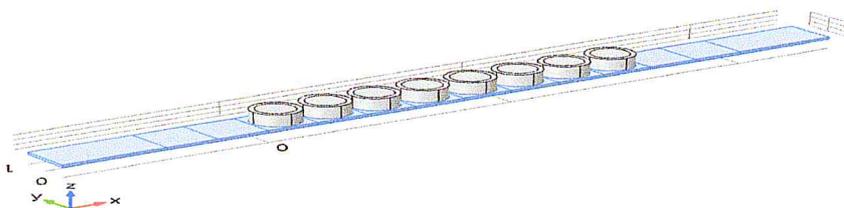
b. Matériaux constituant la structure :

Les paramètres physiques des matériaux, tel que le module de Young, la densité volumique, la permittivité diélectrique, le tenseur d'élasticité et la masse volumique le tenseur piézoélectrique , sont des caractéristiques propres à chaque matériau. Dans cette structure PC on a défini { Béton. Acier. Rubber. Pvc. Plomb. Silicon} .

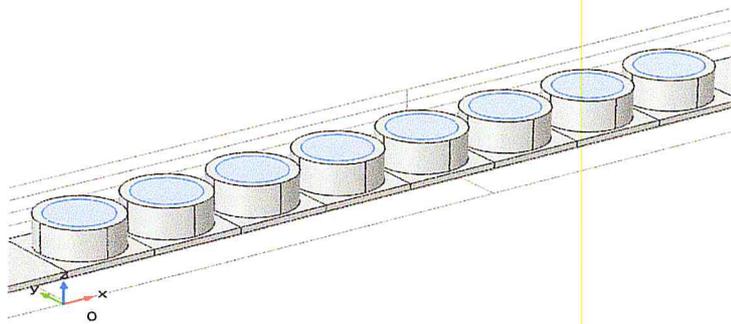
Béton:

Material parameters

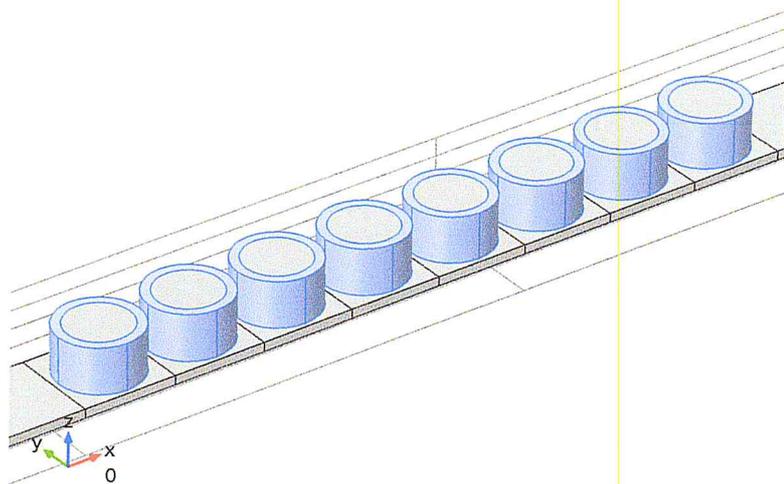
Name	Value	Unit
Density	2400[kg/m ³]	kg/m ³
Young's modulus	30e9[Pa]	Pa
Poisson's ratio	0.30	1



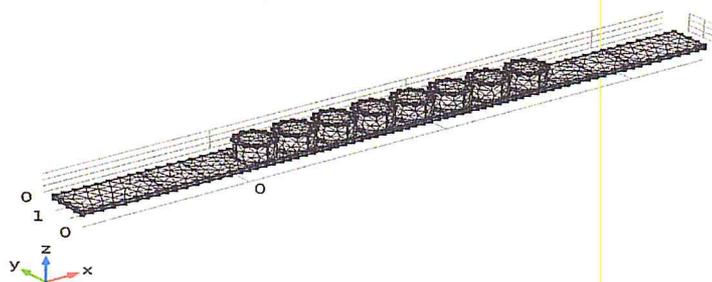
Acier/Plomb



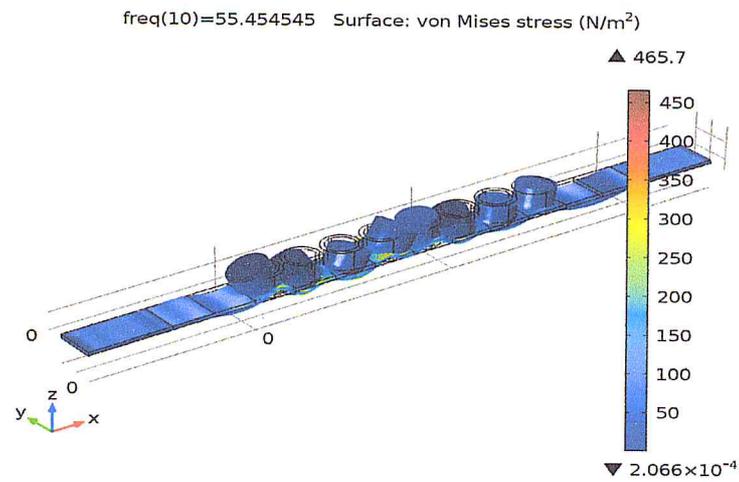
PVC/Silicon/Rubber :



Maillage:



Simulation:



Le graphe :

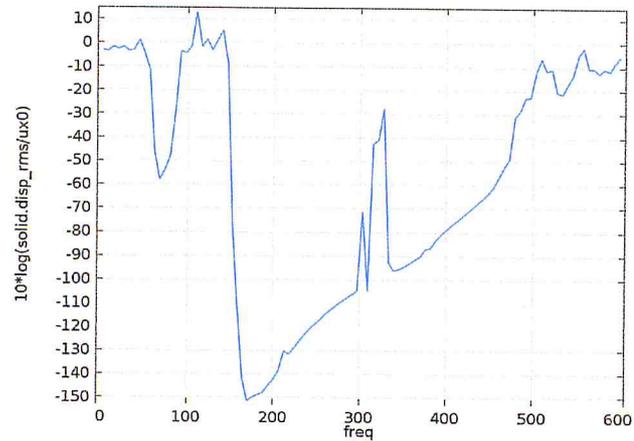


Figure 3.7 : Courbe de transmission d'un guide phononique.

3.3.2 Résultats de simulation des courbes dispersion de cristal phononique à un seul résonateur :

Le modèle de notre structure de base est un massif en béton de section carrée dont l'épaisseur "t" (figure 3.3) [17]. Ce massif est incrusté par des colonnes (piliers) de sections circulaires formées de deux matériaux différents. Les cylindres intérieurs sont en acier puis par le plomb; ils sont entourés par une couche de pvc comme l'illustre la figure 5. Le massif représentant la cellule de base est carré de dimension "a" égale à 1 mètre; les colonnes en acier et en pvc ont respectivement des rayons relatifs r_1 et r_2 et des hauteurs relatives respectives h_1/a et h_2/a (figure 3.3). En deuxième étape on remplace le pvc par le caoutchouc (rubber) et du silicone [17].

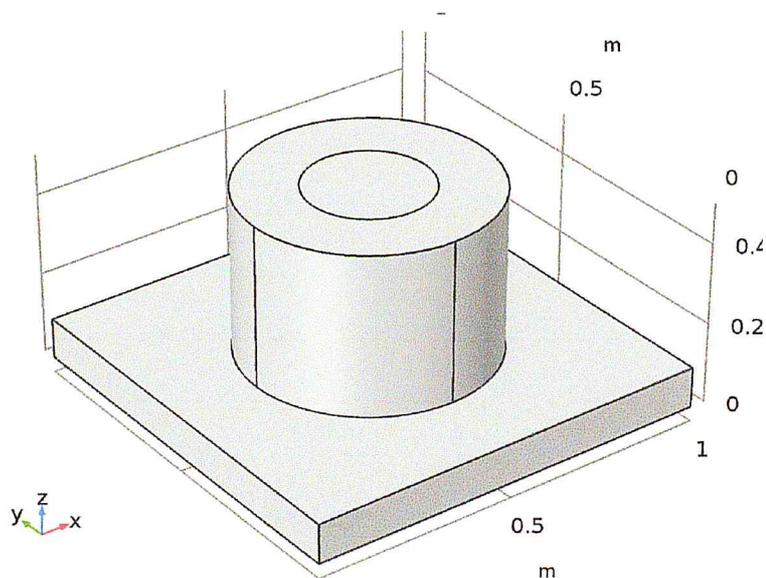


Figure 3.6 : Model de base pvc acier béton.

Tableau représentant les différents matériaux utilisés.

Cas 1	Mat1	pvc	Steel	Béton
Cas 2	Mat 2	Rubber	Steel	Béton
Cas 3	Mat 3	Silicon	Steel	Béton
Cas 4	Mat 4	pvc	plomb	Béton

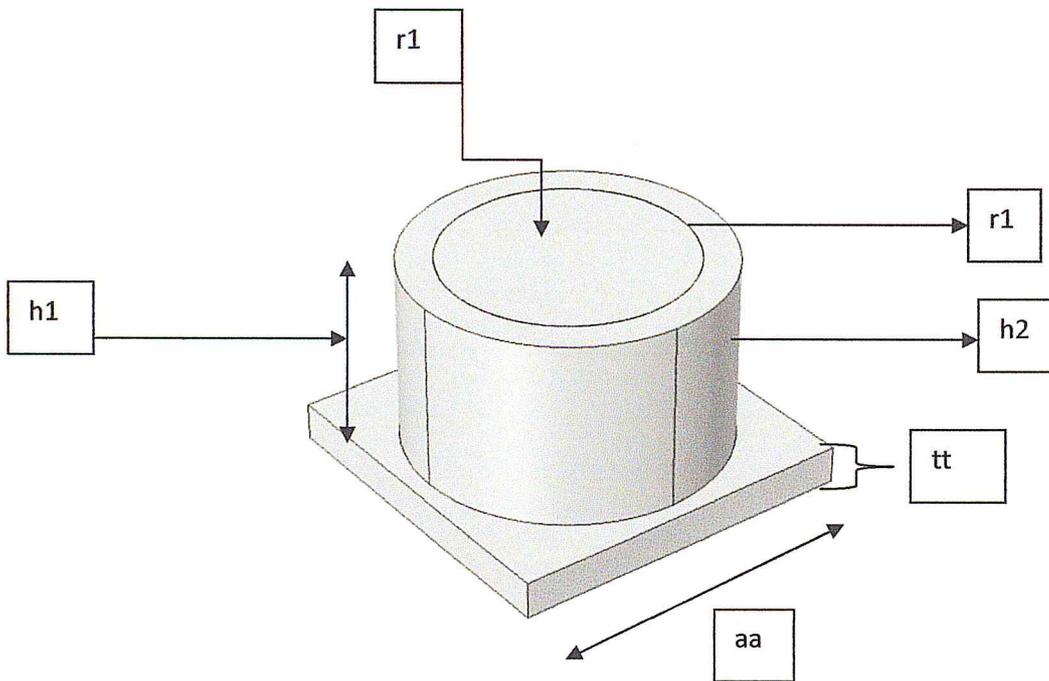


Figure 3.7 : Massif en béton

a. Structure Cas 1:

L'ensemble des matériaux utilisés dans ce premier cas est donné dans le tableau suivant :

MATERIAL	E(G[Pa])	ν	Masse volumique ρ (Kg/m ³)
BETON	30	0.3	2400
ACIER	209	0.3	7870
PVC	0.35	0.3	1400

Les courbes de dispersion dans les trois direction Γ -X, M- Γ et X-M sont respectivement données dans les figures 3.8, 3.9 et 3.10. Nous avons joint afin d'illustrer les modes de vibration, des figures de déplacements.

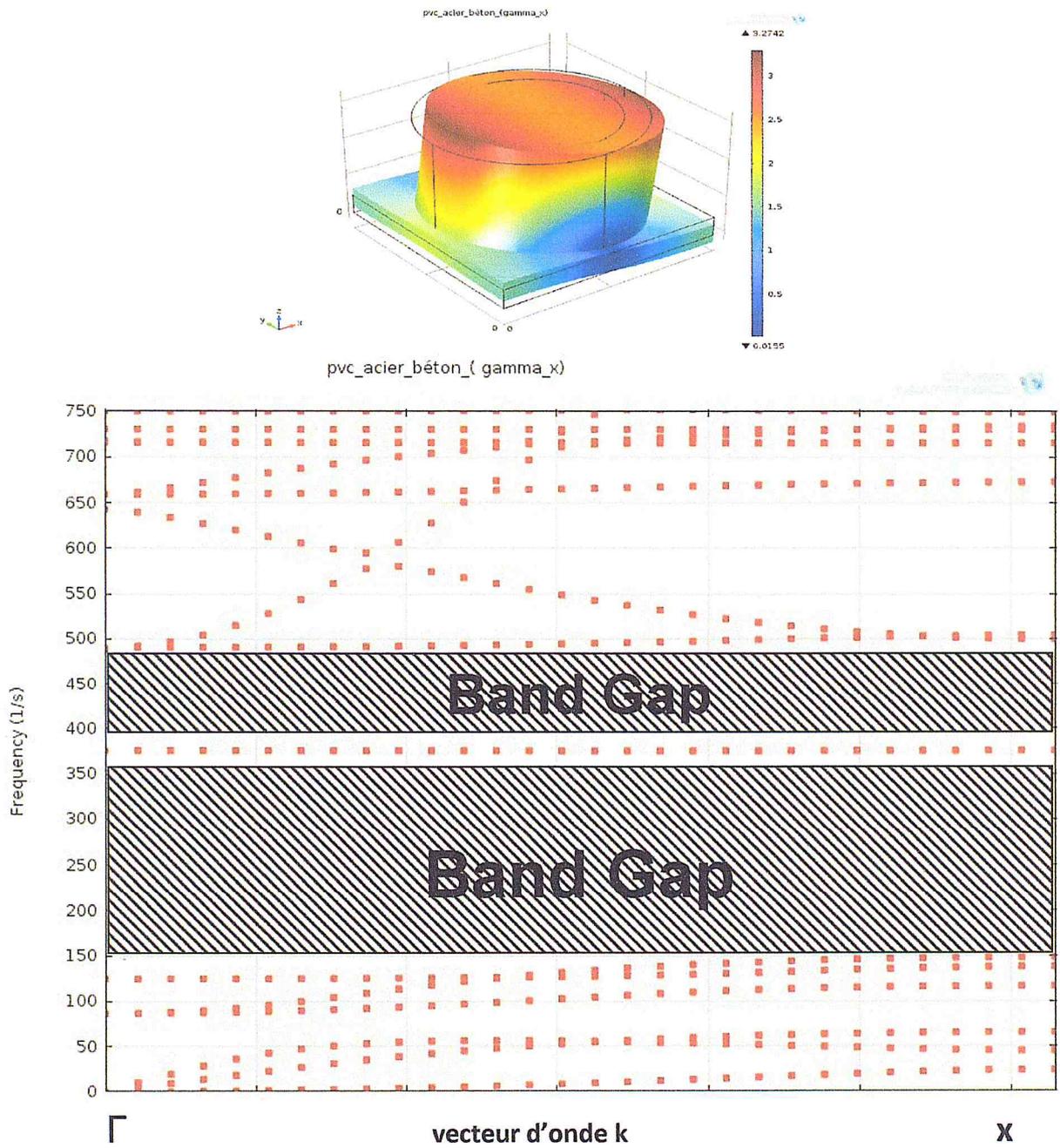


Figure 3.8 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc, acier ; béton).(Γ_x).

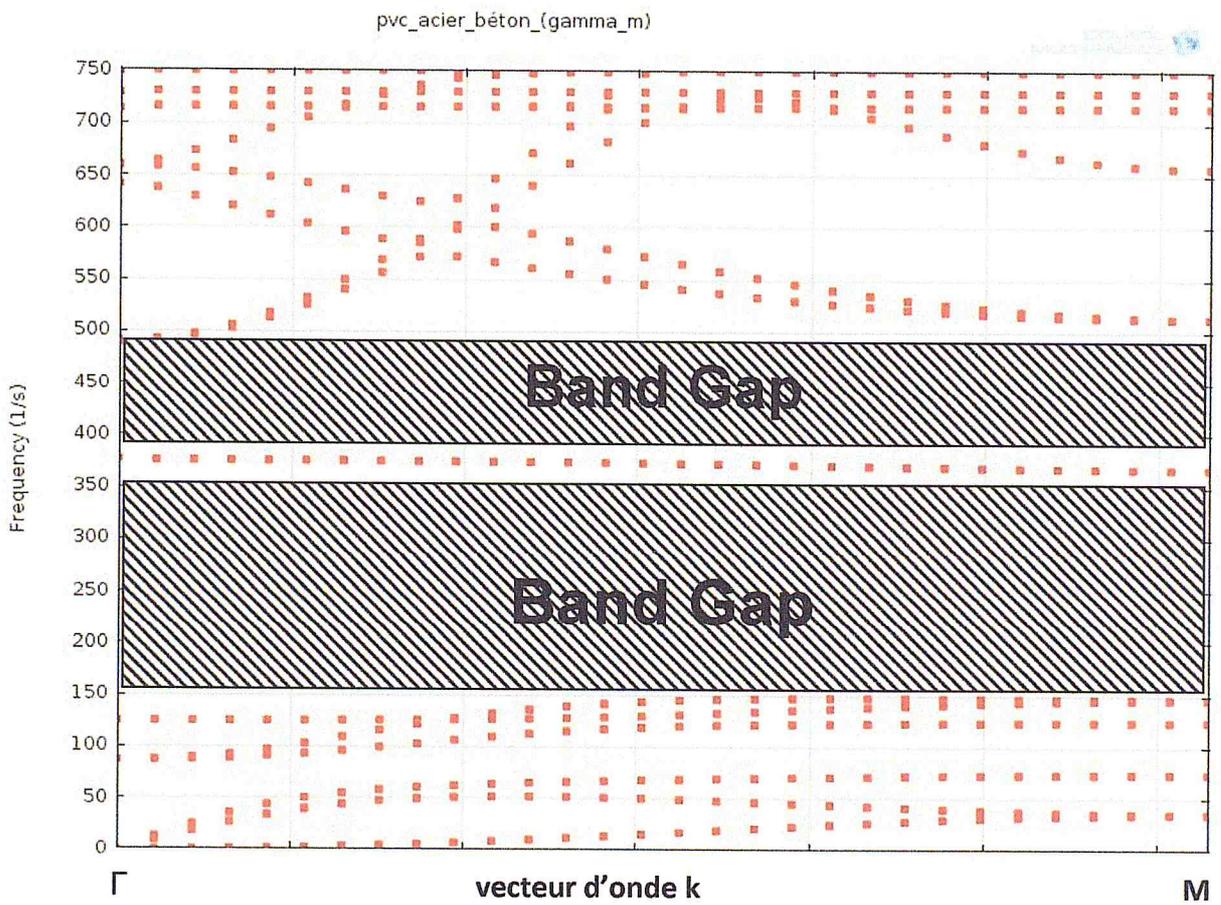
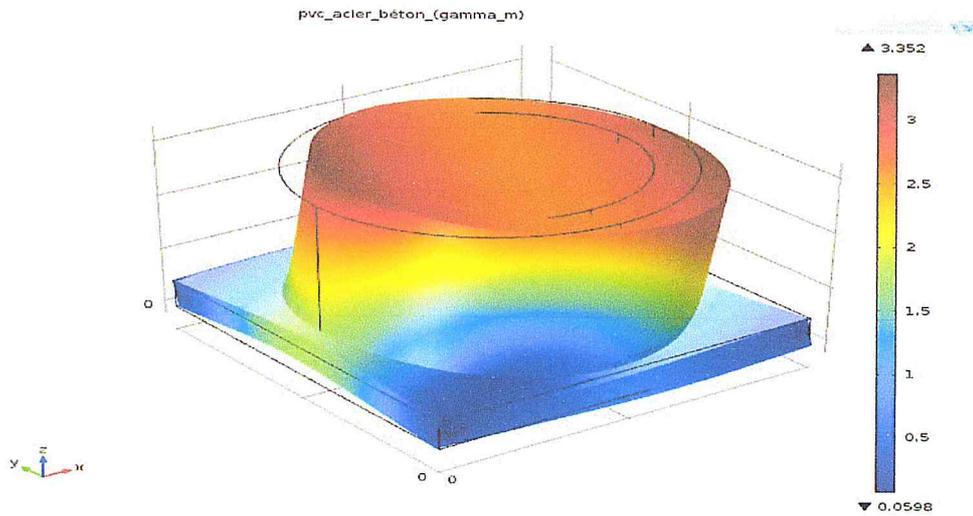


Figure 3.9 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc, acier ; béton).(Γ _M).

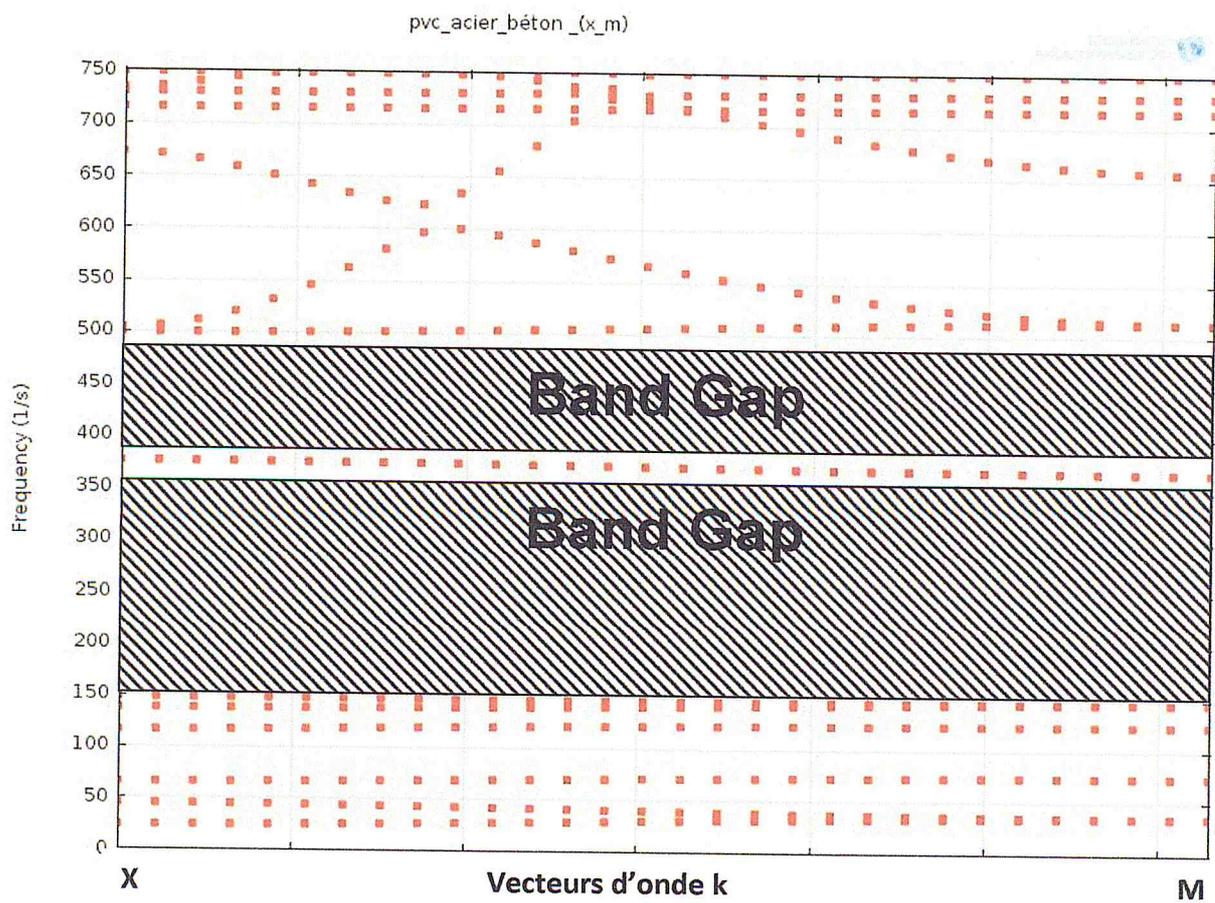
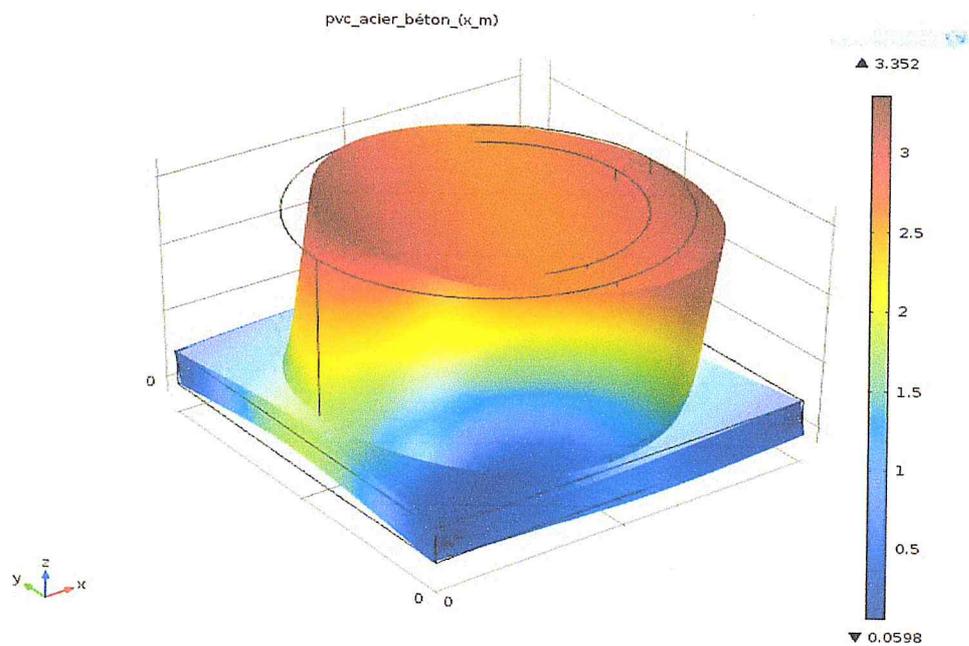


Figure 3.10 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc, acier ; béton).(x_M).

Il existe un band gap pour les trois directions entre 150-350 m/s avec un mode parasite persistant.

b. Structure Cas 2:

L'ensemble des matériaux utilisés dans ce deuxième cas est donné dans le tableau suivant :

MATERIAL	E(G[Pa])	ν	Masse volumique ρ (Kg/m ³)
BETON	30	0.3	2400
ACIER	209	0.3	7870
RUBBER	0.1	0.45	950

Les courbes de dispersion dans les trois direction Γ -X, M- Γ et X-M sont respectivement données dans les figures 3.11, 3.12 et 3.13. Nous avons joint afin d'illustrer les modes de vibration, des figures de déplacements.

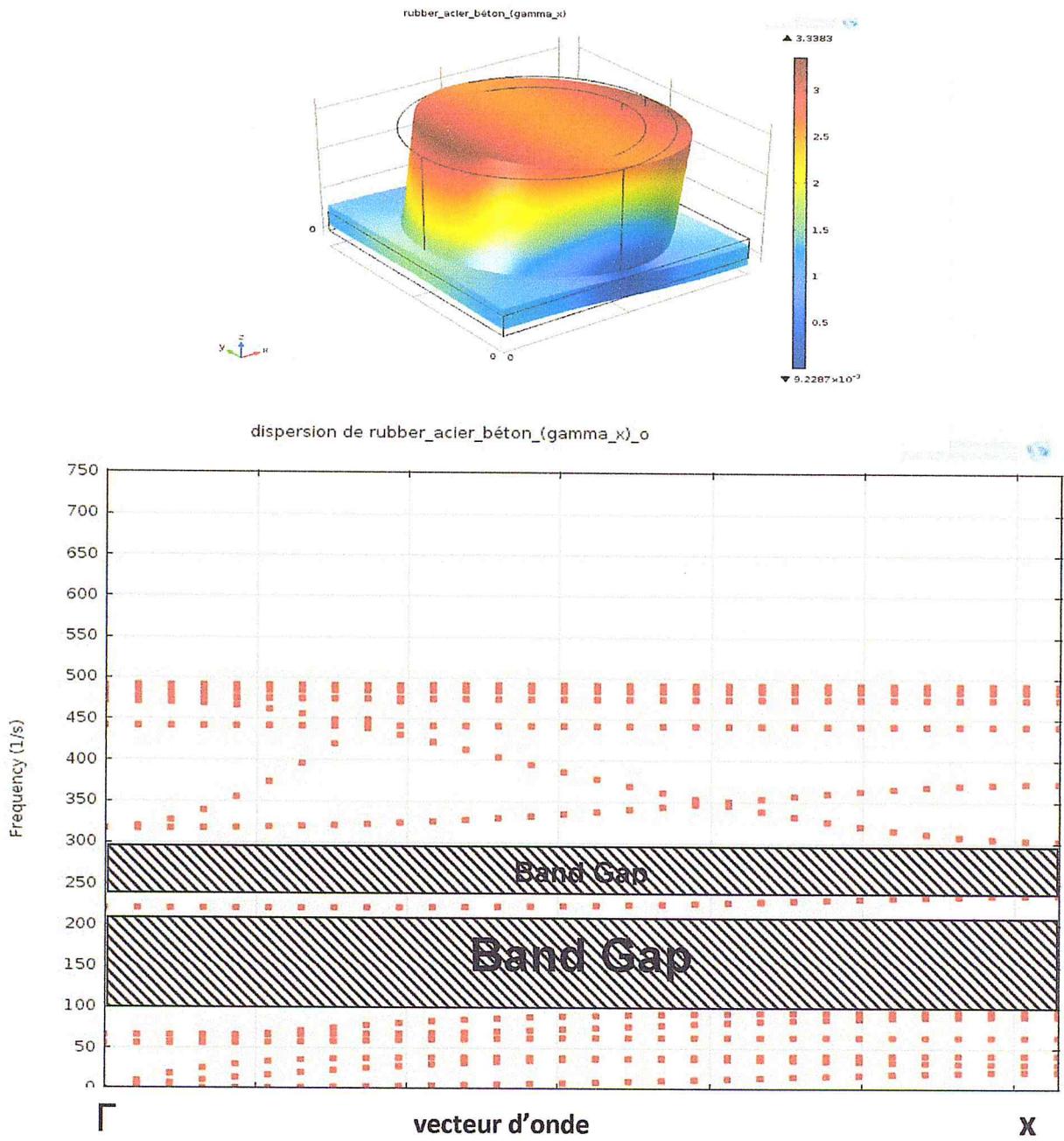


Figure 3.11 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (Rubber, acier ; béton). (Γ_x).

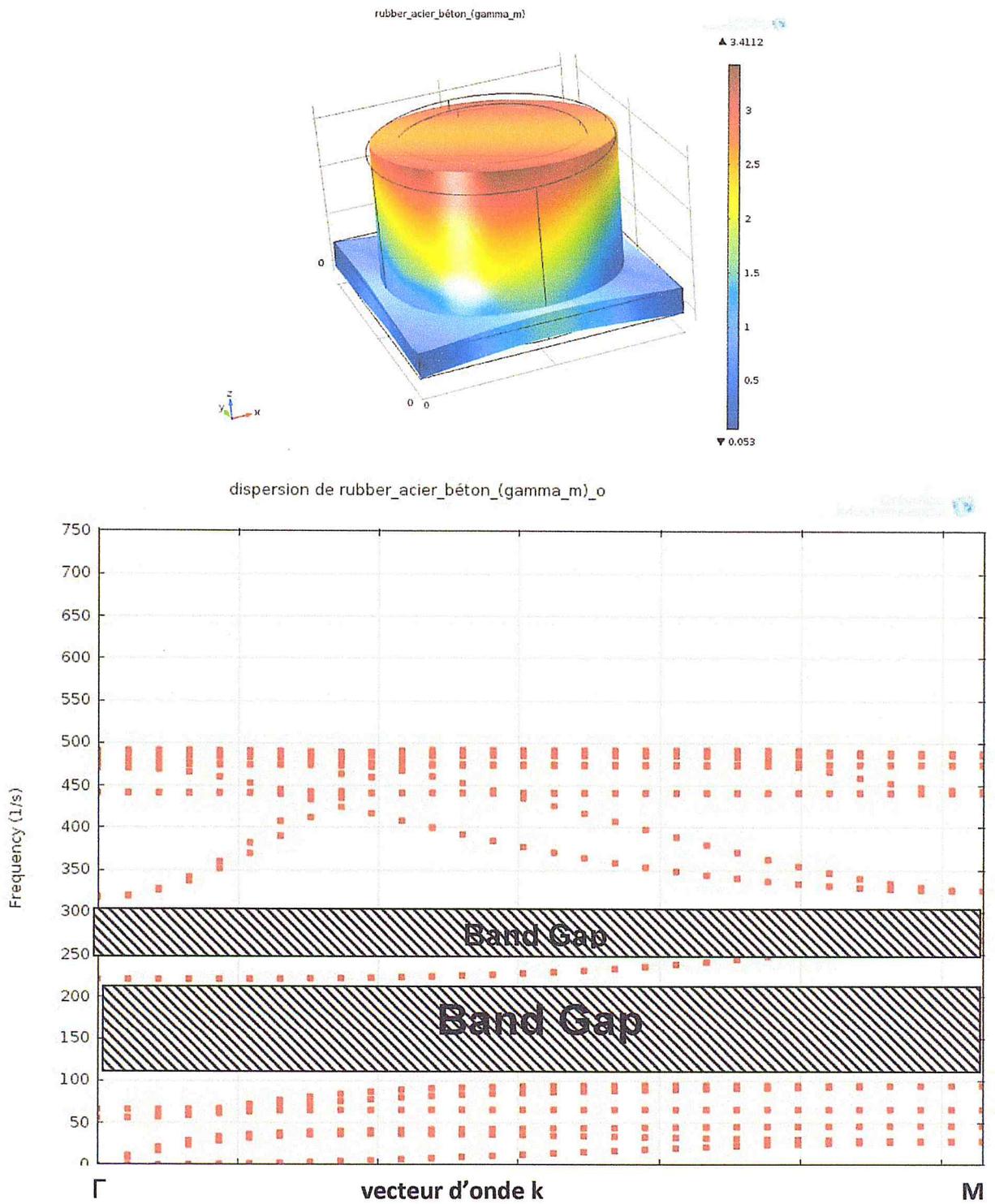


Figure 3.12 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (Rubber, acier ; béton) (Γ _M).

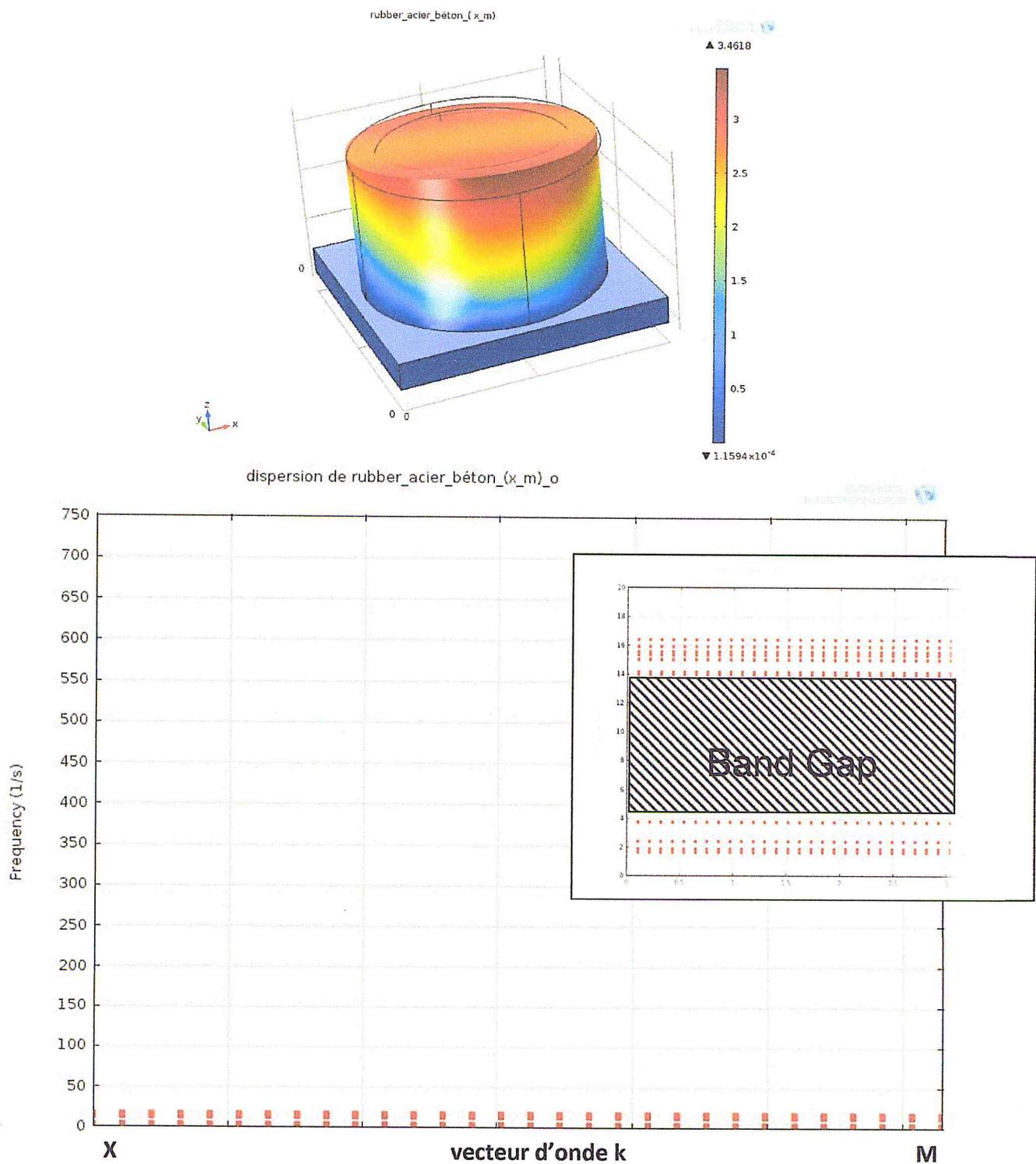


Figure 3.13 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (Rubber, acier ; béton), (x_M)

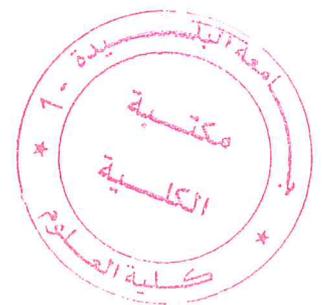
Il existe un band gap pour les trois directions entre 100-200 m/s avec un mode parasite persistant.

c. Structure Cas 3:

L'ensemble des matériaux utilisés dans ce deuxième cas est donné dans le tableau suivant :

MATERIAL	E(G[Pa])	ν	Densité ρ (Kg/m ³)
Béton	30	0.3	2400
Acier	209	0.3	7870
Gomme silicone	0.00013	0.463	1300

Les courbes de dispersion dans les trois directions Γ -X, M- Γ et X-M sont respectivement données dans les figures 3.14, 3.15 et 3.16. Nous avons joint afin d'illustrer les modes de vibration, des figures de déplacements.



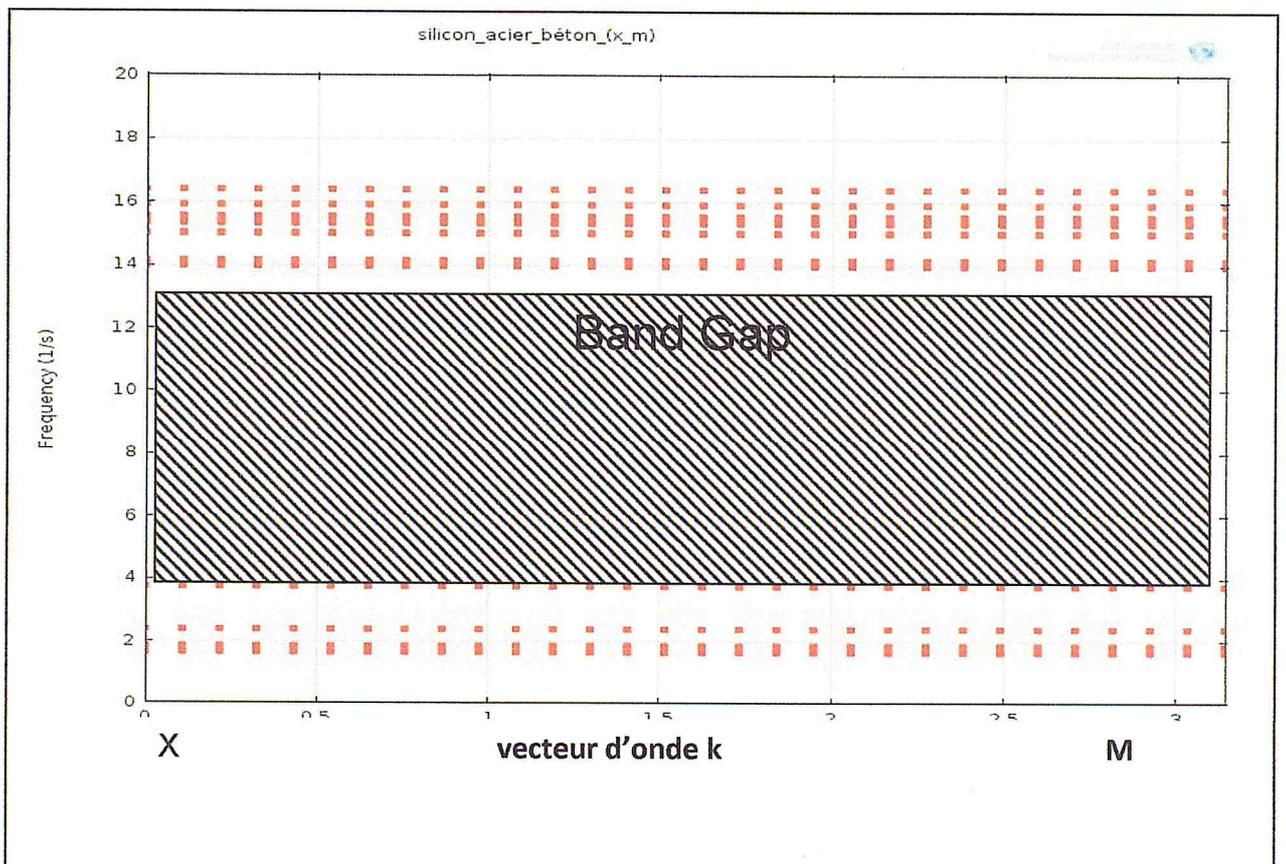
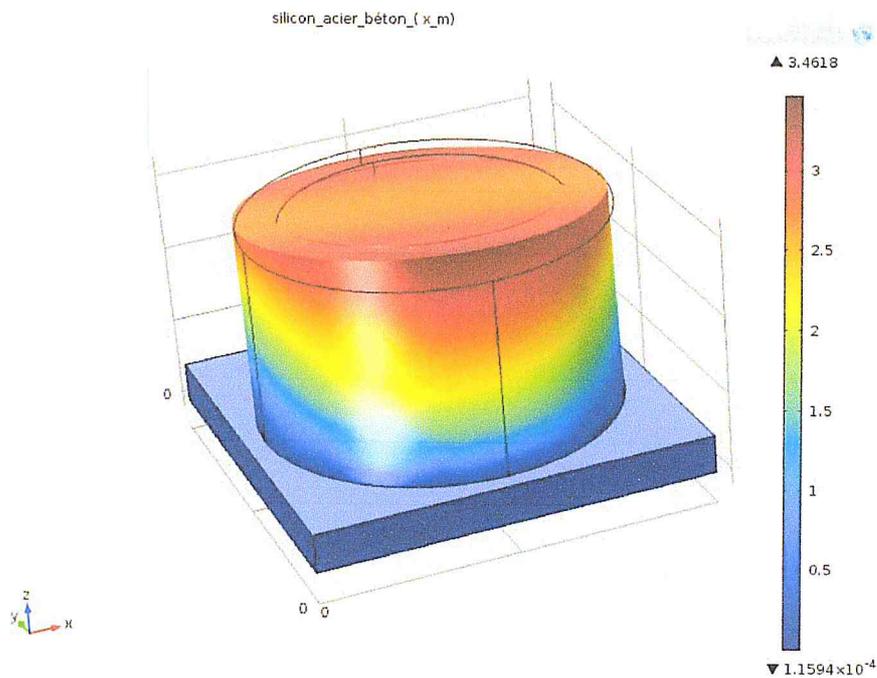


Figure 3.15 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (silicon, acier ; béton), (X_M).

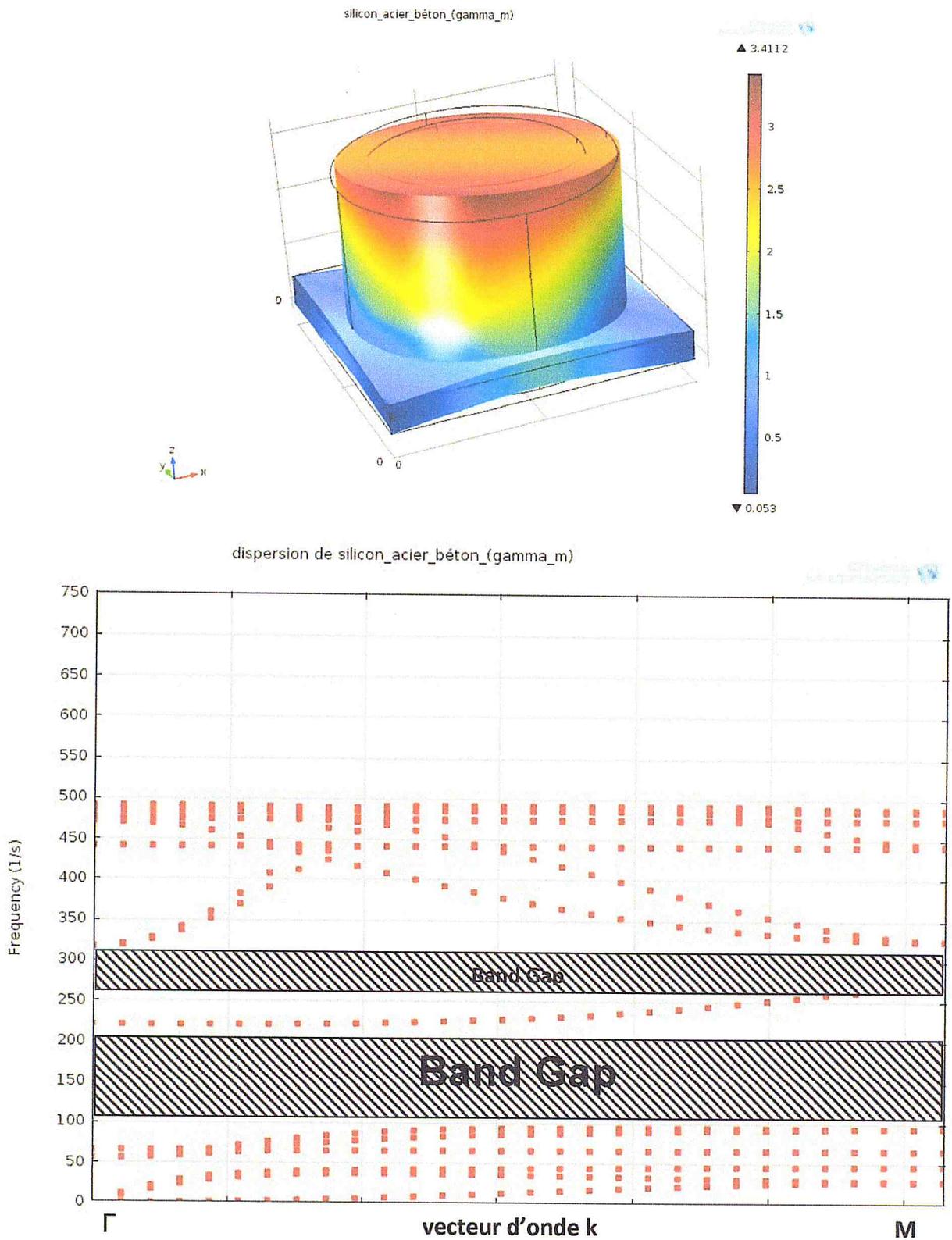


Figure 3.16 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (silicon, acier ; béton), (Γ _M).

Il existe un band gap pour les trois directions entre 4-9 m/s pour γ_x et x_m et de 250_300 pour γ_m avec un mode parasite persistant.

d. Structure Cas 4:

L'ensemble des matériaux utilisés dans ce deuxième cas est donné dans le tableau suivant :

MATERIAL	E(G[Pa])	ν	Masse volumique ρ (Kg/m³)
BETON	30	0.3	2400
ACIER	209	0.3	7870
PLOMB	16.7	0.44	11350

Les courbes de dispersion dans les trois directions Γ -X, M- Γ et X-M sont respectivement données dans les figures 3.17, 3.18 et 3.19. Nous avons joint afin d'illustrer les modes de vibration, des figures de déplacements.

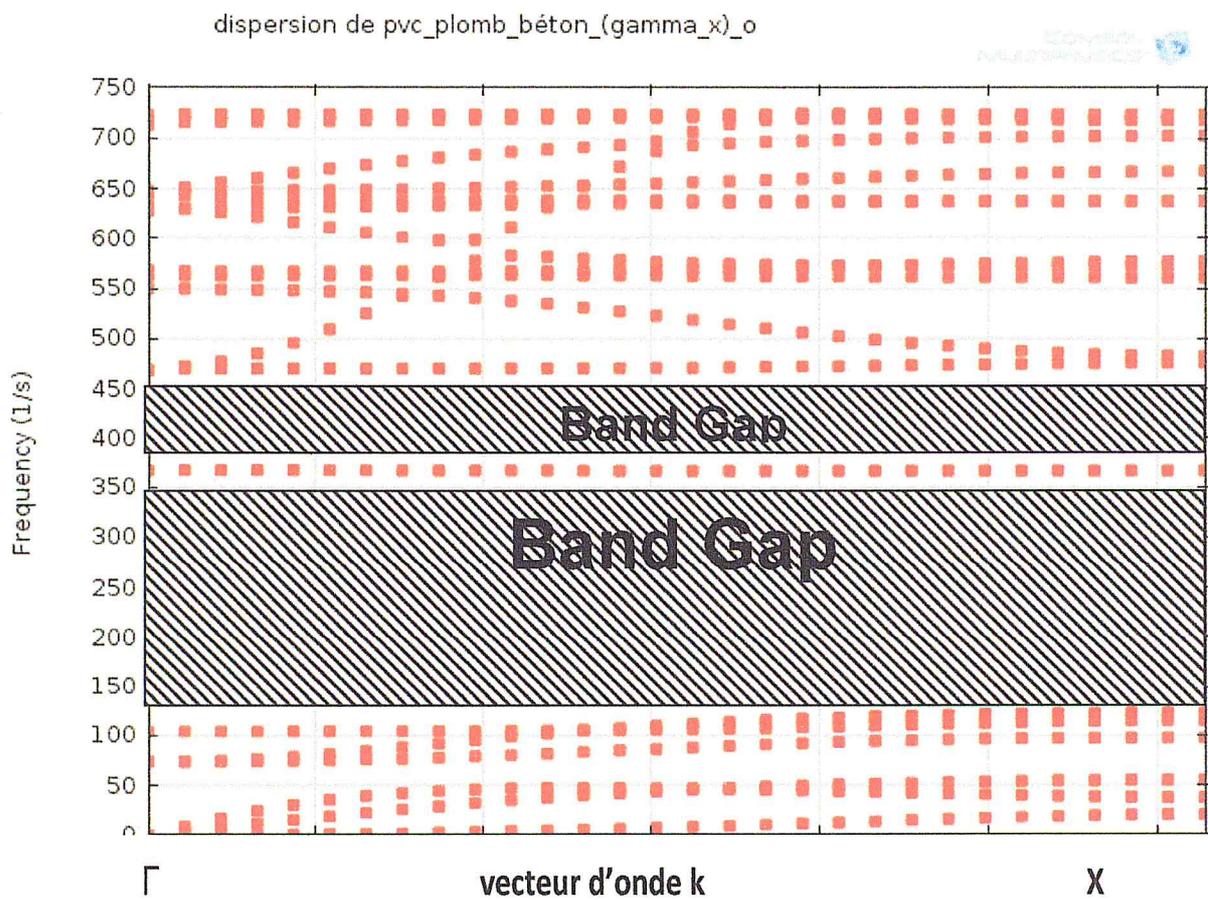
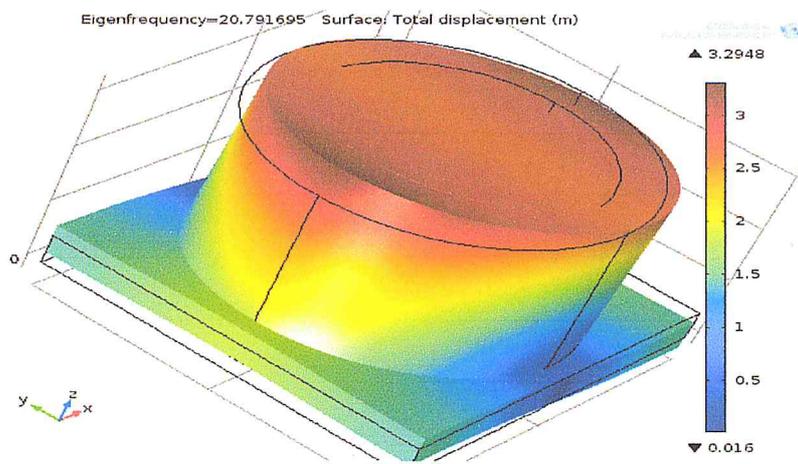


Figure 3.17 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc, plomb ; béton), (Γ_x).

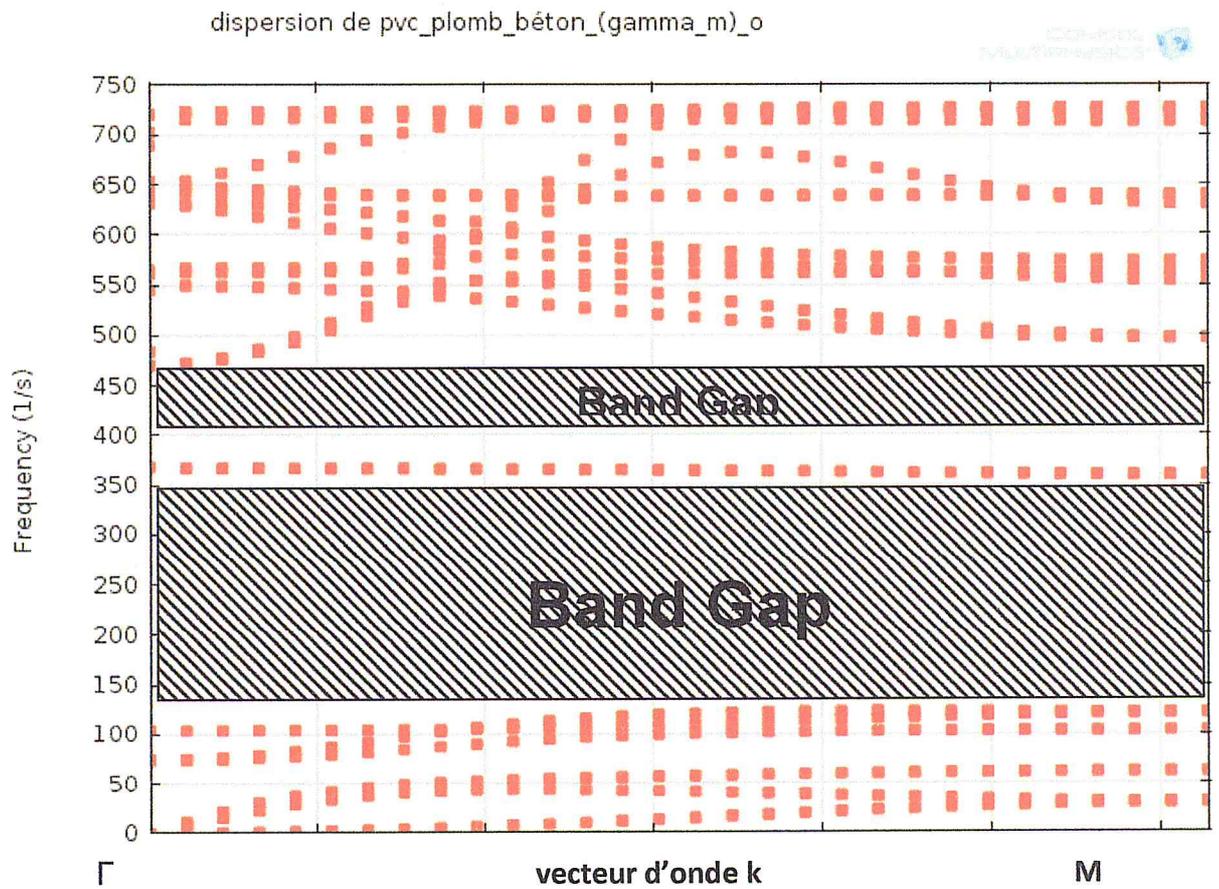
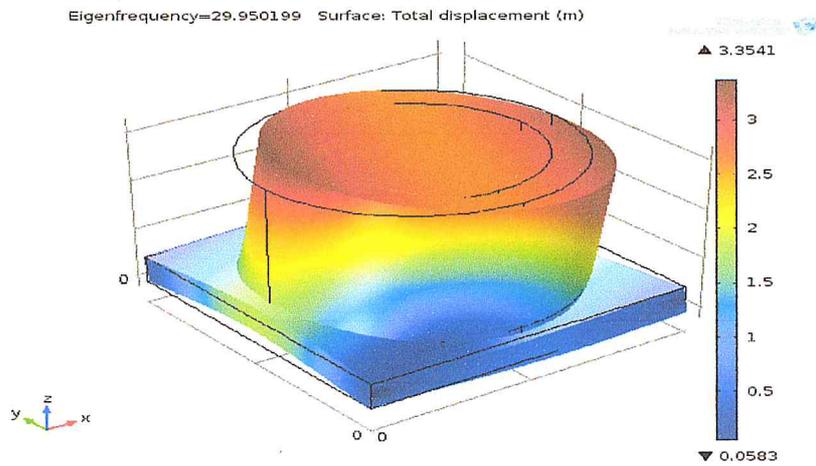


Figure3.18 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc, plomb ,béton),(Γ _m).

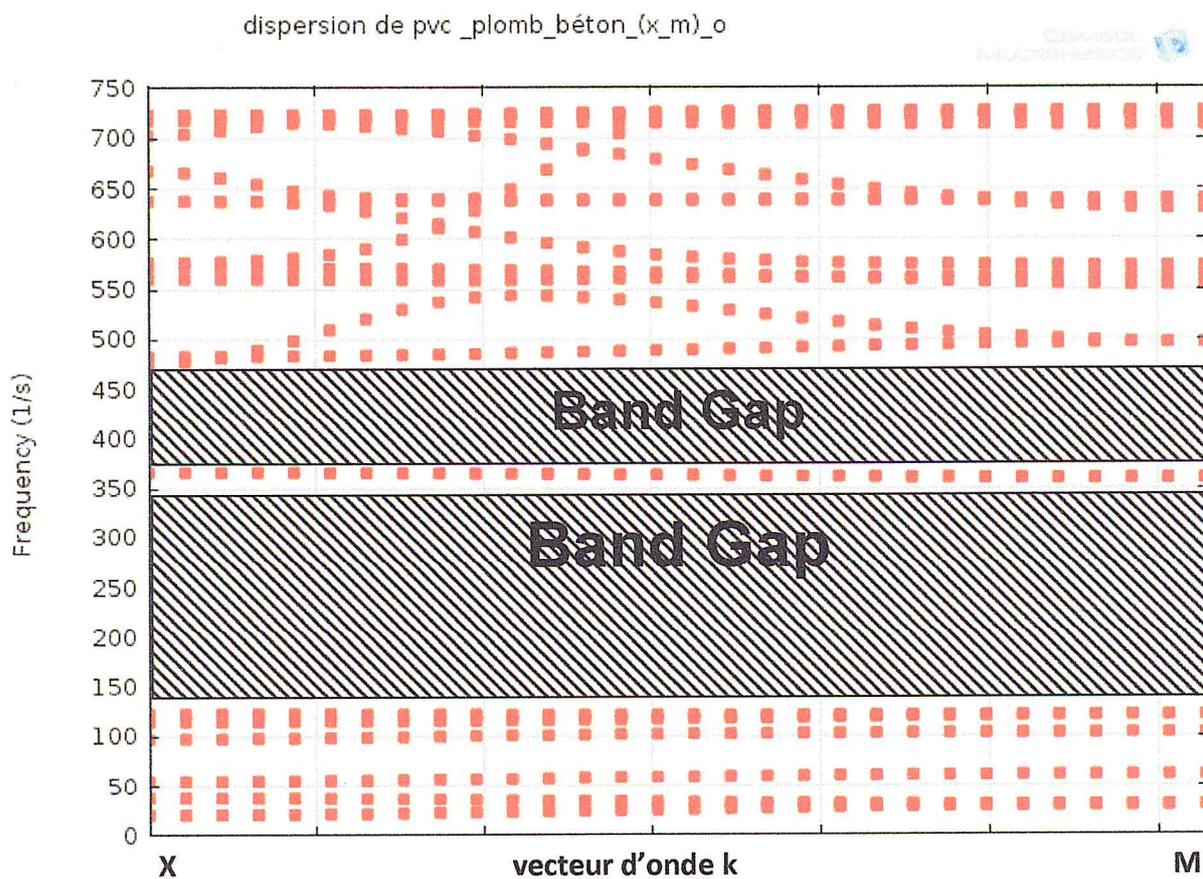
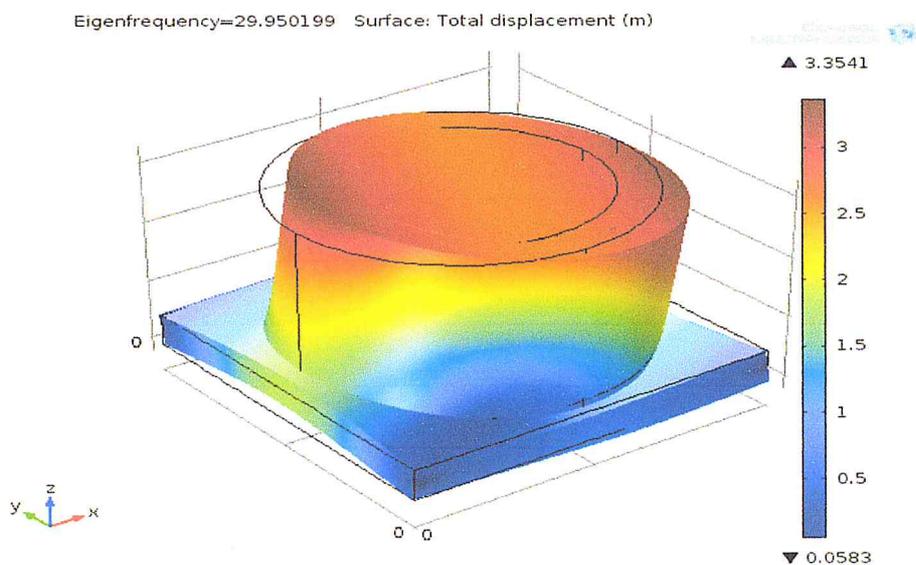


Figure3.19 : Courbe de dispersion des fréquences en fonction d'un vecteur d'onde (pvc, plomb; béton), (x_M).

Il existe un band gap pour les trois directions de 125_350 avec un mode parasite persistant.

L'étude de A. Amrane *et al* [17] montre les mêmes résultats que nous avons resimuler les figure (5.6.7) les courbes de dispersions des fréquences réduites $f.a$ (m/s) de propagation en fonction du vecteur d'onde réduit π/a (sans unité) dans la moitié de la première zone de Brillouin. Dans cette première phase de simulation le choix des matériaux s'est porté sur le couple acier-rubber ,acier-silicon ,acier-pvc pvc-plomb [17]. Le rayon relatif du pilier (ou colonne) en PVC r_1/a est de 0.45 et celui du cylindre en acier r_2/a est de 0.35. Nous avons choisie les même hauteurs relatives de ces deux colonnes encastrées h_1/a et h_2/a sont prises égales à 0.5 que le travail de A. Amrane *et al*[16]. Il est à noter l'absence de propagation d'onde dans une zone large de fréquences réduites située dans la gamme 125-225 m/s puis en deuxième gamme 225-325 m/s .

3.4 Résultats de simulation des spectres de transmission de cristal phononique à un seul résonateur simulation pour les matériaux cas à 2D :

Cette partie représente la partie originale de notre travail où nous avons concentré les résultats de simulations des spectres de transmission de structures phononiques Tableau suivant précédemment étudiées dans le paragraphe précédent [16].

Tableau: Type de matériaux simulés.

Mat1	Mat2	Mat3	Mat4
Pvc acier béton	Rubber acier béton	Silicon acier béton	Pvc plomb beton

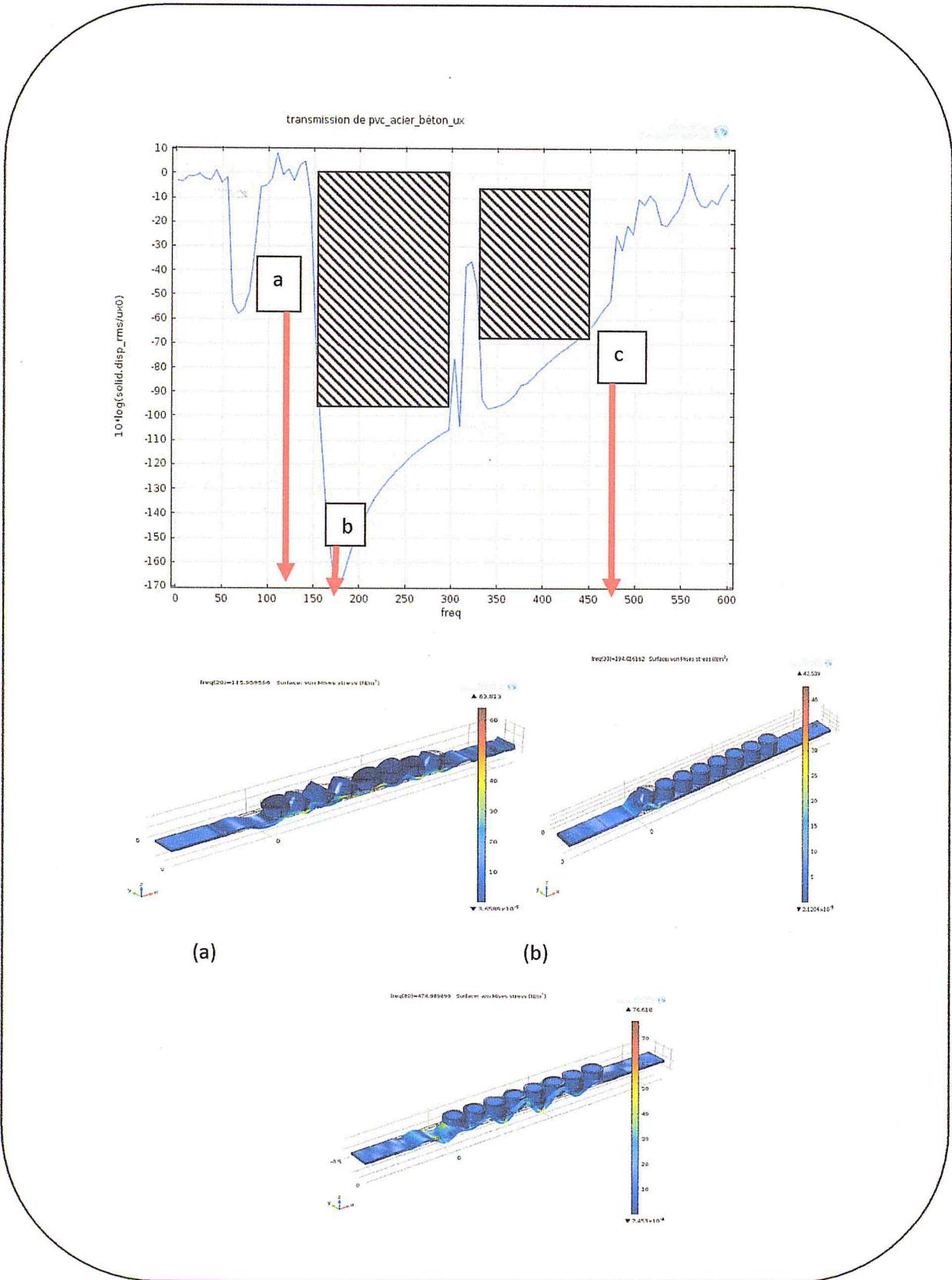


Figure 3.20 : Courbe de transmission pour matériaux pvc_acier_béton (Mat1) suivant direction U_{x0} . Les déformée de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.20 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat1 (PVC-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction U_{x0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.7 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 150-350 m/s et 400-475 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 194.61 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

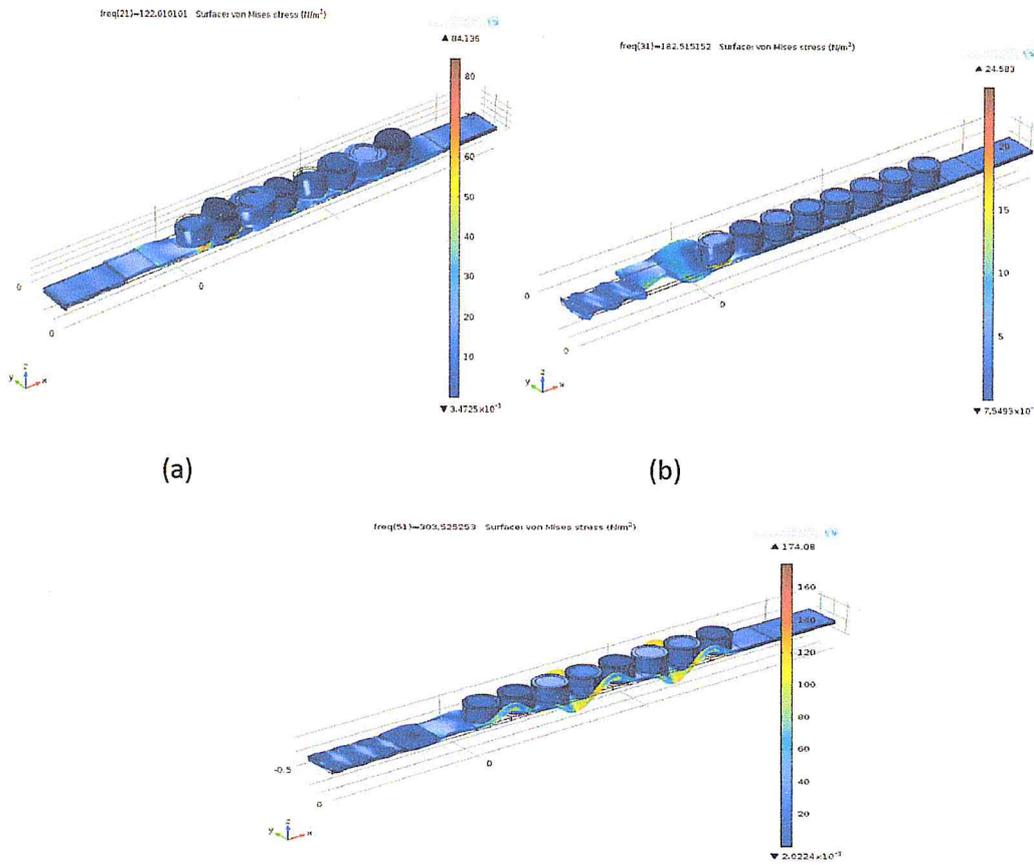
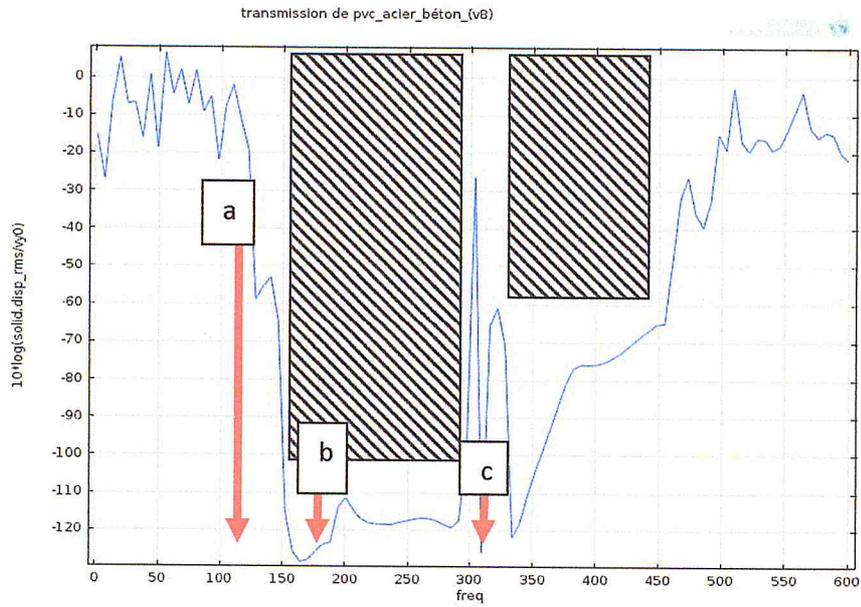


Figure 3.21 : Courbe de transmission pour matériaux pvc_acier_béton suivant direction V_y Les déformée de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.21 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat1 (PVC-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction v_{y0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.11 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 150-350 m/s et 400-475 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 194.61 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

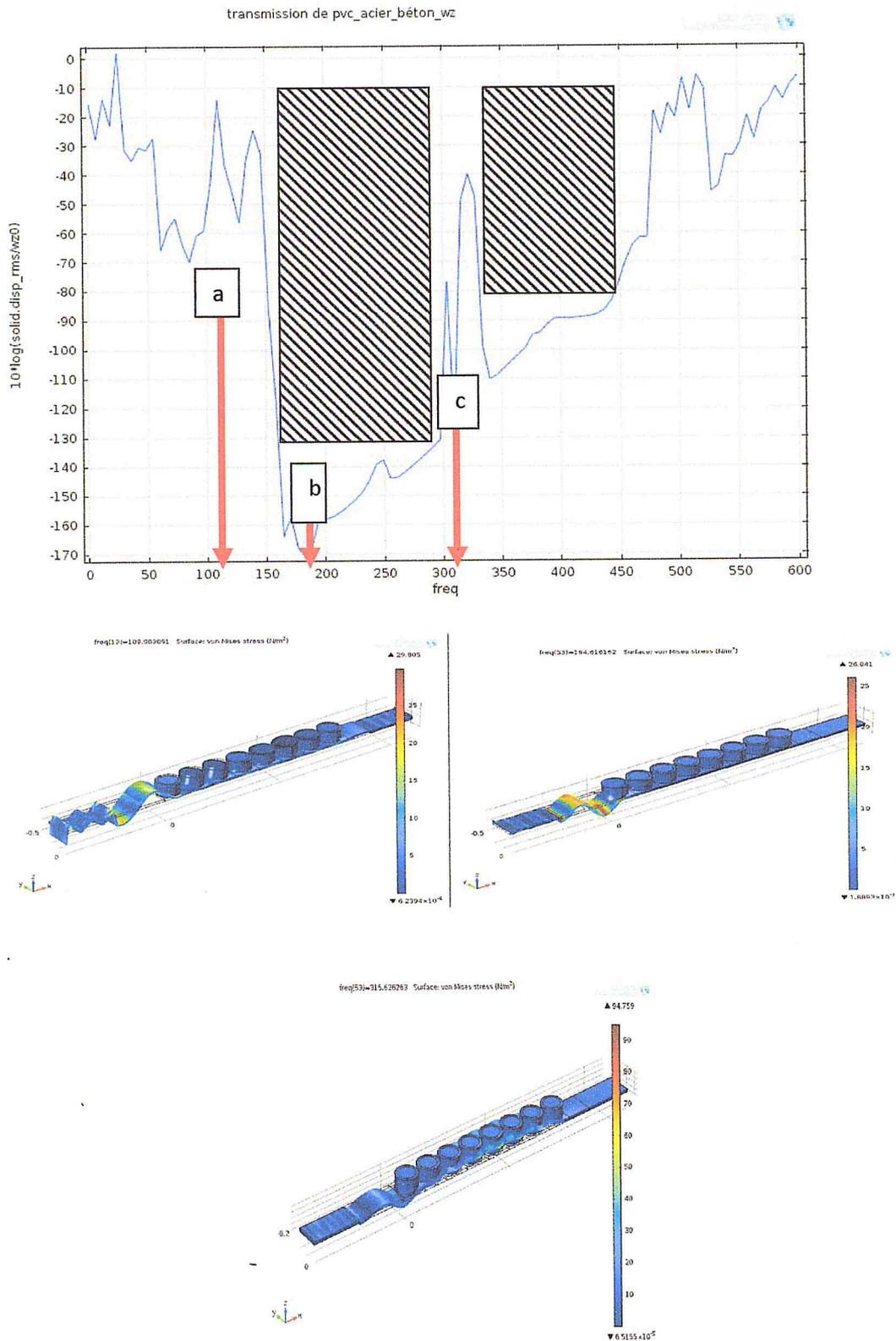
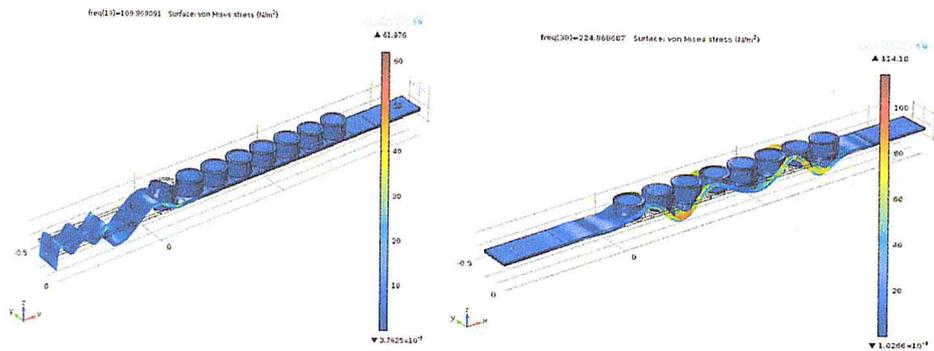
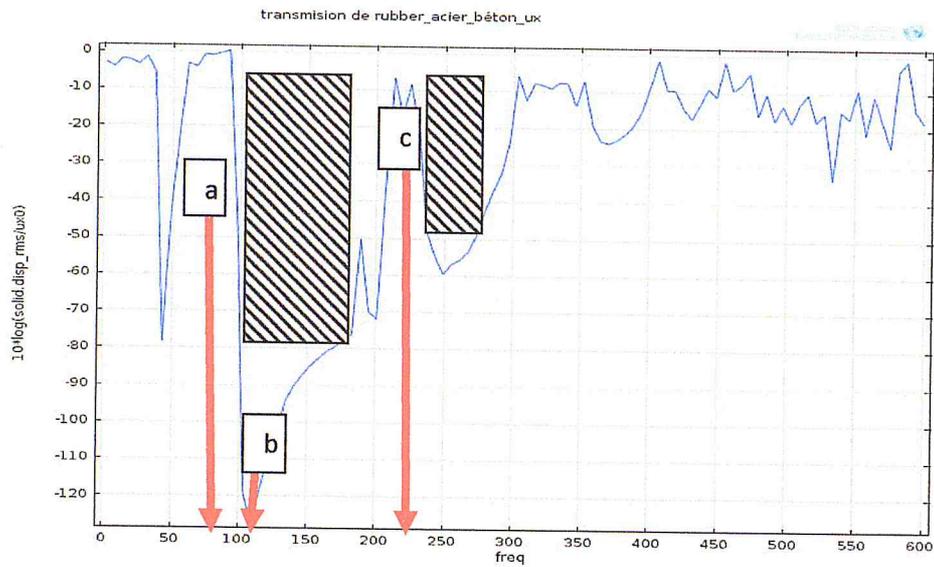


Figure 3.22 : Courbe de transmission pour matériaux pvc_acier_béton suivant direction Wz₀. Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.22 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat1 (PVC-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction w_{z0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.11 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 150-350 m/s et 400-475 m/s.

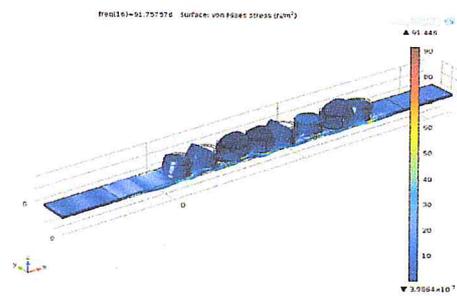
De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 194.61 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

Il est à noter que quelques soit la polarisation de la vibration d'excitation U_{x0} (Fig. 3.20), V_{y0} (Fig. 3.21) et W_{z0} (Fig. 3.22), les bandes interdites sont à peu de choses près identiques. Donc s'il ya atténuation, elle le sera pour toute les polarisations. Ce qui est en lui même très intéressants.



(b)

(a)



(c)

Figure 3.23 : Courbe de transmission pour matériaux Rubber_acier_béton suivant direction U_{x0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.23 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat2 (Rubber-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction U_{x0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.11 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 100-200 m/s et 250-300 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 224.88 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

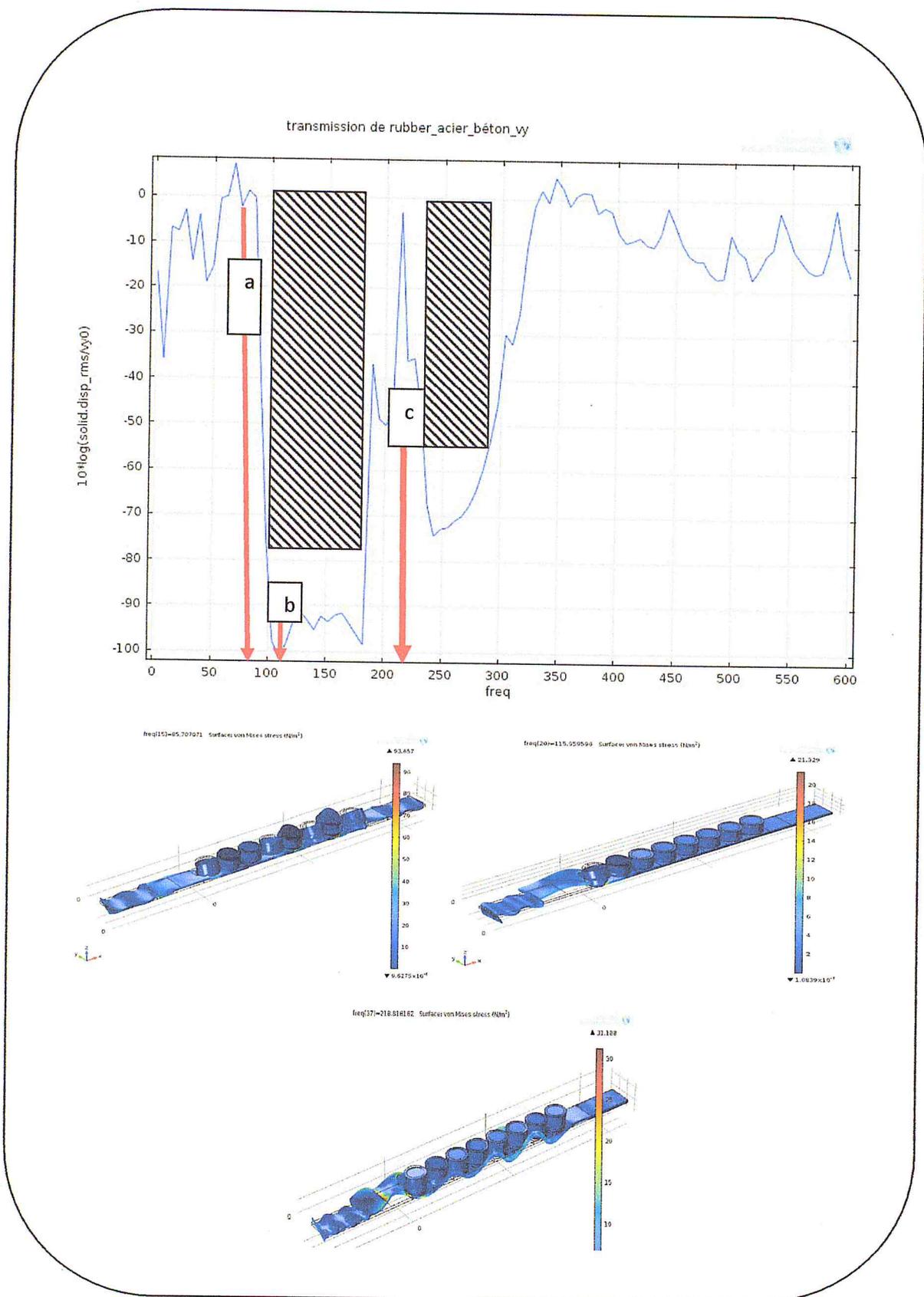


Figure3. 24 : Courbe de transmission pour matériaux Rubber_acier_béton suivant direction V_{y0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.24 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat2 (Rubber-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction V_{y0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.8 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 100-200 m/s et 250-500 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 115.61 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

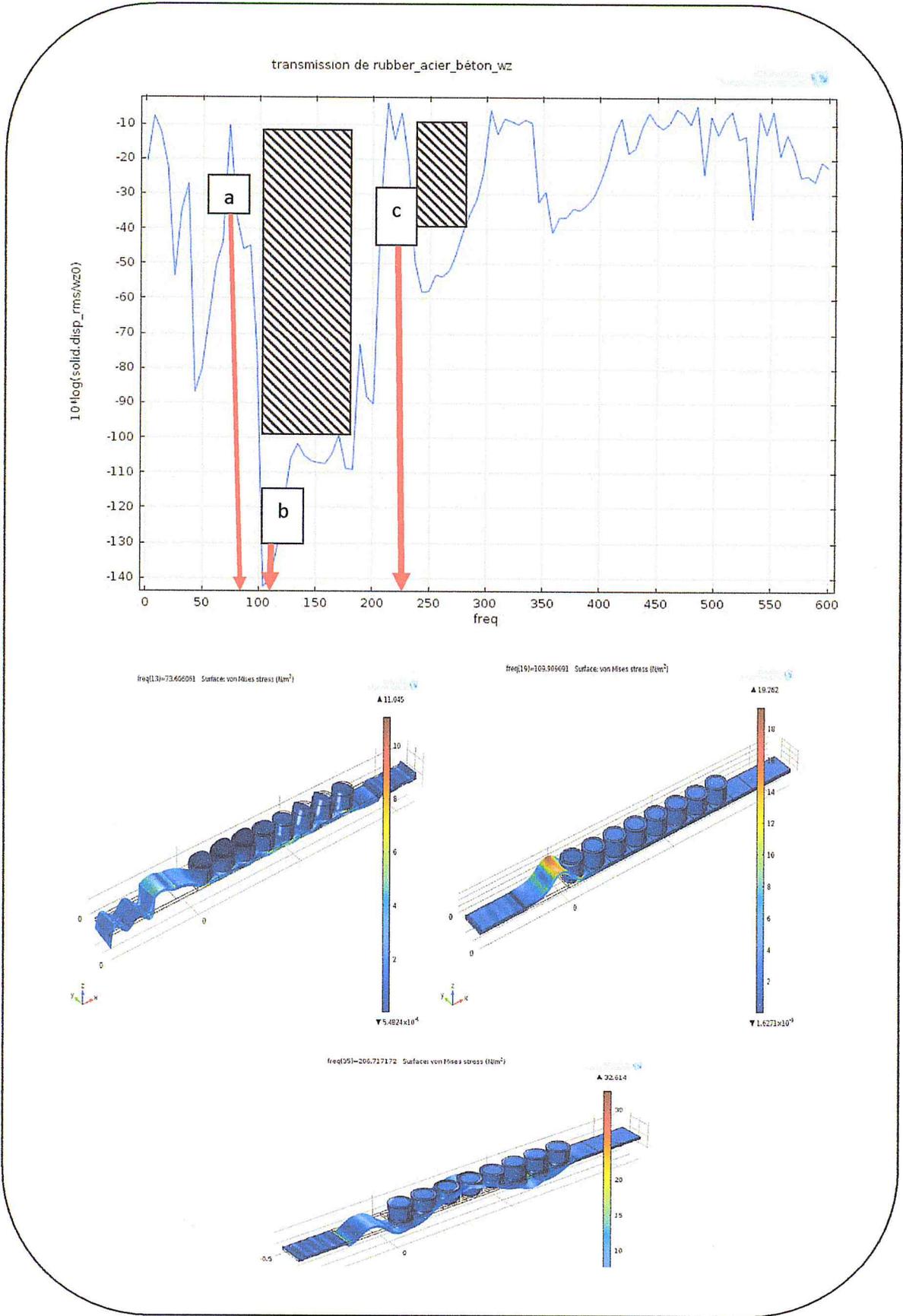


Figure 3.25 : Courbe de transmission pour matériaux Rubber_acier_béton suivant direction Wz_0 . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.25 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat2 (Rubber-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction W_{z0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.9 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 100-200 m/s et 250-300 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 109.90 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

Il est à noter que quelques soit la polarisation de la vibration d'excitation U_{x0} (Fig. 3.23), V_{y0} (Fig. 3.24) et W_{z0} (Fig. 3.25), les bandes interdites sont à peu de choses près identiques. Donc s'il ya atténuation, elle le sera pour toute les polarisations. Ce qui est en lui même très intéressants.

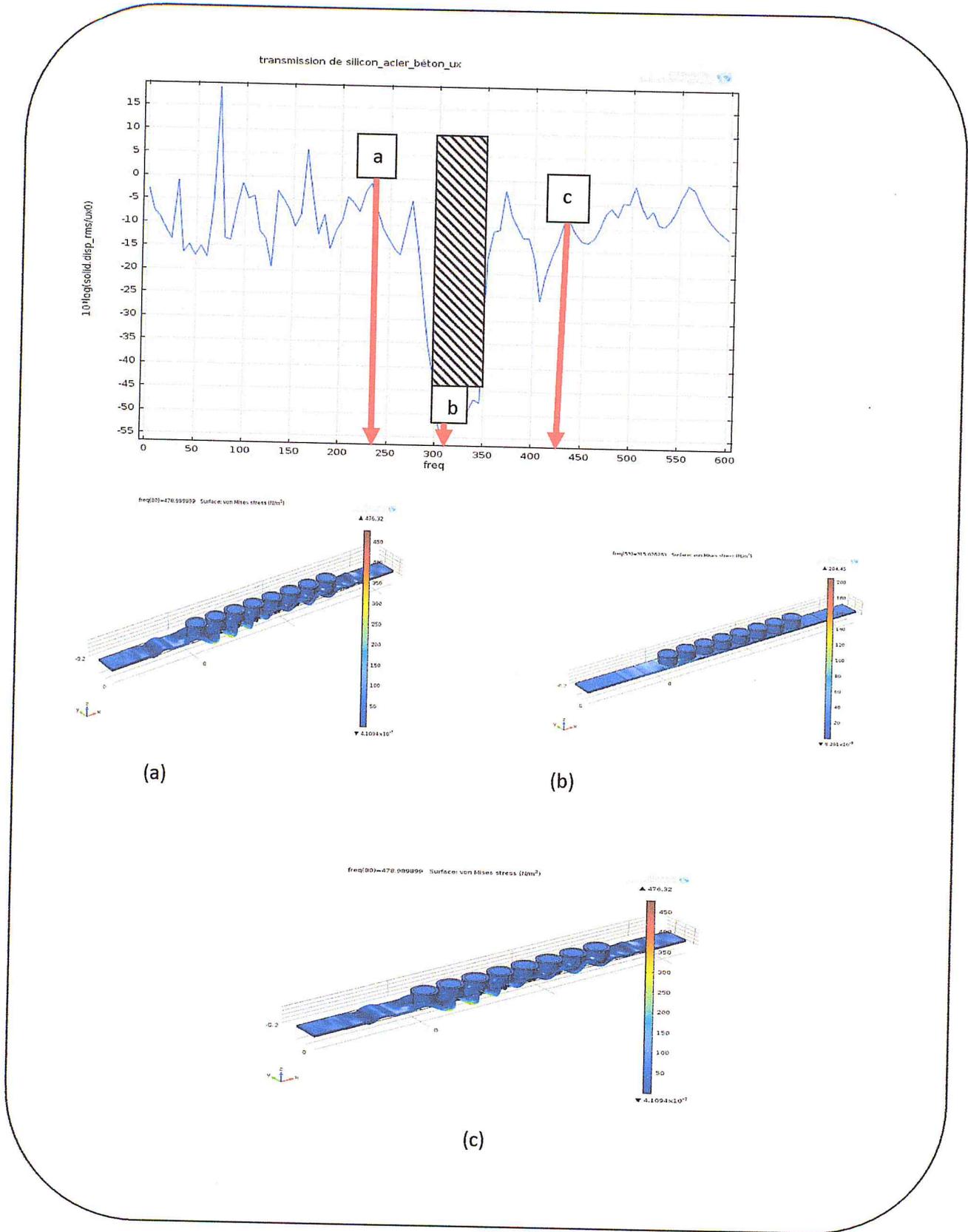


Figure 3.26: Courbe de transmission pour matériaux Silicon_acier_béton suivant direction U_{x0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.26 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat3 (Silicon-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction U_{x0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 300-350 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 1315.90 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

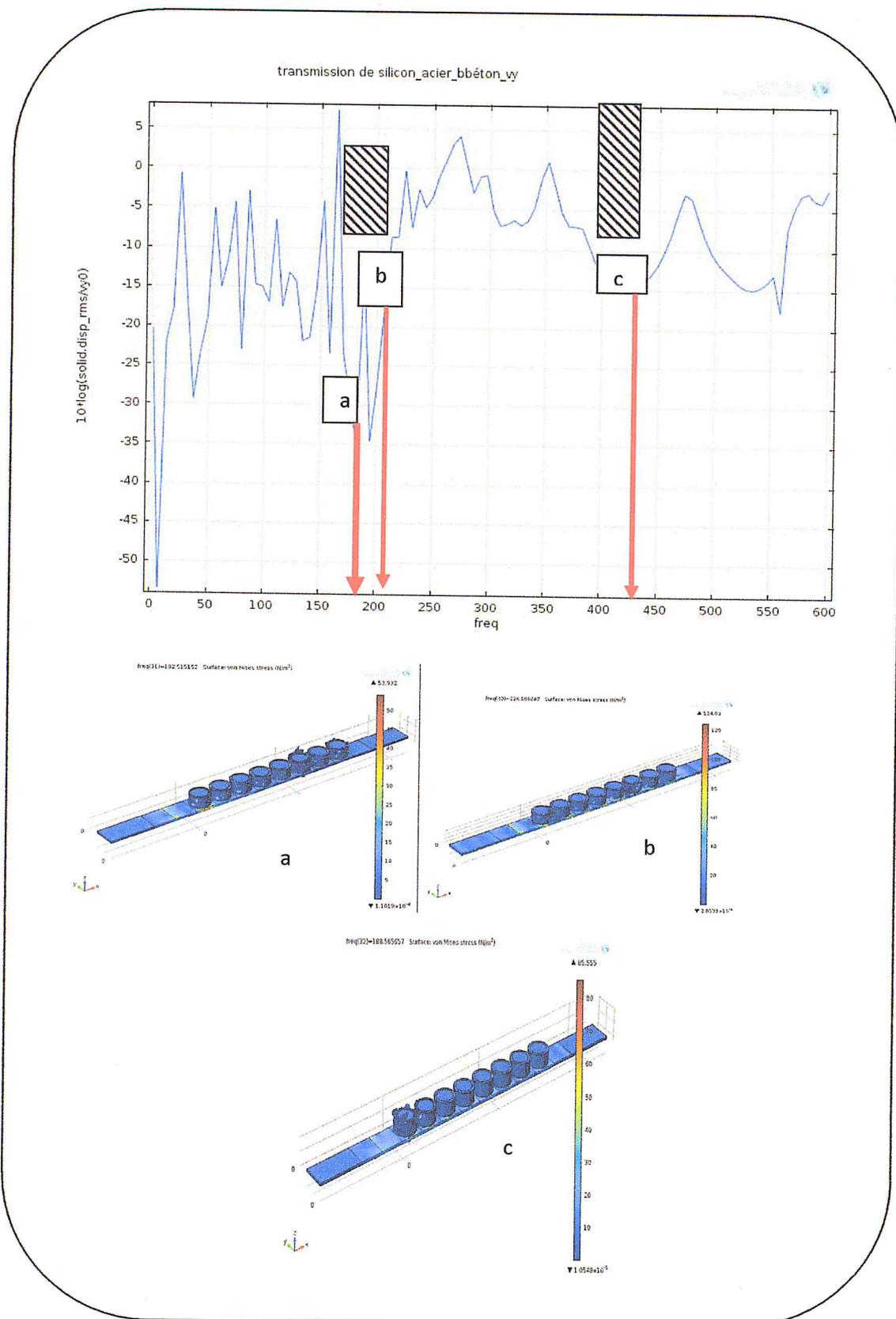


Figure 3.27 : Courbe de transmission pour matériaux Silicon_acier_béton suivant direction V_{y0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.27 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat3 (Silicon-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction V_{y0} . Bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 100-150 m/s et 400-450 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 236.98 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchié et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

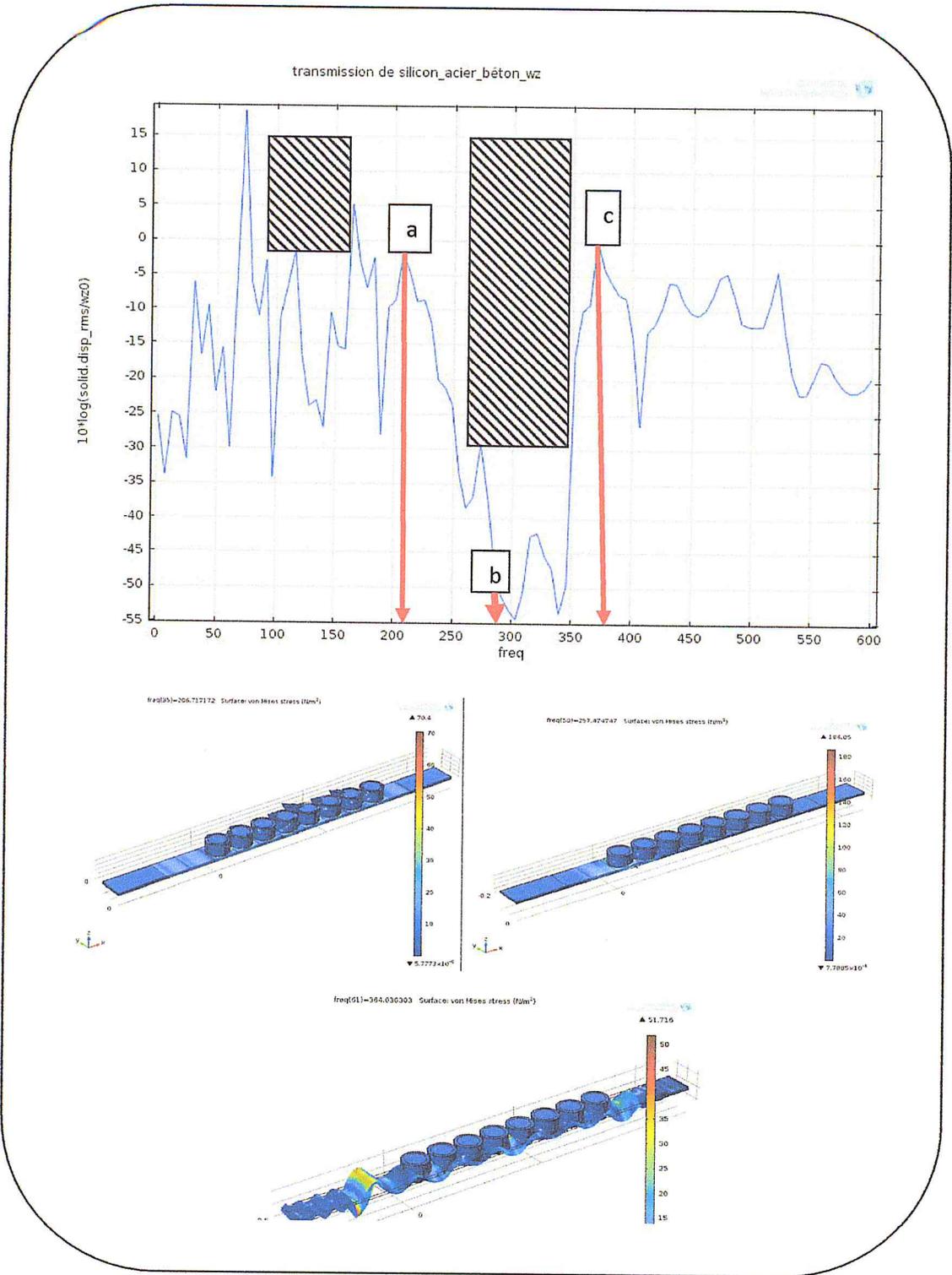


Figure3.28 : Courbe de transmission pour matériaux Silicon_acier_béton suivant direction W_{z0} . Les déformée de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.28 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat3 (Silicon-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction U_{x0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 100-150 m/s et 250-350 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 297.47 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

Il est à noter que quelques soit la polarisation de la vibration d'excitation U_{x0} (Fig. 3.26), V_{y0} (Fig. 3.27) et W_{z0} (Fig. 3.28), les bandes interdites sont à peu de choses près identiques. Donc s'il ya atténuation, elle le sera pour toute les polarisations. Ce qui est en lui même très intéressants.

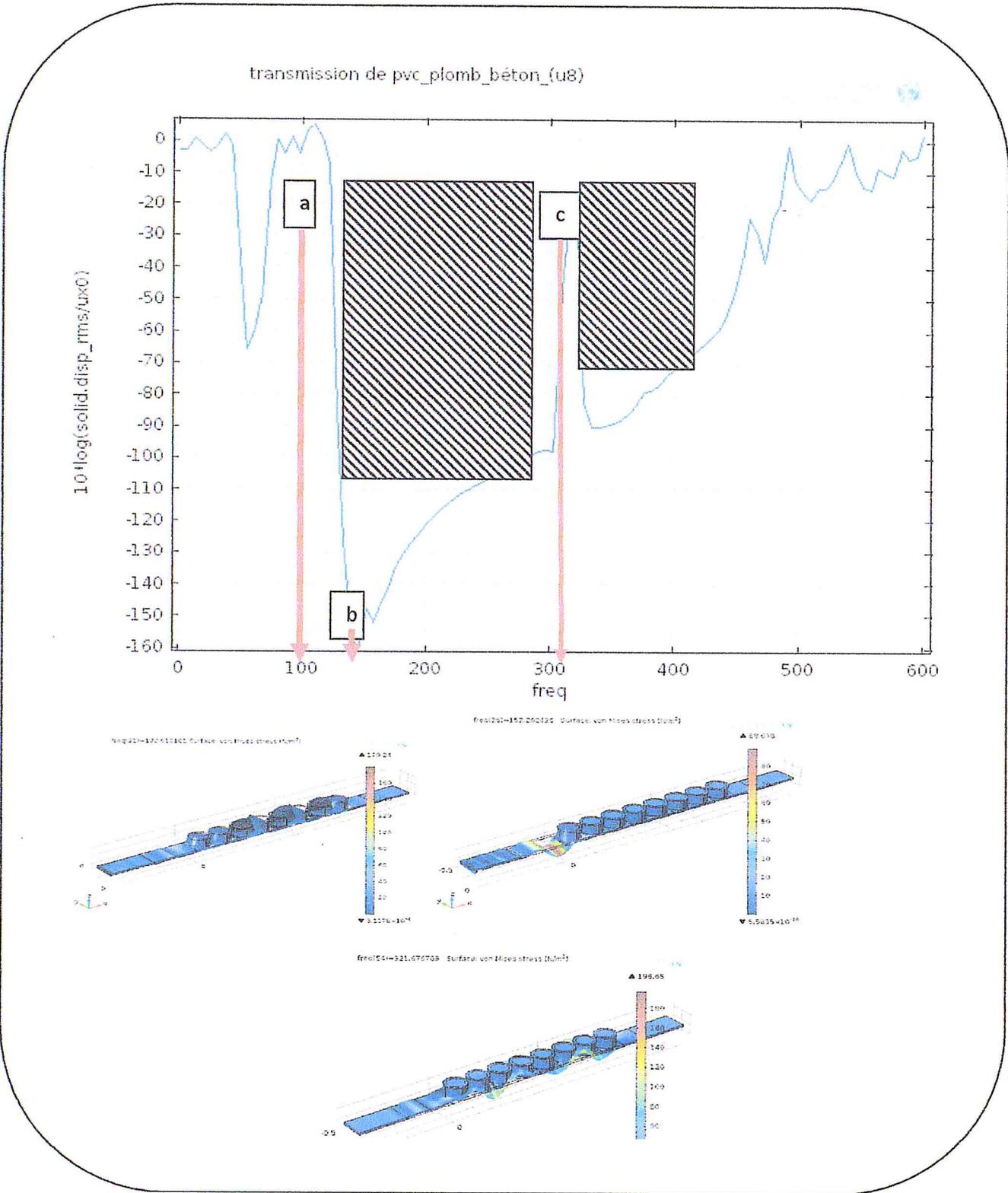


Figure 3.29 : Courbe de transmission pour matériaux pvc_plomb_béton suivant direction U_{x0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3. 29 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat4 (PVC-Plomb-béton) avec une excitation polarisée dans la direction U_{x0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.13 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 125-350 m/s et 400-450 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 152.26 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

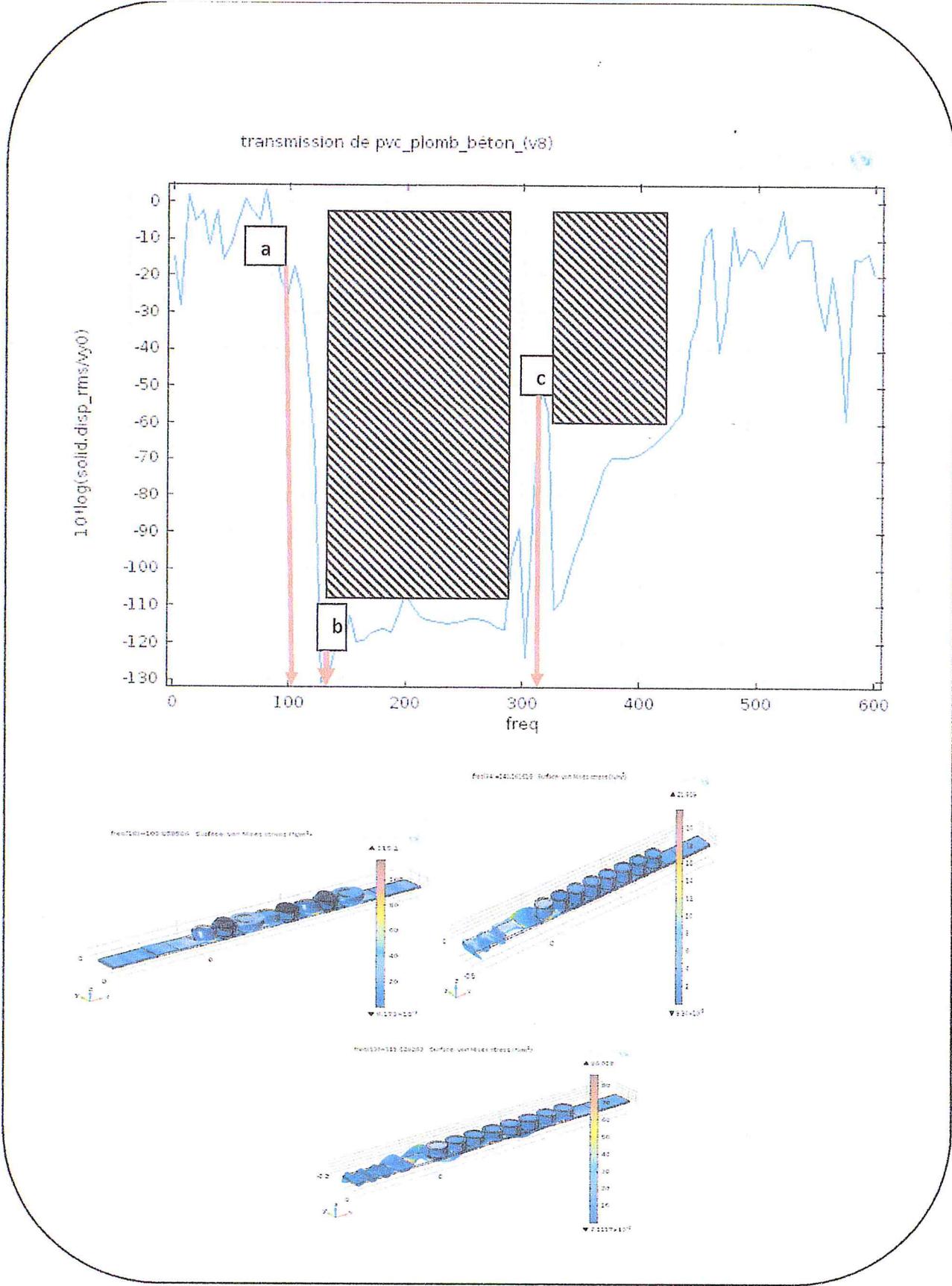


Figure 3.30 : Courbe de transmission pour matériaux pvc_plomb_béton suivant direction V_{y0} . Les déformée de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.30 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat4 (PVC-Plomb-béton) avec une excitation polarisée dans la direction V_{y0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.14 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 125-350 m/s et 400-450 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 140.16 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

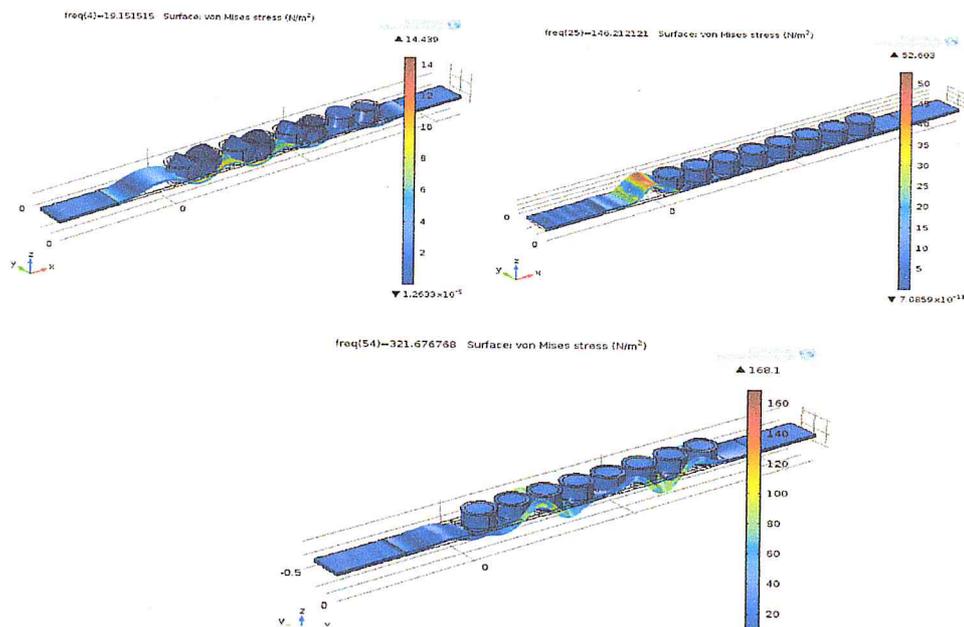
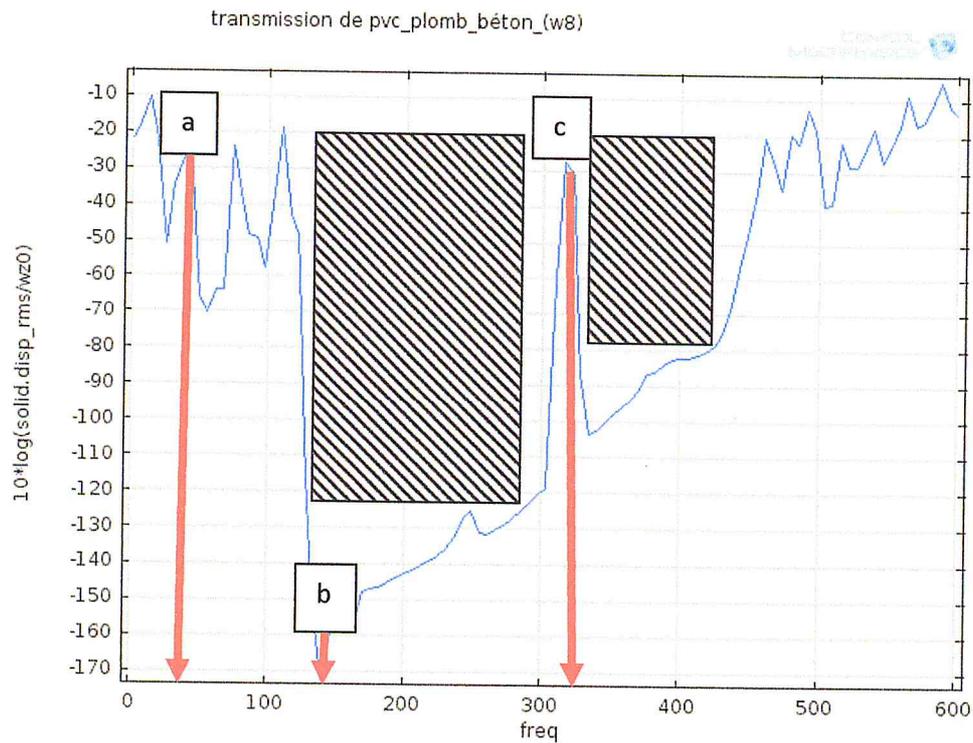


Figure3.31 : Courbe de transmission pour matériaux pvc_plomb_béton suivant direction W_{z0} . Les déformée de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.31 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat4 (PVC-Plomb-béton) avec une excitation polarisée dans la direction U_{x0} . L'atténuation prévue par la simulation des courbes de dispersions Fig. 3.15 est en exacte concordance ce qui montre l'exactitude de nos simulations. Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 125-350 m/s et 400-450 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 146.21 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

Il est à noter que quelques soit la polarisation de la vibration d'excitation U_{x0} (Fig. 3.29), V_{y0} (Fig. 3.30) et W_{z0} (Fig. 3.31), les bandes interdites sont à peu de choses près identiques. Donc s'il ya atténuation, elle le sera pour toute les polarisations. Ce qui est en lui même très intéressants.

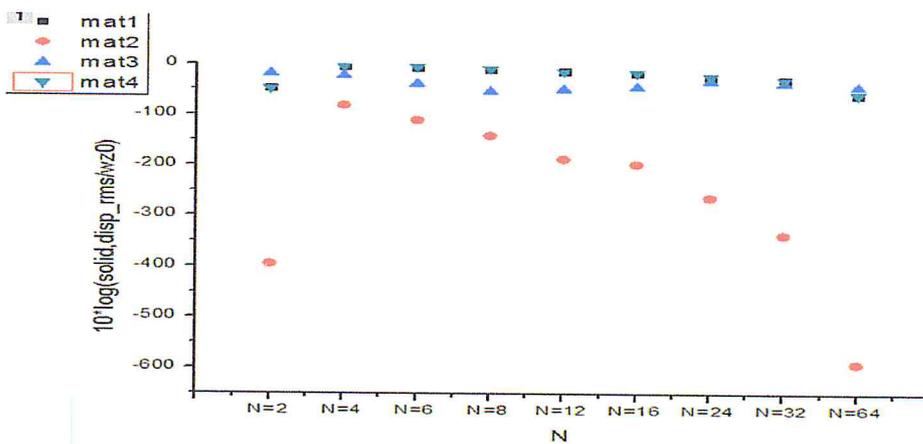
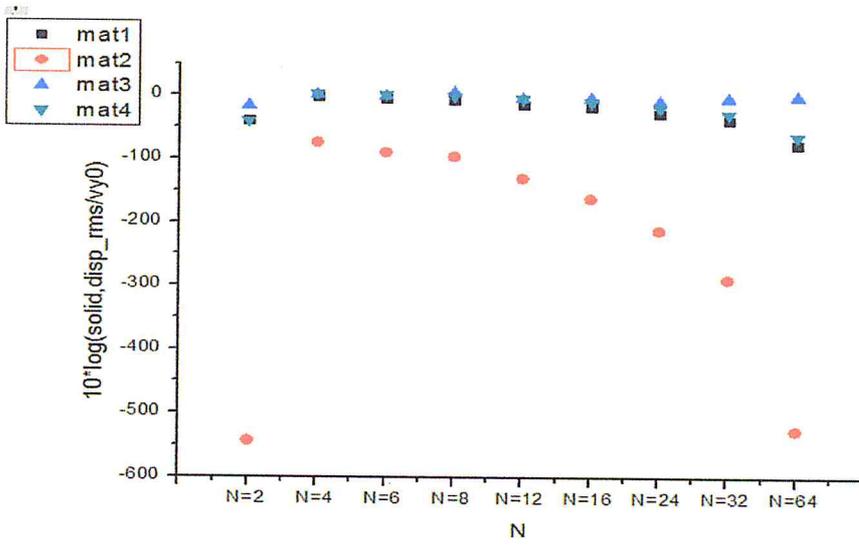
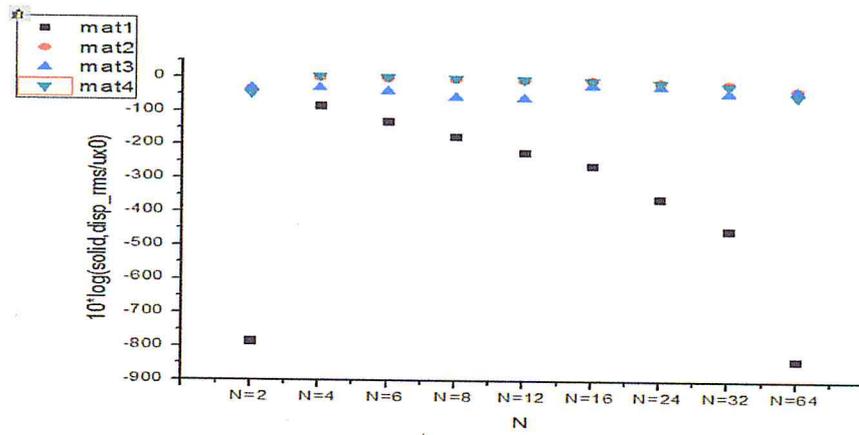


Figure 3.32 : Courbe de transmission pour matériaux Mat1.Mat2.Mat3.Mat4 suivant direction U_{x0} , V_{y0} , W_{z0} .

La figure 3.32 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat1 (PVC-acier-béton), Mat2 (Rubber-acier-béton), Mat3(silicon-acier-béton) , Mat4(pvc-plomb-béton) avec une excitation polarisée dans la direction $U_{x0}V_{y0}w_{z0}$. L'atténuation pour Mat1 se fait suivant la direction ux_0 a un valeur de 64 mais les autre matériaux demande plus de valeur.

L'atténuation de mat2 suivant la direction vy_0 et wz_0 se fait pour 64 valeurs les autres matériaux demande plus de valeurs pour se atténuer.

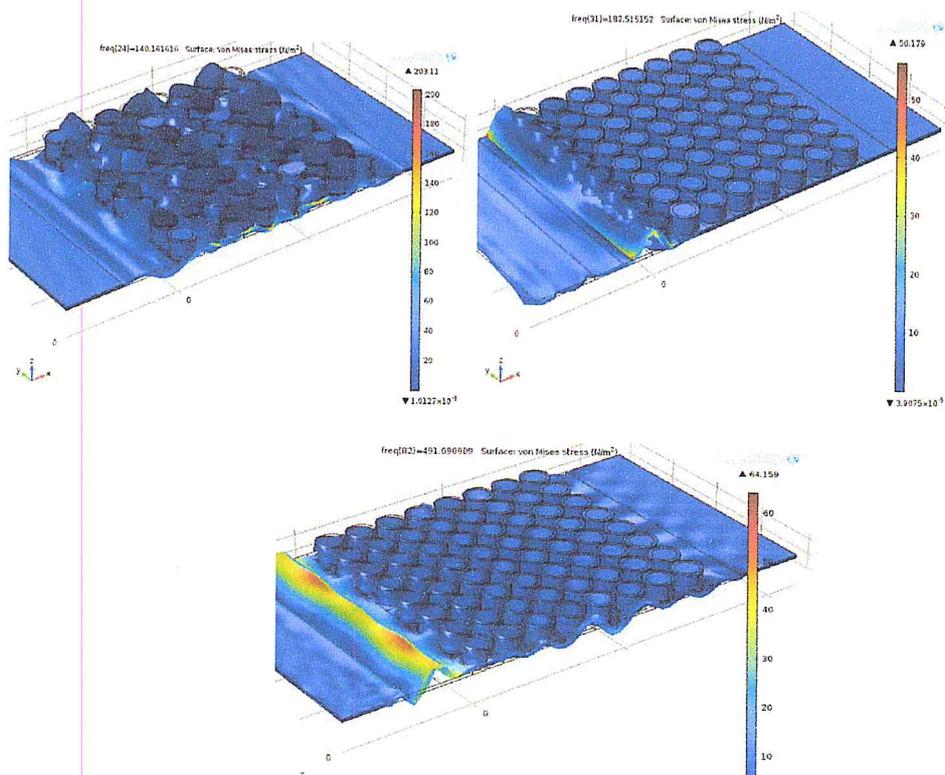
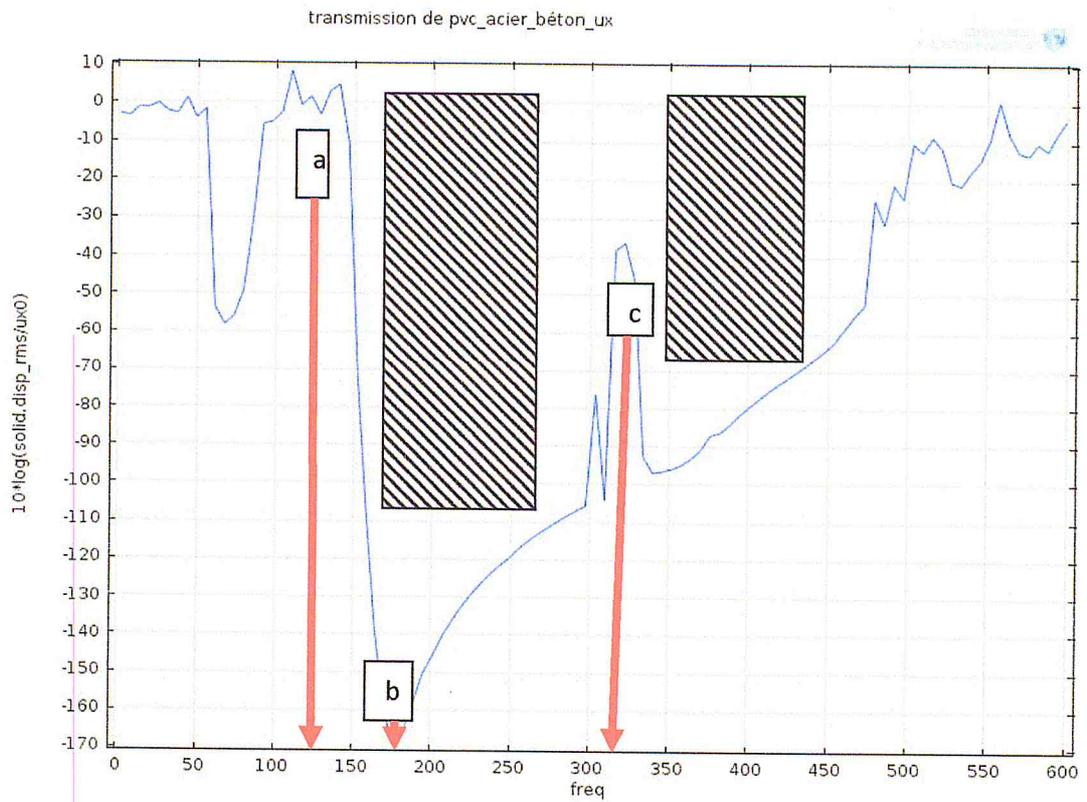


Figure 3.33 : Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc_acier_béton suivant direction U_{x0}. Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

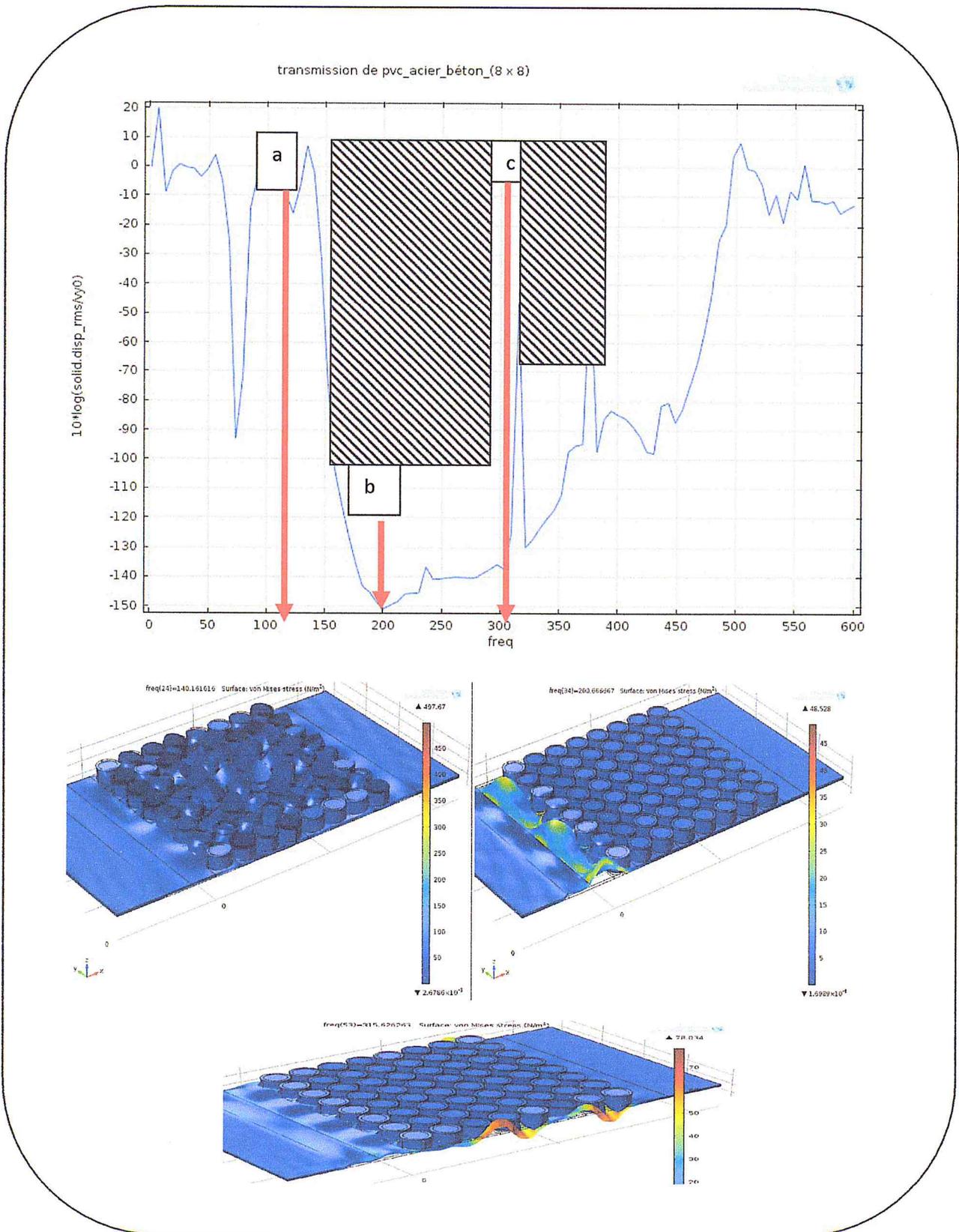


Figure 3.34 : Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc_acier_béton suivant direction v_{y0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.34 représenté le spectre de transmission(8x8) pour une structure Mat1 (PVC-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction v_{y0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 150-300 m/s et 325-375m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 200.66 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

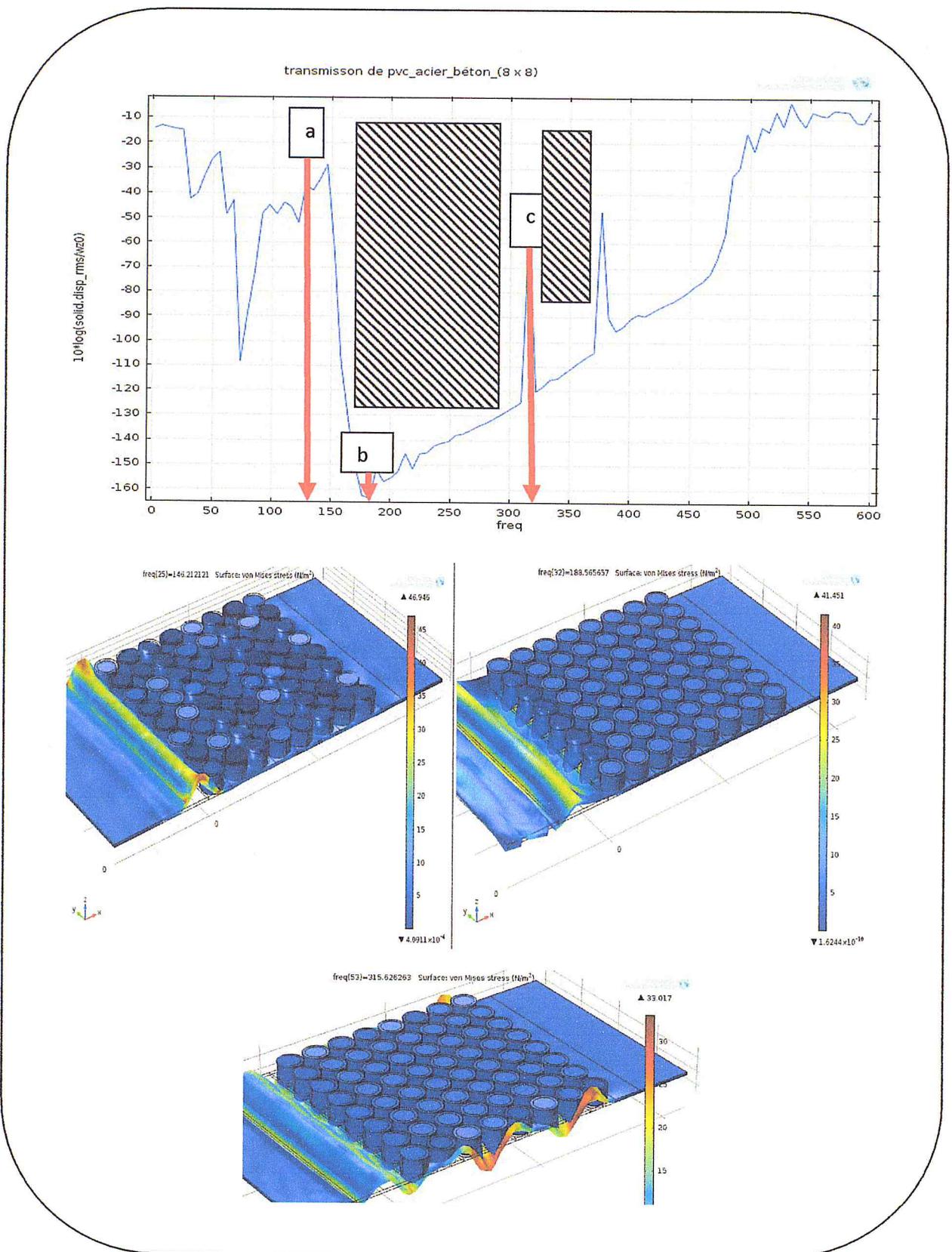


Figure3.35: Courbe de transmission(8x8) pour matériaux pvc_acier_béton suivant direction w_{z0} . Les déformée de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.35 représenté le spectre de transmission(8x8) pour une structure Mat1(PVC-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction w_{z0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 175-275 m/s et 325-375 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 188.56 m/s est quasiment immobile en sortie. La réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

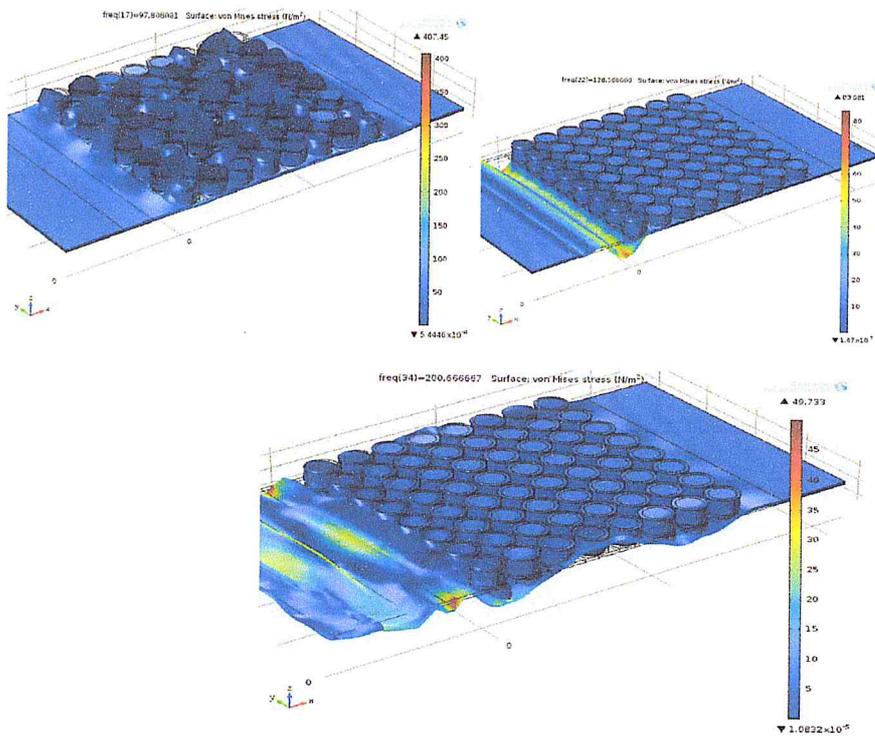
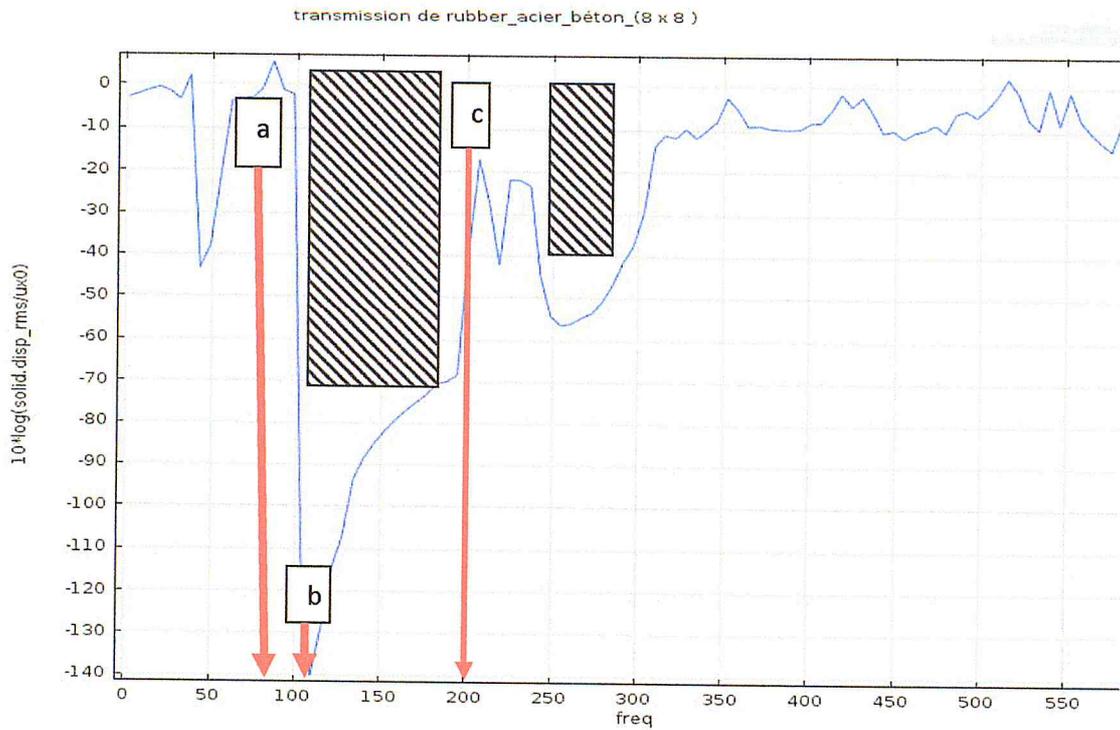


Figure 3.36: Courbe de transmission (8x8) pour matériaux Rubber_acier_béton suivant direction U_{x0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.36 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat2 (rubber-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction U_{x0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 100-200 m/s et 250-300 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 128.04 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

transmission de rubber_acier_béton_(8x8)

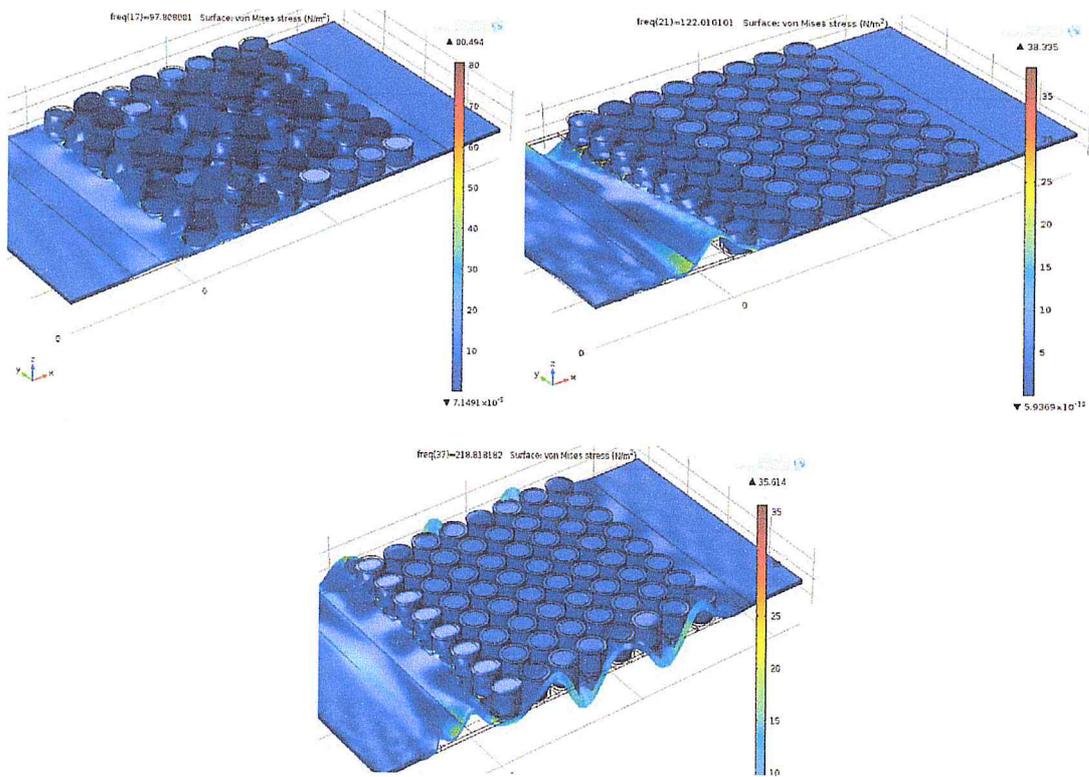
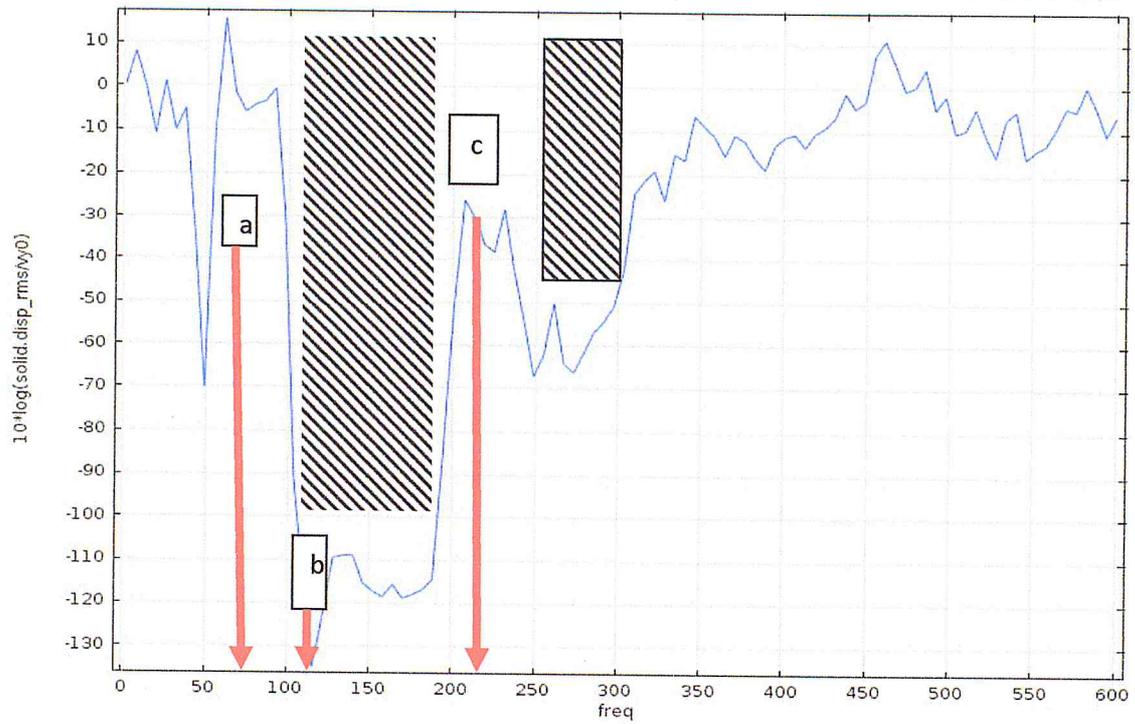


Figure 3.37 : Courbe de transmission (8x8) pour matériaux Rubber_acier_béton suivant direction V_{y0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.37 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat2 (rubber-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction v_{y0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 100-200 m/s et 250-300 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 122.01 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchié et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

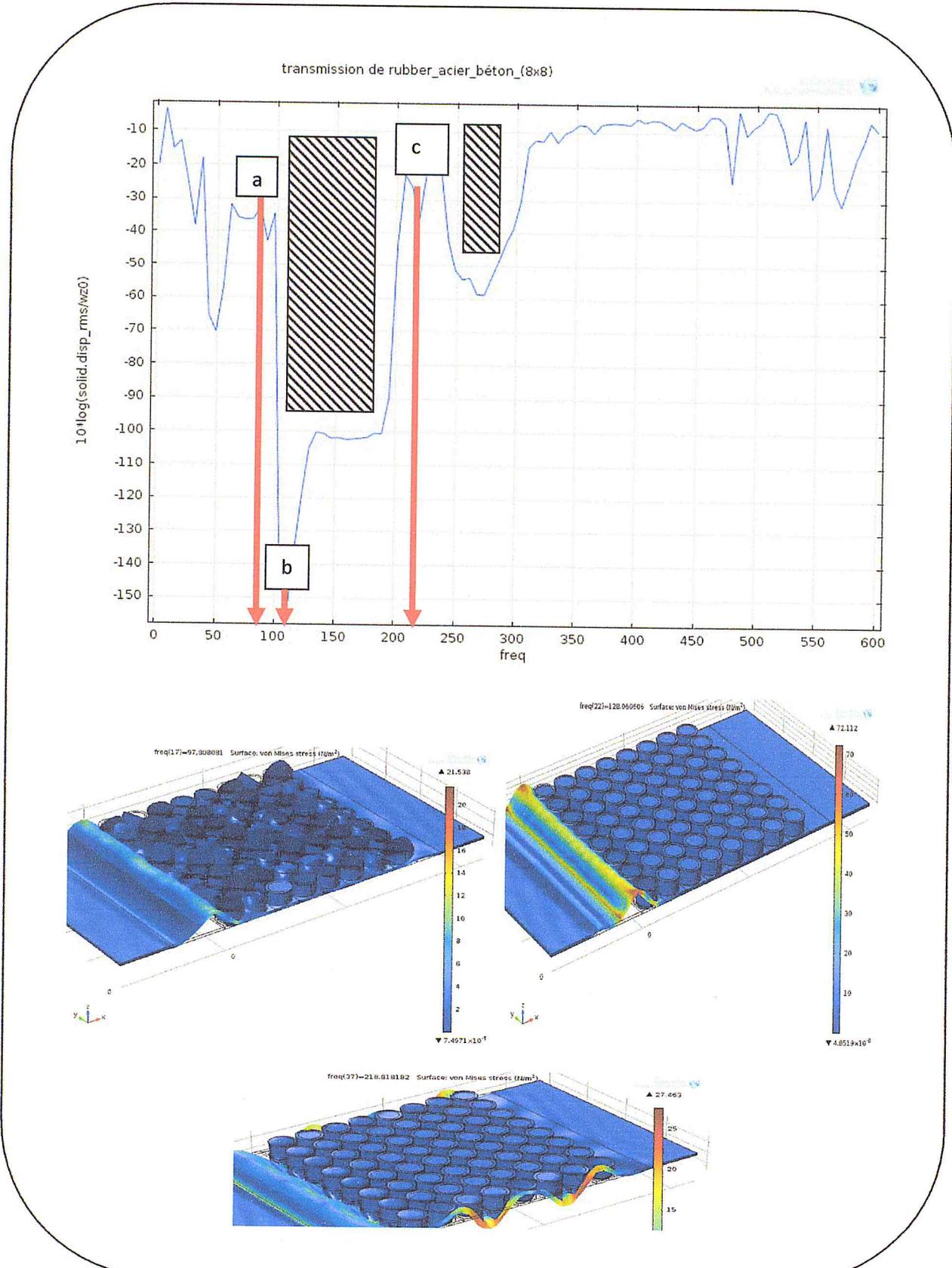


Figure 3.38 : Courbe de transmission (8x8) pour matériaux Rubber_acier_béton suivant direction W_{z0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.38 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat2 (rubber-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction w_{z0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 100-200m/s et 250-300 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 128.06 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite

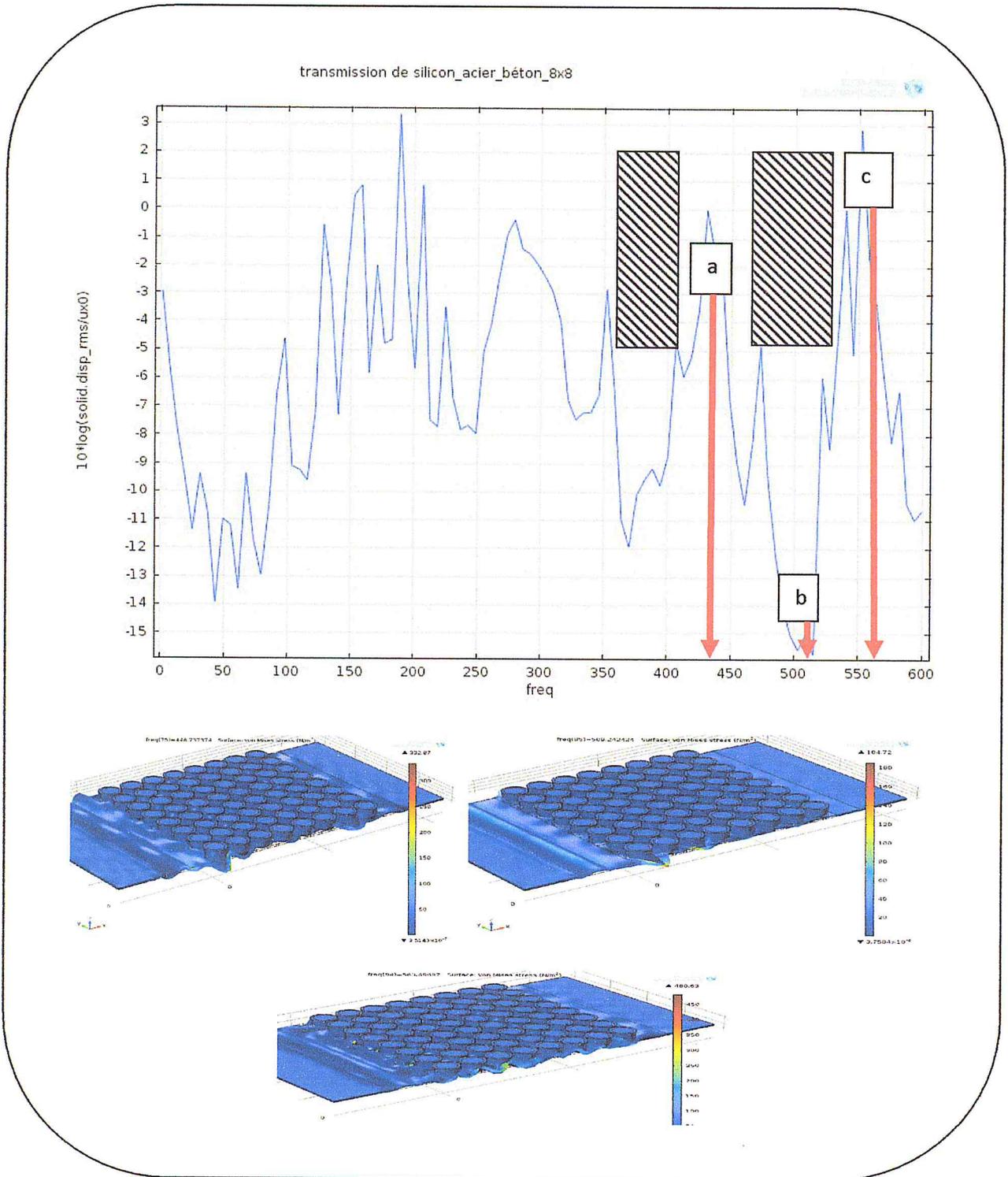


Figure 3.39 : Courbe de transmission (8x8) pour matériaux Silicon_acier_béton suivant direction U_{x0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.39 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat3 (silicon-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction u_{x0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 350-400 m/s et 475-500 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 509.24 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchié et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

La figure 3.33 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat4 (PVC-Plomb-béton) avec une excitation polarisée dans la direction w_{z0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 50-100 m/s et 125-250 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 182.51m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite

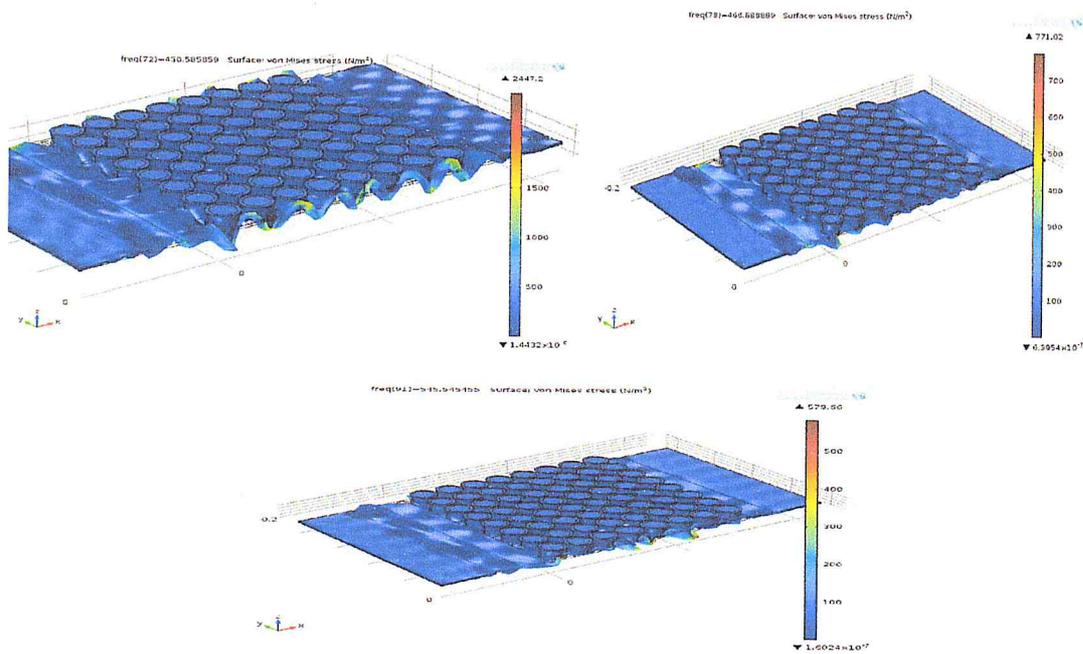
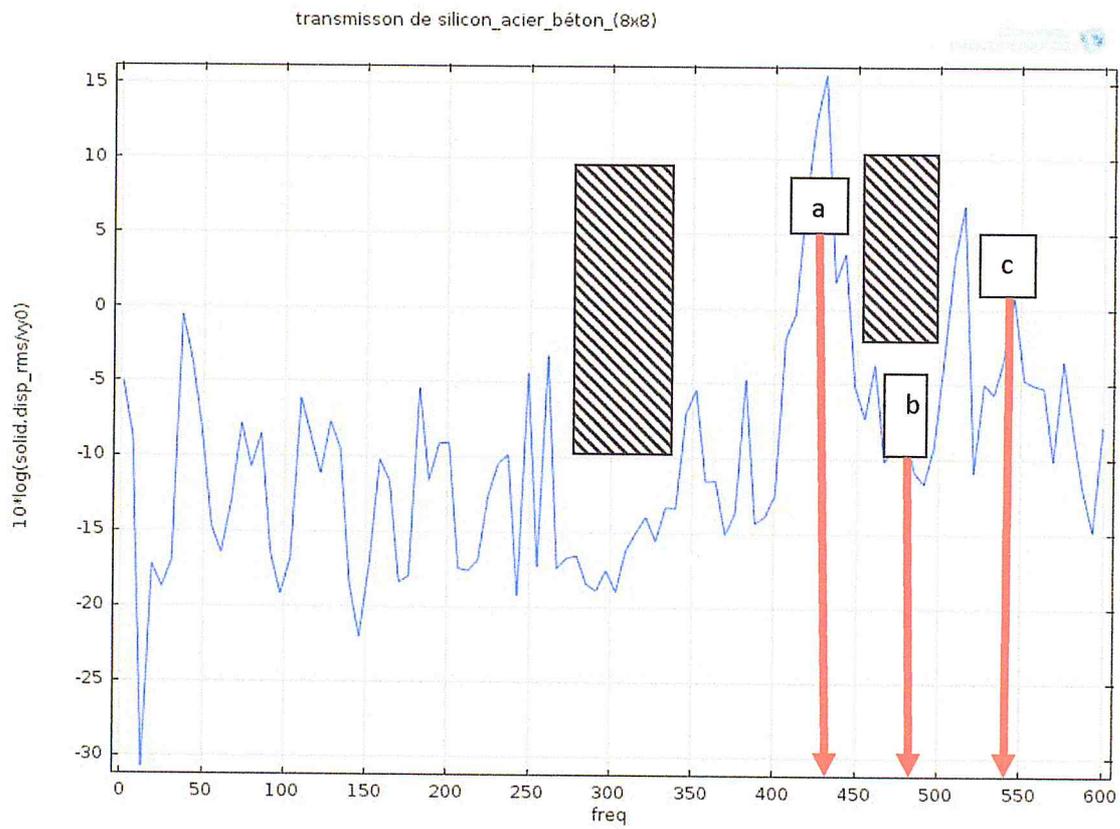
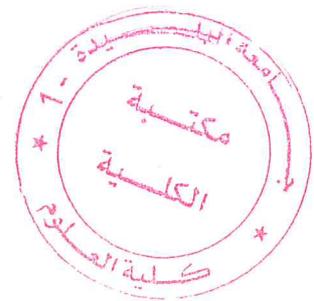


Figure 3.40 : Courbe de transmission (8x8) pour matériaux silicon_acier_béton suivant direction V_{y0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.40 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat3(silicon-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction v_{y0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 275-325m/s et 450-500 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 465.82 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite



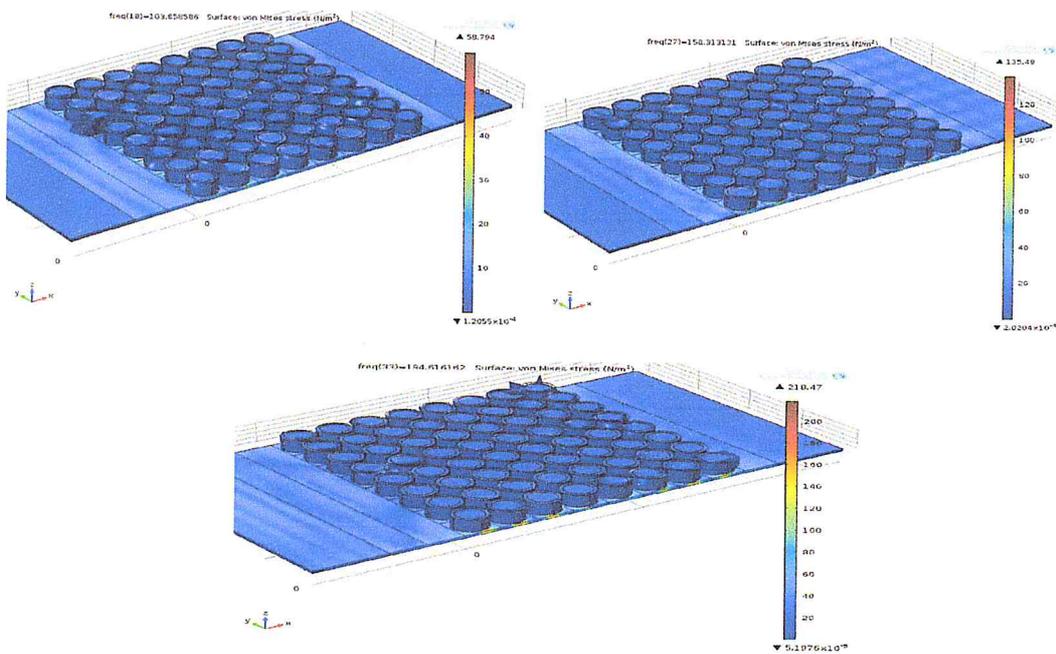
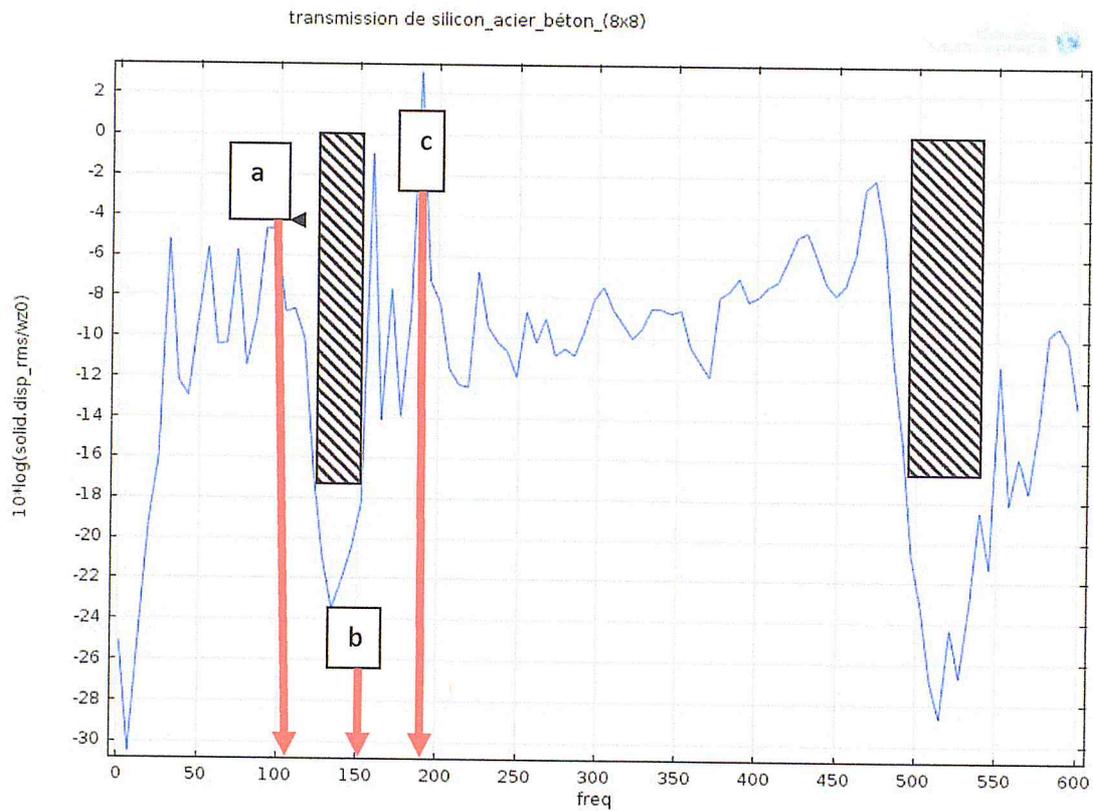


Figure3.41 : Courbe de transmission(8x8) pour matériaux Silicon_acier_béton suivant direction W_{z0} . Les déformée de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.41 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat3 (silicon-acier-béton) avec une excitation polarisée dans la direction w_{z0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 125-150 m/s et 500-550 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 154.31 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchi et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite

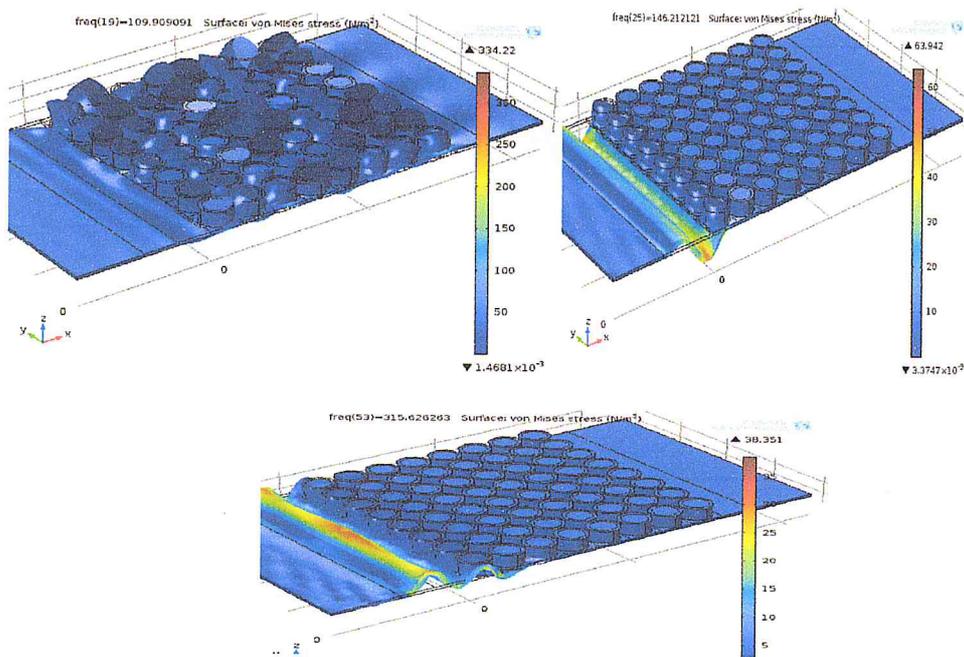
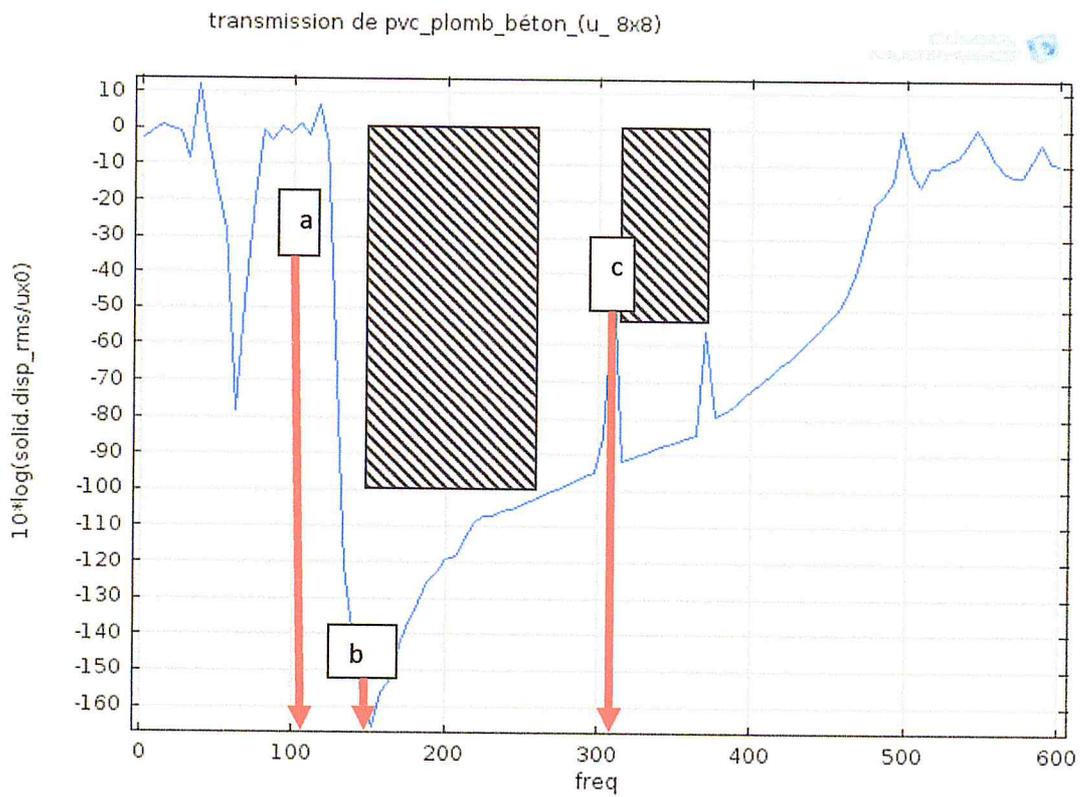


Figure 3.42 : Courbe de transmission (8x8) pour matériaux Plomb_acier_béton suivant direction U_{x0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.42 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat4(PVC-Plomb-béton) avec une excitation polarisée dans la direction u_{x0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 150-300 m/s et 310-375 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 146.21 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite

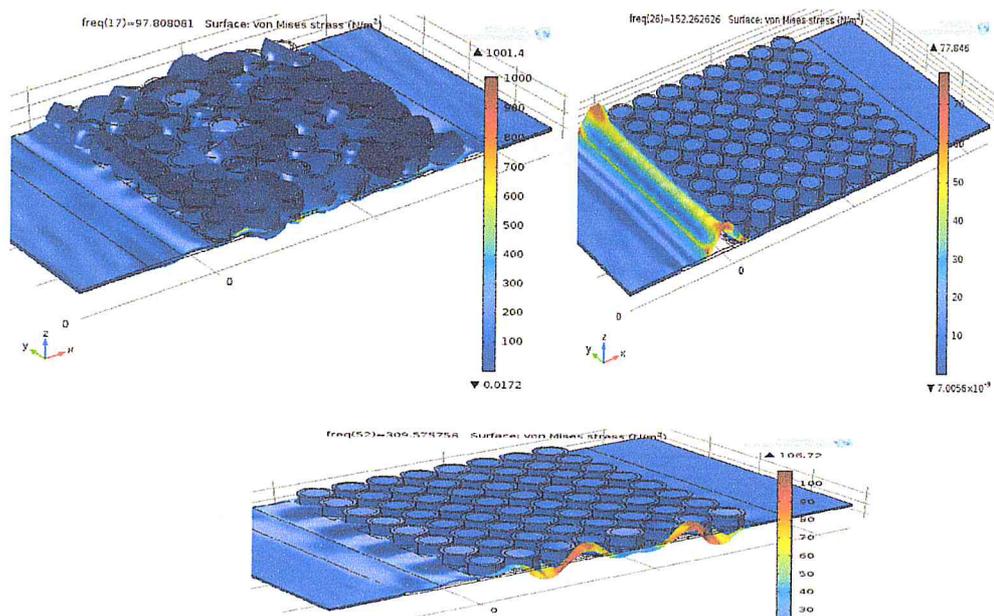
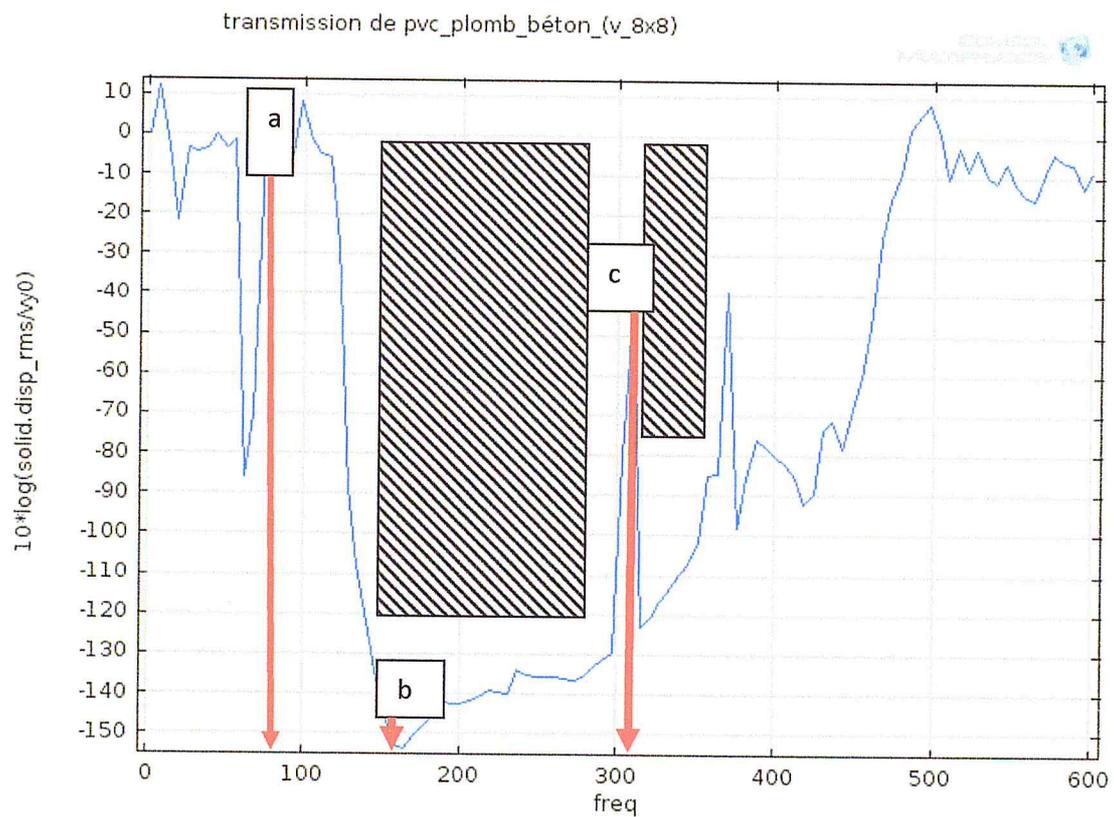


Figure3.43 : Courbe de transmission (8x8) pour matériaux pvc_plomb_béton suivant direction V_{y0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.43 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat4 (PVC-Plomb-béton) avec une excitation polarisée dans la direction v_{y0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 150-300 m/s et 350-375 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 152.24 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchi et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite.

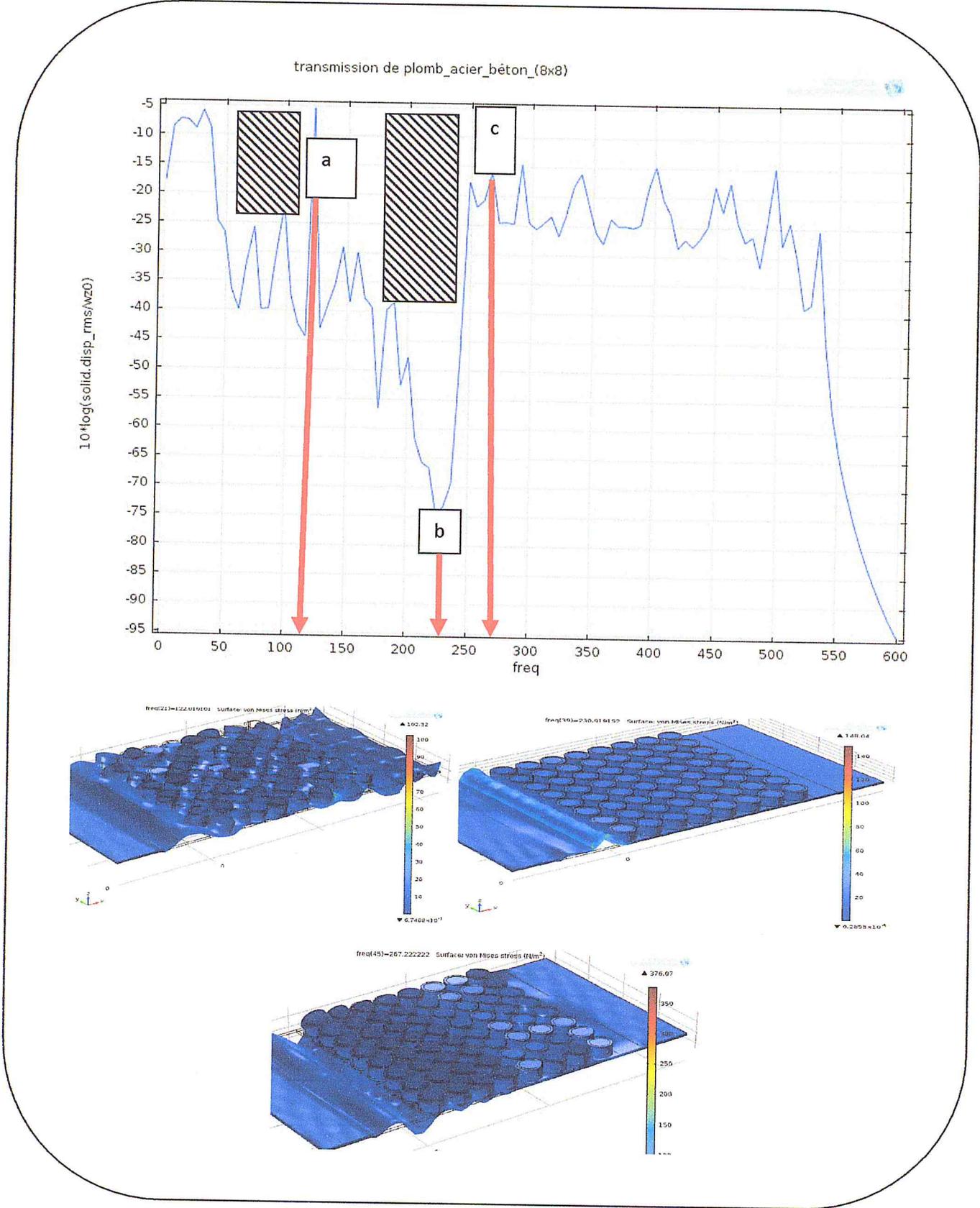


Figure 3.44 : Courbe de transmission (8x8) pour matériaux pvc_plomb_béton suivant direction W_{z0} . Les déformées de la structure pour chaque point a, b et c référence est ainsi représentée.

La figure 3.44 représenté le spectre de transmission pour une structure Mat4 (PVC-Plomb-béton) avec une excitation polarisée dans la direction w_{z0} . Les bandes hachurées sont là afin d'illustrer cette concordance avec deux bandes gap 50-100 m/s et 125-250 m/s.

De plus, nous montrons dans cette même figure la déformé de la structure pour trois fréquence de références notées a, b et c. Il est intéressant de noté que la structure pour la fréquence centrale b de l'atténuation 230.91 m/s est quasiment immobile en sortie. réflexion de l'onde incidente est totale. Là l'utilité de la partie PML est importante afin d'absorber cette onde totalement réfléchie et ne pas perturbé la simulation par des échos parasite

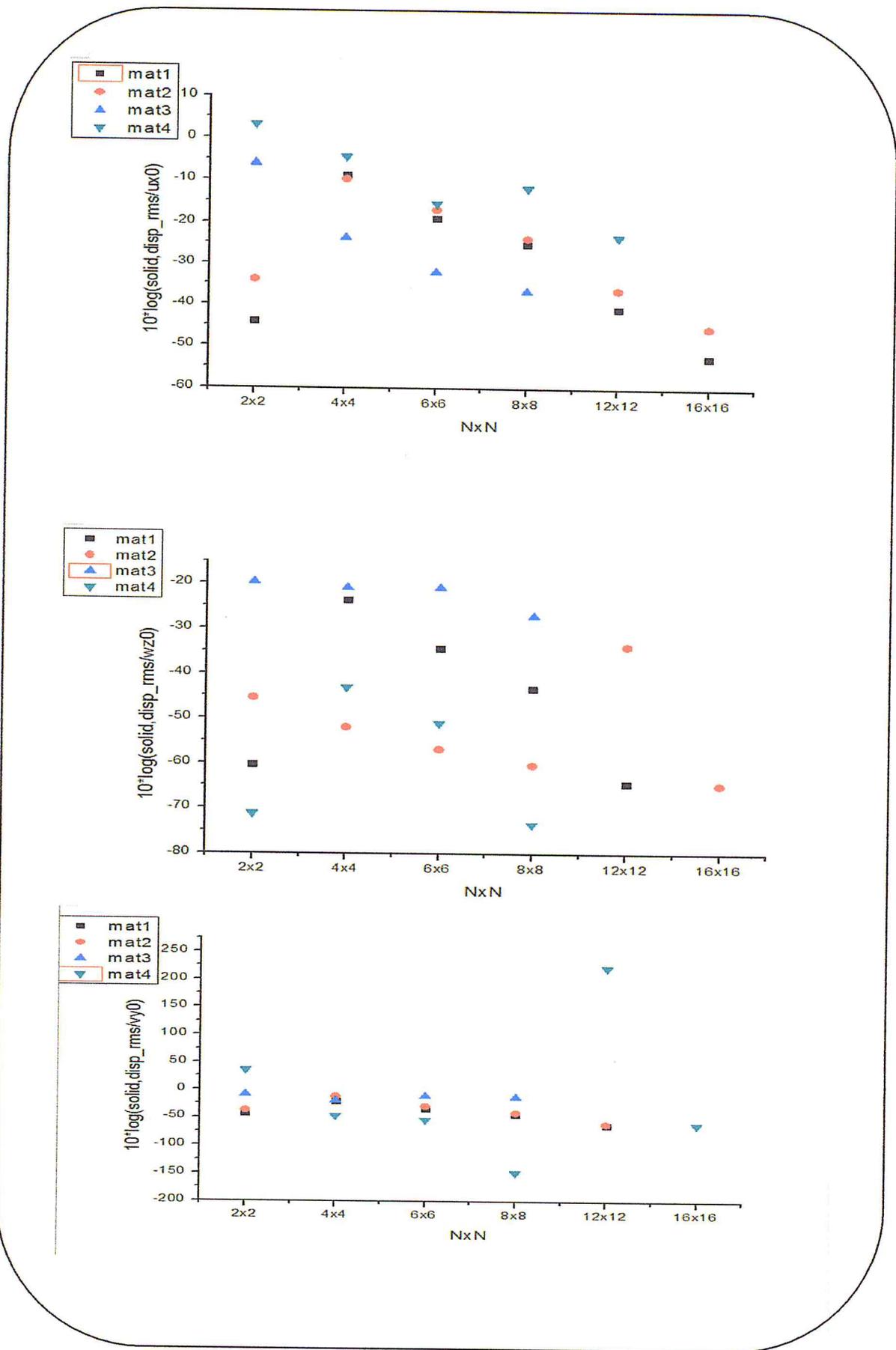


Figure 3.45 : Courbes de transmission pour les matériaux Mat1, Mat2, Mat3, Mat4 suivant les direction Ux0, Vy0 et Wz0.

Conclusion générale:

Ce travail de master consiste à étudier la propagation des ondes élastiques des structures périodiques les cristaux phononiques. Plus exactement, nous avons implémenté le calcul des coefficients de transmission dans des structures phononiques 1D :(linéaire) et 2D :(plane).

Nous structures phononiques sont basées sur l'implantation de résonateur localisée servant à faire baisser la valeur de fréquences des bandes interdites. Nous avons utilisée le logiciel *comsol Multiphysics* v4.3a. Nous avons étudié des cellules jusqu'à nombre de 64x64 qui nécessitent des moyens de calcul important. Le temps de calcul était très grand « une semaine ».

Finalement nous présentons les résultats théoriques simulatoires de la modélisation d'un massif en béton incrusté d'une colonne (pilier) en acier enrobé dans un polymère en polychlorure de vinyle (Pvc). Les résultats sont assez intéressants car ils montrent l'existence de bandes interdites à moyennes voire à basses fréquences. En explorant d'autres couples matériaux métal-polymère tels que "Acier-rubber", "Acier-Silicone", "Acier-pvc " et Pvc-plomb la gamme des bandes interdites a fait un bond spectaculaire vers les basses fréquences. Les calculs numériques montrent qu'il existe bandes à faible fréquence sont observées dans ces structures.

Une structure équivalente dans le domaine du génie civil a été proposée et devra être amélioré dans des travaux se périment au futur.

Equipé d'ordinateurs plus performants, la poursuite de ces simulations aussi bien sur les structures planes pour des applications aérospatiales ou des structures en béton armés seront d'un grand apport.

Références:

- [1] E. Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys.Rev. Lett.* **58**, 2059–2062 (1987)
- [2] M.S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, and B. Djafari-Rouhani, *Acoustic band structure of periodic elastic composites*, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2022–2025 (1993).
- [3] E.N. Economou and M. M. Sigalas, *Classical wave propagation in periodic structures: Cermet versus network topology*, *Phys. Rev. B* **48**, 13434–13438 (1993).
- [4] HOSINE LARABI critaux phononiques et metamateriaux acoustiqu application aux domaine de guidage filtrage et isolation phonoque 27 octobre2001
- [5] R. Martínez-Sala, C. Rubio, L. M. García-Raffi, J. V. Sánchez-Pérez, E. A. Sánchez-Pérez et J. Llinares, *Control of noise by trees arranged like sonic crystals*. *J. Sound Vib*, **291**,100 (2006).
- [6] J.V. Sánchez-Pérez, D. Caballero, R. Martínez-Sala, C. Rubio, J. Sánchez-Dehesa, F. Meseguer, J. Llinares, F. Gálvez, Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 5325–5328 (1998)
- [7] J. Vasseur, P. A. Deymier, B. Djafari-Rouhani, Y. Pennec, and A-C. Hladky-Hennion. *Absolute forbidden bands and waveguiding in two-dimensional phononic crystal plates*. *Phys.Rev. B*, **77** (085415), 2008.
- [8] Z HOU and BM ASSOUAR MODELING of lomb wave progation inplate with two dimation phoniques crystal layer coated substrate *LettA372* 2091(2008)
- [9] J, vib structure vers periodic waves guides peiodic *Acous Inpress*(2012)
- [10] http://junon.u-3 mrs .fr /mso 1 w004 sismo des ecol/public html/seisgram/ ondes_sismiques htm
- [11]P ,Balandier cours de construction parasismique volume1-DDE Martinique(2001)
- [12] I.E. Psarobas, A. Modinos, R. Sainidou, N. Stefanou, Acoustic properties of colloidal crystals. *Phys. Rev. B* **65**, 064307 (2002)
- [13] J Gaofeng and S Zhifei A new isolation sys and feasibility study *Eng and ENGINEERING VIBRATION* **9** :75-82,2010
- [14] M.S. Kushwaha, B. Djafari Rouhani, L. Dobrzynski, Sound isolation from cubic arrays of air **bubbles** in water. *Phys. Lett. A* **248**, 252–256 (1998)

[15] Hammouche Khaled Abdelkader Hassen-Bey Abdelkrim Khelif ,Evidences of ultrasonic Band Gap in Aluminum phononic crystal Beam.J, vib , acoustic ;2013;135(4):041007-041007-4.

[16] Abd-el-Kader Hassen-Bey, Abdel rim Khelif, Selectif Band Gap to suppress spurious acoustic mode in film acoustic resonation structures J, vib acoustic 2018;140(3):031018-031018-7

