

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة 1

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1



كلية العلوم – دائرة الفيزياء

Faculté des Sciences

Département de Physique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU

DIPLÔME DE :

MASTER EN PHYSIQUE

Option : Nano physique

***ETUDE ET SIMULATION DES DISPOSITIFS A BASE DE
TRANSDUCTEURS LINEARE ET CIRCULAIRES POUR LA
GENERATION D'ONDES ACOUSTIQUES DE LAMB***

Présenté par :

ABDELLI AMINA MANEL

Le jury composé de :

Dr. Salah Eddine Aoudj	MCA	U. Blida1	Président
Dr. Amine Amrane	MCB	U. Blida1	Examineur
Dr. Abdelkader Hassein-Bey	MCB	U. Blida1	Promoteur
Dr. Asmaa Hassein-Bey	Docteur	U. Blida1	Co-promoteur

Blida 1 -2022/2023

Remerciements

Je remercie dieu le tout puissant et puis à mes parents respectifs, qui ont mis tous leurs moyens pour que je puisse aujourd'hui arriver à cette étape dans mes études. En premier lieu, je tiens à remercier mon encadreur DR. Abdelkader Hassen-Bey qui m'a aidé et conseillé durant ce travail. Mes remerciements vont également aux membres de jury pour m'avoir honoré par leur évaluation de ce travail. Je remercie également tous les enseignants du département de physique de l'université de BLIDA pour leur aide et encouragement. Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu, encouragé et donné l'envie de mener à terme ce travail.

Dédicaces

*Je dédie mon travail à la fleur de ma vie « ma mère »,
à l'exemple de fierté « mon père », à vous mes très chères
beau parents que j'aime et qui m'ont toujours soutenu et
encouragé le long de mon cursus universitaire, que dieu
protégé.*

A mon mari Oussama

A mon fils

A mes chers frères

A mes adorables amie « Ilham, Ouissem, Ikram »

*A tous les étudiants et les professeurs de département
de physique*

Et vous ... prochains physiciens

ملخص

في هذه الدراسة، قمنا بتنفيذ محاكاة باستخدام طريقة العناصر المحددة لتحليل جهاز يعتمد على محول خطي متشعب ثنائي الأبعاد ودائري ثلاثي الأبعاد لتوليد موجات لامب. بشكل أكثر دقة، استخدمنا لحساب الترددات أثناء هذه المحاكاة برنامج كومسول

Résumé

Cette étude s'est concentrée sur la modélisation et la simulation de dispositifs exploitant des transducteurs linéaires interdigités en deux dimensions et circulaires en trois dimensions pour la génération contrôlée d'ondes de Lamb. Nous avons employé la méthode des éléments finis, une approche numérique largement reconnue pour résoudre les équations aux dérivées partielles, afin de caractériser ces dispositifs. Les simulations ont été réalisées en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysiques pour calculer avec précision les fréquences et les modes d'ondes de Lamb pertinents.

Abstract

In this study, we conducted simulations using the finite element method to analyze a device based on a linear interdigitated transducer in 2D and circular in 3D for the generation of Lamb waves. More precisely, we used the COMSOL software to calculate frequencies during these simulations.

Table des matières

Remerciements	2
Dédicaces	3
Liste des figures et des tableaux.....	7
LISTE DES ABBREVIATION	10
Introduction générale	11
Chapitre 1 : Généralités et états de l'art sur la piézoélectricité et les ondes élastiques.....	14
1.1 Introduction	15
1.2 Ondes acoustiques	15
1.3 Type d'onde élastique.....	17
1.3.1 Ondes de volume	17
1.3.2 Ondes de surface.....	19
1.3.2.1 L'onde de Love L ou LQ	19
1.3.2.2 L'onde de Rayleigh ou LR.....	20
1.3.2.3 Ondes de surface de polarisation transverse	20
1.3.2.4 Ondes de Lamb	21
1.3.2.4.1 Equation de Lamb	22
1.3.2.4.2 Courbes de dispersion.....	23
1.3.2.4.3 Champ de déplacement	24
1.4 Ondes dans les milieux périodiques	25
1.5 Transduction piézoélectricité.....	26
1.6 Quelques matériaux piézoélectriques	27
1.6.1 Les polymères piézoélectriques	27
1.6.2 Les céramiques piézoélectriques	27
1.6.3 Les cristaux piézoélectriques	28
1.7 Dispositifs à ondes de surface à base de transducteurs inter-digité	28
1.8 Le transducteur inter-digité :	30
1.8.1 Description du transducteur inter-digité :	30
1.8.2 La conception du transducteur inter-digité :.....	30
1.8.3 Les différentes configurations du transducteur inter-digité :	31
1.9 Dispositifs à onde de surface SAW : Définition et principe de fonctionnement	31

Chapitre 2: modélisation et méthode de simulation.....	35
2.1 Introduction	36
2.2 Méthode des éléments finis.....	36
2.3 Description du logiciel Comsol Multiphysique	37
2.4 La géométrie de model linéaire (2D)	39
2.5 Définitions des matériaux	40
2.5.1 Niobate de lithium	41
2.5.2 L'or (Au).....	42
2.6 Maillage de la structure	42
2.7 La variation de la zone centrale (gap)	43
2.8 Géométrie du model circulaire (3D).....	48
2.8.1 La géométrie de 1 ^{er} cas	48
2.8.2 La géométrie de 2 ^{ème} cas	49
2.9 Définitions des matériaux	50
2.10 Condition aux limites	53
2.11 Maillage.....	54
Conclusion	55
Chapitre 3 : Résultats et discussion	56
3.1 Calcul des fréquences propres linéaire (2D)	57
3.2 Calcule de la réponse fréquentiel.....	63
3.2.1 Linéaire (2D)	63
3.2.2 Circulaire (3D).....	64
Conclusion générale	66
Références.....	67

Liste des figures et des tableaux

Figure 1.1:polarisation des ondes.	16
Figure 1.2:Modes de Lamb symétrique et antisymétrique dans une plaque d'épaisseur finie	17
Figure1.3:Représentation schématique des ondes P	18
Figure 1.4:Représentation schématique des ondes S	19
Figure1.5:Représentation schématique des ondes L.....	20
Figure 1.6: Représentation schématique des ondes.....	20
Figure 1.7: Onde de surface de polarisation	21
Figure 1.8: Onde de Lamb	22
Figure1.9: Formation d'une onde de Lamb	22
Figure1.10: Système de coordonnées utilisé pour la plaque libre.....	22
Figure1.11:Vitesses de phase des modes de Lamb symétriques (s0) et Antisymétriques (a0) en fonction du produit « fréquence-épaisseur »	23
Figure1.12: Distribution de déplacement des particules pour les trois premières modes symétriques (à gauche) et antisymétriques (à droite) d'une onde de Lamb sur une plaque isotrope.....	25
Figure1.13: L'effet Piézoélectrique direct et inverse dans un matériau.....	27
Figure 1.14: L'historique des dispositifs SAW	29
Figure 1.15: Schéma de la vue de dessus d'un transducteur inter digité	30
Figure 1.16: Les différentes configurations des transducteurs inter digités (IDT)..	31
Figure 1.17: Résonateurs de SAW	32
Figure1.18: Transducteur inter-digité déposé sur la surface d'un substrat piézoélectrique	32
Figure1.19: Principe de fonctionnement et caractéristiques d'un dispositif à ondes élastiques de surface	33
Figure 2.1: Décomposition du domaine en éléments	37
Figure 2.2: Interface du logiciel COMSOL Multi physique.....	38
Figure2.3 : La géométrie 2D du modèle.....	39
Figure 2.5 : géométrie pour le substrat piézoélectrique	40
Figure 2.6 : géométrie des électrodes	40
Figure 2.7: Affectation de LiNbO3 à la région de la couche piézoélectrique.....	41
Figure 2.8 : Affectation du matériau l'or aux électrodes.....	42
Figure 2.9 : Maillage de model.....	43

Figure 2.9 : les géométries du modèle linéaire avec différent de zone centrale ...	44
Figure 2.10 : le maillage de différent valeur de la zone centrale.....	44
Figure 2.18 : géométrie de model gap=250 μm	45
Figure 2.19 : maillage de model gap=250 μm	46
Figure 2.20 : géométrie de model gap=500 μm	46
Figure 2.21 : Géométrie de model gap=500 μm avec cantate théorique.....	47
Figure 2.22 : maillage de model gap=500 μm	47
Figure 2.23 : Géométrie pour 2 électrodes.....	49
Figure 2.24 : Géométrie pour 6 électrodes.....	50
Figure 2.25 : Affectation du matériau l'or aux électrodes.....	50
Figure 2.26 : Affectation de LiNbO ₃ à la région de la couche piézoélectrique.....	51
Figure 2.27 : Affectation de LiNbO ₃ à la région de la couche piézoélectrique.....	51
Figure 2.28 : Affectation du matériau l'or aux électrodes.....	52
Figure 2.29 : Domaines définissant les régions <i>PML</i>	53
Figure 2.30 : Domaines définissant les régions <i>PML</i>	53
Figure 2.31 : Condition aux limites électriques.....	54
Figure 2.34 : Condition aux limites électrique.....	54
Figure 2.35 : Maillage de structure.....	55
Figure 2.36 : Maillage de structure.....	55
Figure 3.1 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 55 μm	58
Figure 3.2 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 75 μm	59
Figure 3.3 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 100 μm	60
Figure 3.4 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 125 μm	61
Figure 3.5 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 150 μm	62
Figure 3.6 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 250 μm	63
Figure 3.7 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 250 μm	64
Figure 3.8 : Mode de vibration de la structure pour 2 électrodes.....	65

Figure 3.9 : Mode de vibration de la structure pour 6 électrodes.....	65
Tableau 2.1 : les paramètres de la géométrie 2D du modèle.....	39
Tableau 2.2 : les propriétés de matériaux Niobate de lithium.....	41
Tableau 2.3 : les propriétés de matériaux or	42
Tableau 2.4 : les différentes valeurs de gap	43
Tableau 2.5 : les paramètres géométriques pour 2 électrodes	48
Tableau 2.6 : les paramètres géométriques pour 6 électrodes	49

LISTE DES ABBREVIATION

Au : L'or

FEM: Finite Element Methode

LiNbO3: niobate de lithium

MEMS: Micro Electro Mecanical Systeme

PML : Perfect matched Layer

SAW : surface acoustic wave

IDT : transducteur inter-digité

Introduction générale

Introduction générale :

Un composant *MEMS* (*Micro Electro Mechanical System*) est un système dont les dimensions sont micrométriques composé d'éléments électrique mais aussi d'éléments mécaniques. Il est destiné à assurer des fonctions de capteur ou d'actionneur [1]. L'histoire des microsystèmes, a commencé lors d'une conférence donnée par le professeur Feynman [2] au *CALTECH* lors de la réunion annuelle de la société Américaine de Physique (*Physical American Society*) en décembre 1959. Les *MEMS* ont été développés au début des années 70 en tant que dérivé de la microélectronique. L'objectif étant de remplacer certaines fonctions actuellement réalisées à base de circuits intégrés par des microsystèmes ayant de meilleures performances, faibles pertes hyperfréquences, grande linéarité, faible consommation électrique et surtout pouvant manipuler d'autres grandeurs autre qu'électrique par exemple les pressions mécaniques, température, concentrations d'espèces chimiques , etc.

Les *MEMS* utilisent généralement des matériaux actifs, tels que les matériaux piézoélectriques qui sont très prometteurs du fait de la réciprocité de l'effet piézoélectrique qu'ils présentent [3].

Les matériaux piézoélectriques constituent un lien, une passerelle, entre deux domaines de la physique : la mécanique et l'électromagnétisme. Ils permettent de convertir un signal électrique qui peut être de haute fréquence en une onde élastique progressive.

Pour une propagation suivant l'épaisseur, l'onde est appelée « onde de volume », et pour une propagation sur la surface de la couche du matériau piézoélectrique, l'onde est appelée « ondes de surfaces *SAW* » (*Surface Acoustic Waves*). Les résonateurs piézoélectriques *SAW*, sont constitués d'un substrat piézoélectrique sur lequel est déposé un motif d'électrodes d'excitation en forme de peigne inter digité (*IDT*) [4].

L'invention des transducteurs inter-digité par white et voltmer en 1965 [5] a fourni un moyen pratique pour générer et détecter les ondes acoustique, et a permis ainsi à réaliser les premiers dispositifs à ondes de surfaces par les travaux de Awohltjen et Dessy [6] en 1979.

Lorsque l'épaisseur de la plaque où sont générées ces ondes est de très faible épaisseur permettant un couplage entre les deux faces de la plaque, on appelle ces ondes des ondes de Lamb. Les dispositifs à ondes de Lamb sont très utilisés afin de manipuler des liquides déposés en surfaces. Le but essentiel de ce genre de dispositifs (*cell sorting* ou *drop sorting*) est de déplacer des cellules biologiques ou des gouttelettes dans des directions bien précises. Une autre application est aussi ciblée par ce genre de dispositifs à ondes de Lamb est celle des micro-mélangeurs où des solutions multiphasique sont fortement « secouées » et brassées afin de les mélanger. Cette fonction est fondamentale dans les applications de médication automatique (*Drug Delivery*). Afin de focaliser des ondes de Lamb sur un point focal des *IDT* sont conçues sous forme circulaire.

Notre étude s'intéresse à la conception de telle structure et à une meilleure compréhension de leur comportement. Donc nous allons concevoir ce micro-mélangeur en utilisant des simulations par la méthode « des éléments finis » (*FEM* pour finit élément méthode) en utilisant le logiciel Comsol multiphysique. Ceci en modélisant les phénomènes physique entrant dans ce dispositif.

Le travail présent dans ce mémoire de master a été structure en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art sur la piézoélectricité et les ondes élastiques. En donnant plus d'information sur les dispositifs *SAW* et des structures d'excitation *IDT*.

Dans le deuxième chapitre est réservé à la procédure de conception des transducteurs à ondes de Lamb de formes linéaire et circulaire. Dans un premier stade la modélisation se fera en 2D afin de se concentrer et maîtriser la physique du dispositif. Et dans un second stade, nous allons modéliser nos dispositifs circulaire en 3D afin d'être plus proche du comportement réel.

Nous avons rassemblé dans le dernier chapitre, les principaux résultats de simulation numérique et du comportement de notre dispositif pour finalement conclure notre travail.

Chapitre 1 : Généralités et états de l'art sur la piézoélectricité et les ondes élastiques

Chapitre 1 : Généralités et états de l'art sur la piézoélectricité et les ondes élastiques

1.1 Introduction

Les premières ondes élastiques ont été observées lors de tremblements de terre ou de séismes. Les vibrations engendrées (ondes sismiques) se propagent en effet dans toutes les directions et peuvent causer de très nombreux dégâts aussi bien matériels qu'humains. L'hypocentre est généralement localisé dans les profondeurs de la couche terrestre, alors que l'épicentre est situé en surface à la verticale du foyer.

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques, elles peuvent ainsi traverser un milieu sans le modifier durablement. L'impulsion de départ « pousse » des particules élémentaires, qui, à leurs tours vont « pousser » d'autres particules et reprendre leur place, et ainsi de suite.

1.2 Ondes acoustiques

La propagation d'une onde acoustique se traduit par une variation temporelle d'une série de déformations dans le milieu support de la propagation. Ce comportement vibratoire est dû aux forces d'inertie et celles de rappel élastique qui concourent entre elles en agissant sur les particules du milieu. Ainsi, les caractéristiques d'une onde acoustique dépendent des propriétés élastiques et de la densité du support matériel dans lequel elle se propage.

Sachant qu'un matériau adopte un comportement élastique spécifique suivant la direction des déformations qu'il subit par rapport à son orientation et sa structure cristallographique, les propriétés de l'onde seront déterminées par sa direction de propagation et sa polarisation. Dans un milieu homogène isotrope par exemple, si l'onde élastique se propage sans rencontrer d'obstacle, elle garde ses propriétés physiques tout au long de son parcours. Autrement dit, si les dimensions de ce milieu sont supposées infinies dans toutes les directions de l'espace, comparées aux distances parcourues par le déplacement de l'onde, celle-ci pourra alors se propager dans le volume du milieu. Ses propriétés physiques ne dépendront que de sa polarisation quelle que soit la direction de propagation. On parle alors d'une onde de volume. Dans le cas des milieux solides isotropes, la

vitesse des ondes à polarisation longitudinale est supérieure à celle des ondes à polarisation transverse.

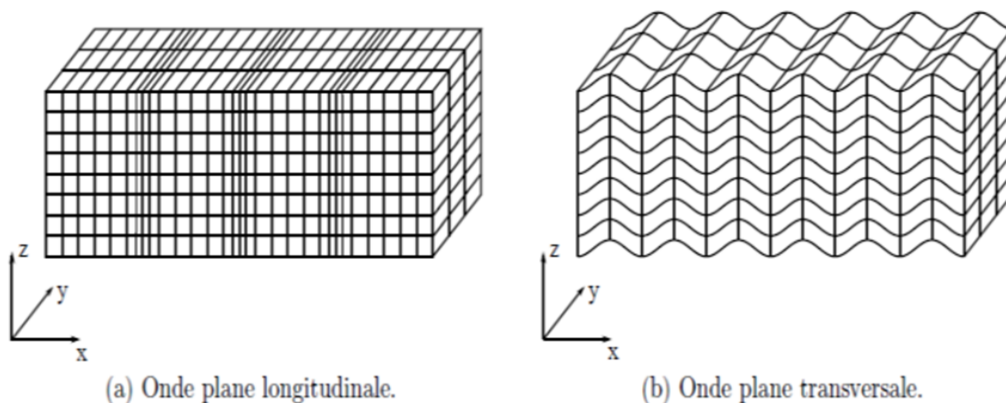


Figure 1.1: Polarisation des ondes [7].

Les ondes acoustiques/élastiques peuvent aussi se propager le long d'une surface libre délimitant un milieu élastique. On parle alors d'onde acoustique de surface (*Surface Acoustic Wave (SAW)*). Lord Rayleigh [8] était le premier à mettre en évidence l'existence des ondes de surface en 1885. Il remarqua alors que les ondes issues des tremblements de terre peuvent aussi se propager parallèlement à la surface de la terre sous forme d'ondes localisées en surface avec une profondeur de pénétration de l'ordre d'une longueur d'onde. Ces ondes de surface se caractérisent par une décroissance exponentielle de leurs champs de déplacement depuis la surface vers la profondeur. Elles ont une polarisation elliptique qui résulte de la superposition d'un mode longitudinal et d'un mode transverse, déphasés d'un quart de longueur d'onde (polarisation elliptique). L'intérêt porté aux ondes acoustiques de surface, connues aussi sous le nom d'ondes de Rayleigh, s'est accru à partir des années soixante et soixante-dix pour la fabrication de dispositifs à ondes de surface. Ainsi, de multiples applications qui concernent les domaines de télécommunication, les radars, le filtrage, les capteurs [7]...etc.

Finalement, le comportement des ondes acoustiques change au voisinage des frontières du milieu dans lequel elles se propagent, surtout lorsque les dimensions de celui-ci deviennent proches de la longueur d'onde. En 1916, Horace Lamb a exploré les propriétés des ondes élastiques dans une plaque isotrope à frontières libres. Une plaque solide se comporte comme un guide d'ondes élastiques dans les

directions parallèles à ses surfaces libres. Les ondes guidées au niveau de la plaque sont la résultante d'un couplage entre les ondes de surface, guidées sur chaque côté de la plaque quand la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la plaque en question [9]. Le caractère dispersif de ces ondes dans la plaque, appelées ondes de Lamb, est très complexe, mais nous pouvons en gros distinguer entre deux catégories de modes. D'abord, les modes ayant une distribution de champ de déplacement symétrique, puis ceux avec une distribution antisymétrique par rapport au plan parallèle aux surfaces libres de la plaque et coupant celle-ci au milieu (Figure (1.2)). Les modes symétriques ont un champ de déplacement longitudinal dominant, alors que les antisymétriques ont une polarisation transverse dominante.

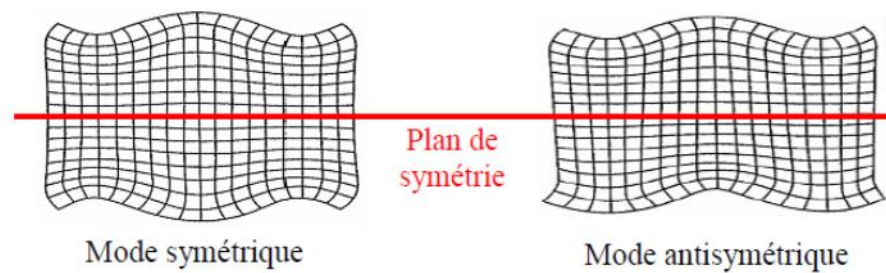


Figure 1.2.: Modes de Lamb symétrique et antisymétrique dans une plaque d'épaisseur finie [9].

1.3 Type d'onde élastique

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 grands 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 surface.

1.3.1 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 [10] 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 Tonde 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.

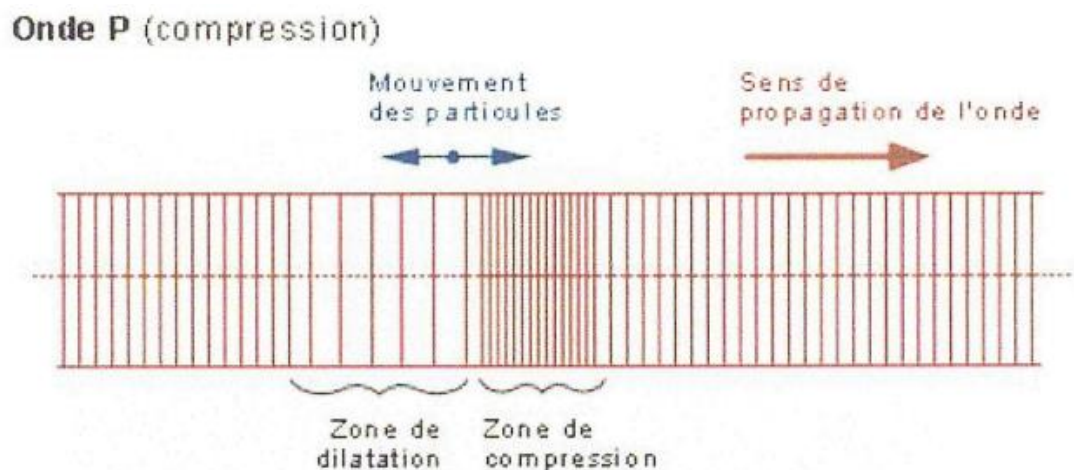


Figure 1.3:Représentation schématique des ondes P [10].

Les ondes S (Secondaires) [10] 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.

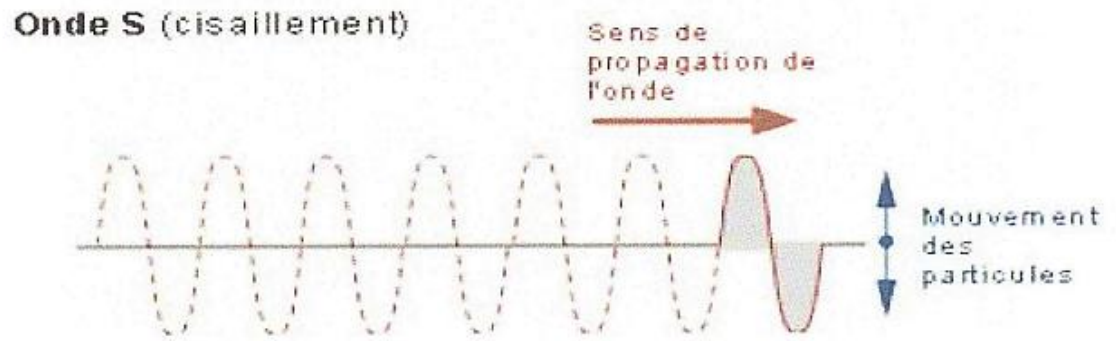


Figure 1.4: Représentation schématique des ondes S [10].

1.3.2 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 :

1.3.2.1 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 composants horizontaux du sismomètre. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices.

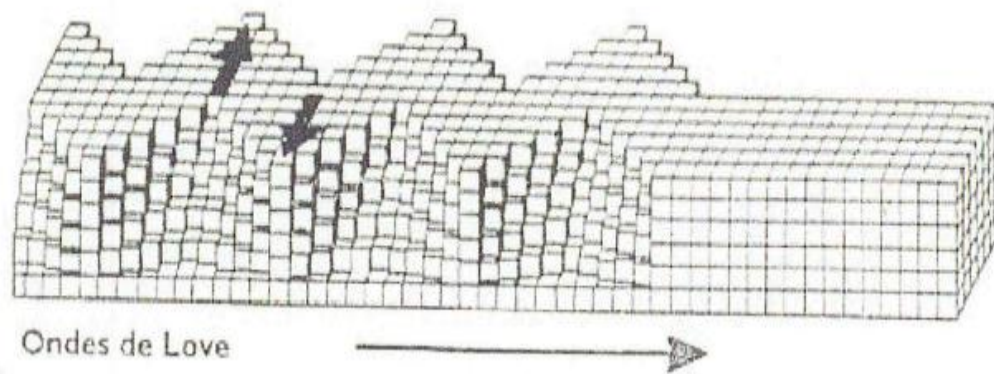


Figure 1.5: Représentation schématique des ondes L [11].

1.3.2.2 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.

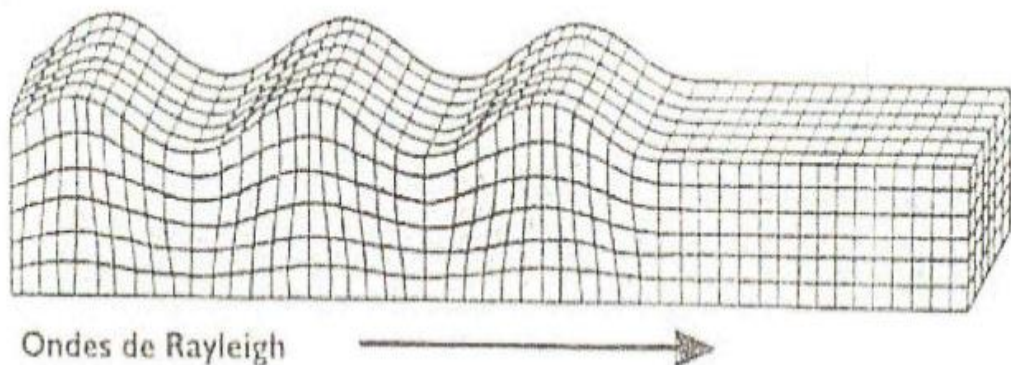


Figure 1.6: Représentation schématique des ondes [11].

1.3.2.3 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.

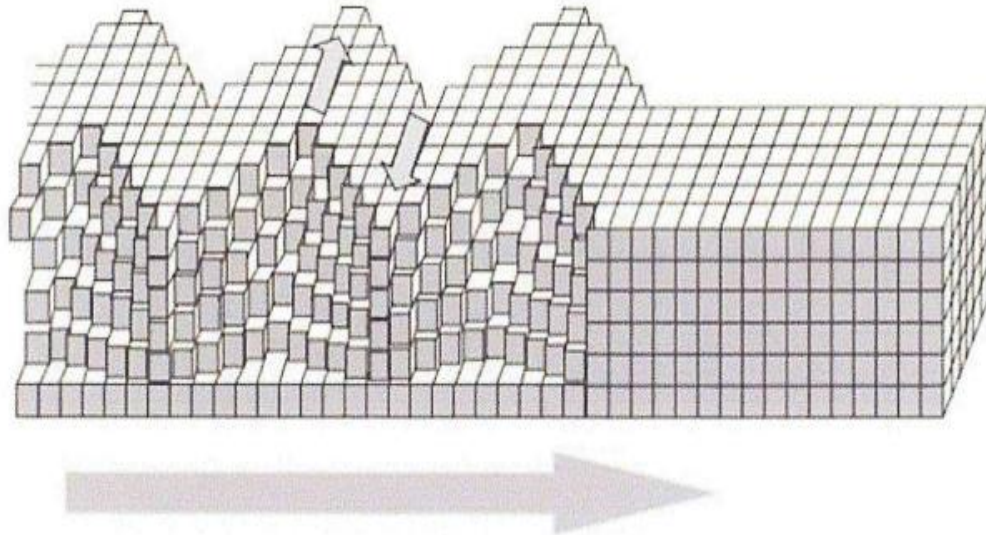


Figure 1.7: Onde de surface de polarisation [11].

1.3.2.4 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 [12].

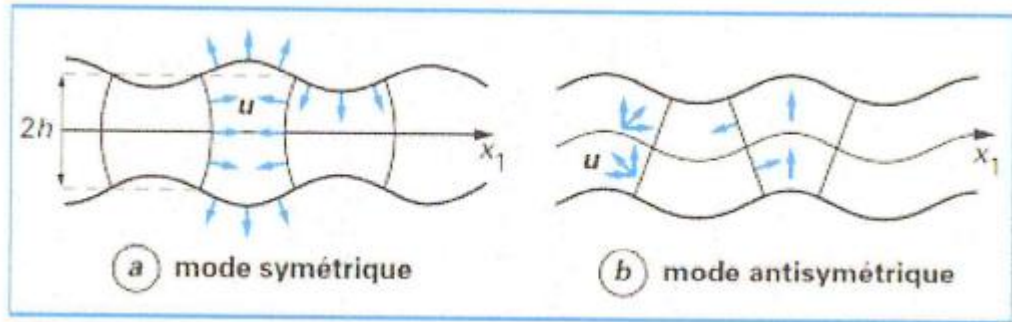


Figure 1.8: Onde de Lamb [11].

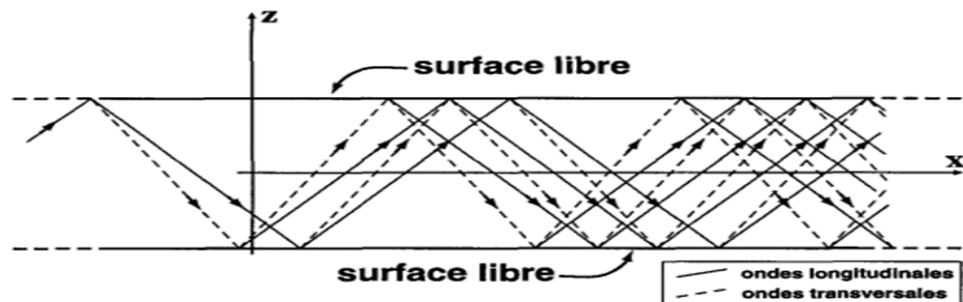


Figure 1.9: Formation d'une onde de Lamb [13].

1.3.2.4.1 Equation de Lamb

Considérons une onde de Lamb se propageant le long d'une plaque mince d'épaisseur ($e=2d$) dans la direction des x positifs figure (1.10). [14]

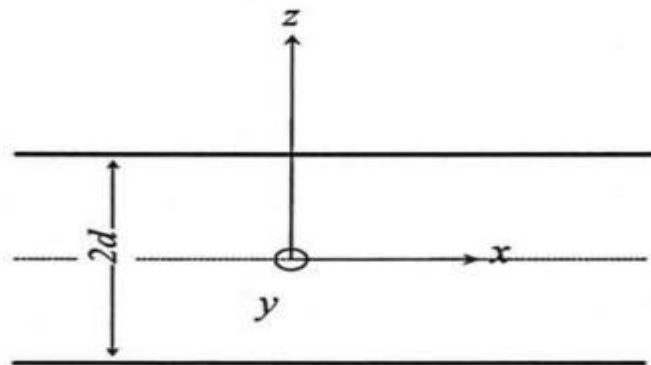


Figure 1.10: Système de coordonnées utilisé pour la plaque libre [14].

Les conditions aux limites appliquées sur les faces libres en contraintes de la plaque permettent d'écrire l'équation caractéristique (équations de Rayleigh-Lamb) [13-15].

$$(k^2 + s^2)^2 \cos(qd) \sin(sd) + 4k^2 qs \sin(qd) \cos(sd) = 0 \quad (1.1)$$

$$(k^2 + s^2)^2 \sin(qd) \cos(sd) - 4k^2 qs \cos(qd) \sin(sd) = 0 \quad (1.2)$$

$$s^2 = k^2 - k_T^2 \quad , \quad q^2 = k^2 - k_L^2$$

Avec k est le nombre d'onde, k_L (k_T) est le nombre d'onde longitudinal (transversal).

Les équations 1 et 2 décrivent deux groupes d'ondes, qui peuvent se propager dans la plaque d'une façon indépendante l'une de l'autre, puisque chacune satisfait les équations d'onde et les conditions aux limites de la plaque. Quand le vecteur d'onde k est calculé à partir de l'équation 1, les ondes sont appelés symétriques. Les ondes antisymétriques sont obtenues à partir du vecteur d'onde k calculé à l'aide de l'équation 2.

1.3.2.4.2 Courbes de dispersion

La résolution numérique des équations (1.1) et (1.2) permet de trouver les courbes de dispersion des modes de Lamb symétriques et antisymétriques.

Dans la figure 1.11, pour un produit «fréquence-épaisseur» donné, chaque racine des équations 1.1 et 1.2 détermine un mode de propagation, représenté par une courbe du graphique. On peut noter que seulement les deux modes d'ordre le plus bas, le mode antisymétrique a_0 et le mode symétrique s_0 , ne présentent pas de fréquence de coupure.

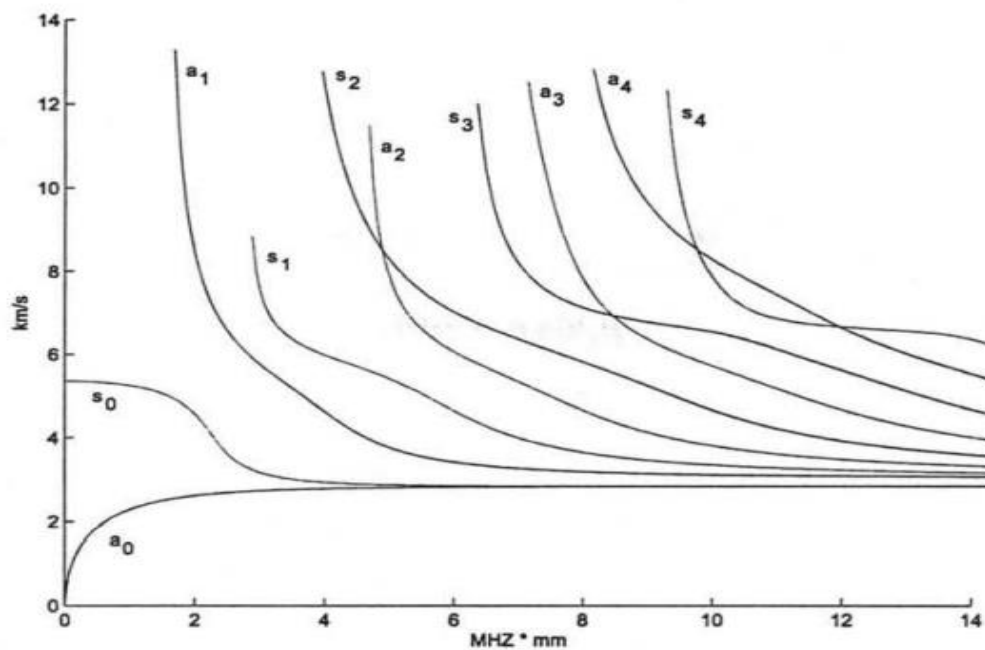


Figure 1.11: Vitesses de phase des modes de Lamb symétriques (s_0) et Antisymétriques (a_0) en fonction du produit «fréquence-épaisseur» [16].

1.3.2.4.3 Champ de déplacement

Les expressions des déplacements u_{sx} et u_{sy} pour les modes symétriques sont données par :

$$\begin{aligned}u_{sx} &= Ak \left[\frac{\cos qy}{\sin qd} - \frac{2qs}{k^2 + s^2} \frac{\cos sy}{\sin sd} \right] ie^{[kx-\omega t]} \\u_{sy} &= Aq \left[\frac{\sin qy}{\sin qd} - \frac{2k^2}{k^2+s^2} \frac{\sin sy}{\sin sd} \right] ie^{[kx-\omega t]} \quad (1.3)\end{aligned}$$

Les expressions des déplacements u_{ax} et u_{ay} pour les modes antisymétriques sont données par :

$$\begin{aligned}u_{ax} &= Ak \left[\frac{\sin qy}{\cos qd} - \frac{2qa}{k^2 + a^2} \frac{\sin ay}{\cos ad} \right] ie^{[kx-\omega t]} \\u_{ay} &= Aq \left[\frac{\cos qy}{\cos qd} - \frac{2k^2}{k^2+a^2} \frac{\cos ay}{\cos ad} \right] ie^{[kx-\omega t]} \quad (1.4)\end{aligned}$$

A partir de l'équation 1.3, on peut noter que le déplacement de ce groupe d'ondes est symétrique par rapport au plan médian ($y=0$) de la plaque. Le déplacement u_{sx} a le même sens, et le déplacement u_{sy} au le sens opposé sur la surface supérieure par rapport à la surface inférieure.

L'équation 1.4 décrit un groupe d'ondes dont le déplacement est antisymétrique par rapport au plan médian de la plaque. u_{ax} a le sens opposé, et le déplacement u_{ay} a le même sens sur la surface supérieure par rapport à la surface inférieure, (figure 1.12). Les ondes du premier groupe sont appelées ondes de Lamb symétriques, et les ondes du deuxième groupe sont appelées ondes de Lamb antisymétriques.

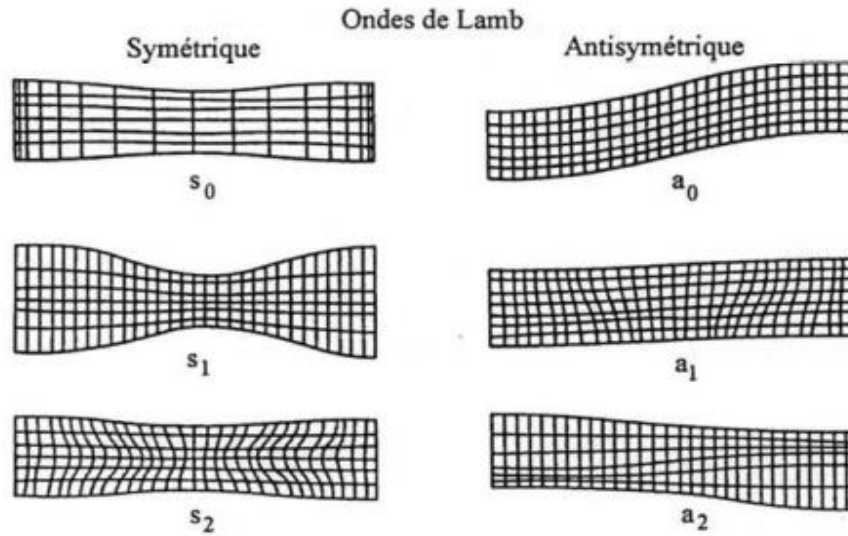


Figure 1.12: Distribution de déplacement des particules pour les trois premières modes symétriques (à gauche) et antisymétriques (à droite) d'une onde de Lamb sur une plaque isotrope [16].

1.4 Ondes dans les milieux périodiques

La propagation d'une onde est décrite mathématiquement par une équation (ou un système d'équations couplées) nommée à propos l'équation d'ondes. Il s'agit d'une équation aux dérivées partielles du second ordre, dont la forme dépend de la nature des ondes considérées.

Le matériau dans lequel se propage l'onde est décrit quant à lui par ses propriétés physiques (comme sa permittivité, sa densité, son élasticité, etc.). Selon le problème traité, les propriétés physiques sont représentées mathématiquement par des scalaires ou des tenseurs suivant que le matériau est isotrope ou anisotrope, par exemple pour un matériau photonique, la permittivité varie périodiquement avec les coordonnées d'espace, telle que :

$$\vec{\varepsilon}_r(\vec{r}) = \vec{\varepsilon}_r(\vec{r} + m.\vec{a}_1 + n.\vec{a}_2 + p.\vec{a}_3) \quad (1.5)$$

Avec \vec{r} : le vecteur position, m, n et p trois entiers et $(\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3)$ les vecteur de base de la maille cristalline du réseau.

Les travaux du mathématicien Gaston Floquet en 1883 ont permis d'établir l'existence d'une solution des système d'équations différentielles coefficients périodiques qui présentent une périodicité de seconde espèce [4], à savoir : la

solution évaluée en deux points séparés l'un de l'autre d'une distance égale au pas du réseau est identique à un déphasage près (de type $e^{\theta i}$).

Ces travaux sont repris par Félix Bloch en 1928 qui démontra que la fonction d'onde d'un électron dans un potentiel périodique présente une périodicité de la seconde espèce selon la terminologie de Floquet. L'opérateur de translation et l'Hamiltonien ont une base commune (ils «commutent»), les solutions de l'Hamiltonien après translation diffèrent d'un facteur de phase. Ce résultat se généralise aux problèmes de propagation pour des ondes de nature différente, l'Hamiltonien étant remplacé par un opérateur de propagation.

De ces travaux découlent le théorème de Bloch-Floquet pour les ondes dans les milieux périodiques, qui stipule qu'une fonction propre de l'opérateur de propagation est décrite comme le produit d'une onde plane de vecteur d'onde k et d'une fonction périodique de même période que celle du réseau. Ou, de façon équivalente, par la superposition linéaire d'une infinité d'ondes planes de même vecteur d'ondes espacées les unes des autres par un vecteur du réseau réciproque.

1.5 Transduction piézoélectricité

Signalé en 1880 par Pierre et Jacques Curie, l'effet piézoélectricité direct décrit la génération de charges électriques sur la surface de certains solides cristallins causée par l'application d'une contrainte mécanique. Le mot «piezo» provient du grec et signifie la pression [17]. A l'inverse, l'apparition d'une déformation mécanique résultant de l'application d'une tension électrique externe est appelée effet piézoélectrique inverse. Cet effet a été prédit mathématiquement par Lippman en 1881 et confirmé expérimentalement par la suite par les frères Curie [18].

L'origine physique de la piézoélectricité provient de l'asymétrie du réseau cristallin qui, sous l'effet de la déformation, est le siège d'une séparation des centres de gravité des charges positives et négatives, c'est la raison pour laquelle ces matériaux sont dits non-Centro symétriques. La polarisation résultante génère un champ électrique qui peut être utilisé pour transformer l'énergie mécanique fournie, par la déformation du matériau, en énergie électrique [19].

Lorsqu'on fournit une énergie électrique au matériau piézoélectrique, celle-ci sera en partie stockée sous forme mécanique, le reste peut être stocké sous une

forme électrique, mais seule l'énergie mécanique stockée sera utile à une éventuelle reconversion vers l'énergie électrique [20].

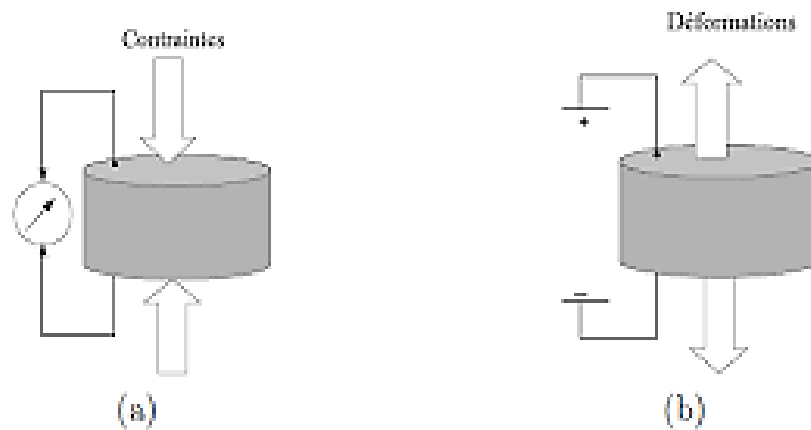


Figure 1.13: L'effet Piézoélectrique direct et inverse dans un matériau [19].

(a) : Effet direct: Sous l'effet d'une contrainte, tension apparait des charges.

(b) : Effet indirect: L'application d'une tension engendre une déformation.

1.6 Quelques matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques peuvent être regroupé sen trois classes principales [21].

- Les polymères piézoélectriques
- Les céramiques piézoélectriques
- Les cristaux piézoélectriques

1.6.1 Les polymères piézoélectriques

Découverts par Kawai en1969, les films polymères semi-cristallins de type poly fluorure de Vinilydène PVDF présentent des propriétés piézoélectriques lorsqu'ils sont étirés sous un champ électrique. Les premières applications comme filtres à ondes de surface sont apparues au début des années 1980 [21].

1.6.2 Les céramiques piézoélectriques

Ce sont des céramiques massives découpées et noyées dans des résines [22].

1.6.3 Les cristaux piézoélectriques

Le quartz (SiO_2) est le plus connu des cristaux piézoélectriques, malheureusement il a des propriétés peu intéressantes pour les applications telles que les générateurs ultrasonores. Ses principaux défauts sont sa permittivité diélectrique, et ses constantes piézoélectriques qui sont relativement faibles, ainsi que son coefficient de couplage électromécanique k^2_{eff} [23]. On cite également les matériaux piézoélectriques cristallins tels que l'oxyde de zinc (ZnO), le nitrure d'Aluminium (AlN), etc., qui ont des propriétés très intéressantes.

1.7 Dispositifs à ondes de surface à base de transducteurs inter-digité

Le choix de matériau piézoélectrique pour les *IDT* du *SAW* se fait en fonction de l'application [24]. En plus de la vitesse de propagation des ondes de surface, et de l'impédance élastique, il faut tenir compte de différents paramètres importants

Le coefficient du couplage électromécanique (K): ce coefficient traduit l'efficacité de la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Il caractérise les matériaux piézoélectriques et peut être mesuré en s'appuyant sur la relation suivante :

$$K^2 = \frac{2(v_0 - v_m)}{v_0} \quad (1.6)$$

Où v_0 et v_m sont respectivement les vitesses des ondes élastiques de surface mesurées respectivement sur une surface libre et sur une surface métallisée.

Le coefficient de température/fréquence (TCF Température Coefficient Fréquence) il traduit la dérivée de la fréquence de résonance sous l'effet de la température

L'histoire, sous forme d'un arbre généalogique, des dispositifs *SAW* est résumée dans la Figure (1.14) [25-26].

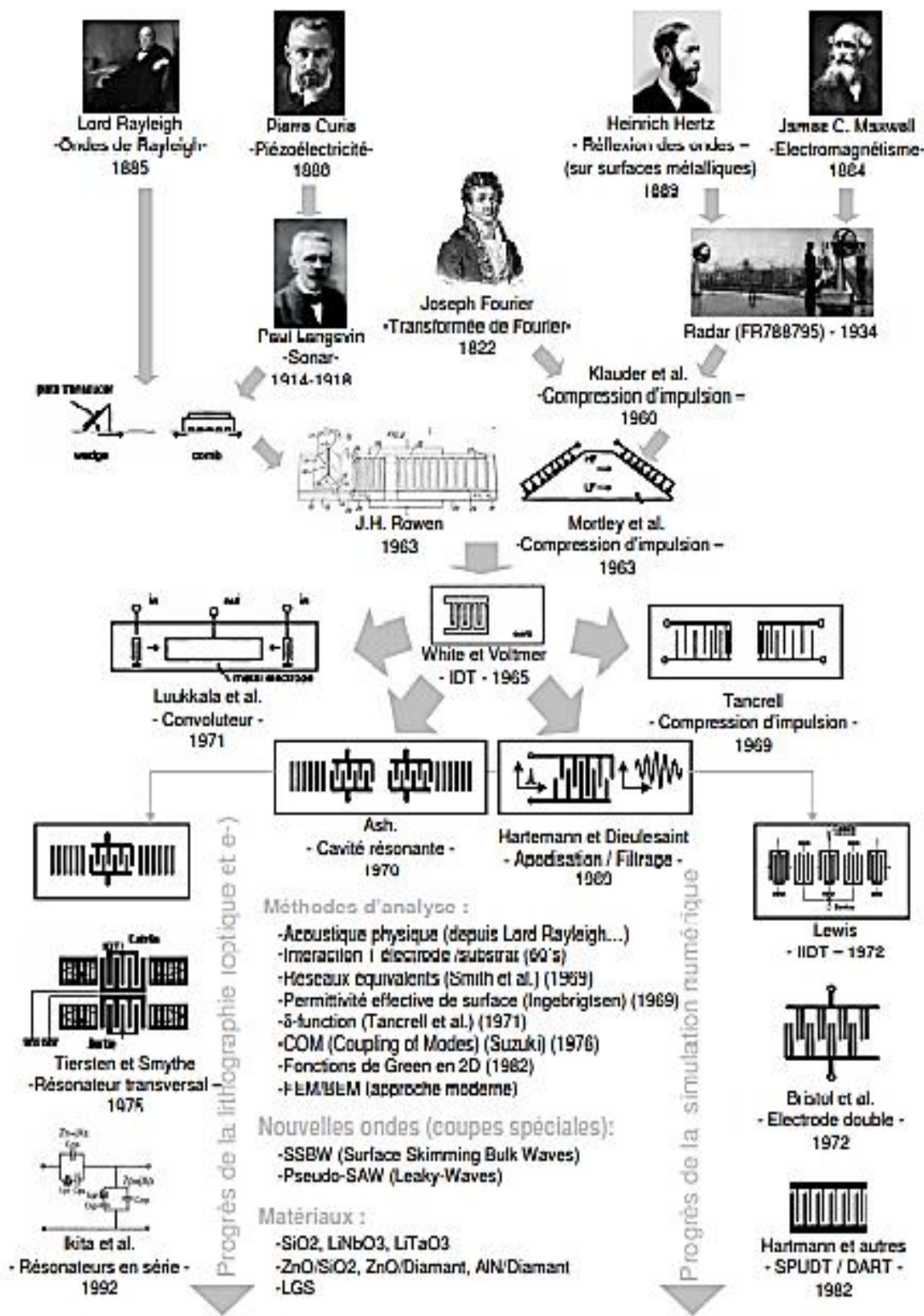


Figure 1.14: L'histoire des dispositifs SAW [25].

1.8 Le transducteur inter-digité :

1.8.1 Description du transducteur inter-digité :

Le *IDT* est constitué de deux électrodes métalliques sous forme de peignes Inter digités, où l'un est connecté à la masse et l'autre est porté à la tension électrique désirée [27].

L'invention du transducteur interdigital (*IDT*) a permis l'utilisation de la technologie microélectronique planaire, de la photolithographie et des salles blanches pour la fabrication en masse des capteurs SAW [28]. Le terme SAW désigne l'acronyme anglais "*Surface Acoustic Wave*" que l'on peut traduire par « Onde Acoustique de Surface »

1.8.2 La conception du transducteur inter-digité :

Les deux peignes métalliques composant le *IDT* (figure 1.15) sont obtenus par dépôt du métal choisi sur la surface de la couche piézoélectrique, suivi de sa gravure de sorte à obtenir la géométrie finale désirée [27-29]. La période de l'*IDT* a pour rôle à la fois de contrôler la fréquence de résonance [30] et de déterminer la longueur d'onde du mode de vibration qui se propage dans le dispositif acoustique [29].

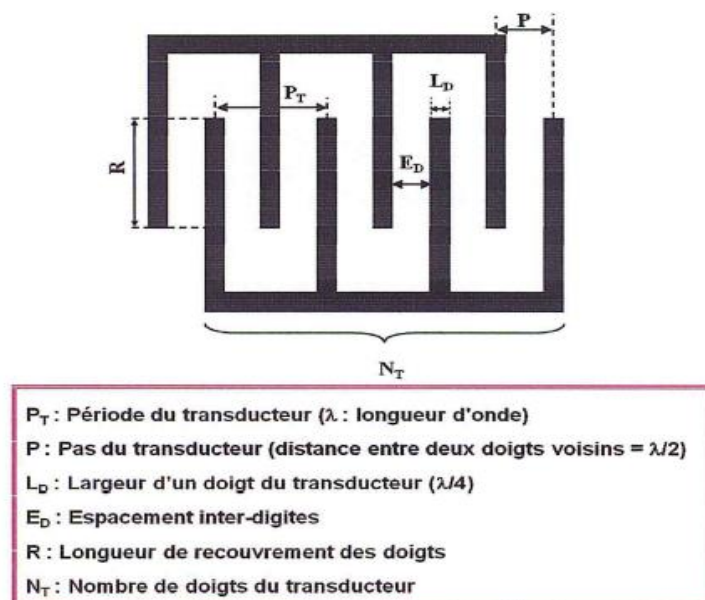


Figure 1.15: Schéma de la vue de dessus d'un transducteur inter digité [27].

1.8.3 Les différentes configurations du transducteur inter-digité :

Les *IDT* peuvent se décliner sous quatre configurations (la figure 1.16). Il y a d'abord les cas où le *IDT* est déposé sur la surface supérieure de la couche piézoélectrique, avec (c) ou sans (a) électrode flottante sur la face opposée. Il y a ensuite les cas où le *IDT* est déposé sur la couche diélectrique, avec (d) ou sans (b) électrode flottante sur la face opposée. Shih et al [31] ont proposé d'ajouter quatre autres configurations dans lesquelles une électrode flottante est insérée entre la couche diélectrique et le substrat.

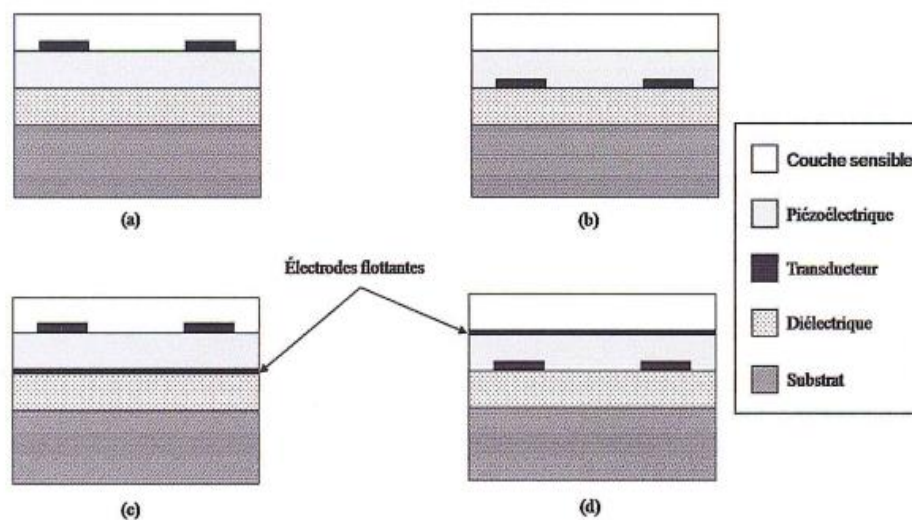


Figure 1.16: Les différentes configurations des transducteurs inter digités (*IDT*) [31].

(a) *IDT* déposé sur la couche piézoélectrique sans électrodes flottantes, (b) *IDT* déposé sur la couche diélectrique sans électrodes flottantes, (c) comme en (a) mais avec des électrodes flottantes sur la couche diélectrique, (d) comme en (b) mais avec des électrodes flottantes sur la couche piézoélectrique

1.9 Dispositifs à onde de surface SAW : Définition et principe de fonctionnement

La structure SAW (figure 1.17), toujours utilisée à l'heure actuelle, est constituée d'un substrat piézoélectrique sur lequel est déposé un motif d'excitation en forme de peigne inter-digité (*IDT*) [32]. Plusieurs matériaux ont été exploités sous

forme massive (le niobate de lithium, les tantalate de lithium, et le quartz) ou stratifiée (oxyde de zinc sur silicium, nitrure d'aluminium sur diamant ou saphir etc..).

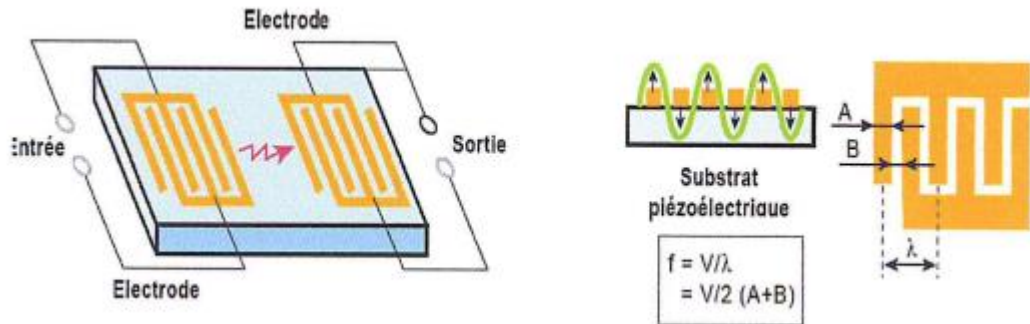


Figure 1.17: Résonateurs de SAW [32].

Les transducteurs inter-digités permettent d'exciter et/ou de détecter les ondes élastiques de surface (SAW) [33]. Ils sont constitués d'électrodes métalliques en forme de peignes (souvent en or ou en argent), composées de doigts imbriqués, qui sont déposées sur un substrat piézoélectrique.

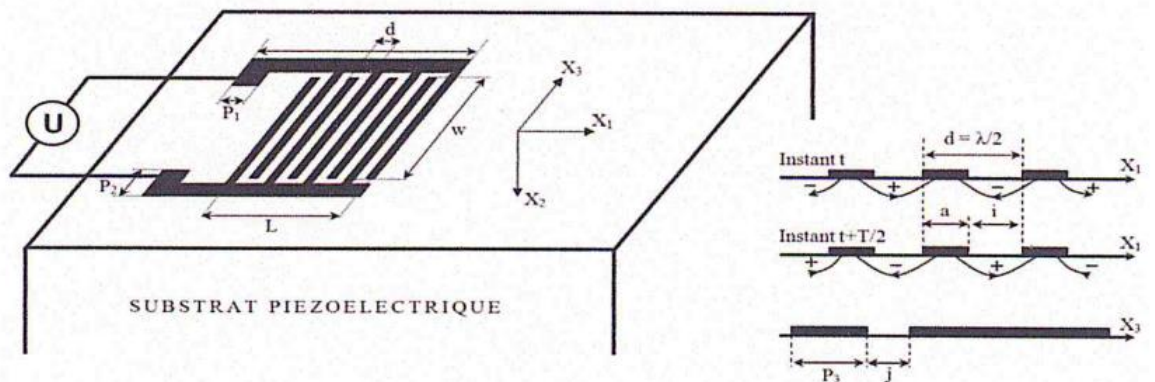


Figure 1.18: Transducteur inter-digité déposé sur la surface d'un substrat piézoélectrique [34].

Lorsqu'une tension U est appliquée entre les deux électrodes, le champ électrique créé engendre des compressions et des dilatations, au voisinage de la surface de la lame piézoélectrique, donnant naissance à des ondes élastiques de surface. Le transducteur se comporte alors comme un réseau de sources ultrasonores [35-36].

Lorsque la tension appliquée est sinusoïdale, les vibrations s'ajoutent de façon constructive seulement si la distance entre les doigts est égale à une demi-longueur d'onde élastique produisant ainsi des ondes élastiques de surface. Elles sont émises de chaque côté du transducteur [37]. La fréquence f_0 qui correspond à cet effet cumulatif est appelée fréquence de synchronisme ou fréquence de résonance Définie par :

$$f_0 = \frac{v_R}{2d} = \frac{v_R}{\lambda} , \text{ avec } d = \frac{\lambda}{2} \quad (1.7)$$

d est la périodicité du système d'électrode, λ est la longueur d'onde SAW à f_0 et v_R la vitesse de propagation des ondes SAW dans le substrat.

Si la fréquence s'écarte de cette valeur, l'interférence entre les signaux élastiques émis par les différentes paires de doigts n'est plus totalement constructive et le signal résultant est moindre. Il apparaît ainsi que la bande passante d'un transducteur est d'autant plus étroite, et d'autant plus intense qu'il comporte plus de doigts.

Grâce à la réciprocité du phénomène piézoélectrique, il est possible de réceptionner l'onde qui s'est propagée [38], sous forme électrique à l'aide d'un autre transducteur inter digité récepteur du même type. Le signal ainsi reçu est retardé et atténué par rapport au signal émis. C'est pourquoi l'ensemble du système de génération-réception est qualifié de ligne à retard.

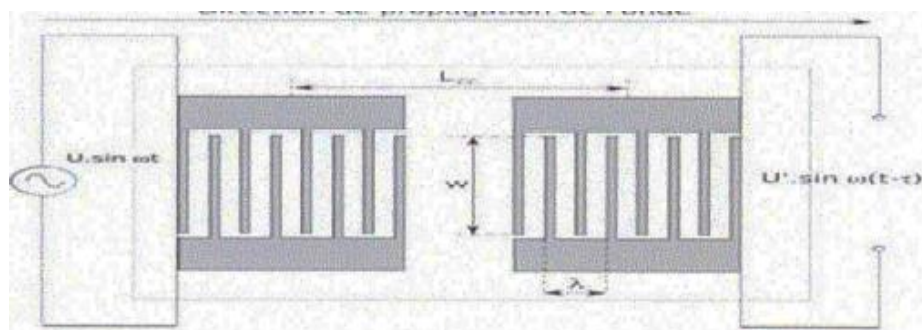


Figure 1.19: Principe de fonctionnement et caractéristiques d'un dispositif à ondes élastiques de surface [39].

W : est la largeur de recouvrement, V_R est la vitesse de propagation, L_{cc} : représente la distance centre à centre des *IDT*, et est la longueur d'onde. $\tau = \frac{L_{cc}}{V_R}$ Est le retard que fait l'onde pour aller des *IDT* émetteurs vers les *IDT* récepteurs.

Chapitre 2: modélisation et méthode de simulation

Chapitre 2: modélisation et méthode de simulation

2.1 Introduction

Nous décrivons dans ce deuxième chapitre la méthode de simulation par éléments finis (*FEM*), avec le logiciel Comsol multiphysique sur les dispositifs à base de transducteur inter-digité à onde de Lamb.

Les outils de simulation par *FEM* sont plus que nécessaire car ils permettent la prévision des valeurs de certain paramètres technologique avant même de passer à l'expérimentation et la réalisation du composant la simulation permet, en outre, un gain considérable en temps et en cout du matériel, tout en réduisant le risque d'erreur.

2.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (*FEM*) a été introduite en 1956 par Turner [40]. L'objectif était de trouver des solutions approximatives aux problèmes qui sont difficiles à résoudre analytiquement et ayant des domaines complexes soumis à des conditions aux limites. Le principe de la méthode *FEM* est basé sur la décomposition du domaine de la structure (3D, 2D, 1D), à l'aide des «fonctions de forme des éléments finis», en un nombre fini de sous-domaines de faibles dimensions devant la longueur d'onde d'intérêt nommés «éléments» (de forme tétraédrique, prismatique, hexaédrique ou pyramidale) [43], ces éléments sont en continuité sur les limites entre eux. Chaque élément du réseau est connecté à un autre élément voisin par les nœuds communs. Cette situation est représentée dans la figure (2.1) La modélisation par des éléments finis consiste à résoudre l'équation de la dynamique, de la piézoélectricité ou autre, sur de petits éléments. Dans chaque élément, les solutions recherchées sont développées sur un ensemble de fonctions de base. D'un point de vue numérique, la solution approximative systématique de chaque élément est construite par l'application des méthodes vibrationnelles [44]. Le choix des fonctions de base est dicté par le nombre de degrés de liberté. La projection des équations différentielles sur les fonctions de base, dans chacun des éléments finis, ramène le problème à un système d'équations linéaires. Concernant, les interfaces hétérogènes, les conditions aux limites assurent l'assemblage des matrices élémentaires en une matrice globale du système complet. Les différents

types d'éléments finis qui sont disponibles dans Comsol sont éléments finis de Lagrange et éléments finis nodaux iso-paramétriques.

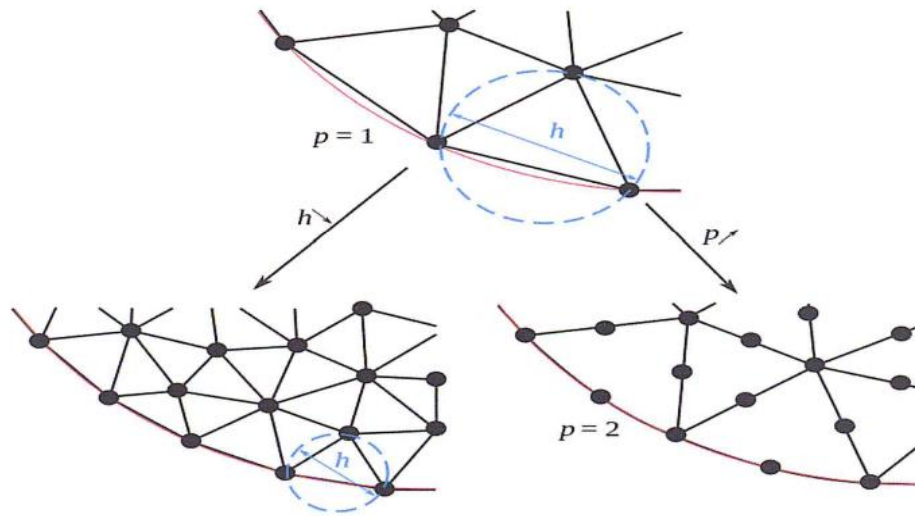


Figure 2.1: Décomposition du domaine en éléments [44].

2.3 Description du logiciel Comsol Multiphysique

COMSOL Multi Physique est un logiciel destiné à la résolution des systèmes d'équations différentielles, décrivant un ou plusieurs phénomènes physiques couplés ou découplés, en utilisant la méthode des éléments finis. Ainsi, il est possible de modéliser les phénomènes multi-physiques tels que la déformation élastique des matériaux, l'écoulement des fluides, l'électromagnétisme et la diffusion de la chaleur, etc. avec une erreur acceptable. On peut également choisir différent solveurs numériques [40]. Le type d'analyse peut être, stationnaire, harmonique (domaine fréquentiel), modale (détermination des fréquences propres) ou même transitoire (méthode de la réponse impulsionnelle). COMSOL Multi physiques contient plus de 25 modules, nous citons ici l'exemple (le module AC/DC, le module élastique, batteries et piles à combustible, le module d'importation CAD, le module de corrosion le module d'électrolyse, l'électrochimie, la fatigue, le module *MEMS*, la mécanique, le fluide, le thermique ainsi que le module chimique etc.) Le temps de simulation requis (de quelques minutes à plusieurs jour) est très variable, il est fonction de la puissance et type de la machine de calcul et il est aussi

fonction de la dimension du problème, à savoir 1D, 2D, 3D, ainsi que le type de maillage (nombre de domaines et nombre de nœuds).

Les étapes du processus de modélisation sur ce logiciel, dont une vue de l'interface graphique est présentée sur la Figure 2.3, se déroulent de la manière suivante :

- ✓ Choisir la dimension de la géométrie du modèle (1D, 2D et 3D).
- ✓ Choisir le domaine physique de l'étude (AC/DC, acoustique, mécanique des structures, transfert de chaleur...).
- ✓ Choisir le type d'étude pour le calcul (fréquentielle, temporelle, stationnaire, ...).
- ✓ Construire le modèle géométrique du dispositif à étudier.
- ✓ Définir les propriétés physiques des matériaux et les conditions aux limites.
- ✓ Construire le maillage de la structure.
- ✓ Résoudre et afficher les résultats : Analyse des résultats et post traitement.

Notons que ce logiciel permet de simuler plusieurs domaines physiques en même temps et pour la même étude [41-42].

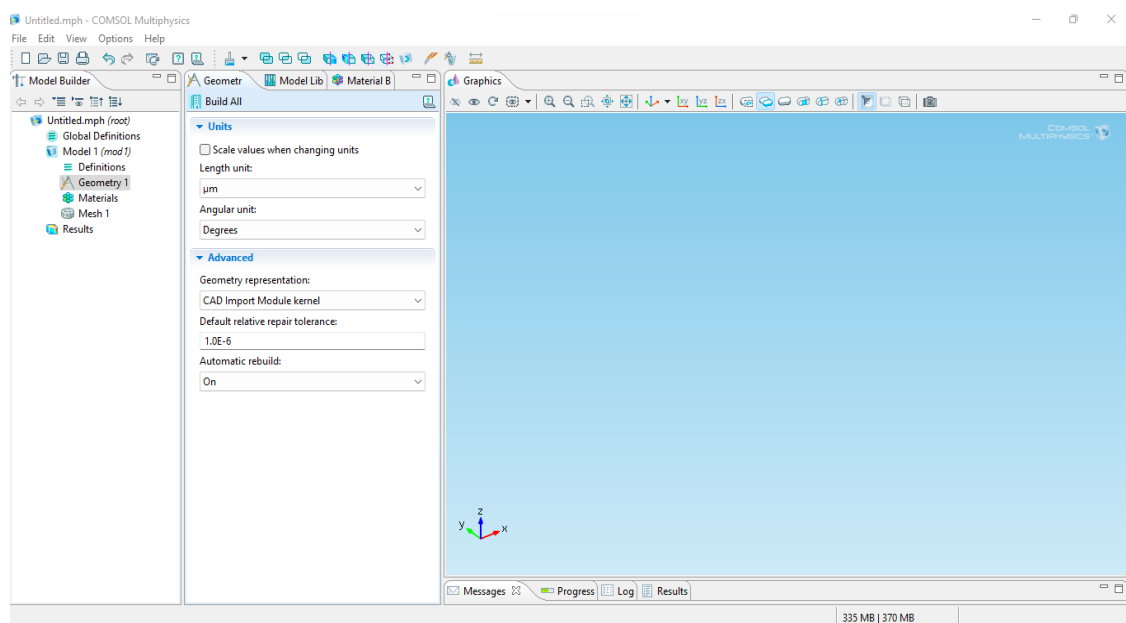


Figure 2.2: Interface du logiciel COMSOL Multi physique

2.4 La géométrie de model linéaire (2D)

La géométrie 2D du modèle est conçue par la création de plusieurs blocs rectangulaires montres dans la figure 2.3 avec la zone centrale (gap)= 55 μm :

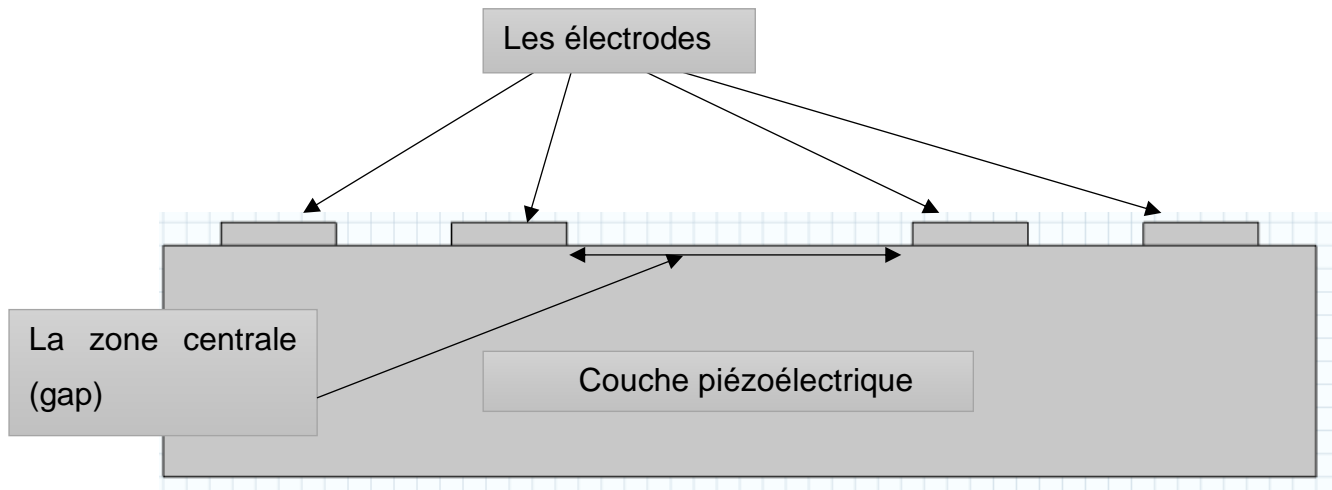


Figure 2.3 : La géométrie 2D du modèle

Tableau 2.1 : les paramètres de la géométrie 2D du modèle

	Largeur	Hauteur
Couche piézoélectrique	$385 + \text{gap } \mu\text{m}$	$11 \mu\text{m}$
Electrode	$55 \mu\text{m}$	$0,2 \mu\text{m}$
La distance entre les électrodes	$55 \mu\text{m}$	

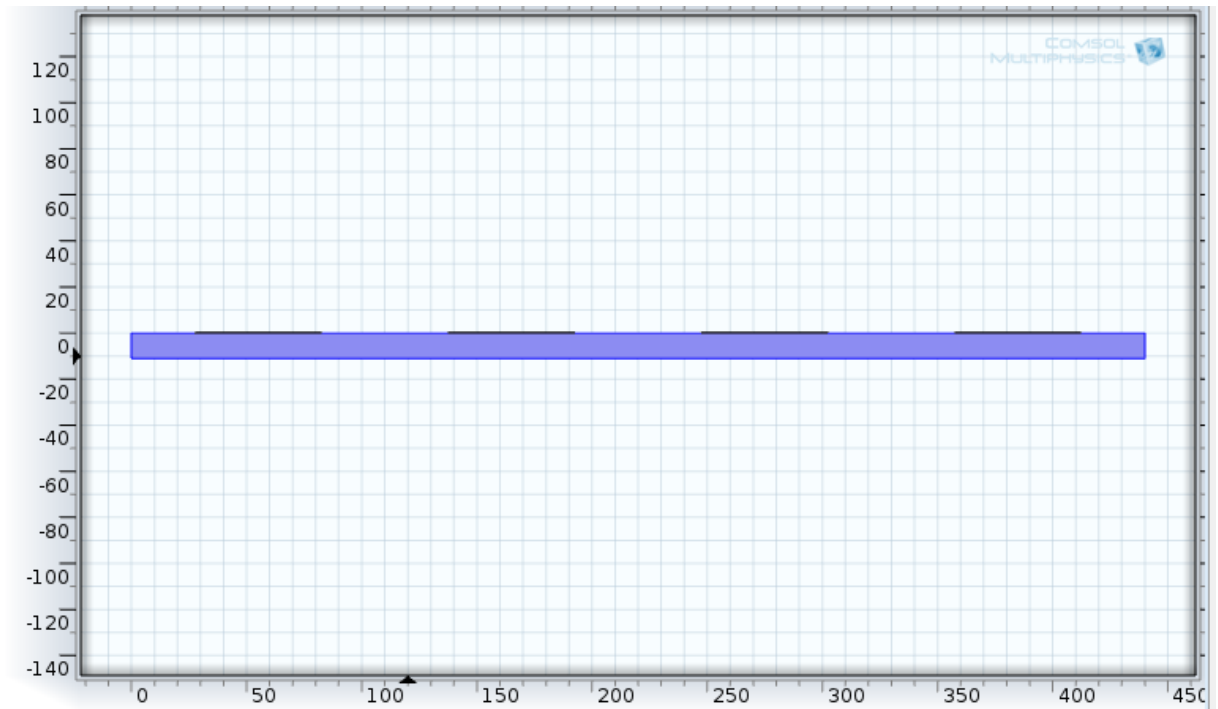


Figure 2.4 : Géométrie pour le substrat piézoélectrique

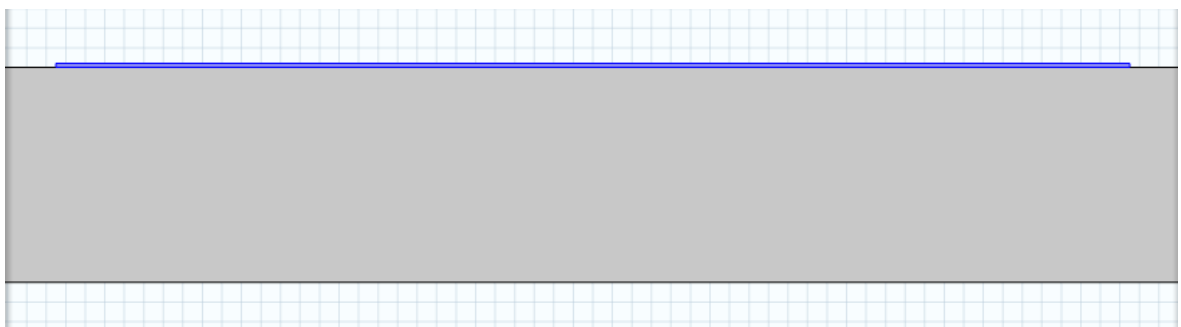


Figure 2.5 : Géométrie des électrodes

2.5 Définitions des matériaux

Une des étapes importantes est le choix des matériaux utilisés, notre modèle est composé de deux matériaux différents : lithium niobate (LiNbO₃), l'or (Au) :

2.5.1 Niobate de lithium

Niobate de lithium (LiNbO₃) est le matériau piézoélectrique utilisé dans cette simulation. Le tableau 1 résume quelques propriétés nécessaires pour notre travail tels que la densité, l'élasticité la matrice de couplage et la permittivité relative :

Tableau 2.2 : les propriétés de matériaux Niobate de lithium

Propriété	Value
Densité	4674
Matrice de couplage (ordre : xx, yy,zz,yz,xz,xy)	{1.33, 0, 0, 0.23, 0, -2.5, 0.23, 0, 2.5, 0, -2.5, 0, 0, 0, 3.7, 0, 3.7, 0}
matrice d'élasticité (ordre : xx, yy,zz,yz,xz,xy)	{2.424e11, 0.752e11, 2.03e11, 0.752e11, 0.573e11, 2.03e11, 0[Pa], 0[Pa], 0[Pa], 0.752e11, 0[Pa], 0.085e11, -0.085e11, 0[Pa], 0.595e11, 0[Pa], 0[Pa], 0[Pa], 0.085e11, 0[Pa], 0.595e11}
permittivité relative	{28.7, 85.2, 85.2}

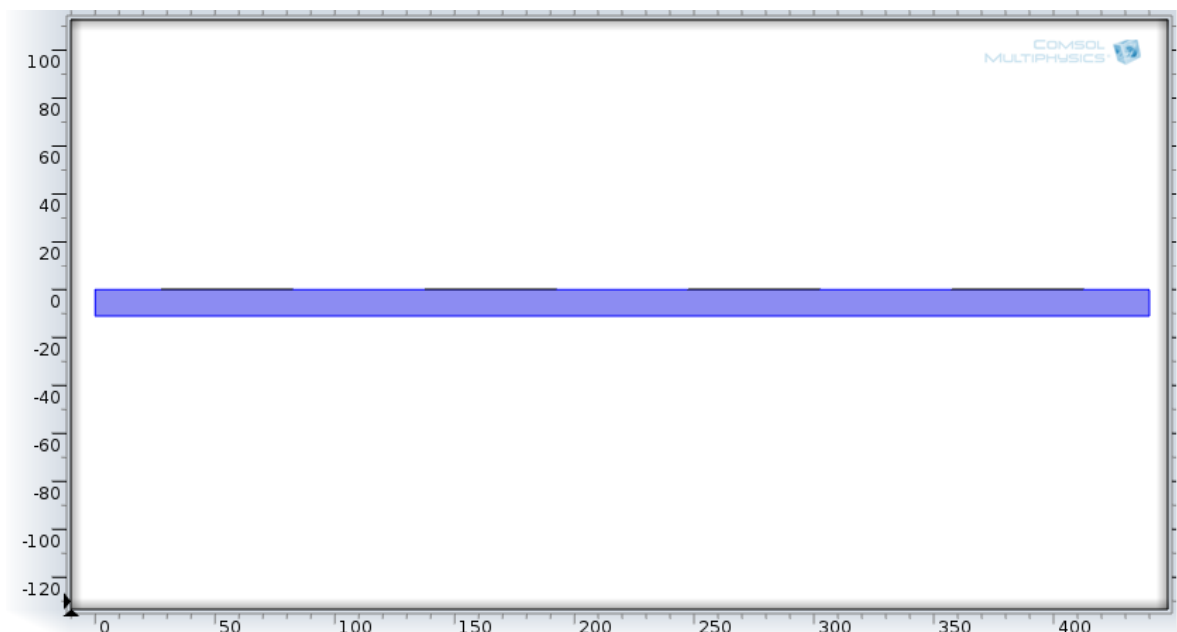


Figure 2.6: Affectation de LiNbO₃ à la région de la couche piézoélectrique.

2.5.2 L'or (Au)

L'or est le matériau utilisé pour les électrodes ces propriétés (Conductivité électrique, Coefficient de dilatation thermique, Capacité calorifique à pression constante, Densité et Conductivité thermique)

Tableau 2.3 : les propriétés de matériaux or

Propriété	Value
Conductivité électrique	45.6e6[S/m]
Coefficient de dilatation thermique	14.2 e-6[1/K]
Capacité calorifique à pression constante	129[J/kg*K]
Densité	19300[kg/m ³]
Conductivité thermique	317[W/m*K]

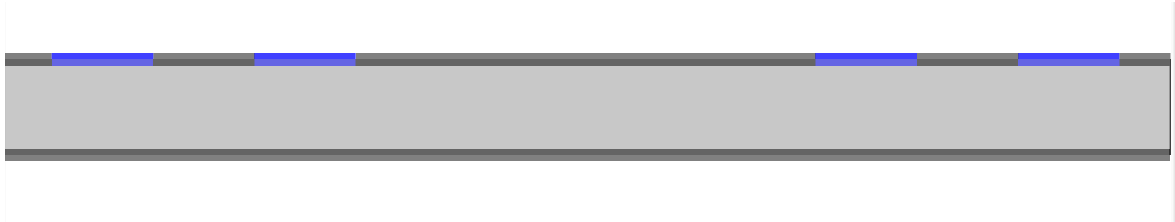


Figure 2.7 : Affectation du matériau l'or aux électrodes

2.6 Maillage de la structure

Le maillage est un découpage du domaine globale en un nombre fini de sous domaines. Comsol *Multiphysique* propose plusieurs méthodes pour le maillage, dont le maillage tétraédrique libre, extrudé, couche limite...etc.[45]Le choix du maillage dépend de la nature de la structure, de la géométrie, des conditions aux limites et aussi de la physique, dans notre cas le maillage dépend principalement de la longueur d'onde mécanique se propageant dans la structure.

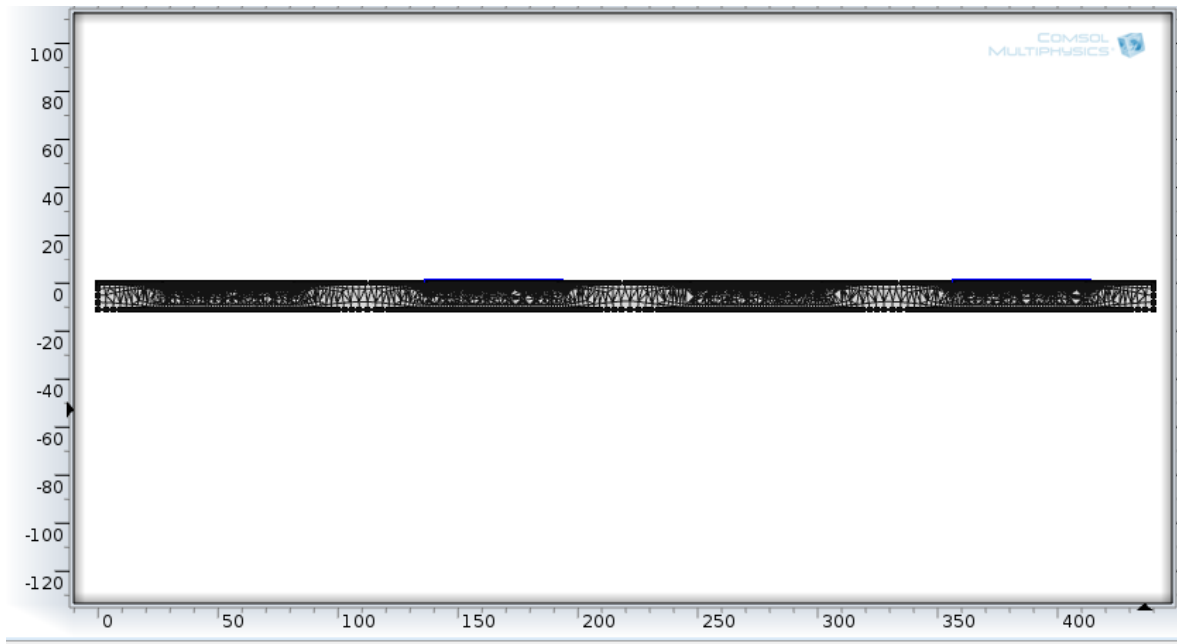


Figure 2.8 : Maillage du model

2.7 La variation de la zone centrale (gap)

Nous allons modifier la zone centrale en utilisant plusieurs valeurs ; on laisse les mêmes matériaux et les mêmes conditions aux limites le tableau ci-dessous indique les différentes valeurs appliquées :

Tableau 2.4 : les différentes valeurs de gap

Les cas	Les valeurs
Cas1	75 μm
Cas2	100 μm
Cas3	125 μm
Cas4	150 μm
Cas5	250 μm
Cas6	500 μm

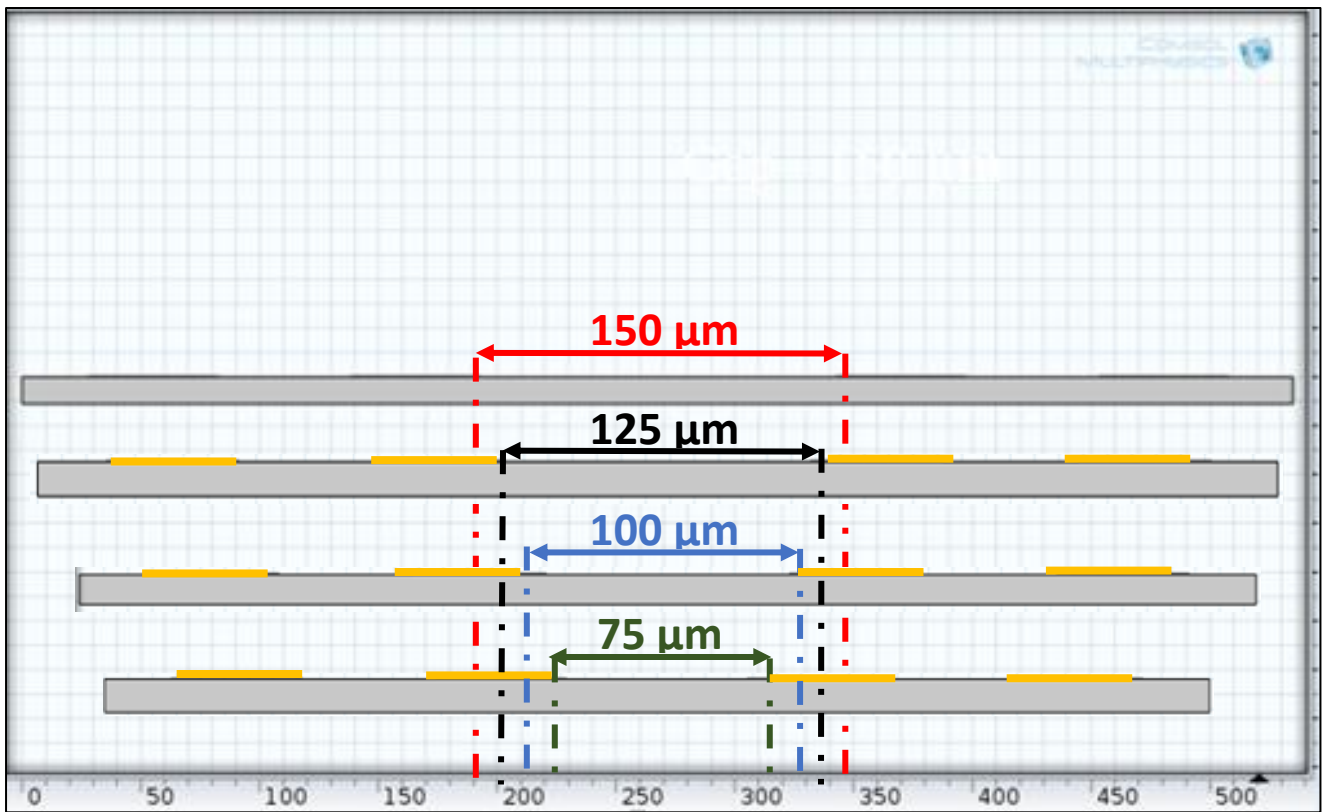


Figure 2.9 : les géométries du modèle linéaire avec diffèrent de zone centrale

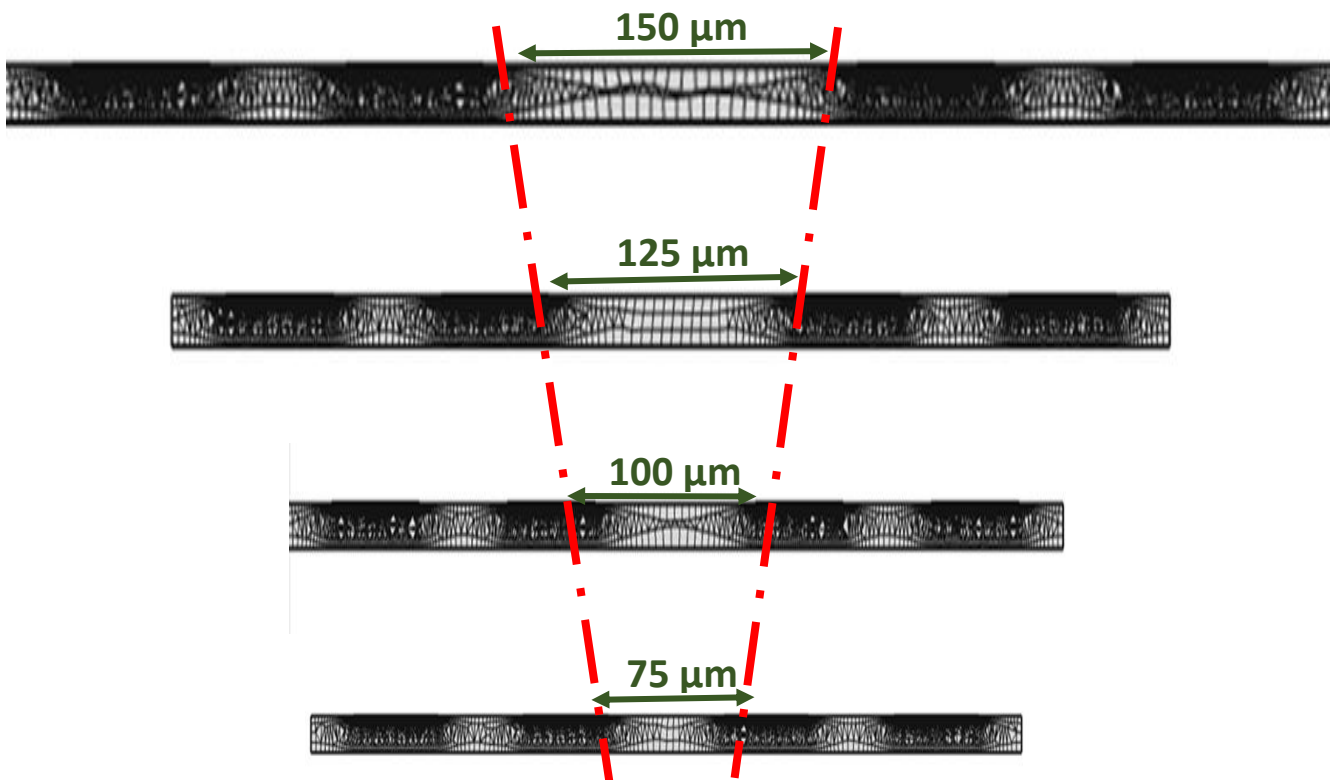


Figure 2.10 : le maillage de diffèrent valeur de la zone centrale

Cas 5

Pour le cas5, nous montrons la géométrie et le maillage du modèle linéaire (2D) avec la zone centrale égale 250 μm nous avons changé le type d'étude vue que Le calcul de la fréquence propre devient difficile dans les structures dont la valeur de la zone centrale dépasse 150 μm .

- Géométrie

Gap =250 μm



Figure 2.11 : Géométrie de model gap=250 μm

- Maillage

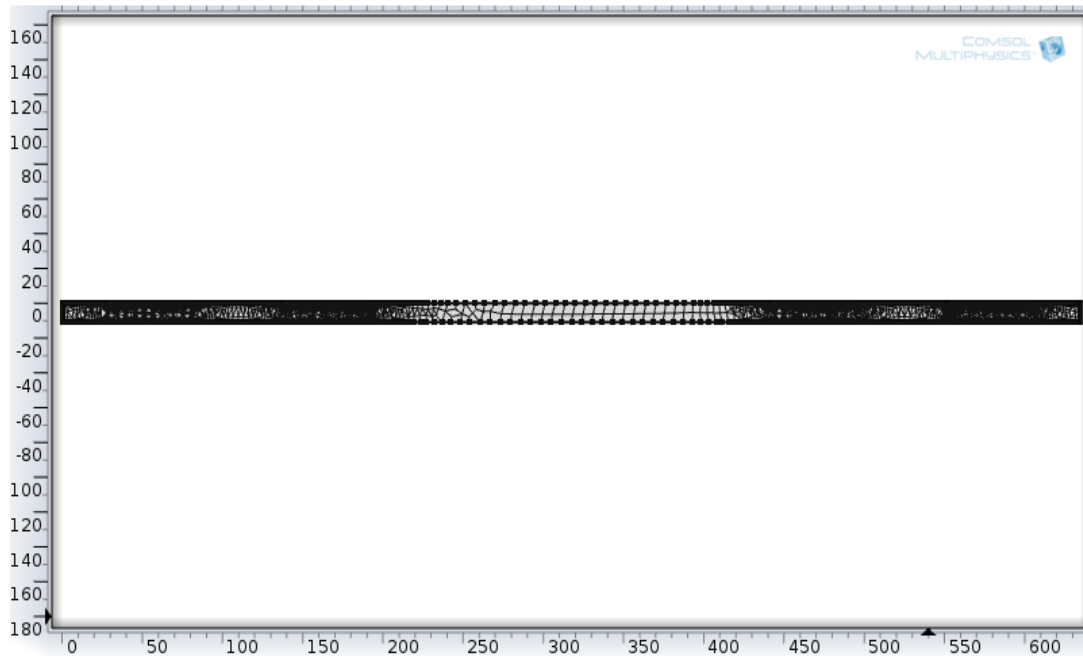


Figure 2.12 : Maillage de model gap=250 μm

Cas 6

Pour le cas6, nous montrons la géométrie et le maillage du modèle linéaire (2D) avec la zone centrale égale 500 μm .

- Géométrie

Gap =500 μm

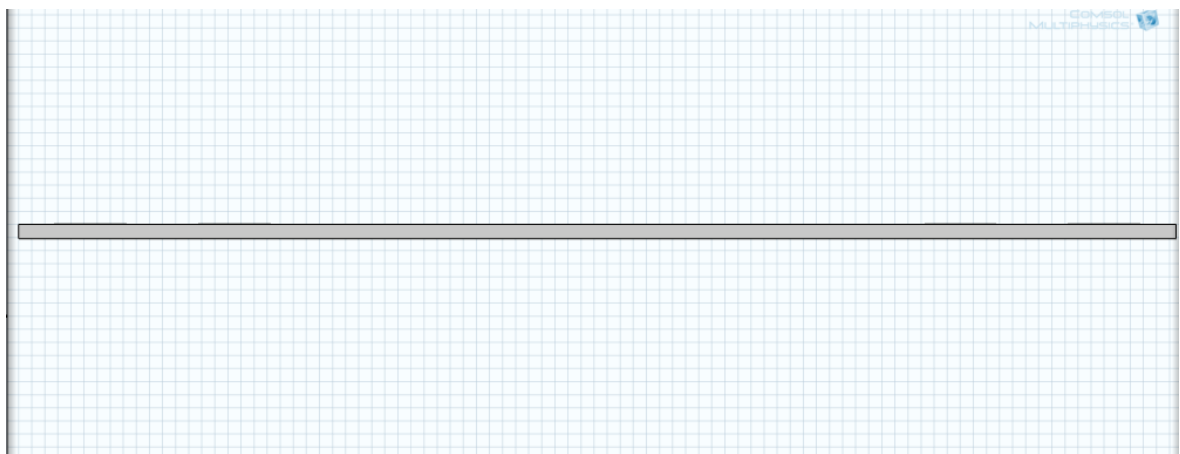


Figure 2.13 : Géométrie de model gap=500 μm

- Maillage

Le logiciel Comsol ne supporte pas un facteur de forme important avec un maillage libre. Afin de dépasser cette limitation il existe deux solutions. La première consiste à utiliser un maillage bien paramétré à la forme géométrique et la seconde à réduire volontairement le facteur de forme. Nous avons opté pour la deuxième solution. Donc nous avons modifié les électrodes en utilisant un contact théorique c'ad d'épaisseur infiniment petite.

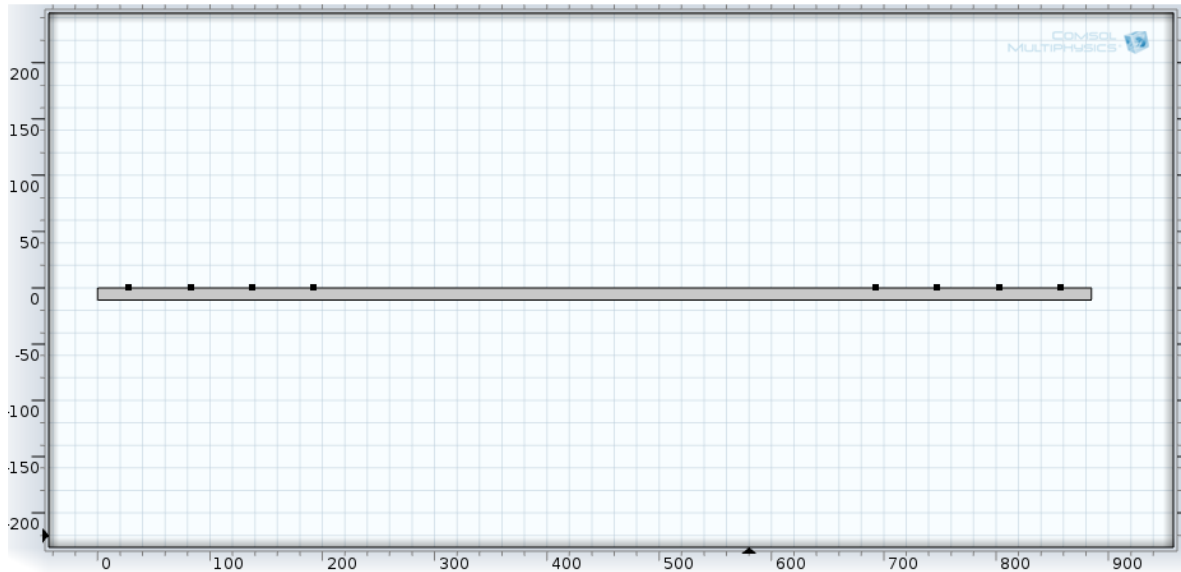


Figure 2.14 : Géométrie de model gap=500 µm avec contacte théorique

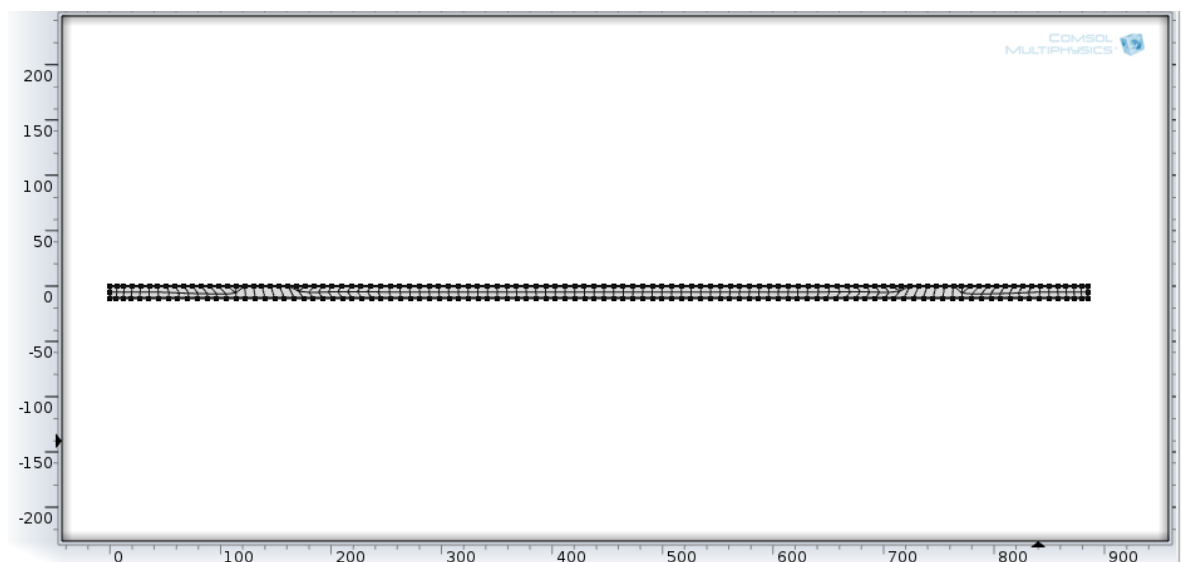


Figure 2.15 : Maillage de model gap=500 µm

2.8 Géométrie du model circulaire (3D)

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

La géométrie de notre structure est compose d'électrodes cylindrique. Les paramètres géométriques de chaque cylindre sont énumères dans les tableaux, il y a deux cas avec la zone central (gap=1000 μm) et la distance entre les électrodes égale 55 μm :

- 1^{er} cas : la structure avec 2 électrodes
- 2^{ème} cas : la structure avec 6 électrodes

2.8.1 La géométrie de 1^{er} cas

Les Paramètres géométriques pour le 1^{er} cas dans le tableau ci-dessous

Tableau 2.5 : les paramètres géométriques pour 2 électrodes

Cylindre	Rayon	Hauteur	Position
Cylindre1	Gap/2+465	11 μm	Z=-11
Cylindre2	Gap/2+265	11 μm	Z=-11
Cylindre3	Gap/2+165	11 μm	Z=-11
Cylindre4	Gap/2+110	11 μm	Z=-11
Cylindre5	Gap/2+55	11 μm	Z=-11
Cylindre6	Gap/2	11 μm	Z=-11

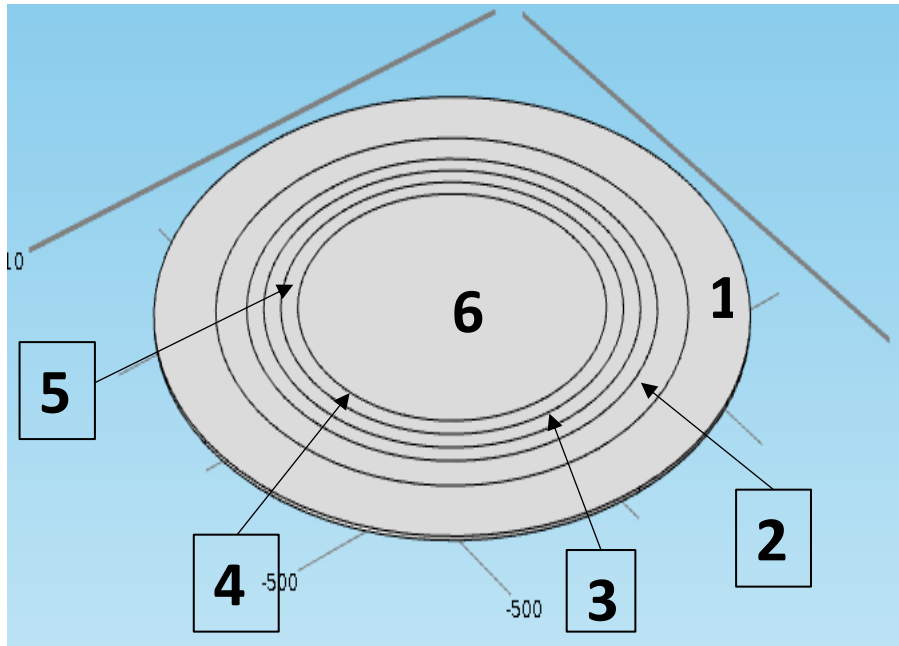


Figure 2.16 : Géométrie pour 2 électrodes

2.8.2 La géométrie de 2^{ème} cas

Les Paramètres géométriques pour le 2^{ème} cas dans le tableau ci-dessous

Tableau 2.6 : les paramètres géométriques pour 6 électrodes

Cylindre	Rayon	Hauteur	Position
Cylindre1	Gap/2+ (11*55) +100	11 µm	Z=-11
Cylindre2	Gap/2+ (11*55) +400	11 µm	Z=-11
Cylindre3	Gap/2+ (11*55) +200	11 µm	Z=-11
Cylindre4	Gap/2+ (11*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre5	Gap/2+ (10*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre6	Gap/2+ (9*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre7	Gap/2+ (8*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre8	Gap/2+ (7*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre9	Gap/2+ (6*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre10	Gap/2+ (5*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre11	Gap/2+ (4*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre12	Gap/2+ (3*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre13	Gap/2+ (2*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre 14	Gap/2+ (1*55)	11 µm	Z=-11
Cylindre15	Gap/2	11 µm	Z=-11

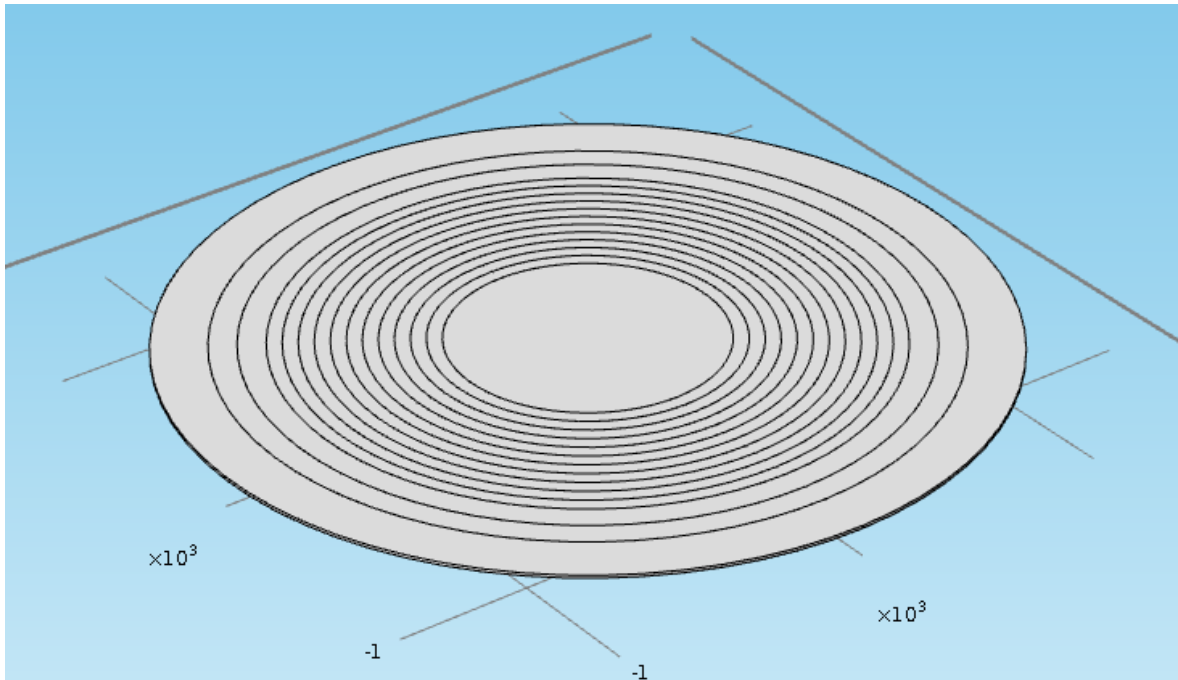


Figure 2.17 : Géométrie pour 6 électrodes

2.9 Définitions des matériaux

Les matériaux utilisés dans cette simulation sont les même que ceux utilisés dans la simulation précédente (niobate de lithium et l'or) et un matériau virtuel, la couche absorbante parfaitement adaptée (*PML*).

On a démontra que les propriétés des matériaux sont indiqué à partir des tableaux

- Pour 2 électrodes :

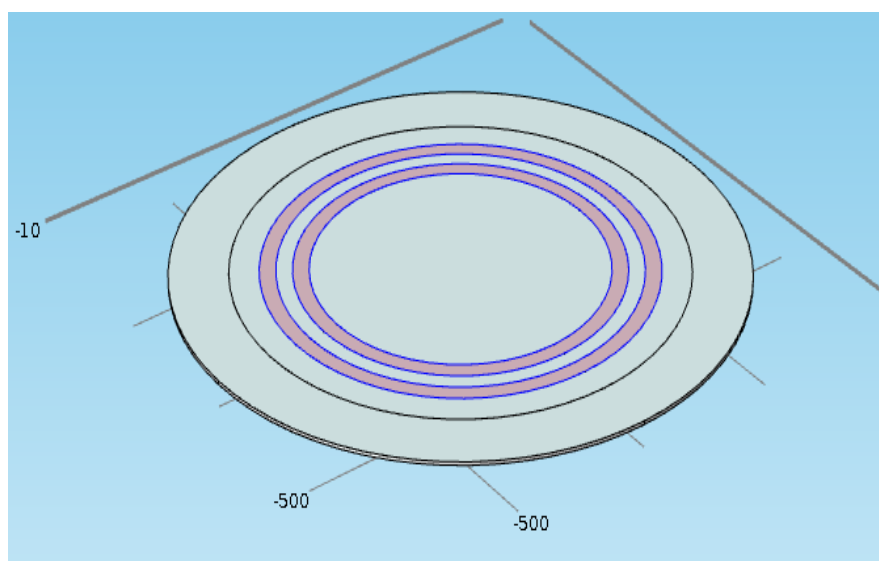


Figure 2.18 : Affectation du matériau l'or aux électrodes.

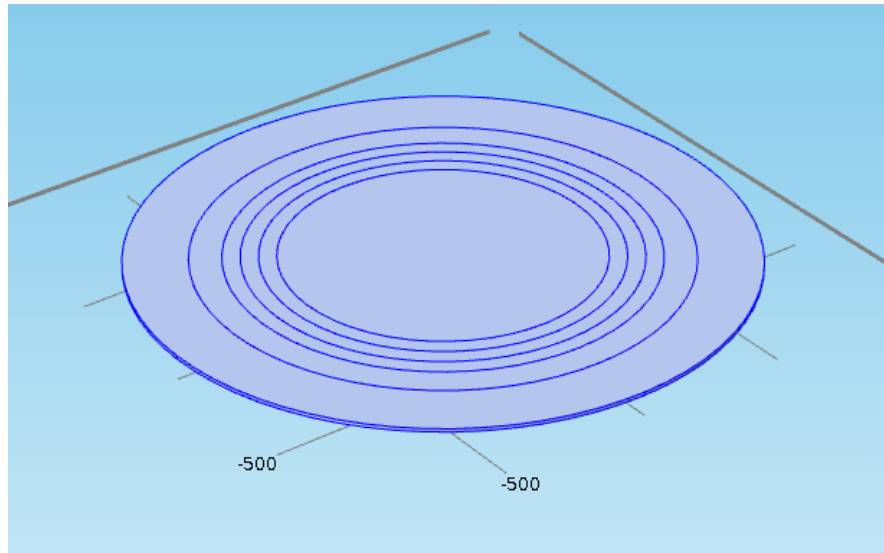


Figure 2.19 : Affectation de LiNbO₃ à la région de la couche piézoélectrique

- Pour 6 électrodes :

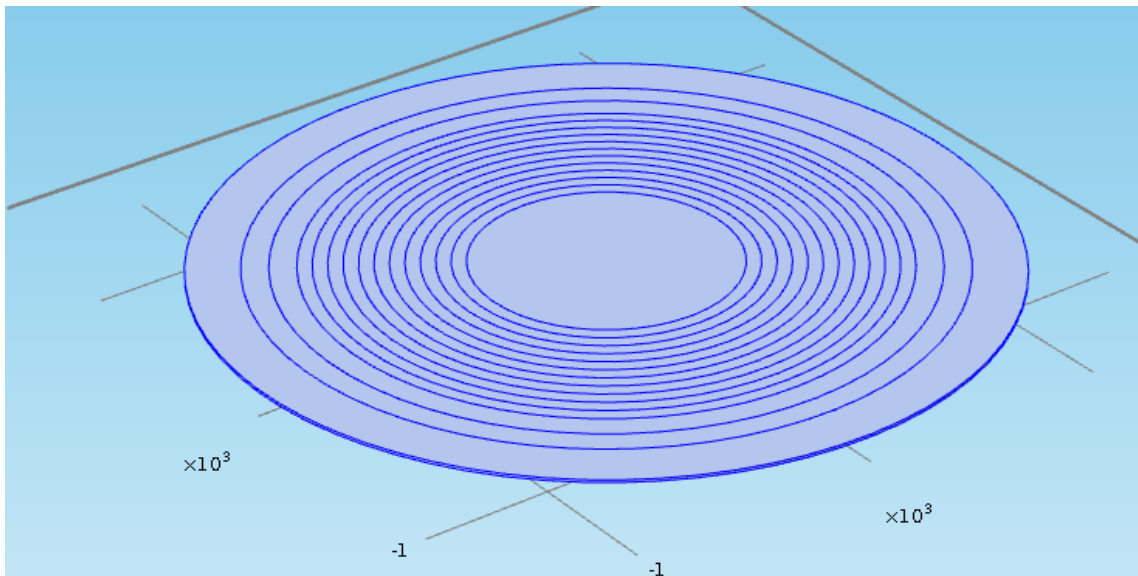


Figure 2.20 : Affectation de LiNbO₃ à la région de la couche piézoélectrique

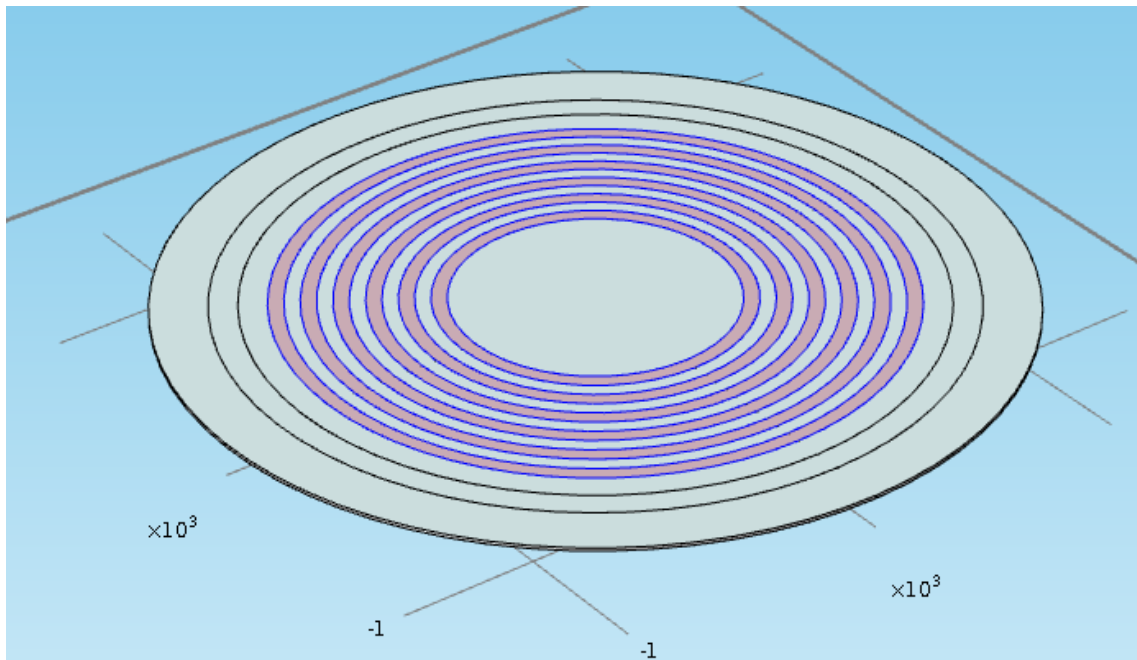


Figure 2.21 : Affectation du matériau l'or aux électrodes.

2.9.1 Definition du PML "*Perfectly Matched Layer*"

Une couche absorbante parfaitement adaptée (en anglais *Perfectly matched layer, PML*) est une couche absorbante artificielle pour les équations d'ondes, couramment utilisée pour tronquer les domaines de calcul dans les méthodes numériques de simulation de problèmes à frontières ouvertes, particulièrement dans la méthode *FEM*.

La propriété essentielle d'une PML qui la distingue d'un matériau absorbant ordinaire est le fait qu'elle est conçue de telle sorte que les ondes incidentes l'atteignant depuis un matériau non PML ne se réfléchissent pas à l'interface. Cette propriété permet aux PML d'absorber fortement toutes les ondes sortant d'un domaine de calcul sans les renvoyer dans ce domaine.

- Pour 2 électrodes :

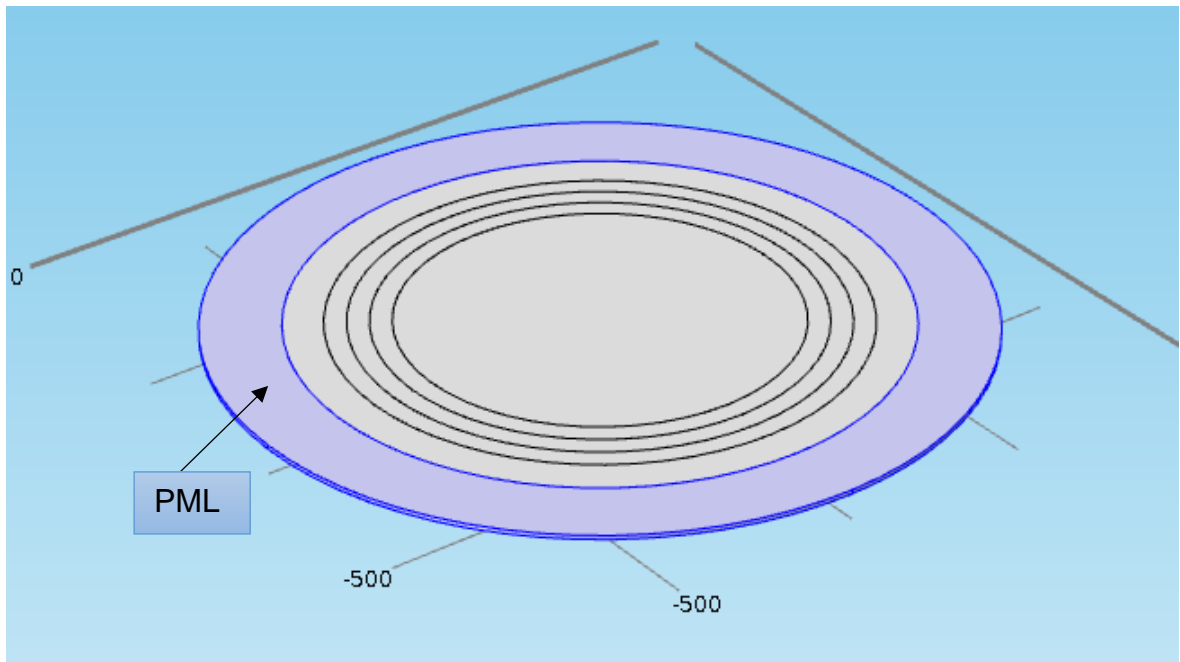


Figure 2.22 : Domaines définissant les régions *PML*.

- Pour 6 électrodes :

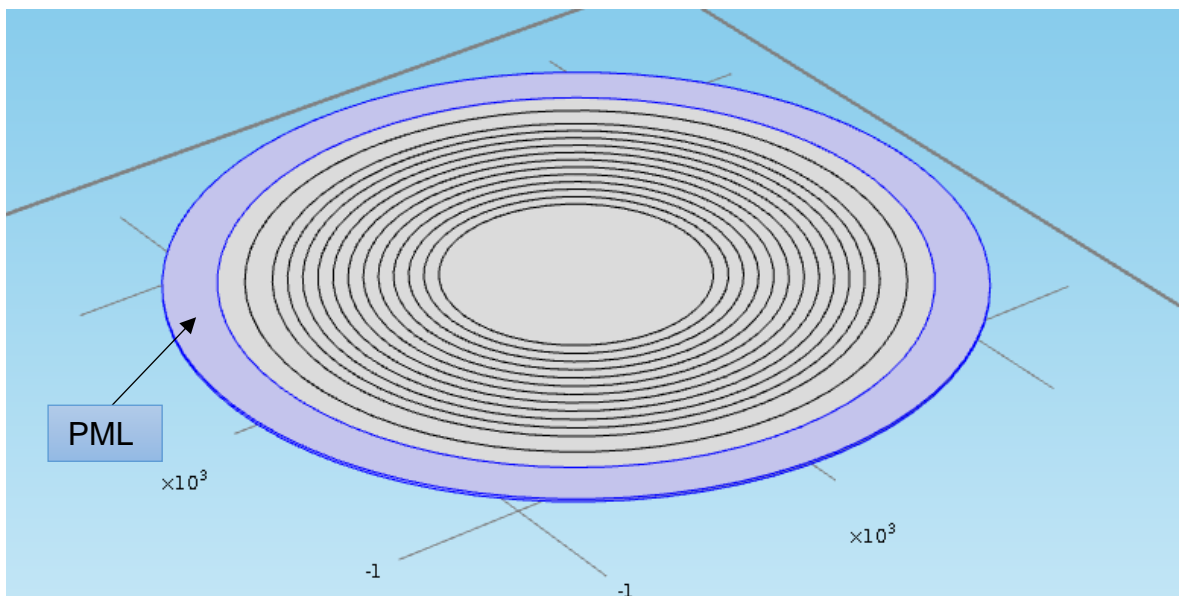


Figure 2.23 : Domaines définissant les régions *PML*

2.10 Condition aux limites

La structure étudiée est une structure 3D. Des conditions aux frontières doivent être simulées le comportement réel de la structure.

Dans ce cas, il y a un type de condition aux limites sont appliqués, des conditions aux limite électrique et on a ajouté une perturbation harmonique.

- Pour 2 électrodes :

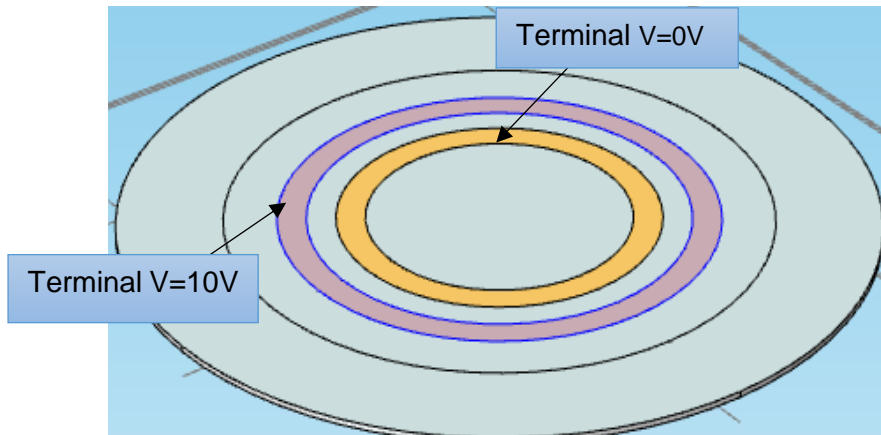


Figure 2.24 : Condition aux limites électriques

- Pour 6 électrodes :

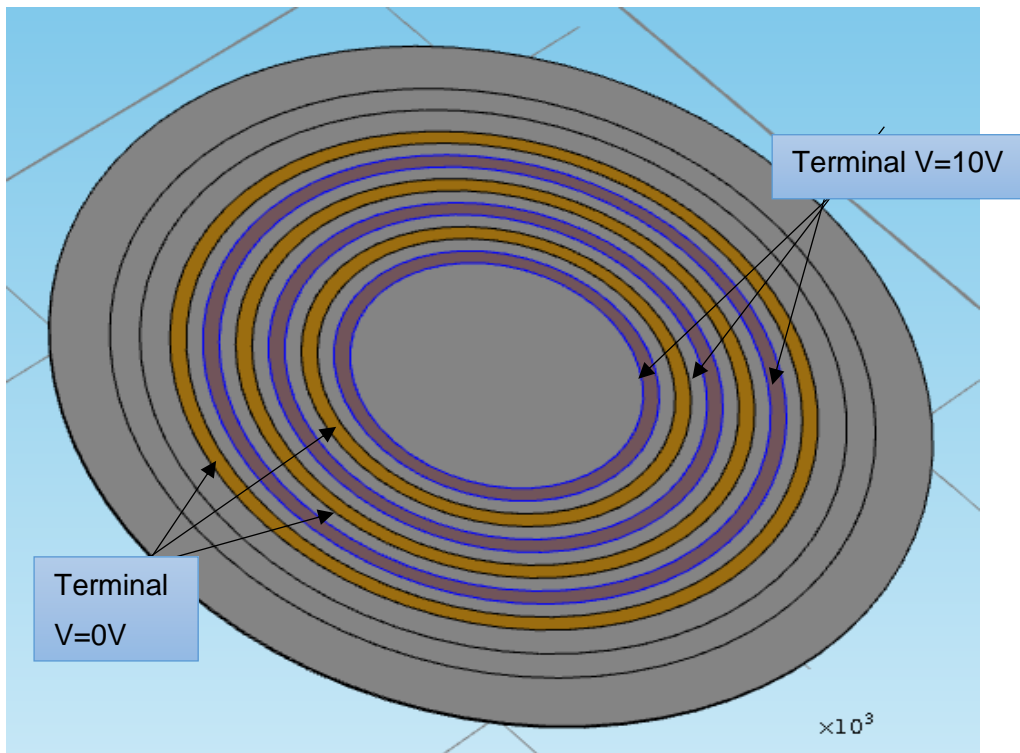


Figure 2.25 : Condition aux limites électrique

2.11 Maillage

Nous montrons le maillage du modèle circulaire (3D) pour deux cas : le premier avec deux électrodes et le deuxième avec six électrodes.

- Pour 2 électrodes

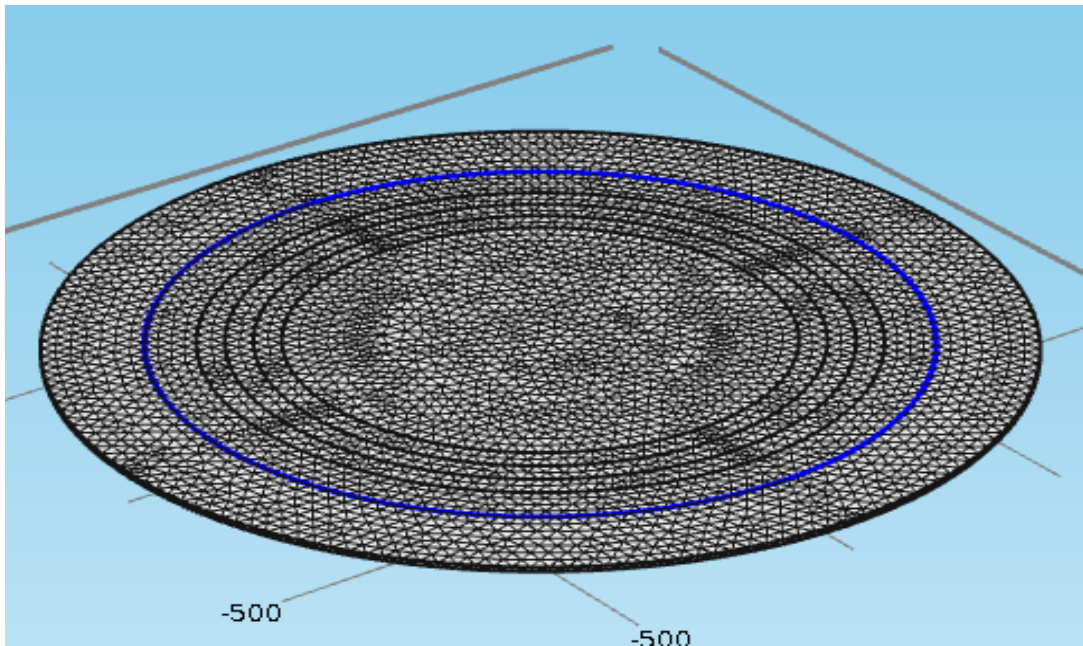


Figure 2.26 : Maillage de structure

- Pour 6 électrodes :

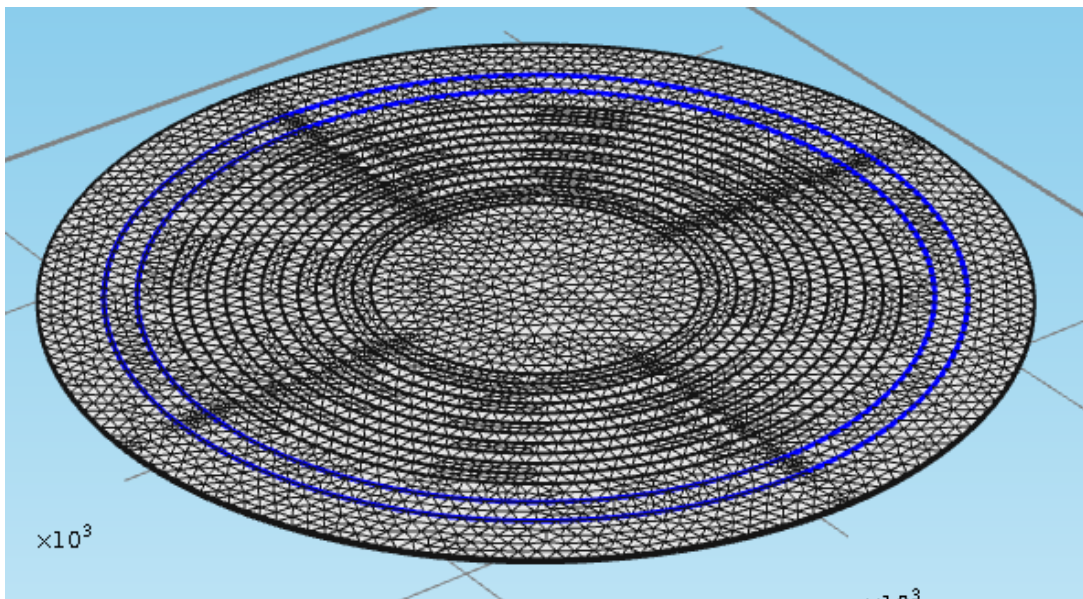


Figure 2.27 : Maillage de structure

Conclusion

Dans le deuxième chapitre, nous avons fait la modélisation et la simulation pour la méthode élément fini de notre modèle (linéaire (2D) et circulaire (3D)). Nous avons effectué des variations de la zone centrale avec différentes valeurs pour le modèle linéaire (2D).

Chapitre 3 : Résultats et discussion

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3.1 Calcul des fréquences propres linéaire (2D)

Notre modèle de base comprend une zone centrale d'une valeur de $55\mu\text{m}$, puis nous procéderons à des modifications des valeurs de la zone centrale, comme indique dans le tableau 4.

Pour le modèle de base $\text{gap}=55\ \mu\text{m}$:

Nous montrons dans les figures ces fréquence propre de base à $10.37403\ \text{MHz}$ et $10.36836\ \text{MHz}$ de $\text{gap}\ 55\ \mu\text{m}$.

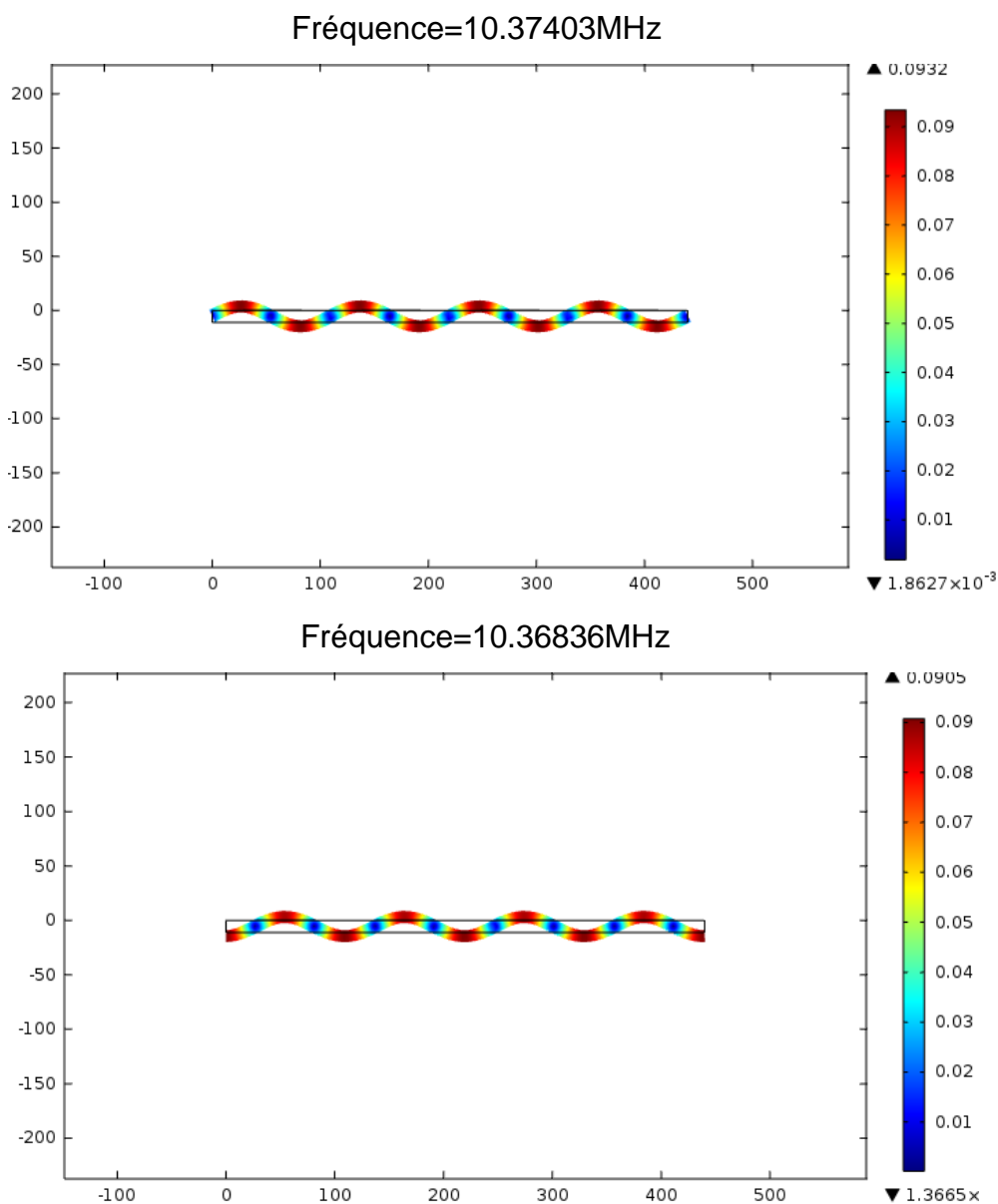


Figure 3.1 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de $55\ \mu\text{m}$: (a) Pour une fréquence $10.37\ \text{MHz}$ et (b) pour une fréquence $10.36\ \text{MHz}$.

Les figures sont représentés la simulation des différentes situations du tableau 4, mettant évidence les variations de la zone centrale (gap) (75 μm , 100 μm , 125 μm , 150 μm , 250 μm) :

- La structure cas1

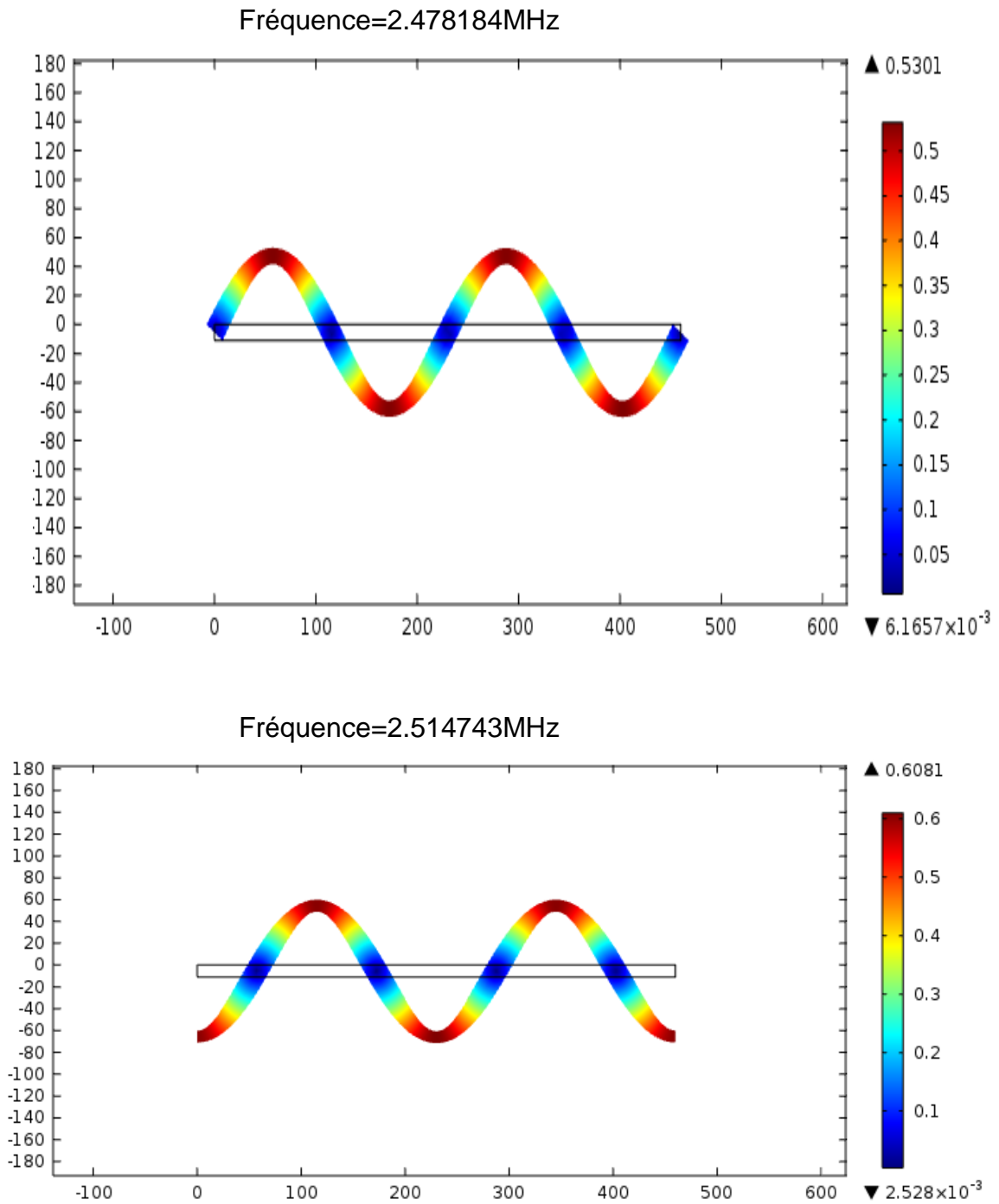


Figure 3.2 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 75 μm : (a) Pour une fréquence 2.47 MHz et (b) pour une fréquence 2.51 MHz.

Nous montrons toujours dans les calculs des fréquences propre pour la zone centrale (gap) un petit peut plus grand à 75 μm .

- La structure cas2

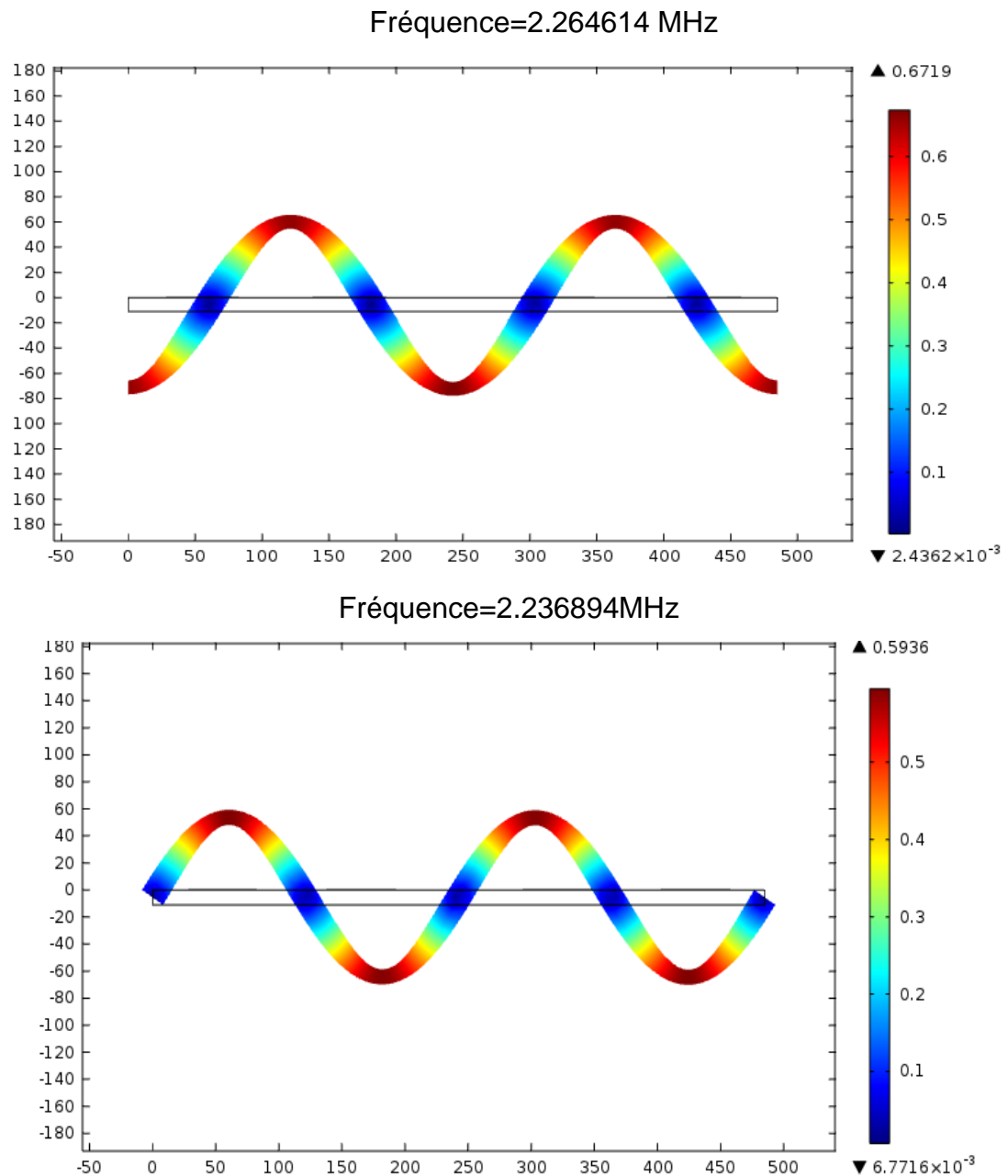


Figure 3.3 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 100 μm : (a) Pour une fréquence 2.26 MHz et (b) pour une fréquence 2.23 MHz.

Nous montrons dans les figures ces fréquences propres de base à 2.264614 MHz et 2.236894 MHz avec une zone centrale (gap) 100 μm .

- La structure cas3

Nous montrons dans les figures ces fréquences propres de base à 2.030152 MHz et 2.048738 MHz avec une zone centrale (gap) 125 μm .

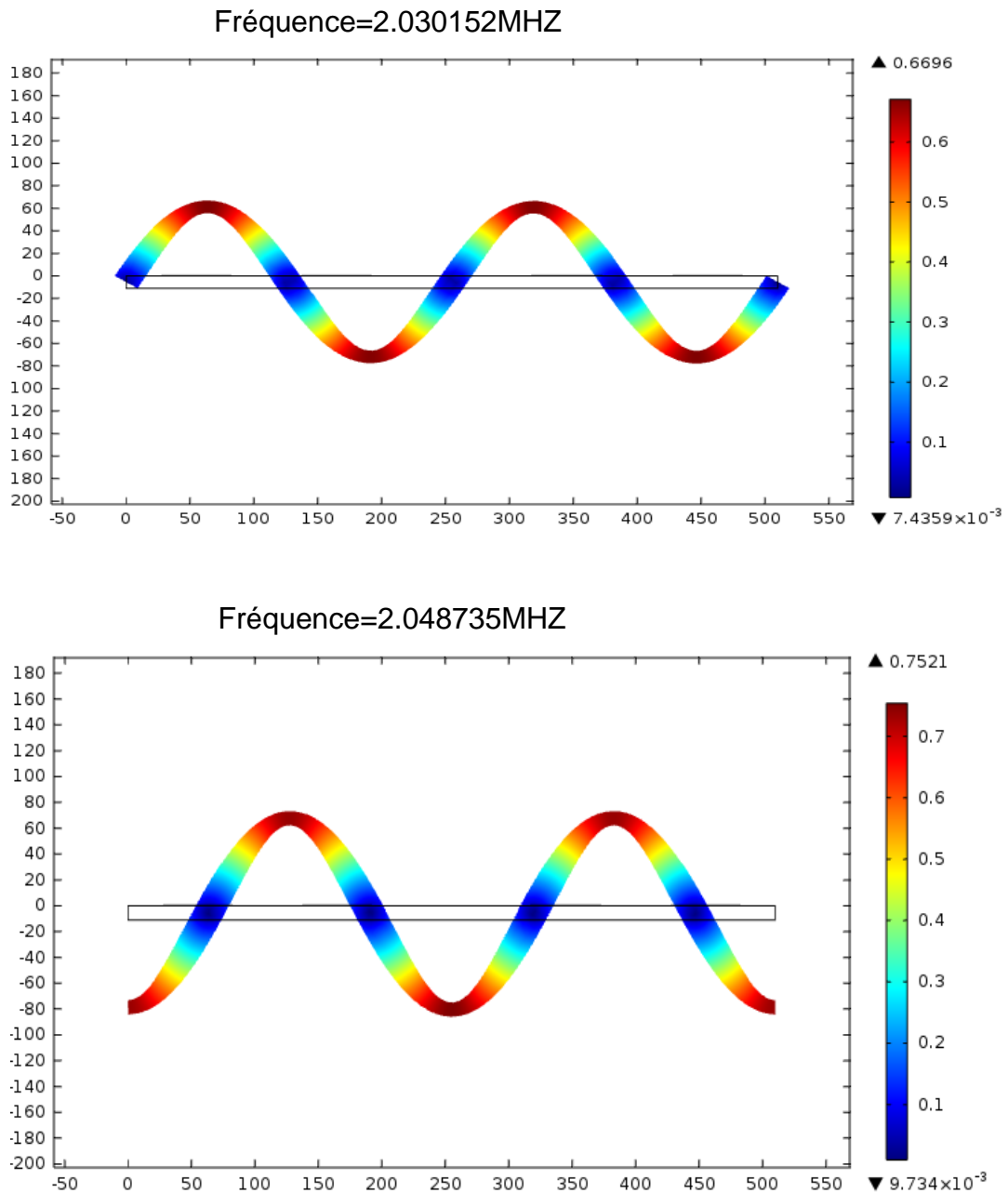
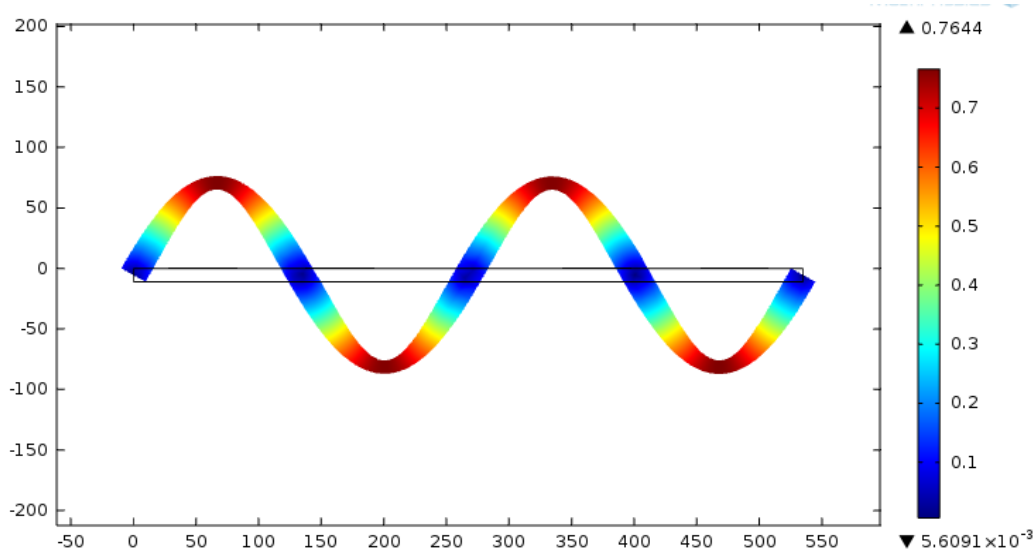


Figure 3.4 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 125 μm : (a) Pour une fréquence 2.03 MHz et (b) pour une fréquence 2.04 MHz.

- Structure cas4

Nous montrons dans les figures ces fréquences propres de base à 1.861807 MHz et 1.851129 MHz avec une zone centrale 150 μm

Fréquence=1.851129 MHz



Fréquence=1.861807MHz

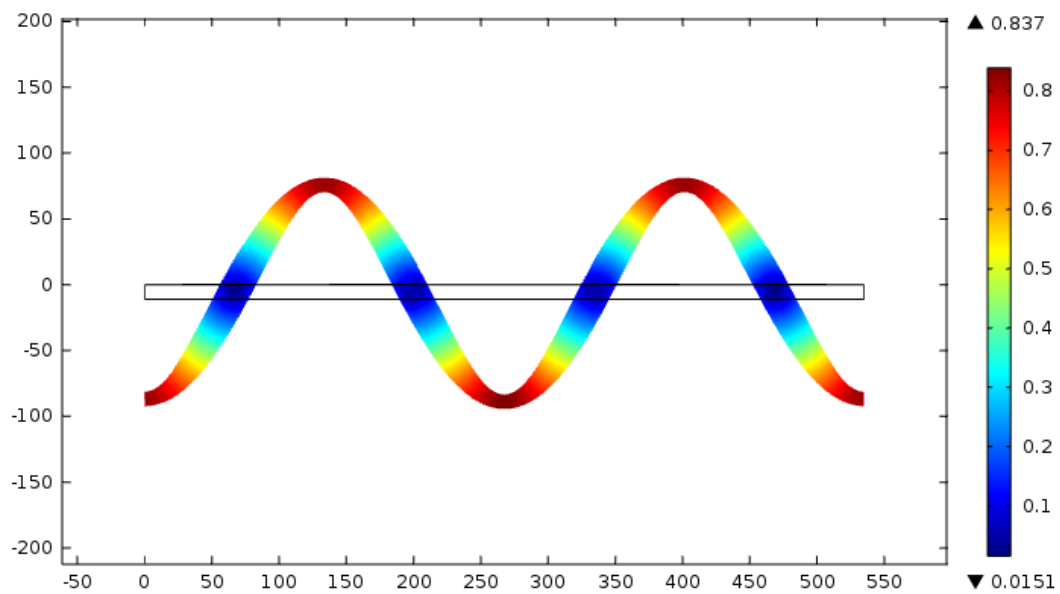


Figure 3.5 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 150 μm : (a) Pour une fréquence 1.85 MHz et (b) pour une fréquence 1.86 MHz.

- Structure cas 5

Nous montrons dans les figures ces fréquences propres de base à 1.322789 MHz et 1.326437 MHz avec une zone centrale 250 μm .

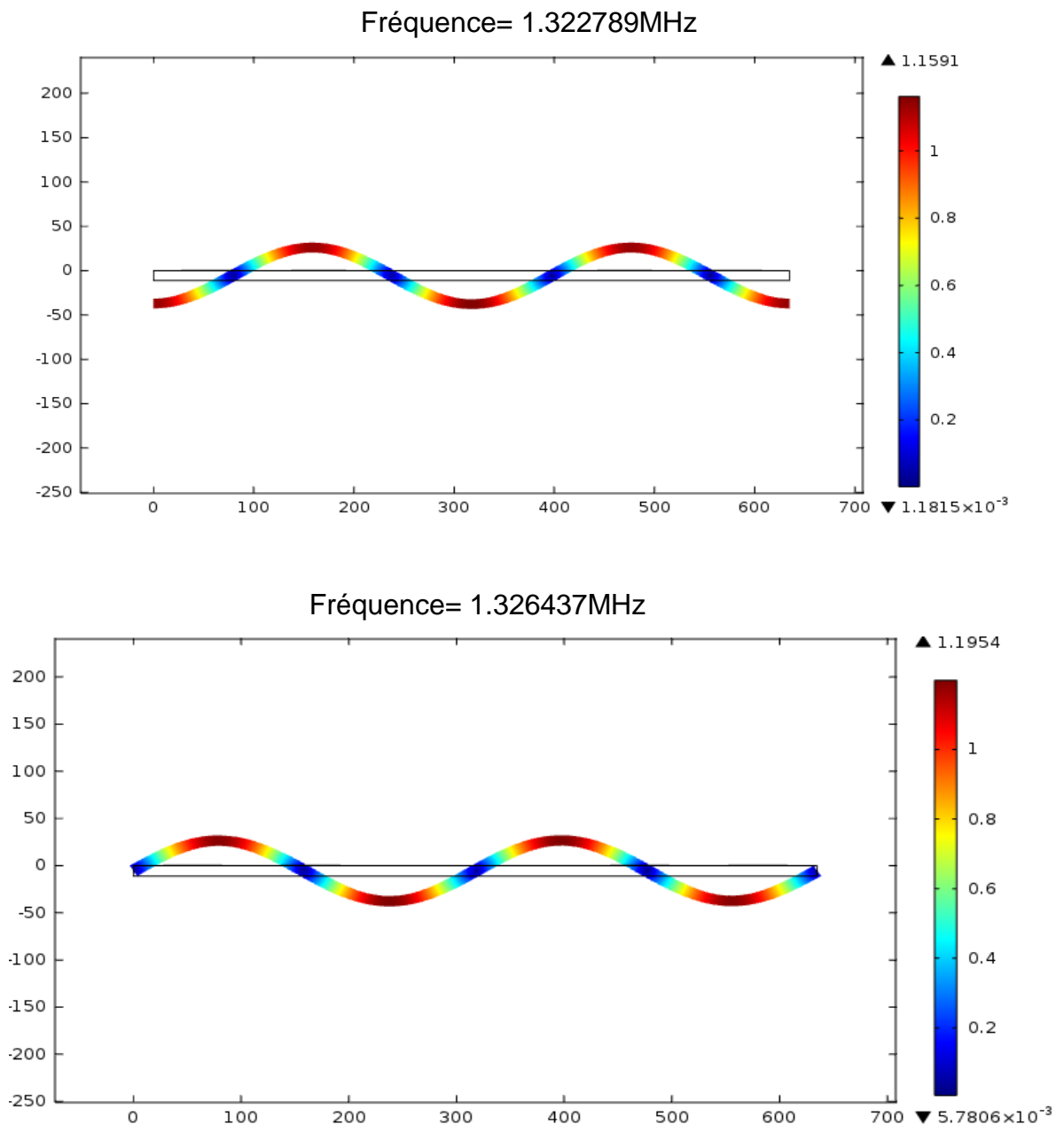


Figure 3.6 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 250 μm : (a) Pour une fréquence 1.322 MHz et (b) pour une fréquence 1.326 MHz.

Discussion

Les figures présentent les fréquences propres, et on observe que la forme épouse directement la distance interdigitée, correspondant à une demi-longueur d'onde. De plus, on remarque que même en maintenant la distance interdigitée constante, l'augmentation de la longueur d'onde conduit à une diminution de la fréquence, ce

qui est attribué à l'effet d'inertie causé par la zone centrale, et cela a un impact significatif sur l'abaissement de la fréquence de résonance.

3.2 Calcul de la réponse fréquentiel

3.2.1 Linéaire (2D)

Le calcul de fréquence propre devient difficile dans ce structure donc on a obligé de simule en fonction de fréquence.

- Structure cas 6

Nous montrons dans les figures les fréquences à 0.17332945 MHz et 0.1733313 MHz avec la zone centrale 500 μm .

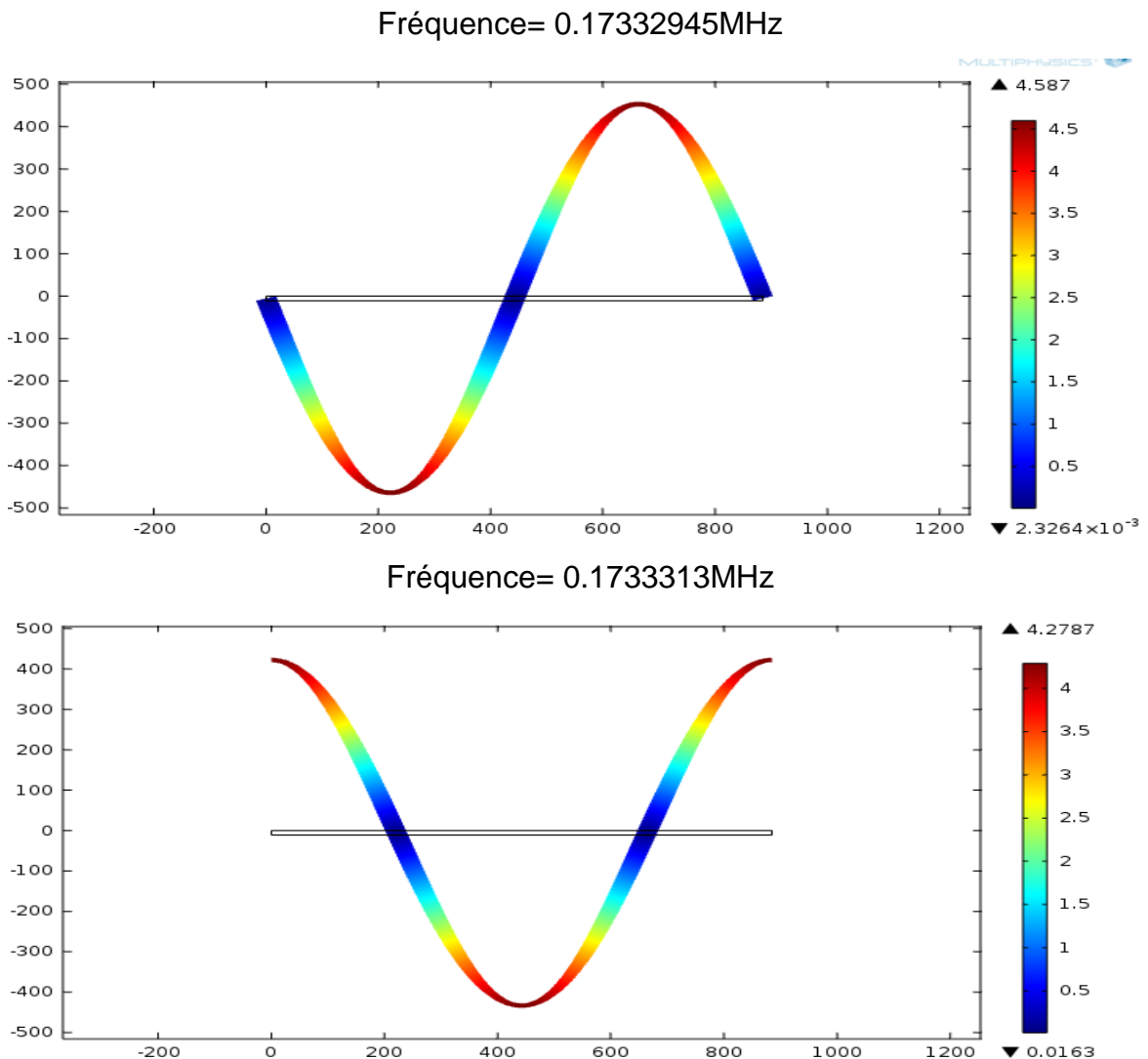


Figure 3.7 : Déformé de l'onde de Lamb des vibrations dans la plaque avec un gap de 250 μm : (a) Pour une fréquence 0.17332 MHz et (b) pour une fréquence 0.17333 MHz.

3.2.2 Circulaire (3D)

Nous disposons de deux modèles IDT circulaire. Dans le premier modèle, nous créons deux électrodes, tandis que dans le deuxième modèle, nous avons utilisé six électrodes avec une zone centrale égale à $1000\mu\text{m}$. Les résultats de ces simulations sont présentés dans les figures suivantes :

- Pour 2 électrodes

Fréquence = 1.779702 MHz

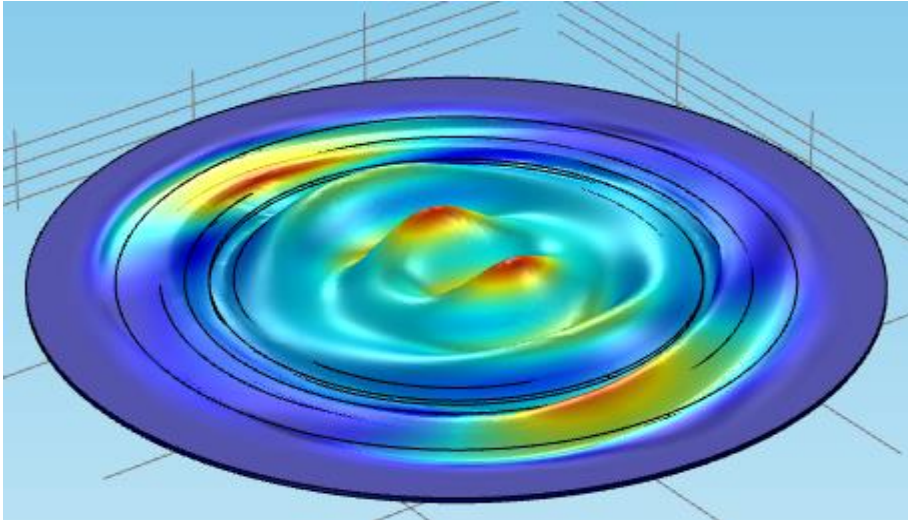


Figure 3.8 : Mode de vibration de la structure pour 2 électrodes pour une fréquence 1.779702 MHz.

- Pour 6 électrodes

Fréquence = 0.644237 MHz

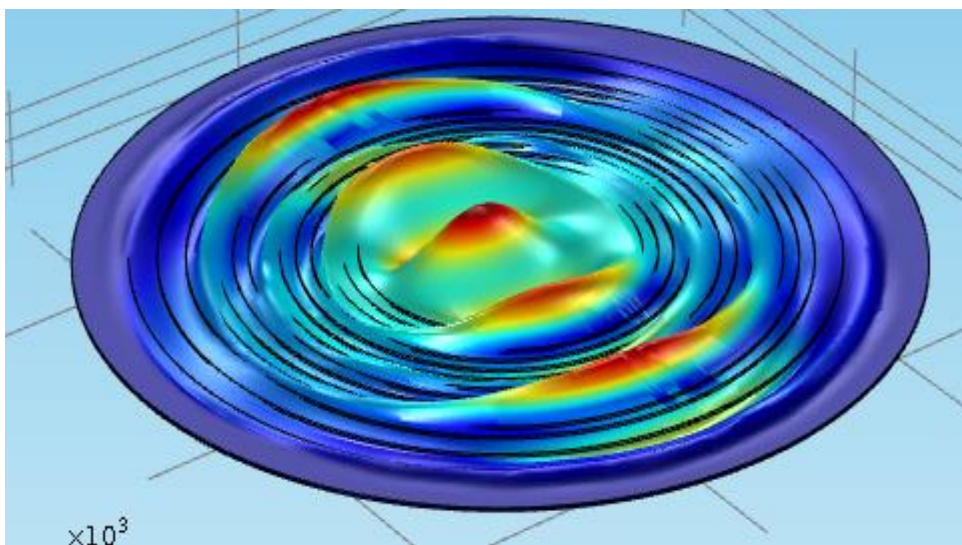


Figure 3.9 : Mode de vibration de la structure pour 6 électrodes pour une fréquence 0.644237 MHz.

Discussion

Pour simuler un dispositif plus réaliste possible on a été obligé de passer à une simulation en fonction de fréquences. Il n'est pas possible d'étudier les fréquences propres dans une structure comme ça, parce que on a été obligé de maîtriser une zone de *PML*, le calcul de fréquences propres devient vraiment aléatoire et très difficile à exécuter donc on a préféré faire des calculs en fonction du spectre des vibrations. Notre objectif est de démontrer la fréquence qui correspond aux modes présents dans la zone centrale, qui a un rayon de 500 μm , soit un diamètre de 1000 μm . De plus, nous avons observé la formation d'ondes stationnaires au milieu de cette zone.

Conclusion générale

Ce travail de master, consiste à étudier des dispositifs à base de transducteur inter-digit linéaire (2D) et circulaire (3D) pour la génération d'onde acoustique de Lamb.

Dans la première partie de ce travail, nous sommes intéressés aux généralités et l'état de l'art sur la piézoélectricité et les ondes élastiques, en donnant plus d'information sur les dispositifs de SAW et des structures d'excitation IDT.

La deuxième partie de cette étude a été consacrée à l'utilisation de la méthode des éléments finis par le logiciel Comsol Multiphysique pour modéliser et simuler les modèles. Nous avons commencé par créer des modèles linéaires (2D) et circulaires (3D). Nous avons effectué des calculs des fréquences propres et des réponses fréquentielles dans le mode linéaire (2D). En variant la zone centrale, nous avons observé une diminution des fréquences lorsque les valeurs de la zone centrale augmentent. Dans le modèle circulaire (3D), nous avons calculé les réponses fréquentielles car il n'était pas possible de calculer les fréquences propres en raison de la nécessité de mettre en place une zone de PML.

En conclusion, ce projet continuera à être développé à l'avenir en intégrant l'étude des gouttes d'eau. Il est essentiel de poursuivre cette étude afin d'explorer davantage les propriétés en utilisant des formes variées. De plus, il convient de souligner que cette recherche présente un coût abordable.

Références

- [1] Z. e. a. L., "Performance of low-loss RF MEMS capacitive switches". Microwave and Guided Wave Letters, IEEE (see also IEEE Microwave and Wireless Components Letters), 8(8), 269-271, 1998.
- [2] E. e. a. E. Fourn, MEMS switchable interdigital coplanar filter. Microwave, 2003.
J. Y. Z. J. E. M. M. A. V. K. & G. Brank, C. L RF MEMS-based tunable filters. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 11(5), 276-284., 2001.
- [3] D. R. e. E. Dieulesaint:, "Elastic Waves In Solids 1. Free and Guided, 2000.
- [4] F. v. R.M. White, Appl. phys.Left, (1965) 314-16.
- [5] R. D. H Wohltjen, Surface Acoustic Wave Probe for Chemical Analysis introduction and Instrument Description, Analytical Chemistry,, 51 (1979) 1458-1464.
- [6] Thèse de Thierry Aubert "Contribution à l'élaboration de capteurs sans-fil, opérant à très haute température (500-1000°C), à base de dispositifs à ondes acoustiques de surface : choix des matériaux constitutifs.", 2010.
- [7] Lord Rayleigh, Proc. London Math. Soc. 17, 4 (1885)..
- [8] B. AULD, "Acoustic fields and waves in solids" Volume II, 1973.
- [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.](http://junon.u-3.mrs.fr/mso/1/w004/sismo/ondes_sismiques.htm)

- [12] H. LARABI, ritaux phononiques et metamateriaux acoustique application aux domaine de guidage filtrage et isolation phonoque, 27 octobre 2001..
- [13] H. Lamb, 'Waves in elastic plates', Proceedings of the Royal Society, London, vol. 93, pp 114-128, (1917).
- [14] Thierry Laurent Génération, propagation et détection d'ondes de Lamb. Modelisation et application aux membranes comportant des couches minces piezoélectriques sur silicium Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Franche-Comte,, juin 1997.
- [15] V. I.A, "Rayleigh and Lamb waves", Plenum, New York, 1970.
- [16] N. York, tude de transducteurs en barrette adaptés au contrôle santé par ondes de Lamb de structures aéronautiques composites. Application à la caractérisation de l'impact basse vitesse. Thèse de doctorat Université Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1998, 193p.
- [17] N. Jalili, Piezoelectric-Based Vibration Control, From Macro to Micro/Nano Scale Systems, Springer, Boston, 2010.
- [18] T. W. C.D. Kohl, Gas Sensing Fundamentals, Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors, G. Urban, Volume 15, Springer Verlag, Berlin, 2014.
- [19] K. Iniewski, Biological and Medical Sensor Technologies, CRC Press, Boca Raton, 2012.
- [20] K. K. Shung, Diagnostic Ultrasound Imaging and Blood Flow Measurements, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [21] C. MAGNET, «Traitement non-linéaire de la tension de sortie éléments piézoélectriques: Application aux transformateurs piézoélectriques et au contrôle de vibration de cartes électroniques.» Thèse de doctorat : L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006. 206p..
- [22] N. BAHLOULI, «Cours sur les matériaux composites.» Support de cours: Université de Strasbourg..

- [23] S. L. Dren, Thèse de Doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon,, mai 2000.
- [24] D. Morgan, Surface acoustic wave filters. Elsevier,, 2007.
- [25] A. P. S. D. a. W. A. J.R. Klauder, he theory and design of chirp radars, Bell Syst. Tech. J., 39, p. 745-808, 1960.
- [26] D. Morgan, History of SAW devices, IEEE Int. Freq. Contr Symp., p. 439-460, 1998.
- [27] V. V. O. A. JW Gardner, Microsensors, MEMS, and Smart Devices, Willey, Chichester,, 2002.
- [28] J. Cheeke, fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, CRC press , boca rotana, 2002.
- [29] S. M. e. a. DS. Ballantine Jr. RM. White, Acoustic Wave Sensors Theory, Design, and Physico-Chemical Applications, Academic Press, San Diego,, 1997.
- [30] H. Campanella, Acoustic Wave and Electromechanical Resonators Concept to Key Applications, Artech House, Norwood,, 2010.
- [31] M.-S. W. M. S. T. S. W-C Shih, The effect of an SiO₂ buffer layer on the saw properties of ano/sio₂/gaas structure, IEEE Transactions On Ultrasonics Ferroelectrice And Frequency Control, 40 (1993) 642-647.
- [32] R. Serhane, Thèse de Doctorat, Université Des Sciences et de La Technologie Houari Boumedién, juillet 2014.
- [33] M. Dahmani et H. Mokhtari, Mémoire de Master, Université Blida, (2016)..
- [34] V. Laude, cours sur les exemples de dispositifs à ondes élastiques», Institut FEMTO-ST, Département MN2S équipe MINANO (micro-instrumentation, nanosciences et ondes), (2005-2006).
- [35] D. Morgan, istory of SAW devices, IEEE Int. Freq. Contr Symp., p. 439-460, 1998.
- [36] J. H. Collins, "A short history of microwave acoustics" IEEE Trans. on Micro.Theo And Tech, 32(9), (1984), 1127-1140..
- [37] Thomson, Microsonics SAW components, data book, 2000-2001.

- [38] Henri Pailloux Piezoelectricite. Calcul des vitesses de propagation, J. phys.radium, 19(5):523-526,, 1958.
- [39] C. Droit, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté,, 2013.
- [40] J. Comput, Bérenger. Phys. 114, 185, 1994.
- [41] H. T. A. O. D. M. D. R. R. K. e. C. D. I. Gammoudi, "Love-wave bacteria-based sensor for the detection of heavy metal toxicity in liquid, 2010.
- [42] L. B. F. M. C. G.-H. C. B. R. K.] I. Gammoudi, "High sensitive mesoporous TiO₂-coated love wave device for heavy metal detection", Biosensors and Bioelectronics, vol. 57, p. 162-170,.
- [43] M. Zlamal:, : On the finite element method. Numerische Mathematik, 12, pp. 394–402, (1968).
- [44] B. A. S. M. A. A. a. V. L. A Khelif, , Phys. Rev. E 74, 046610, 2006.
- [45] E. BOUCHER, «Elaboration et caractérisation des céramiques PZT Bi-Substituées et modélisation non-linéaire de leur comportement en contrainte et en champ électrique.» Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002. 178p..
- [46] V. R. H. T. F. M. C. G.-H. A. O. I. Gammoudi, "Enhanced bio-inspired microsensor based on microfluidic/bacteria/love wave hybrid structure for continuous control Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 198, p., 2014.