

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة

Université SAAD DAHLEB Blida



Centre de développement des technologies avancées

CDTA

Faculté de technologie

Département d'Électronique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en :

Microélectronique

Thème

Contribution à l'étude de la réponse des transducteurs piézoélectrique et des systèmes ultrasonores

Proposé et encadré par :

Dr. LEMLIKCHI Safia

Co-encadreur :

Prof. AISSAT Abdelkader

Réalisé par :

BENZERGA Ferial

YETTOU Abdennour

2019/2020

## *Dédicace*

*A ma chère âme, dont l'âme restera toujours avec moi même si la mort la prend GUICHAOUI Khadhra,*

*A ma chère maman Fatiha, sans qui je ne serais pas arrivée ici, c'est ton rêve que j'ai toujours vu qui jaillit de tes yeux fatigués, c'est le mois que je puisse vous offrir « mon diplôme »,*

*A mon frère Mohamed,*

*A mes sœurs Amira, Khaoula et Manara,*

*A tous mes amis,*

*Qui m'ont apporté affection et soutien lors de la réalisation de ce travail.*

*BENZERGA Ferial*

## Remerciements

*Avant tout, nous remercions ALLAH de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce travail.*

*Nous tenons à remercier le docteur LEMLIKCHI Safia pour son encadrement et ses encouragements, qui nous ont été précieux afin de mener notre travail à bon port. Tous merci, gratitude et appréciation pour ses efforts déployés avec nous.*

*Nous remercions également le professeur AISSAT Abdelkader pour ses efforts tout au long de la période de Master, pour conclure sa générosité avec nous en apportant son aide dans cette thèse et en ajoutant un peu de son expérience pour enrichir ce travail, tout le respect et l'appréciation pour ses efforts.*

*De plus, les remerciements ne sont pas complets sans mentionner les membres de jury. Tous respect, appréciation et gratitude envers le président du jury et l'examineur, tous merci à vous d'avoir accepté l'évaluation de ce mémoire.*

*Nous souhaitons également remercier tous les membres du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) pour leurs supports et encouragements tout au long de cette thèse.*

*Nous tenons également à remercier tous les membres du groupe de Matériaux Optoélectronique laboratoire LATSI pour leur soutien pendant toute la durée de cette thèse.*

*Nous remercions, également, toute personne qui a participé, de près ou de loin, pour rendre ce travail réalisable et présentable.*

*Enfin, nous remercions nos familles pour nous avoir soutenues et nous données les conditions nécessaires pour accomplir à terme ce mémoire.*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I : Généralités &amp; Définitions</b>	
Introduction .....	05
I.1. La piézoélectricité .....	05
I.1.1. Définition .....	05
I.1.2. Matériaux piézoélectriques .....	05
I.1.3. Formes usuelles des matériaux piézoélectriques .....	06
I.1.4. Applications des matériaux piézoélectriques .....	06
I. 2. Les Transducteurs .....	07
I.2.1. Définition .....	07
I.2.2. Eléments constitutifs des Transducteurs Ultrasonores .....	07
I.2.3. Caractéristiques des transducteurs ultrasonores .....	08
I. 3. Les ultrasons .....	11
I. 3.1 Définition .....	11
I. 3. 2. La gamme ultrasonore .....	11
I. 3. 3. Génération des ultrasons .....	12
I. 3. 4. Méthodes ultrasonores .....	13
I. 3. 5. Méthodes ultrasonores .....	14
Conclusion .....	14
<b>Chapitre II : Modélisation des systèmes ultrasonores</b>	
Introduction .....	16
II. 1. Modélisation de la partie piézoélectrique (transducteur) .....	16
II. 1. 1. Modèle de Mason et Redwood.....	16
II. 1. 2. Implémentation du schéma de Mason et Redwood sur PSpice .....	18
II. 1. 2. 1. Modèle de Morris .....	18
II. 1. 2. 2. Modèle de Leach .....	20
II. 2. Modélisation de la partie mécanique d'un système ultrasonore.....	22
II. 3. Modélisation de la partie électrique d'un système ultrasonore .....	29
Conclusion .....	29
<b>Chapitre III : Simulation &amp; Discussion</b>	

Introduction .....	31
III. 1. Simulation de la partie piézoélectrique .....	31
III. 1. 1. Simulation de l'impédance électrique .....	33
III. 1. 1. 1. Influence de la géométrie du transducteur .....	36
III.1.1. 1.1. Effet du diamètre .....	36
III. 1. 1. 1. 2. Effet de l'épaisseur .....	38
III. 1. 1. 2. Influence du chargement (baking / damping) .....	39
III. 1. 1. 3. Influence de la nature du matériau piézoélectrique .....	41
III. 1. 2. Simulation de la réponse impulsionnelle d'un transducteur .....	43
III.2. Simulation de la réponse impulsionnelle d'un système ultrasonore.....	47
III. 2.1. Configuration simulée .....	47
III. 2.2. Circuit électrique équivalent .....	48
III. 2.3. Simulation PSPice .....	49
Conclusion .....	55
<b>Conclusion générale</b> .....	56
<b>Annexe</b> .....	59
<b>Bibliographie</b> .....	60

# Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Schéma d'un transducteur à ultrasons .....	08
<b>Figure I.2 :</b> Forme typique de : a) réponse impulsionnelle et b) spectre FFT .....	09
<b>Figure I.3 :</b> Influence du damping sur la réponse impulsionnelle et le spectre d'un transducteur ultrasonore. (a et b) low damping, (c et d) medium damping et (e et f) high damping [11].....	10
<b>Figure I. 4:</b> Forme typique de l'impédance électrique d'un transducteur ultrasonore (module et phase)) [12].....	10
<b>Figure I.5 :</b> Domaines de fréquences des ondes sonores .....	11
<b>Figure I.6 :</b> Domaine de fréquence des sons .....	12
<b>Figure I.7 :</b> Principe du contrôle par ultrasons laser .....	12
<b>Figure I.8 :</b> Principe du contrôle en mode écho [15] .....	13
<b>Figure I. 9 :</b> Principe du contrôle en mode écho [15] .....	14
<b>Figure II.1:</b> Schéma électrique équivalent d'un cristal piézoélectrique en mode épaisseur proposé par Mason [1] .....	17
<b>Figure II. 2 :</b> Schéma de Mason modifié par Redwood [16] .....	18
<b>Figure II. 3 :</b> Implémentation du schéma de Mason sur PSpice [5] .....	19
<b>Figure II. 4 :</b> 1 <sup>er</sup> schéma d'implémentation PSpice de Leach [6] .....	21
<b>Figure II. 5 :</b> 2 <sup>ème</sup> schéma d'implémentation PSpice de Leach [6] .....	22
<b>Figure II. 6:</b> Schéma équivalent d'une ligne de transmission en fonction de ses paramètres linéiques .....	23

<b>Figure III. 1</b> : Schéma équivalent de Püttmer[7].....	31
<b>Figure III. 2</b> : Circuit électrique utilisé pour la simulation de l'impédance.....	34
<b>Figure III. 3</b> : Impédance électrique d'un transducteur piézoélectrique. a) Module et b) phase .....	35
<b>Figure III. 4</b> : Impédance électrique de pastilles PZT-5A pour des électrodes de différents diamètres. a) Module et b) phase.....	37
<b>Figure III. 5</b> : Impédance électrique de pastilles PZT-5A de différentes épaisseurs. a) Module et b) phase.....	38
<b>Figure III. 6</b> : Impédance électrique de pastilles PZT-5A de différentes épaisseurs. a) Module et b) phase.....	40
<b>Figure III. 7</b> : Module des impédances électriques des pastilles. a) AlN et b) ZnO et c) PZT-5A.....	42
<b>Figure III. 8</b> : Phases des impédances électriques des pastilles a) AlN et b) ZnO et c) PZT-5A.....	43
<b>Figure III. 9</b> : Circuit électrique utilisé pour la simulation la réponse impulsionnelle de PZT-5A .....	44
<b>Figure III. 10</b> : Réponse simulée du transducteur (PZT-5A). a) réponse impulsionnelle et b) spectre FFT .....	45
<b>Figure III. 11</b> : Réponse impulsionnelle du transducteur (PZT-5A) et son spectre FFT. (a) et (b) $R_b=53\Omega$ , (c) et (d) $R_b=1K\Omega$ , (e) et ( f) $R_b=3k\Omega$ .....	46
<b>Figure III. 12</b> : Configuration simulée.....	47
<b>Figure III. 13</b> : Schéma électrique équivalent de la configuration Fig. (III.12) .....	48

<b>Figure III. 14</b> : Réponse impulsionnelle du système ultrasonore (III.12) simulé sur PSpice selon schéma (III.13) pour cas de fluide = eau .....	50
<b>Figure III. 15</b> : Réponse impulsionnelle du système ultrasonore (III.12) simulé pour trois distances de propagation dans l'eau. (a) 10mm, (b) 20 mm et (c) 30 mm.....	51
<b>Figure III. 16</b> : Réponses impulsionnelles du système ultrasonore (III.12) simulé pour 3 matériaux a) eau, b) huile d'olive et c) glycérine .....	53
<b>Figure III. 17</b> : Comparaison entre les premiers échos de réflexion dans les trois milieux de propagation (glycérine, huile d'olive et eau) .....	54

## Liste des tableaux

<b>Tableau II. i</b> : Analogie électroacoustique.....	29
<b>Tableau III. i</b> : Paramètres linéiques des lignes de transmission T (d, R, L, G, C).....	32
<b>Tableau III. ii</b> : Paramètres pour le reste du circuit équivalent de la piézo-céramique.....	33
<b>Tableau III. iii</b> : Les propriétés physiques du PZT-5A [2].....	33
<b>Tableau III. iv</b> : Valeurs utilisées dans les simulations de la figure (III.4).....	36
<b>Tableau III. v</b> : Valeurs utilisées dans les simulations de la figure (III.5).....	39
<b>Tableau III. vi</b> : Les propriétés physiques de l'AlN et ZnO.....	41
<b>Tableau III. vii</b> : Valeurs utilisées dans les simulations de la figure (III.4).....	41
<b>Tableau III. viii</b> : Valeurs des amplitudes crête à crête et des atténuations .....	52
<b>Tableau III. ix</b> : Valeurs des paramètres limpides correspondant aux lignes de transmission équivalentes de l'eau, huile d'olive et glycérine .....	52

## Résumé

### Arabe

تأثير هندسة محول ان المحاكاة على أساس النمذجة أحادي البعد ، ويتم تنفيذها باستخدام إصدار برنامج PSpice 9.2. الطاقة، التحميل الخلفي وطبيعة المادة الكهرضغطية على مقاومة المحول تمت بمناقشة كهرضغطية. تتم عمليات المحاكاة في مجال التردد. تأثير طبيعة وسط الانتشار على شكل وخصائص الموجات فوق الصوتية المتولدة بواسطة محول كهرضغطية. تطبيق هذا النموذج على السلسلة تتم بمناقشة الموجات فوق الصوتية للتكوين البسيط في المجال الزمني.

### Français

Les simulations basées sur les modélisations unidimensionnelles, et sont effectuées utilisant le logiciel PSpice version 9.2. L'influence de la géométrie du transducteur, du chargement arrière et de la nature du matériau piézoélectrique sur l'impédance du transducteur piézoélectrique sont discutés. Les simulations se font dans le domaine fréquentiel. L'effet de la nature du milieu de propagation sur la forme et les caractéristiques de l'onde ultrasonore générée par un transducteur piézoélectrique est discuté. L'application de ce modèle sur une chaine ultrasonore de configuration simple est discutée.

### Anglais

Simulations based on modeling one-dimensional, and are performed using PSpice software version 9.2. The influence of the geometry of the transducer, rear loading and the nature of the piezoelectric material on the transducer impedance piezoelectric is discussed. The simulations are done in the frequency domain. The effect of nature of the propagation medium on the shape and characteristics of the generated ultrasonic wave by a piezoelectric transducer is discussed. The application of this model on a chain Ultrasound of simple configuration is discussed in the time domain.

**Introduction**

**Générale**

Les systèmes ultrasonores sont des systèmes électriques basés sur la propagation des ondes acoustiques dont la fréquence dépasse les 20 KHz (domaine des ultrasons). Ils sont principalement utilisés pour la caractérisation et le contrôle des matériaux. Leurs applications s'étendent sur plusieurs domaines tels que la médecine, la sidérurgie, l'aéronautique, la microélectronique, etc.

En raison des avantages incontournables des ultrasons, plusieurs types de systèmes ultrasonores sont développés, pour usage académique ou industriel. Bien qu'ils soient largement utilisés, ces systèmes nécessitent un développement en continu pour répondre aux challenges industriels. La maîtrise de tels systèmes requiert des connaissances approfondies de chaque partie du système ultrasonore (partie piézoélectrique, partie électrique, partie acquisition et numérisation des données).

Le transducteur est le composant principal de la partie piézoélectrique d'un système ultrasonore standard (basé sur l'effet piézoélectrique). Son rôle est de générer l'onde ultrasonore à partir d'une excitation électrique. Grâce à son élément actif (pastille piézoélectrique), il convertit l'énergie électrique reçue en énergie mécanique par effet piézoélectrique et vice versa. Les caractéristiques du transducteur (fréquence de résonance, la bande passante, résolution, précision, etc.) dépendent de sa conception, à savoir le matériau dont est fabriquée la pastille piézoélectrique, la taille de la pastille, le chargement arrière et la dimension des électrodes.

En effet, il est important d'étudier, avant toute mise en place pratique, le transducteur et le système ultrasonore à développer, afin de répondre aux critères exigés par l'application souhaitée. La modélisation et la simulation permettent de prédire les différentes étapes allant de la conception jusqu'à la réalisation du transducteur et ainsi de la chaîne ultrasonore. Elles donnent une prédiction de leurs réponses. La modélisation, basée sur le schéma électrique équivalent, offre un outil puissant pour l'analyse des systèmes électromécanique [1]. Elle s'est développée avec les années jusqu'à prendre de l'ampleur dans différents domaines technologiques. Bien que les modèles qui en découlent soient des modèles unidimensionnels (1D), elle a montré son efficacité dans les analyses harmoniques et transitoires en particulier pour les systèmes ultrasonores. En effet, l'approche du schéma électrique équivalent est basée sur l'analogie entre l'aspect électrique et l'aspect mécanique des systèmes électromécaniques.

En utilisant des simulations électriques standards à 1D, l'approche a permis de modéliser des systèmes ultrasonores complexes [2].

Parmi les logiciels de simulation des circuits électriques les plus utilisés, on distingue le logiciel PSpice. Un outil important à l'heure actuelle en matière de simulation de circuits analogiques et numériques. Il est issu de Spice (simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), logiciel créé à l'université de Californie (Berkeley) au début des années 1970 [3]. Grâce à ces différents modules (Capture, Schematics, PSpice A/D qui le rendent plus agréable pour l'utilisateur), PSpice peut être considéré comme le premier et l'un des principaux simulateurs analogiques/numériques [4]. D'ailleurs, il est très utilisé pour les simulations de systèmes à effet électromécanique tels que les systèmes ultrasonores. Plusieurs modèles d'implémentation des schémas électriques des systèmes ultrasonores ont été proposés [2, 5-7].

Ce travail est réparti en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'énoncer de certaines notions de base et quelques définitions, à savoir la piézoélectricité, les transducteurs ultrasonores et les notions globales sur les ultrasons.

Le deuxième chapitre est consacré à l'énoncer de certains modèles unidimensionnels utilisés pour la description de la conversion piézoélectrique dans les systèmes électromécaniques contenant des transducteurs vibrant en mode épaisseur. La modélisation est basée sur le principe du schéma électrique équivalent. L'implémentation du modèle sélectionné dans le logiciel de simulation PSpice est présentée.

Le troisième chapitre est consacré aux simulations basées sur les modélisations unidimensionnelles présentées dans le deuxième chapitre. Les simulations sont effectuées en utilisant le logiciel PSpice version 9.2. L'influence de la géométrie du transducteur, du chargement arrière et de la nature du matériau piézoélectrique sur l'impédance du transducteur piézoélectrique est discutée. Les simulations se font dans le domaine fréquentiel. L'effet de la nature du milieu de propagation sur la forme et les caractéristiques de l'onde ultrasonore générée par un transducteur piézoélectrique est discuté. L'application de ce modèle sur une chaîne ultrasonore de configuration simple est discutée dans le domaine temporel.

# **Chapitre 1**

## **Généralités & Définitions**

## Introduction

Ce chapitre est consacré à l'énoncer de certaines notions de base et quelques définitions qui seront utilisées dans les prochains chapitres. Après un aperçu général sur la piézoélectricité, nous allons présenter les notions de base sur les transducteurs ultrasonores (définition, éléments constitutifs et caractéristiques électriques). À la fin du chapitre, des notions globales sur les ultrasons telles que la gamme ultrasonore, les applications des ultrasons, les techniques ultrasonores, les configurations expérimentales et la chaîne ultrasonore vous seront énoncées.

### I.1. Piézoélectricité

#### I. 1. 1. Définition

La piézoélectricité est la propriété, que possèdent certains matériaux (cristaux, céramiques, polymères ou composites), de pouvoir transformer une énergie électrique en une énergie mécanique et vice versa [8]. On distingue l'effet direct et l'effet inverse :

- L'effet piézoélectrique direct est l'apparition de dipôle électrique dans un matériau soumis à des contraintes mécaniques.
- L'effet piézoélectrique indirect, encore appelé effet inverse ou réciproque, est la capacité du matériau de se déformer spontanément lorsqu'il est soumis à une tension électrique.

#### I. 1. 2. Matériaux piézoélectriques

Les matériaux naturels ou de synthèse présentant des propriétés piézoélectriques sont très nombreux. Il est impossible d'en faire un inventaire exhaustif, néanmoins, on peut les classer en grandes familles selon leur composition chimique, leur structure cristallographique ou bien leur intérêt scientifique ou industriel. On distingue :

- *Les oxydes ferroélectriques* tels que  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{KNbO}_3$ ,  $\text{BiFeO}_3$  et  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  abrégé en PZT [9] ;
- *Les oxydes non ferroélectriques* tels que le quartz ( $\text{SiO}_2$ ) ;
- *Les semi-conducteurs* tels que le nitrure d'aluminium (AlN) et l'oxyde de zinc (ZnO);
- *Les polymères* tels que le PVDF ;
- *Les sels* tels que le sel de Rochelle.

### I. 1. 3. Les formes usuelles des matériaux piézoélectriques

Il existe plusieurs formes de matériaux piézoélectriques. On distingue :

- **Les céramiques** : c'est les matériaux piézoélectriques les plus répandus dans la nature. On parle parfois de piézo-céramiques. Leur structure est granulaire. Les dipôles électriques de ces derniers sont orientés selon une direction privilégiée après un processus de polarisation.
- **Les monocristaux** : c'est sous cette forme que se présentent les matériaux piézoélectriques naturels tel que le quartz. On distingue les monocristaux monodomaines et polydomaines selon qu'une ou plusieurs directions de polarisation coexistent dans le cristal.
- **Les composites** : c'est des piézo-composites constitués de deux phases. Une phase piézoélectrique (souvent la PZT) et une phase non piézoélectrique (typiquement une résine époxy).
- **Les couches minces** : c'est des couches piézoélectriques de faible épaisseur typiquement entre 0,5 et 5  $\mu\text{m}$ . Elles sont généralement fabriquées par procédés de dépôt de matériaux tels que la pulvérisation, sol-gel et ablation laser. Les matériaux les plus répandus sont l'AlN et le ZnO, très souvent à la base des microsystèmes électromécaniques (MEMS).

### I. 1. 4. Applications des matériaux piézoélectriques

Grâce aux progrès technologiques, les matériaux piézoélectriques sont, aujourd'hui, à la base de nombreuses applications telles que :

- **Les actionneurs piézoélectriques** : utilisés dans les microscopes à force atomique, le contrôle de vibrations et assistance à l'usinage, la commande de certains injecteurs en automobile, les imprimantes à jet d'encre et les dispositifs opto-acoustiques.
- **Moteurs piézoélectriques** : utilisés dans les systèmes autofocus d'appareils photographiques et les mécanismes de vitre électrique de voiture.
- **Microsystèmes électromécaniques (MEMS)** : On distingue les filtres piézoélectriques à ondes acoustiques de surface SAW, les filtres à onde de volume (FBAR), résonateurs piézoélectriques et capteurs de pression ou d'accélération.
- **Transducteurs piézoélectriques** : On distingue les microphones piézoélectriques et les haut-parleurs pour la gamme de fréquences audibles, les sonars utilisés dans la marine,

les sondes échographiques utilisées en médecine et les palpeurs utilisés en contrôle non destructif (CND).

## I. 2. Les Transducteurs piézoélectriques

### I. 2. 1. Définition

Un transducteur est un dispositif convertissant un signal physique en un autre [10]. Autrement dit, c'est un dispositif qui transforme l'énergie reçue sous une forme donnée vers une autre forme. Le cœur des transducteurs piézoélectriques est le matériau piézoélectrique. C'est l'élément à l'origine de la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Les transducteurs piézoélectriques peuvent être utilisés pour émettre et/ou détecter les ondes acoustiques dans toutes les gammes de fréquences.

### I. 2. 2. Éléments constitutifs d'un transducteur piézoélectrique

Les principaux composants d'un transducteur sont l'élément actif (pastille piézoélectrique), les deux électrodes, la couche d'amortissement (chargement arrière ou backing), les lames d'adaptation de la face avant et enfin la lentille de focalisation selon les cas (voir **Fig. I.1**). Chacun de ces éléments joue un rôle plus ou moins important dans la résolution et la sensibilité du transducteur :

- L'élément actif représente le cœur du transducteur. Il détermine à la fois la sensibilité à l'émission et à la réception. De plus, son épaisseur, ainsi que sa vitesse fixent la fréquence du transducteur.
- Les électrodes assurent la connexion électrique du matériau piézoélectrique, en émission comme en réception. Leur taille affecte l'amplitude de la résonance.
- La couche d'amortissement (chargement arrière), placée à l'arrière de l'élément actif, absorbe les ondes émises par la face arrière. Ce qui diminue le phénomène de résonance mécanique et donc fixe la résolution axiale. Lorsque l'impédance acoustique de la couche d'amortissement et celle de l'élément actif sont similaires, le transducteur sera fortement amorti, il présente une bonne résolution, mais donne souvent un signal de faible amplitude. Un écart d'impédance acoustique entre la couche d'amortissement et l'élément actif cause une réflexion de l'énergie sonore vers la face avant de l'élément actif. Ceci permet d'avoir un transducteur de faible résolution (durée d'impulsion longue), mais de forte sensibilité (signal de forte amplitude).

- Les lames d'adaptation permettent d'optimiser la transmission de l'énergie mécanique et donc d'améliorer la bande passante du transducteur. Elles assurent également la protection de l'élément actif de l'environnement extérieur. Dans le cas des transducteurs de contact, la lame d'adaptation doit être un matériau durable et résistant à la corrosion afin de résister à l'usure causée par la surface du matériau testé. Pour les transducteurs à immersion, en plus de la protection de l'élément actif, la lame d'adaptation sert à l'adaptation d'impédance entre l'élément actif et l'eau.
- Une lentille peut être placée devant l'élément actif afin de réduire la largeur transverse du faisceau acoustique, et donc d'améliorer le pouvoir de résolution.

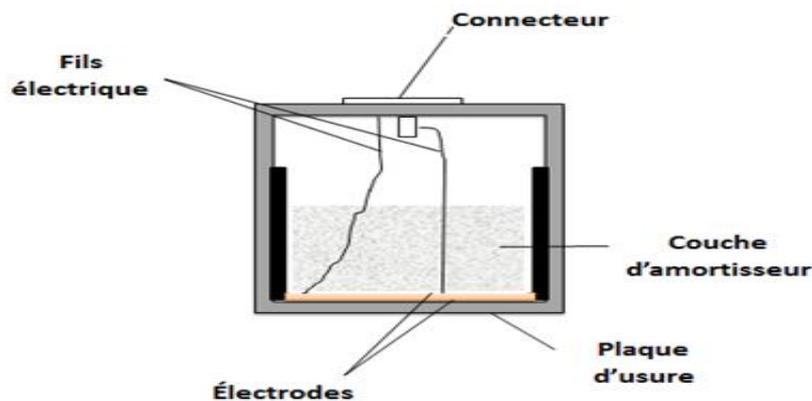


Figure I. 1: Schéma d'un transducteur à ultrasons

### I. 2. 3. Caractéristiques des transducteurs ultrasonores

Un transducteur peut être caractérisé grâce à plusieurs paramètres caractéristiques. Il peut être caractérisé par sa réponse impulsionnelle (waveform) et/ou sa réponse spectrale (analyse des fréquences). La figure (I.2) illustre la forme typique de la réponse impulsionnelle d'un transducteur 5 MHz ainsi que son spectre de Fourier. L'analyse de la réponse impulsionnelle nous renseigne sur la durée de l'impulsion produite par le transducteur ( $\tau$ ) et son amplitude ( $v_{pp}$ ) (Fig. I.2a). L'analyse du spectre (Fig. I.2b) nous renseigne sur sa fréquence centrale dénommée ( $f_c$ ) (correspondant au maximum d'amplitude du spectre) et sur sa bande passante à -6 dB (bandwidth) définie par ( $B_6 = (f_2 - f_1)/f_c$ ).

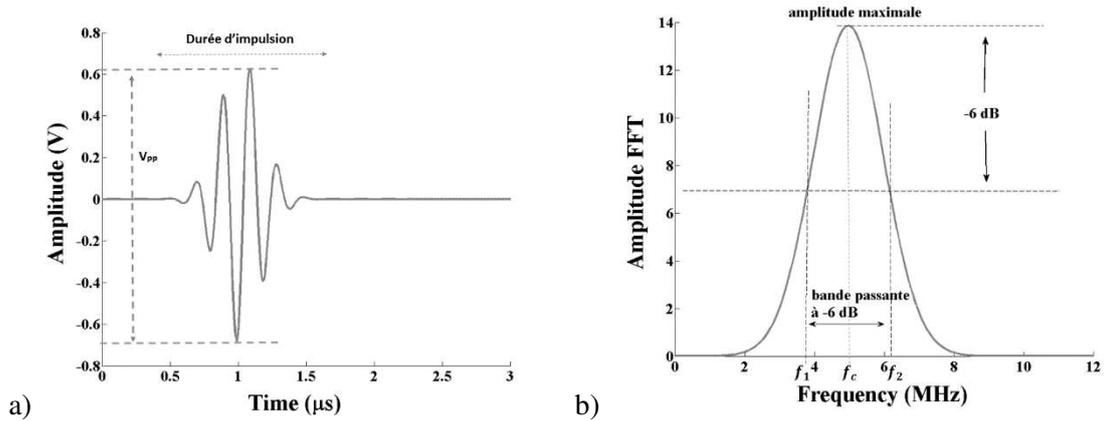


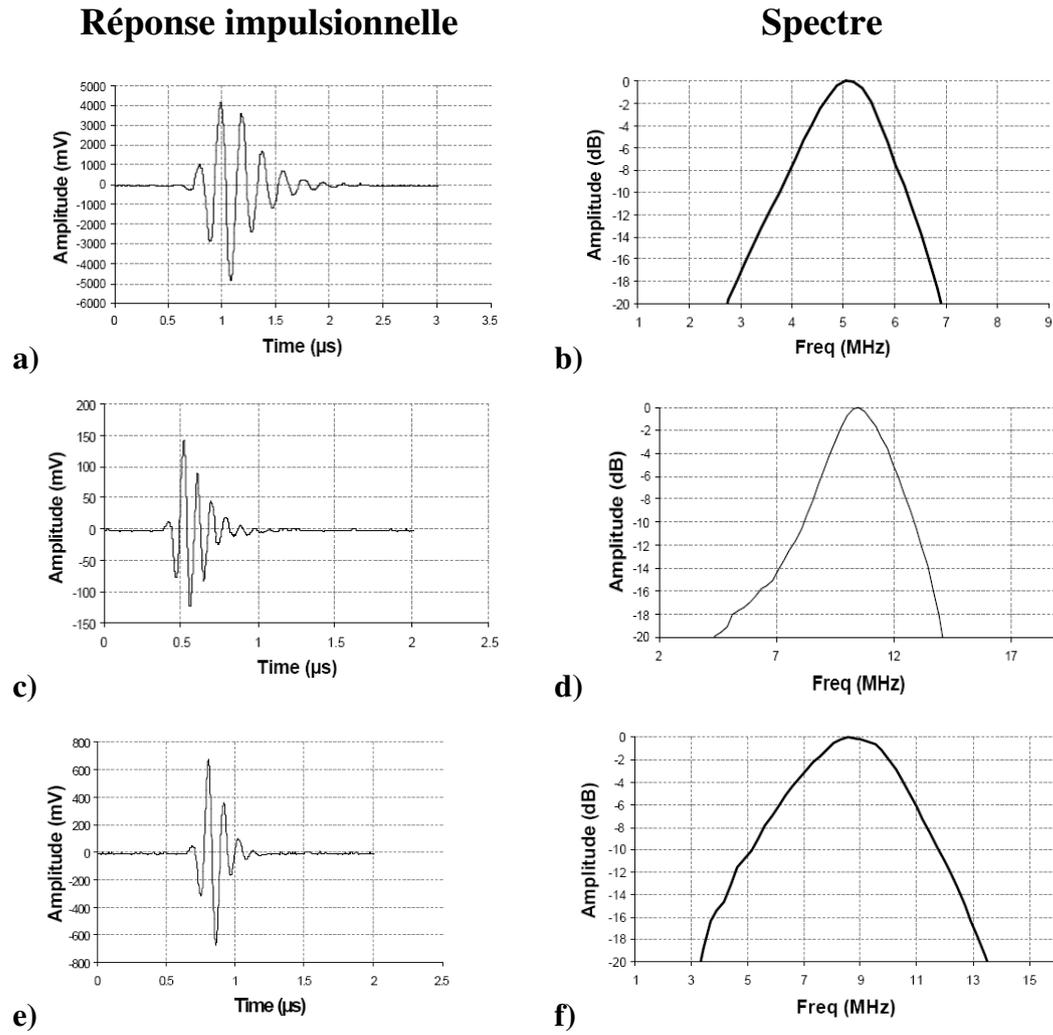
Figure I.2 : Forme typique de : a) réponse impulsionnelle et b) spectre FFT

En effet, la fréquence centrale du spectre caractéristique d'un transducteur est déterminée par l'épaisseur de l'élément piézoélectrique, alors que la durée de l'impulsion ainsi que la bande passante sont déterminées par le chargement arrière (baking ou damping).

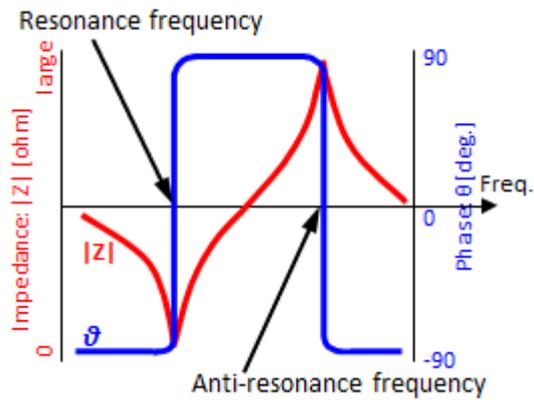
On distingue trois types de transducteurs dans les commerces (**Fig. I.3**) [11] :

- Les transducteurs fortement chargés (high damped), délivrant des impulsions de courte durée dont le spectre présente une large bande passante, appelés transducteurs haute résolution.
- Les transducteurs faiblement chargés (low damped), délivrant des impulsions de longue durée dont le spectre présente une bande passante étroite.
- Les derniers types de transducteurs sont moyennement chargés (medium damped) présentent des caractéristiques intermédiaires.

Un transducteur peut être, également, caractérisé en termes de son impédance électrique. La figure (**I.4**) illustre la forme typique de l'impédance électrique d'un transducteur ultrasonore (module et phase). La courbe du module de l'impédance électrique présente un minimum et un maximum. Le minimum correspond à la fréquence de résonance dénommée ( $f_r$ ), le maximum correspond la fréquence d'anti résonance dénommée ( $f_a$ ).



**Figure I.3 :** Influence du damping sur la réponse impulsionnelle et le spectre d'un transducteur ultrasonore. (a et b) low damping, (c et d) medium damping et (e et f) high damping [11].

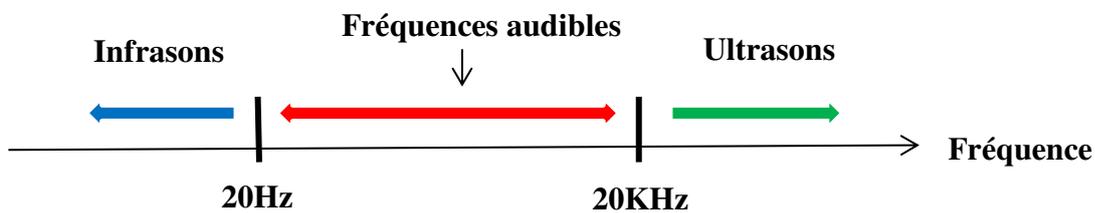


**Figure I. 4 :** Forme typique de l'impédance électrique d'un transducteur ultrasonore (module et phase) [12]

## I. 3. Les ultrasons

### I. 3. 1. Définition

Le son généré au-dessus de la plage auditive humaine (généralement 20 kHz) est appelé ultrason. Les fréquences ultrasonores utilisées en contrôle non destructif et pour la mesure d'épaisseur se situent entre 100 kHz et 50 MHz. Bien que les ultrasons se comportent de manière similaire au son audible, leur longueur d'onde est plus courte. Cela signifie qu'ils peuvent être réfléchis sur de très petites surfaces. C'est cette propriété qui fait l'échographie utile pour les essais non destructifs des matériaux.



*Figure I.5 : Domaines de fréquences des ondes sonores*

Les ultrasons sont utilisés dans de nombreuses applications telles que l'homogénéisation, la désintégration par ultrasons, le dégazage et démoussage des liquides, le nettoyage par ultrasons, l'échographie médicale et l'ultrasonothérapie.

### I. 3. 2. La gamme ultrasonore

Les ultrasons sont des ondes acoustiques (mécaniques) dont la gamme de fréquences se situe entre 16 KHz et 10MHz. On peut classer les ultrasons en fonction de leur fréquence en deux catégories :

- Les ultrasons de puissance (forte intensité et faible fréquence de 16 KHz à 1 MHz) peuvent entraîner des modifications physiques (décapage, dégazage, émulsification) et chimiques (modification du mécanisme réactionnel, production de radicaux libres).
- Les ultrasons de diagnostic (faible intensité et haute fréquence de 1 à 10 MHz) permettent de déterminer les caractéristiques physicochimiques du milieu qu'ils traversent. Ces propriétés sont utilisées en imagerie médicale et en contrôle non destructif de matériaux.

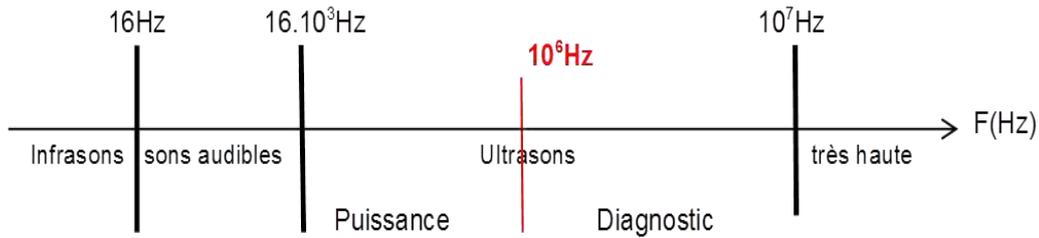


Figure I.6 : Domaine de fréquence des sons

### I. 3. 3. Génération des ultrasons

Les ultrasons peuvent être générés par différentes sources. La méthode de génération standard des ultrasons utilise l'effet piézoélectrique, pour convertir l'énergie électrique en un déplacement mécanique (voir § I.1.1). Une tension électrique appliquée sur l'échantillon induit une déformation du cristal.

Le développement récent des lasers a permis l'exploitation des interactions lumière-matière et a fait naître la nouvelle méthode de génération des ultrasons notamment les ultrasons laser LUS. Cette technique, mise en évidence pour la première fois par White [13-14], est fondée sur l'interaction du faisceau lumineux avec un matériau. Une impulsion laser chauffe la partie supérieure du matériau entraînant localement une déformation thermoélastique. Des ondes élastiques surfaciques et volumiques sont alors créées dans la matière (Fig. I.7). L'interaction de ces ondes avec les défauts ou les bords de l'échantillon étudié génère des déplacements de la surface. Ces déplacements sont détectés par un interféromètre.

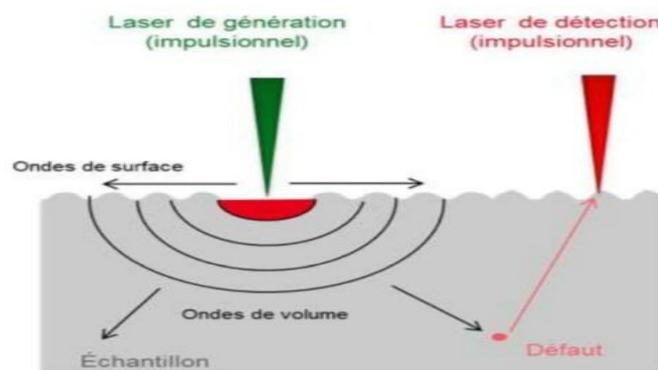


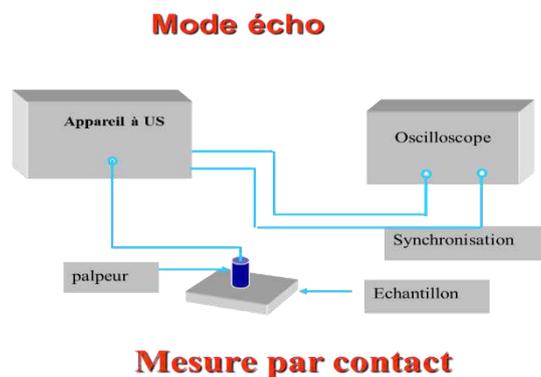
Figure I.7 : Principe du contrôle par ultrasons laser

L'avantage de la génération optique des ultrasons est qu'elle permet un diagnostic sans contact. Les ultrasons peuvent ainsi être utilisés pour des contrôles en ligne, puisqu'ils ne perturbent pas le procédé de fabrication et peuvent être utilisés sous des contraintes de température.

### I. 3. 4. Méthodes ultrasonores

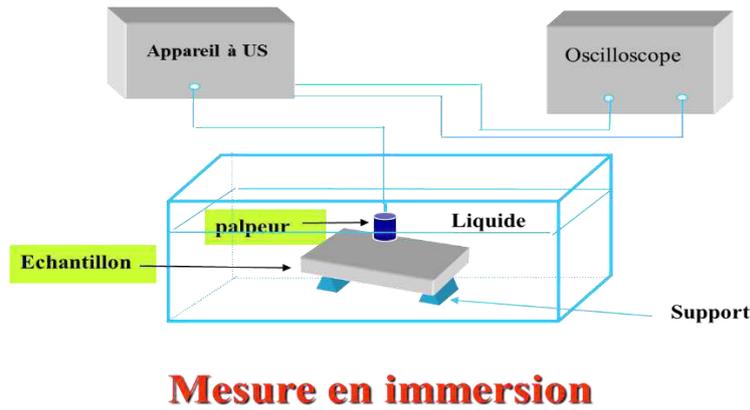
On distingue plusieurs méthodes pratiques de contrôle ultrasonore :

- **Contrôle en mode transmission** : Cette méthode nécessite deux transducteurs piézoélectriques distincts. Le premier est utilisé pour l'émission de l'onde ultrasonore, le deuxième pour sa réception. La difficulté de cette méthode vient dans le fait que le transducteur récepteur doit se situer exactement en face du transducteur émetteur.
- **Contrôle en mode écho (mode par réflexion)** : Cette méthode est la plus utilisée dans le contrôle ultrasonore. Elle utilise le même transducteur pour l'émission et la réception du signal. L'avantage de cette méthode est le fait d'utiliser la même face de l'échantillon et un seul transducteur.



*Figure I.8 : Principe du contrôle en mode écho [15]*

- **Mesure par Contact** : Cette méthode nécessite l'ajouter d'un couplant (ex. gel) entre le transducteur et l'échantillon pour assurer la transmission des ondes. L'avantage de cette technique est que l'incidence est quasi-normale. Elle est très simple à mettre en œuvre et les réflexions sur la face arrière de l'échantillon sont totales. Cependant, les mesures sont souvent effectuées dans la région du champ proche où les perturbations associées à la diffraction du champ sont importantes.
- **Mesure en Immersion** : Dans cette méthode, le transducteur est placé à une certaine distance de l'échantillon dans un milieu liquide en général de l'eau. La colonne d'eau est suffisamment grande pour se trouver dans la zone de champ lointain. L'avantage est que l'énergie transférée à l'échantillon est toujours constante tant que la hauteur de la colonne d'eau reste constante. Le déplacement et le réglage de l'ensemble peuvent être assurés par un système mécanique permettant la précision et la reproductibilité des mesures.



## Mesure en immersion

Figure I.9 : Principe du contrôle en mode écho [15]

### I. 3. 5. Systèmes ultrasonores

Les systèmes ultrasonores sont constitués de plusieurs éléments, chacun définit une fonction et un rôle particulier :

- Le transducteur est l'élément responsable de la génération de l'onde acoustique par conversion électroacoustique grâce à son élément piézoélectrique. Il peut être utilisé soit en mode écho (émission et réception) ou en mode transmission (émission ou réception).
- L'appareil à ultrasons (émetteur / récepteur) est utilisé pour l'émission de l'onde électromagnétique (avant conversion) et la réception de cette dernière (après conversion). La partie émettrice de l'appareil à ultrasons est responsable de l'excitation du transducteur avec des impulsions. La partie réceptrice de l'appareil à ultrasons reçoit l'onde après sa conversion par le transducteur, elle permet de manipuler le signal reçu en faisant des filtrages et des amplifications.
- Le numériseur peut être soit une carte d'acquisition (ADQ) ou un oscilloscope. Son rôle est de numériser (échantillonner) le signal (qui est continu à sa réception) pour pouvoir le traiter par la suite sur un ordinateur.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions et les propriétés associées à la piézoélectricité, les transducteurs et les ultrasons. Ces notions sont utiles pour le développement des prochains chapitres.

# **Chapitre 2**

**Modélisation des systèmes**

**ultrasonores**

## Introduction

Dans ce Chapitre, nous allons présenter la modélisation unidimensionnelle des systèmes électro-mécaniques contenant des transducteurs vibrant en mode épaisseur. La modélisation est basée sur le principe du schéma électrique équivalent. L'implémentation du modèle sélectionné dans le logiciel de simulation PSpice est présentée.

La modélisation d'un système ultrasonore nécessite la modélisation de (1) la partie piézoélectrique (point de la transduction), (2) la partie mécanique (propagation d'onde) et (3) la partie électrique (génération et lecture du signal électrique). Ces modélisations seront présentées dans les prochains paragraphes.

## II. 1. Modélisation de la partie piézoélectrique (transducteur)

### II. 1. 1. Modèle de Mason et Redwood

Un des modèles électromécaniques unidimensionnels (1D) les plus répandus en modélisation des matériaux piézoélectriques vibrant en mode épaisseur est le modèle à trois ports de Mason [1].

Bien qu'il soit unidimensionnel, le modèle de Mason a montré son efficacité dans les analyses harmoniques et transitoires.

Pour une pastille piézoélectrique d'épaisseur  $d_0$  et de surface  $S_0$  vibrant en mode épaisseur (**Fig. II.1a**), le schéma du circuit électrique équivalent proposé par Mason [1] contient (**Fig. II.1b**) :

- Trois ports, un électrique et deux acoustiques situés aux faces avant et arrière du cristal piézoélectrique ;
- Une partie électrique contenant deux condensateurs de signes opposés et un transformateur linéaire dont la capacité et le rapport de transformation sont donnés, respectivement, par

$$C_0 = \frac{\varepsilon^s S_0}{d_0} \quad (\text{II.1})$$

$$\varphi = e_{33} \frac{C_0}{\varepsilon^s} = hC_0 \quad (\text{II.2})$$

où  $\varepsilon^s$  est la constante diélectrique du cristal

$h$  et  $e_{33}$  sont les constantes et le coefficient piézoélectriques du cristal

$S_0$  et  $d_0$  sont, la surface et l'épaisseur de la pastille piézoélectrique

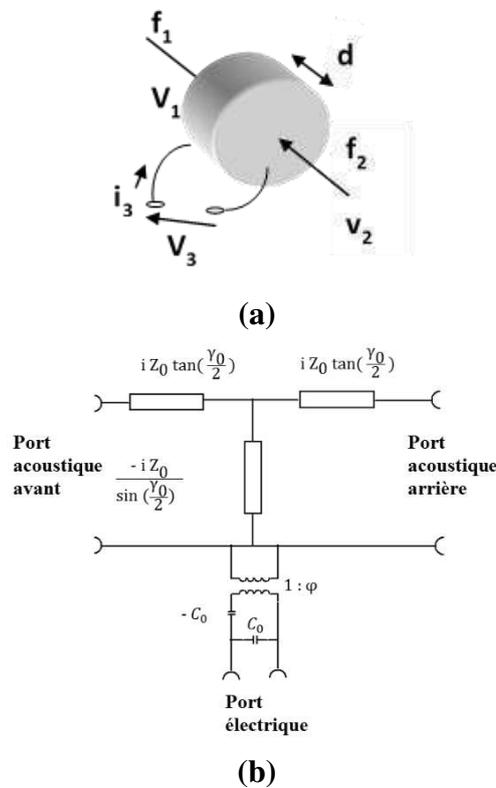
- une partie mécanique contenant trois impédances

$$Z_1 = Z_2 = i Z_0 \tan\left(\frac{\gamma_0}{2}\right) \quad (\text{II.3})$$

et

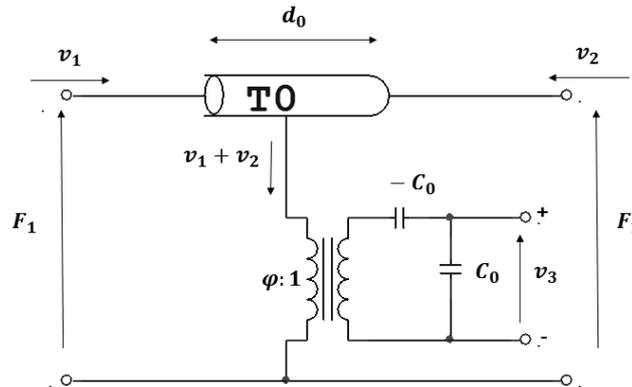
$$Z_3 = -i Z_0 / \sin\left(\frac{\gamma_0}{2}\right) \quad (\text{II.4})$$

où  $Z_0$  est l'impédance acoustique du cristal piézoélectrique et  $\gamma_0 = \omega d_0 \sqrt{\rho_0/c_{33}}$  (où  $c_{33}$  est le module élastique en épaisseur,  $\rho_0$  est la densité du matériaux,  $\omega$  et la fréquence angulaire) est la constante de fréquence normalisée.



**Figure II. 1:** Schéma électrique équivalent d'un cristal piézoélectrique en mode épaisseur proposé par Mason [1]

Une modification du schéma de Mason (**Fig. II.1**) a été proposée par Redwood [16] afin de remplacer la partie mécanique du transducteur par une ligne de transmission  $T_0$  (**voir Fig. II.2**). Le modèle de Mason et Redwood offre un outil très puissant dans l'analyse de l'effet électromécanique des matériaux piézoélectriques, dans le cas des ondes planes longitudinales.



**Figure II. 2 :** Schéma de Mason modifié par Redwood [16].

### II. 1. 2. Implémentation du schéma de Mason et Redwood sur PSpice

Afin d'implémenter le modèle de Mason et Redwood dans le logiciel de simulation des circuits électriques PSpice, plusieurs adaptations de ce dernier ont été proposées dans la littérature.

Pour cette étude nous allons décrire les modèles les plus connus, à savoir le modèle de Morris [5] et le modèle de Leach [6].

#### II. 1. 2. 1. Modèle de Morris

Le premier à proposer un schéma adapté du modèle de Mason et Redwood est Morris [5]. Ce dernier a redessiné le schéma de Mason et Redwood (**Fig. II.2**) en redéfinissant les sorties de la ligne de transmission, et en remplaçant le transformateur idéal et la capacité négative par leurs schémas équivalents.

La figure (**II.3**) montre le schéma proposé par Morris. Les deux blocs encadrés en traits discontinus représentent les schémas équivalents du transformateur idéal et la capacité négative. Ils contiennent des sources linéaires de courant et de tension dépendantes, et également des sources de tension indépendantes.

Les sources de tension indépendantes n'affectent pas le circuit ( $V_{S1}=V_{S2}=0$ ), elles jouent le rôle de ohmmètres.

Les résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  et  $R_4$  sont utilisées afin d'éviter les nœuds flottants, condition de compilation de PSpice.

La ligne de transmission T0 du schéma de Morris est supposée idéale définie par son impédance acoustique  $Z_0$

$$Z_0 = \rho_0 c_0 S_0 \quad (II.5)$$

et son retard  $\tau$

$$\tau = \frac{d_0}{c_0} \quad (II.6)$$

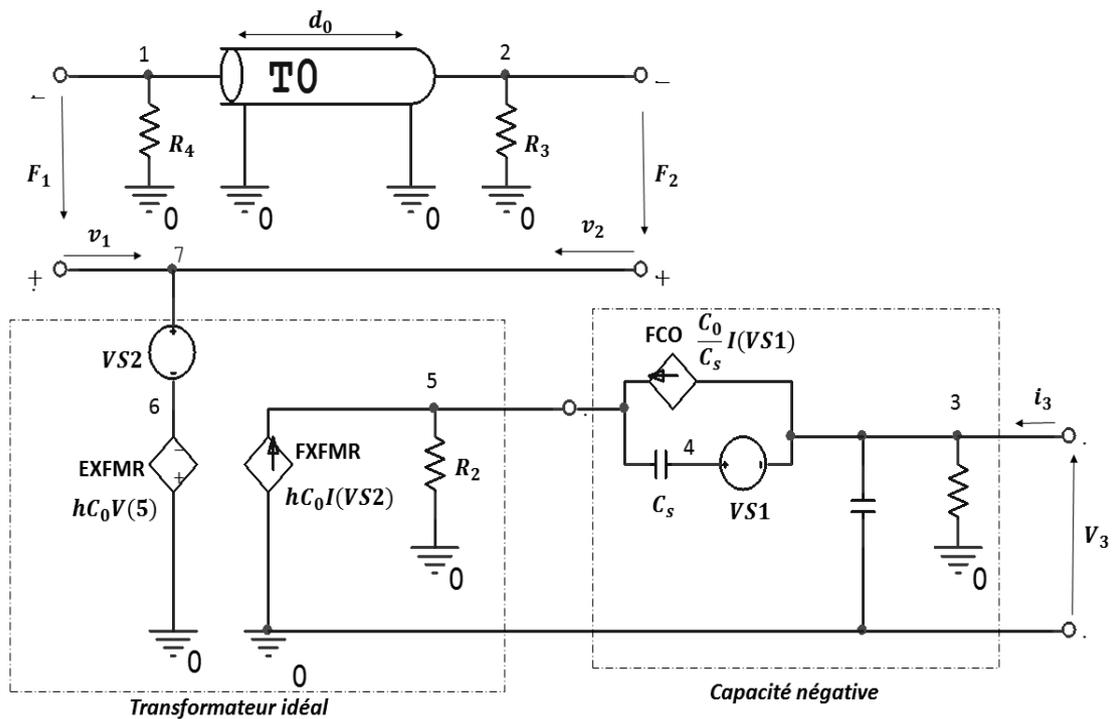


Figure II.3 : Implementation du schéma de Mason sur PSpice [5]

Le script PSpice (netlist) correspondant au schéma de Morris est donné comme suit [5] :

```
.SUBCKT transducteur 3 2 1 7
C0 3 0 {C0}
R1 3 0 {R1}
VS1 4 3
CS 5 4 {k*C0}
FCO 3 5 VS1 {C0/Cs}
R2 5 0 {R2}
FXFMR 0 5 VS2 {φ = hC0}
EXFMR 6 0 5 0 {φ = hC0}
VS2 7 6
T0 1 0 2 0 {Z0} {τ}
R3 2 0 {R3}
R4 1 0 {R4}
.ENDS
```

Les valeurs de  $C_0$  et de  $\varphi$  sont calculées à partir des équations (Eqs. 1 et 2). Dans le modèle de Morris, on considère que  $C_0$  est plus élevée que  $C_s$  d'au moins 100 fois. Les résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  et  $R_4$  sont considérées assez élevées afin d'avoir un effet négligeable sur le circuit.

Bien que le modèle de Morris a franchi un pas important pour l'implémentation du modèle de Mason et Redwood dans les logiciels de simulation standards PSpice, il présente quelques ambiguïtés du fait qu'il utilise un transformateur et une capacité négative.

### II. 1. 2. 2. Modèle de Leach

Leach [6] a proposé une modélisation simplifiée du modèle de Mason et Redwood (Fig. II.2). En ajoutant un terme de valeur nulle à une des équations électromécaniques du composant [6]. Leach a démontré que les équations prennent la forme des équations des télégraphistes de la tension et du courant dans une ligne de transmission.

La figure (II.4) montre la première version de l'implémentation PSpice du modèle proposé par Leach. En plus de la ligne de transmission  $T_0$ , de condensateur  $C_0$  et des sources indépendantes de tension nulle  $V_1$  et  $V_2$ , le schéma de Leach contient des sources contrôlées à la place du transformateur utilisé par Mason.

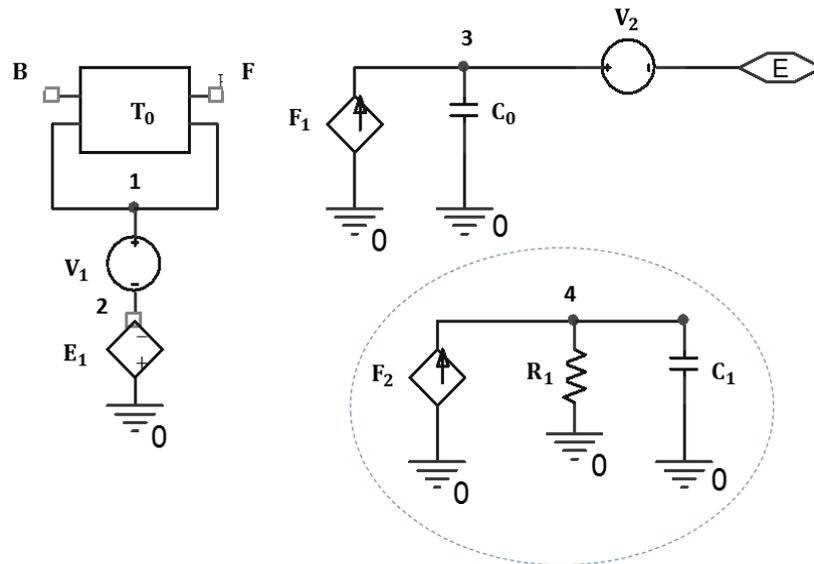


Figure II.4: 1<sup>er</sup> schéma d'implémentation PSpice de Leach [6]

Le script PSpice (netlist) correspondant au 1<sup>er</sup> schéma de Leach est donné comme suit [6]:

```
.SUBCKT transducteur E B F
T0 B 1 F 1 {Z0} {τ}
V1 1 2
E1 2 0 4 0 1
V2 E 3
C0 3 0 {C0}
F1 0 3 V1 {hC0}
F2 0 4 V2 {h}
R1 4 0 {R1}
C1 4 5 1
.ENDS
```

La figure (II.5) montre la deuxième version alternative du schéma de Leach. Dans ce schéma Leach a substitué l'intégral (réalisé par l'ajout de la capacité C1 dans la première version du schéma équivalent) par l'implémentation de la fonction de Laplace intégrée dans le logiciel.

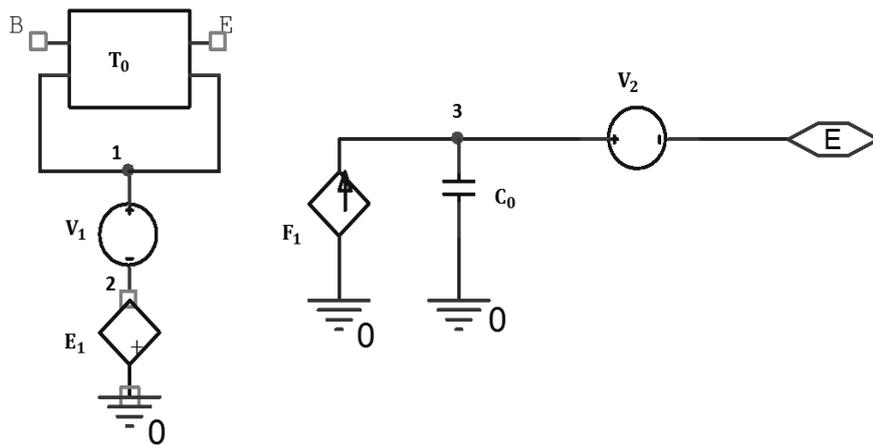


Figure II. 5: 2<sup>ème</sup> schéma d'implémentation PSpice de Leach [6]

Le script PSpice (netlist) correspondant à cette version est [6]:

```
.SUBCKT transducteur E B F
T0 B 1 F 1 {Z0} {τ}
V1 1 2
E1 2 0 LAPLACE {I(V2)}={"h"/s}
V2 E 3
C0 3 0 {C0}
F1 0 3 V1 {hC0}
.ENDS
```

Le modèle de Leach est considéré comme un modèle très intéressant pour la simulation des systèmes électromécaniques du fait qu'il n'utilise pas des transformateurs et de capacité négative.

## II. 2. Modélisation de la partie mécanique d'un système ultrasonore

Dans un système ultrasonore, chaque milieu de propagation constitue la partie mécanique de ce dernier. En utilisant l'analogie électrique des phénomènes acoustiques unidimensionnels, chaque milieu mécanique peut être modélisé par une ligne de transmission définie par ces paramètres linéiques.

Cette modélisation permet de tenir compte du retard temporel ainsi que les pertes mécaniques du signal pendant sa propagation dans les différents milieux mécaniques de la chaîne ultrasonore.

Suivant les travaux de Püttmer [7], il est plus correct de tenir compte des pertes dans la partie mécanique d'un système ultrasonore. Ainsi, il a substitué la ligne de transmission considérée idéale par Leach [6] par une autre avec pertes. Les résultats ont montré une concordance quantitative entre les simulations et l'expérimentation.

La figure (II.6) représente le schéma équivalent d'une ligne de transmission non idéale. Le schéma est représenté en fonction des paramètres linéiques: R (résistance par unité de longueur), L (self par unité de longueur), C (capacité par unité de longueur) et G (conductance par unité de longueur).

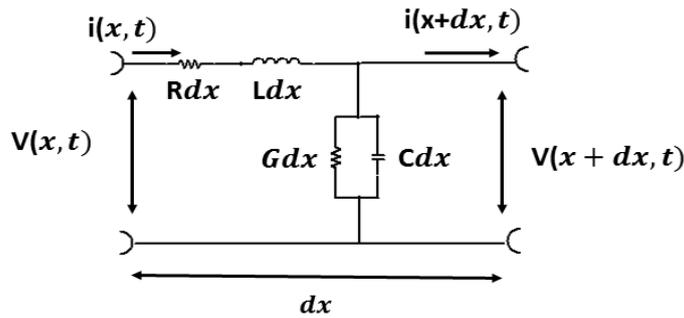


Figure II.6 : Schéma équivalent d'une ligne de transmission en fonction de ses paramètres linéiques

En appliquant la loi de Kirchhoff pour le courant et la tension au circuit de la figure (II. 6) et pour un dx tend vers zéro, on obtient les équations des télégraphistes [2] :

$$\frac{-\partial v(x, t)}{\partial x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{-\partial i(x, t)}{\partial x} = Gv(x, t) + C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (\text{II.8})$$

Pour un régime harmonique et en supposant que la tension et le courant peuvent s'écrire sous forme de produit de deux fonctions une temporelle et l'autre spatiale, on obtient :

$$v(x, t) = \text{Re}[V(x)e^{j\omega t}] \quad (\text{II.9})$$

$$i(x, t) = \text{Re}[I(x)e^{j\omega t}] \quad (\text{II.10})$$

où  $\omega$  est la fréquence angulaire et  $\text{Re}$  désigne la partie réelle.

En remplaçant les équations (II.9) et (II.10) dans les équations (II.7) et (II.8) et en dérivant par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{-dV(x)}{dx} = (R + j\omega L)I(x) \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{-dI(x)}{dx} = (G + j\omega C)V(x) \quad (\text{II.12})$$

En dérivant les équations (II.11) et (II.12) par rapport à  $x$ , nous obtenant les équations différentielles pour la tension et le courant dans la direction de propagation  $x$ :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - \gamma^2 V(x) = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} - \gamma^2 I(x) = 0 \quad (\text{II.14})$$

où  $\gamma$  est une constante de propagation exprimée sous la forme :

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (\text{II.15})$$

Les équations (II.13 et II.14) sont analogues aux équations différentielles de la pression  $p(x)$  et de la vitesse de vibration  $u(x)$  dans le cas des ondes acoustiques planes et harmoniques

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + k_c^2 p(x) = 0 \quad (\text{II.15})$$

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} + k_c^2 u(x) = 0 \quad (\text{II.16})$$

où  $k_c$  est la constante de propagation donnée par:

$$k_c = \alpha + j \frac{\omega}{c} \quad (\text{II.17})$$

Ainsi  $\gamma$  prend la définition d'une constante de propagation constituée d'une partie réelle définissant le coefficient d'atténuation  $\alpha$  exprimé en (Np/[unité de longueur]) et d'une partie imaginaire définissant la constante de phase  $\beta$  exprimée en (rad/[unité de longueur]):

$$\gamma = \alpha + j \beta \quad (\text{II.18})$$

L'impédance caractéristique d'une ligne de transmission avec perte peut-être donnée par :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (\text{II.19})$$

En effet,  $\gamma$  et  $Z_c$  donne une description électrique de la propagation d'une onde acoustique se propageant dans un milieu matériel défini par son impédance acoustique caractéristique  $Z_a = \rho c$ .

Pour les fréquences ultrasonores (hautes fréquences), on peut admettre que les pertes dans la ligne de transmission sont faibles, mais non négligeables ( $R \ll \omega L$  ;  $G \ll \omega C$  et  $\omega \tau \ll 1$ ). L'impédance caractéristique de la ligne de transmission et la constante de propagation peuvent être approximées à:

$$Z_c \cong \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{II.20})$$

$$\gamma \cong \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + j\omega\sqrt{LC} \quad (\text{II 21})$$

Si on néglige R et G,  $\alpha=\alpha_c=\alpha_d=0$ , et donc  $\gamma=j\omega(LC)^{0.5}$ .

Pour corréler entre l'impédance caractéristique de la ligne de transmission et l'impédance caractéristique du milieu de propagation, on définit l'impédance analogue où la force et non la pression est représentée par la tension [2]:

$$Z_{el} \equiv Z_a S \quad (\text{II 22})$$

où S est la surface efficace de la ligne de transmission

Par analogie aux ondes acoustiques, le développement des équations (II 17), (II 20 et (II 21) permettent de remonter aux équations de conversion suivantes :

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II 23})$$

$$L \equiv \rho S \quad (\text{II 24})$$

$$C \equiv \frac{1}{S\rho c^2} \quad (\text{II 25})$$

$$R \equiv 2\rho c S \alpha \quad (\text{II 26})$$

$$G \equiv \frac{2}{\rho c S} \alpha' \quad (\text{II 27})$$

où  $\rho$  et  $v$  sont, respectivement, la densité et la vitesse de phase du milieu de propagation ;  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation liée aux pertes intrinsèques telles que le scattering, l'absorption et l'hystérésis;  $\alpha'$  est le coefficient d'atténuation exprimé en (Np/[unité de longueur]) lié aux pertes liées à la conduction thermique.

Les relations (II.22-II.27) sont utilisées pour calculer les valeurs des paramètres linéiques de n'importe quelle ligne de transmission. Ceci permet de donner une représentation électrique d'un milieu acoustique. Elles constituent les équations de base pour construire le schéma équivalent de la partie mécanique des systèmes ultrasonores.

Dans le cas des matériaux à faible conduction de chaleur, l'atténuation liée à la conduction thermique  $\alpha'$  est négligeable. Ce qui donne une conductance  $G = 0$ .

En combinant les équations (II.23, II.25 et II.26), l'équation (II.26) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$R \approx 2\alpha(\omega) \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{II.28})$$

Le coefficient d'atténuation  $\alpha(\omega)$  est une grandeur qui varie avec la fréquence, son expression dépend de la nature de milieu de propagation.

Dans le cas des fluides, les pertes sont gérées par le phénomène d'absorption liée à la viscosité du liquide. Selon Kinsler et al. [17], le coefficient d'atténuation varie quadratiquement avec la fréquence, il est donné par :

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega^2}{3\rho c^3} \eta \quad (\text{II.29})$$

où  $\eta$  est le coefficient de viscosité du fluide.

En combinant les équations (II.23, II.28 et II.29), la résistance linéique de la ligne de transmission équivalente dans le cas d'un milieu fluide peut être exprimée sous la forme :

$$R(\omega) = \frac{4L\eta}{3\rho c^2} \omega^2 \quad (\text{II.30})$$

L'équation (20) montre que dans le cas des fluides, les pertes suivent une variation fréquentielle quadratique avec un facteur de proportionnalité :

$$R^* = \frac{4L\eta}{3\rho c^2} \quad (\text{II.31})$$

Dans le cas des matériaux solides, en absence des phénomènes de scattering (diffusion) et d'absorption, l'atténuation peut être exprimée en fonction du facteur de qualité Q [18]

$$\alpha(\omega) = \pi \frac{\omega}{Q c} \quad (\text{II.32})$$

En combinant les équations (II.23, II.28 et II.32), la résistance linéique de la ligne de transmission équivalente dans le cas d'un milieu solide en absence de diffusion et d'absorption est donnée sous la forme :

$$R(\omega) = \frac{2\pi L}{Q} \omega \quad (\text{II.33})$$

L'équation (II.33) montre que dans le cas des solides où les pertes sont gérées par les pertes acoustiques, la résistance linéique est proportionnelle à la fréquence avec un facteur de proportionnalité :

$$R^* = 2\pi \frac{L}{Q} \quad (\text{II.34})$$

Le facteur de proportionnalité  $R^*$  est également trouvé égale à  $L/Q$  dans la littérature, donc sans le facteur  $2\pi$ . Ceci est lié à l'approximation au niveau de l'expression du facteur de pertes, à savoir  $\delta = 2\pi/Q$  ou bien  $\delta = 1/Q$ , les valeurs ne change pas beaucoup. Pour  $\delta = 2\pi/Q$ , l'équation (II.34) devient :

$$R^* \approx L \delta \quad (\text{II.35})$$

Il est à noter que nous avons considéré que seule la résistance varie en fonction de la fréquence. L'expression de la résistance varie avec la nature du milieu. Le tableau (II.i)

Table II.i: Analogie électroacoustique.

Électrique	Acoustique
Impédance caractéristique $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$	Impédance acoustique $Z_a = \sqrt{\rho c_{33}^D}$
Vitesse $c = 1/\sqrt{LC}$	Vitesse $c_l = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}}$
Inductance $L = \frac{Z_c}{c}$	Masse volumique $\rho = \frac{Z_a}{c_l}$
Capacité $C = \frac{1}{Z_c v}$	Constante élastique $c_{33}^D = Z_a c_l$
Première résonance $f = \frac{c}{2l}$	Première résonance $f = \frac{c_l}{2e}$

### II. 3. Modélisation de la partie électrique d'un système ultrasonore

La partie électrique d'un système ultrasonore est constituée généralement de (1) la source d'excitation et de réception de l'onde ultrasonore telle qu'un émetteur-récepteur, (2) des câbles de connexion, (3) des connectiques et (4) d'un numériseur ou oscilloscopes.

Généralement, les circuits équivalents des différentes parties électriques sont fournis par les fabricants. Cependant, selon l'objectif des simulations certaines parties peuvent être schématisées au détriment de certains éléments dont l'effet est jugé négligeable.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de Mason et Redwood ainsi que les différents modèles de son implémentation sur le logiciel PSpice. Nous avons présenté les modèles unidimensionnels d'un transducteur vibrant en mode épaisseur notée modélisation piézoélectrique. Les schémas ainsi que leurs netlist sont donnés et expliqués. La modélisation de la partie mécanique des systèmes ultrasonores est présentée séparément. Les équations de conversion sont déduites à partir des équations des télégraphistes et de l'analogie avec la propagation des ondes acoustiques. Un tableau récapitulatif sur l'analogie entre les caractéristiques électriques et les paramètres acoustiques d'un milieu de propagation est donné.

# **Chapitre 3**

## **Simulation & Discussion**

## Introduction

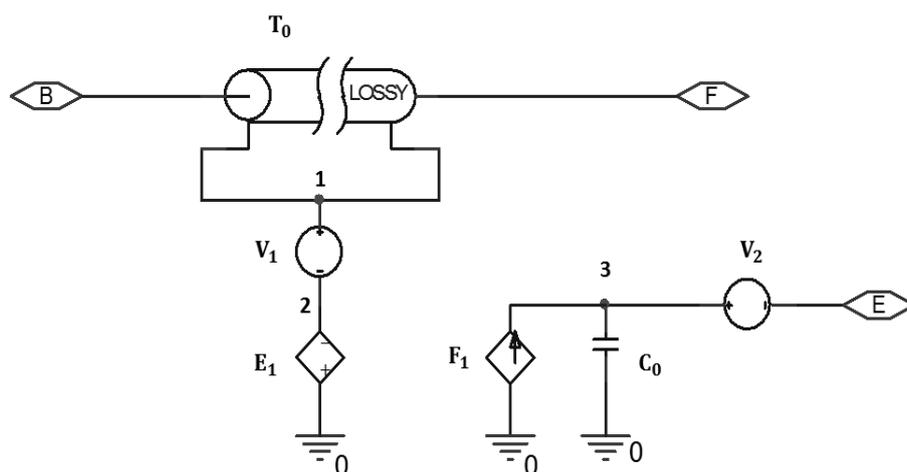
Dans ce chapitre, nous allons présenter les simulations basées sur les modélisations unidimensionnelles présentées dans le chapitre précédent. Les simulations sont effectuées en utilisant le logiciel de simulation des circuits électrique PSpice version 9.2.

Nous allons montrer les résultats de simulation de la partie piézoélectrique d'un système ultrasonore en l'occurrence l'impédance d'un transducteur. L'influence de la géométrie du transducteur (diamètre des électrodes, épaisseur de la pastille piézoélectrique), du chargement arrière (damping) et de la nature du matériau piézoélectrique sera discutée. L'étude de l'impédance se fera dans le domaine fréquentiel.

Les réponses impulsionnelles (domaine temporel) d'un transducteur et d'un système physique en configuration immersion simple seront simulées en fin du chapitre. Les discussions seront orientées vers (1) l'effet du chargement arrière sur la réponse d'un transducteur piézoélectrique et (2) l'effet de la nature du milieu de propagation sur la réponse impulsionnelle.

### III. 1. Simulation de la partie piézoélectrique

Dans toutes les simulations à venir, le transducteur piézoélectrique est modélisé suivant le modèle de Püttmer [7] (**Fig. III.1**). Ceci permet de tenir compte des pertes intrinsèques dans la piézo-céramique.



**Figure III. 1** : Schéma équivalent de Püttmer [7]

Le script PSpice (netlist) correspondant à ce circuit est donné dans le **Netlist 1** :

<b>Netlist 1</b>
<pre>.SUBCKT transducteur E B F T0 B 1 F 1 {d} {R} {L} {G} {C} V1 1 2 E1 2 0 LAPLACE {I(V2)}={ "h"/s} V2 E 3 C0 3 0 {C0} F1 0 3 V1 {hC0} .ENDS</pre>

La partie mécanique du transducteur est modélisée par une ligne de transmission avec pertes (T) définie par ces paramètres linéiques R, C, L et G. Les pertes dans la pastille piézoélectrique sont supposées proportionnelles à la fréquence  $R(\omega) \approx R^* \omega$ , où  $R^*$  est défini par les équations (II. 34) ou (II. 35).

Les tableaux (III. i) et (III.ii) donnent les paramètres utilisés par les deux modèles, à déterminer avant chaque simulation PSpice :

**Tableau III. i: Paramètres linéiques des lignes de transmission T (d, R, L, G, C)**

$d=c/(2*f)$	Épaisseur de la ligne T (matériau)
$L \approx \rho A$	Self par unité de longueur de la ligne T
$C \approx 1/(\rho A c^2)$	capacité par unité de longueur de la ligne T
$R \approx (2\pi L/Q) \omega$	Résistance par unité de longueur de la ligne T dans le cas d'un milieu solide en absence de diffusion et d'absorption
$R(\omega) = \frac{4L\eta}{3\rho c^2} \omega^2$	Résistance par unité de longueur de la ligne T dans le cas d'un milieu fluide
$G \approx 0$	Capacitance par unité de longueur de la ligne T en absence de conduction thermique

Tableau III. ii: Paramètres pour le reste du circuit équivalent de la piézocéramique

$C_0 = \frac{\epsilon^s S_0}{d_0}$	Capacité
$h = \frac{e_{33}}{\epsilon^s}$	Constante piézoélectrique
$R_B = \rho_B c_B A$	Résistance de charge arrière
$R_F = \rho_F c_F A$	Résistance de charge avant

Les différents paramètres des tableaux (III. i) et (III. ii) constituent les paramètres du circuit équivalent qui dépendent de la nature des matériaux utilisés et de la configuration modélisée. Dans le logiciel PSpice, ces paramètres sont introduits comme valeurs entières soit en module (Schematics) ou en module (PSpice A/D). Néanmoins, il est possible de les introduire en tant qu'expressions dépendantes des variables globales prédéfinies au début du script dénommé (Netlist), très utile pour les études paramétriques.

### III. 1.1. Simulation de l'impédance électrique

Soit un transducteur constitué d'une pastille piézoélectrique fabriquée en piézo-céramique (PZT-5A) d'épaisseur  $d = 435 \mu\text{m}$  dont les propriétés sont données dans le tableau (III. iii) et de deux électrodes une supérieure et l'autre inférieure de forme circulaire de diamètre  $D = 12.5 \text{ mm}$ . Nous supposons que la pastille n'est soumise à aucun chargement sur ces faces avant et arrière. Autrement dit, ces deux faces sont libres (effet de l'air  $Z_{air} = 429 \text{ Ray}$ ).

Dans toutes les simulations, nous supposons que les propriétés de la piézo-céramique ne varient pas avec la température et seule la résistance varie avec la fréquence.

Tableau III. iii : Les propriétés physiques du PZT-5A [2]

Paramètre	PZT-5A
$\rho(kg/m^3)$	7750
$c \text{ (m/s)}$	4350
$\epsilon^S(c^2/Nm^2)$	$7.35 \cdot 10^{-9}$
$e_{33}(c/m^2)$	15.8
$Q_m$	75

La figure (III.2) montre le schéma équivalent du circuit simulé. Le transducteur est excité en régime harmonique avec une source indépendante de tension  $V_{in} = 10 \text{ volt}$  et de résistance

interne  $R_G = 50\Omega$ . Le transducteur piézoélectrique est modélisé par le tri-pôle (E B F) dont le schéma équivalent est donné par la Fig (III. 1).

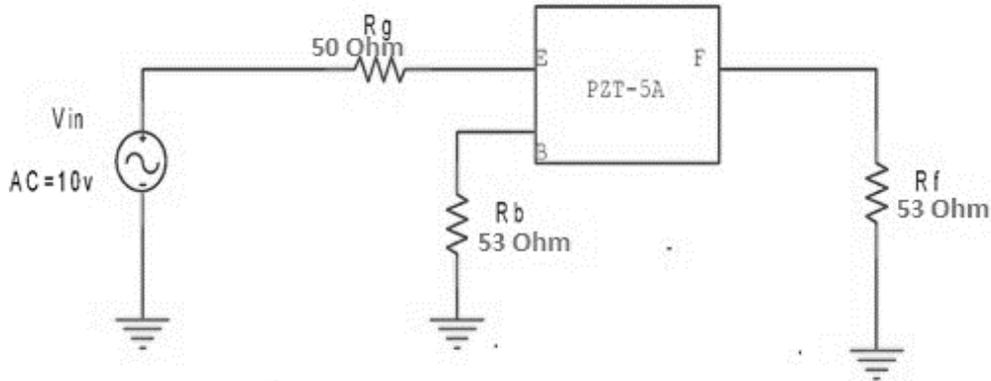


Figure III. 2: Circuit électrique utilisé pour la simulation de l'impédance

Le script PSpice (netlist) correspondant à ce circuit est donné dans le **Netlist2**:

Netlist 2
<pre> .SUBCKT PZT-5A E B F T0 B 1 F 1 len=435u R=0.08*SQRT(-s*s) L=0.95 G=0 C=5.5e-8 V1 1 2 E1 2 0 LAPLACE {I(V2)}={2.1e9/s} V2 E 3 C0 3 0 2.07e-9 F1 0 3 V1 4.5 .ENDS  VIN 1 0 AC 100 0 RG 1 2 50 X1 2 3 4 PZT-5A RF 3 0 0.53 RB 4 0 0.53  .AC LIN 1000 2MEG 10MEG .PROBE .END                     </pre>

La figure (III. 3) montre l'impédance électrique simulée. Le module de l'impédance est montré dans la figure (III. 3a) et sa phase est présentée dans la figure (III. 3b). La courbe du module de l'impédance électrique montre un minimum et un maximum d'amplitude. Le minimum de l'amplitude se produit à la fréquence de résonance ( $f_r$ ) le maximum se produit à la fréquence d'anti-résonance ( $f_a$ ). En mode bi-courbes, le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> passage par zéro dans la courbe de phase coïncident, respectivement, avec le minimum et le maximum de l'amplitude de l'impédance.

Dans le cas simulé (Fig. III. 3), les fréquences de résonance et d'anti-résonance sont 4.5 et 5 MHz, respectivement. En dessous de la fréquence de résonance ( $f_r$ ) et au-dessus de la fréquence d'anti-résonance ( $f_a$ ), la piézo-céramique se comporte de façon capacitive ( $C_0$ ). Entre ces deux fréquences, le comportement électrique du matériau est représenté par la branche constituée des éléments R, L et C.

En effet, la résonance doit être suffisamment isolée des autres modes pour éliminer toute interaction avec les modes adjacents. La résonance dépend des dimensions de la céramique. Ces dernières doivent, par conséquent, être choisies de façon à isoler le mode de résonance considéré.

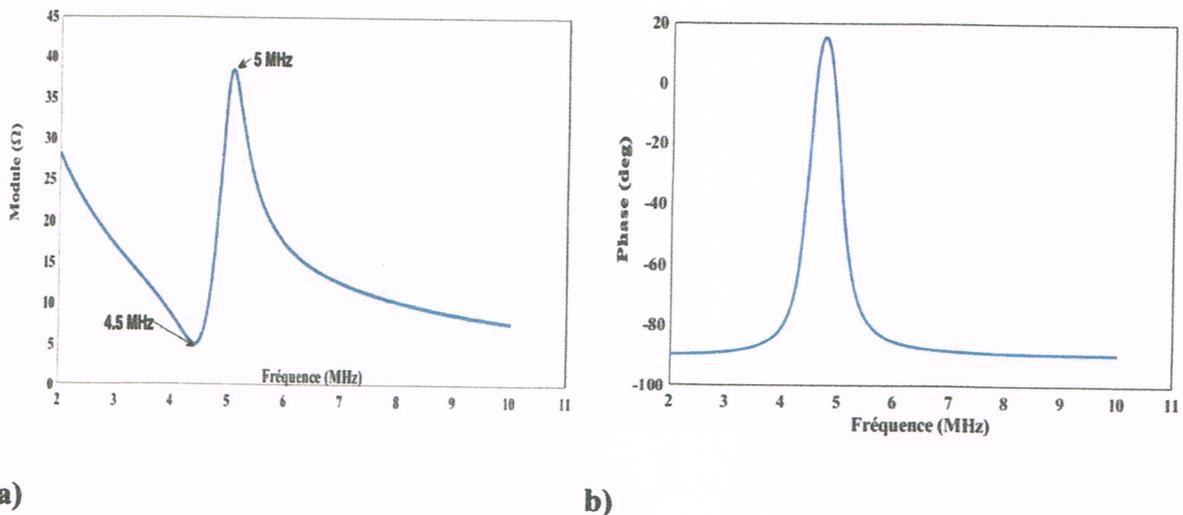


Figure III. 3 : Impédance électrique d'un transducteur piézoélectrique. a) Module et b) phase.

### III.1.1.1. Influence de la géométrie du transducteur

Dans cette section, nous allons discuter l'effet de la géométrie du transducteur en l'occurrence le diamètre des électrodes et l'épaisseur de la pastille piézoélectrique.

#### III.1.1. 1.1. Effet du diamètre

Les figures **III.4 (a, b)** montrent les impédances électriques simulées sous le logiciel PSpice pour quatre pastilles piézoélectriques (PZT-5A) couvertes avec des électrodes de différents diamètres (3 , 4 , 8 et 12.5 mm).

Les pastilles présentent la même épaisseur ( $d = 435 \mu\text{m}$ ). Les faces avant et arrières des pastilles sont libres (soumises à l'effet de l'air).

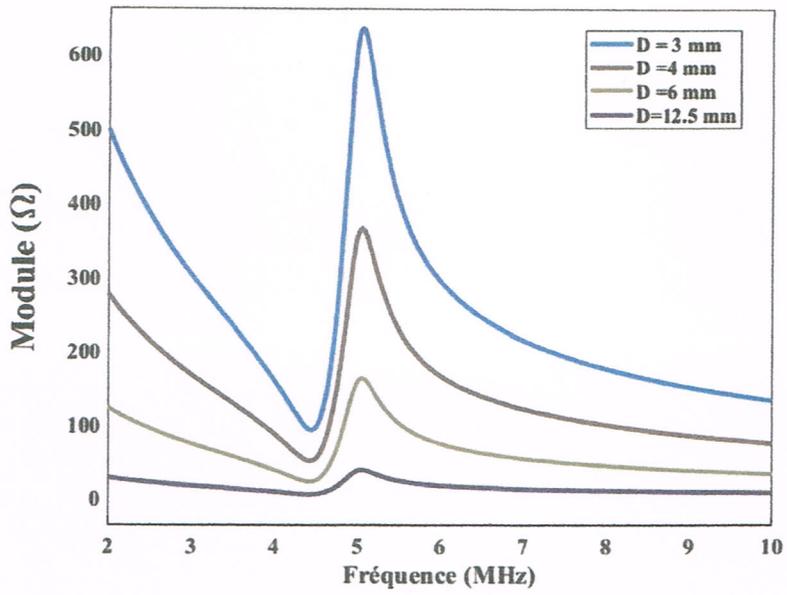
Le **Netlist 2** a été utilisé pour les simulations de la figure (**III.4**) en changeant juste les valeurs des paramètres affectés par la variation du diamètre, à savoir  $R^*$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $C_0$  et  $hC_0$ . Les valeurs utilisées sont montrées dans le tableau (**III. IV**).

Tableau III. IV : Valeurs utilisées dans les simulations de la figure (III.4)

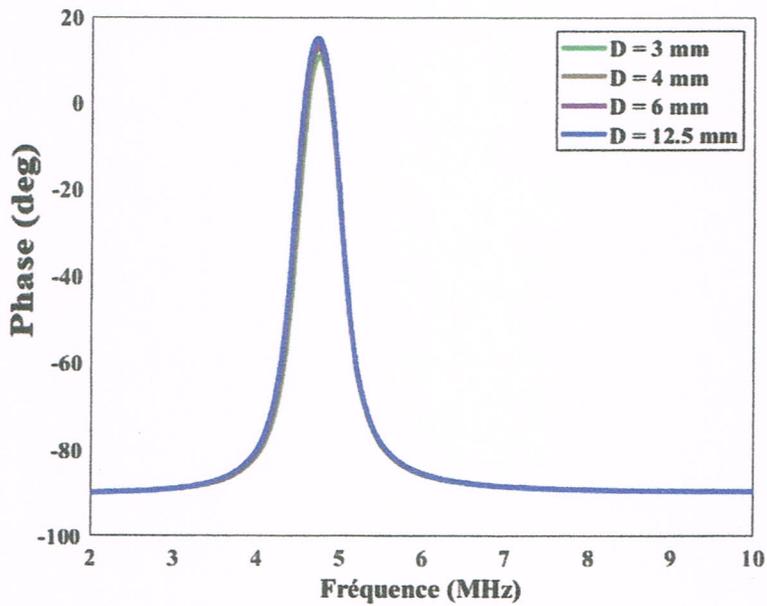
Diamètres (mm)	{ $R^*$ } ( $\Omega$ )	{ $C$ } (nF)	{ $L$ } (H)	{ $C_0$ } (nF)	{ $hC_0$ }
12.5	0.079	55.6	0.95	2.07	4.46
6	0.018	241.2	0.21	0.47	1.03
4	0.008	542.6	0.09	0.21	0.45
3	0.004	964.7	0.05	0.11	0.25

À partir de la courbe de module de l'impédance, nous constatons que la variation des diamètres des électrodes n'influence pas la position des fréquences de résonance et d'antirésonance. Ceci se traduit par des phases identiques (**Fig. III. 4b**).

Néanmoins, l'amplitude de l'impédance diminue avec l'augmentation du diamètre des électrodes. Autrement dit, plus le diamètre est important moins la résonance est prononcée.



a)

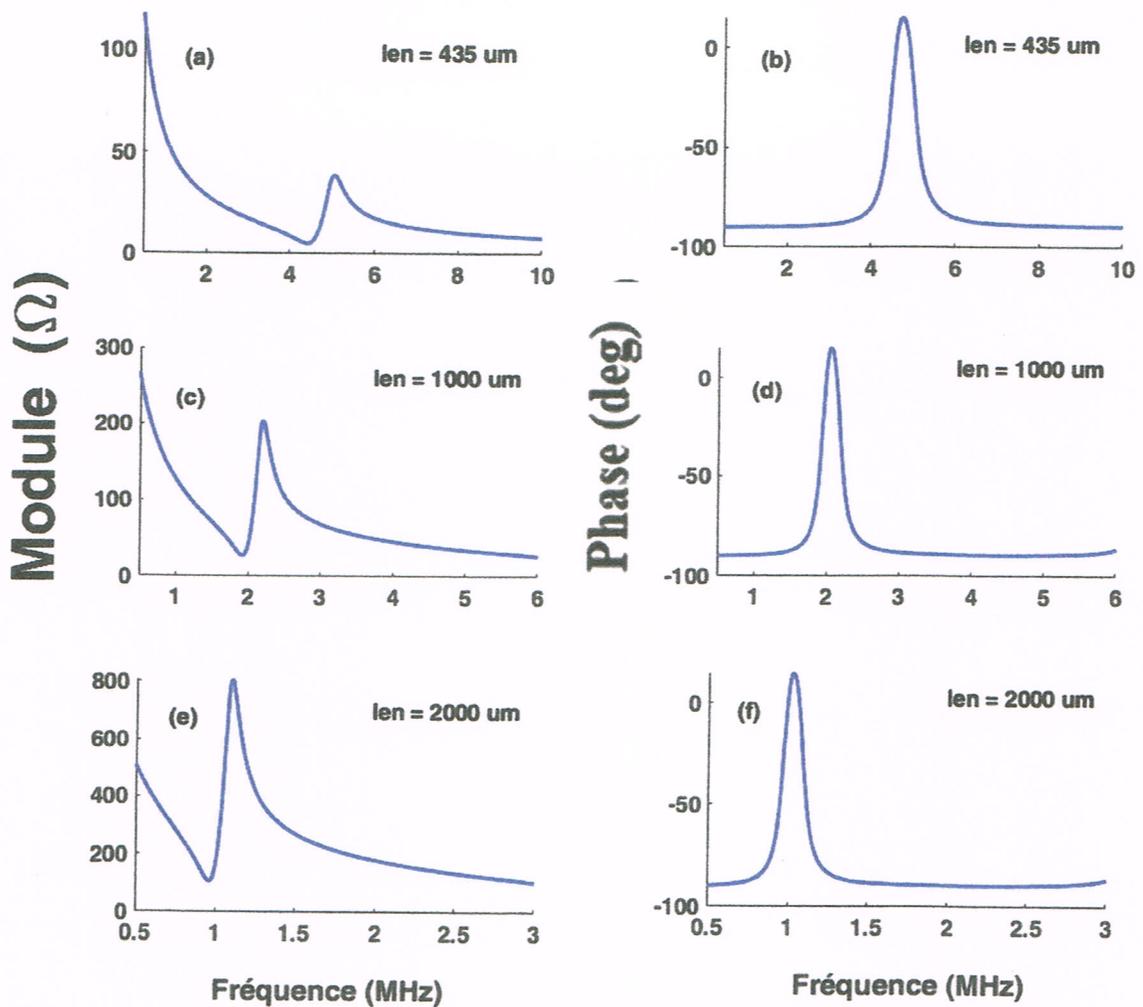


b)

Figure III. 4 : Impédance électrique de pastilles PZT-5A pour des électrodes de différents diamètres. a) Module et b) phase

### III. 1. 1. 1. 2. Effet de l'épaisseur

La figure III. 5 illustre les impédances électriques pour trois pastilles piézoélectriques (PZT-5A) couvertes d'électrodes de diamètre ( $D = 12.5$  mm). Les pastilles présentent différentes épaisseurs (435, 1000 et 2000  $\mu\text{m}$ ). Les faces avant et arrière des pastilles sont libres (soumises à l'effet de l'air).



**Figure III. 5 :** Module et phase de l'impédance électrique des pastilles PZT-5A de différentes épaisseurs, couvertes d'électrodes de diamètre  $D=12.5$  mm. (a, b) len = 435  $\mu\text{m}$ , (c, d) len = 1000  $\mu\text{m}$  et (e, f) len = 2000  $\mu\text{m}$

Pour les simulations de la figure (III. 5), nous avons utilisé le **Netlist 2** en changeant juste les valeurs des paramètres  $C_0$  et le produit  $(hCo)$  qui sont affectés par la variation de l'épaisseur. Leurs valeurs sont données dans le tableau (III. V).

Tableau III. v : Valeurs utilisées dans les simulations de la figure (III.5)

Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	$\{C_0\}$ (nf)	$\{hCo\}$
435	2.07	4.46
1000	0.9	1.94
2000	0.45	0.96

À partir des courbes du module de l'impédance (**Fig. 5a, 5c et 5e**), nous constatons que la variation des épaisseurs affecte la résonance du transducteur. L'augmentation de l'épaisseur cause un décalage vers les hautes fréquences. Les valeurs des fréquences de résonance et d'antirésonance sont (4.35 et 5.07 MHz), (1.93 et 2.19 MHz) et (0.96 et 1.10 MHz) pour les épaisseurs 435, 1000 et 2000  $\mu\text{m}$ , respectivement. Le décalage fréquentiel est apparent dans les courbes des phases correspondantes (**Fig. III. 5b, 5d et 5f**).

Par ailleurs, l'amplitude de l'impédance est également affectée, une augmentation avec l'épaisseur est observée. Ceci s'accompagne d'un rétrécissement de la résonance, c.-à-d. une diminution de l'écart entre la résonance et l'antirésonance qui est de 0.72, 0.26 et 0.14 pour 435, 1000 et 2000  $\mu\text{m}$ , respectivement.

### III. 1. 1. 2. Influence du chargement (baking / damping)

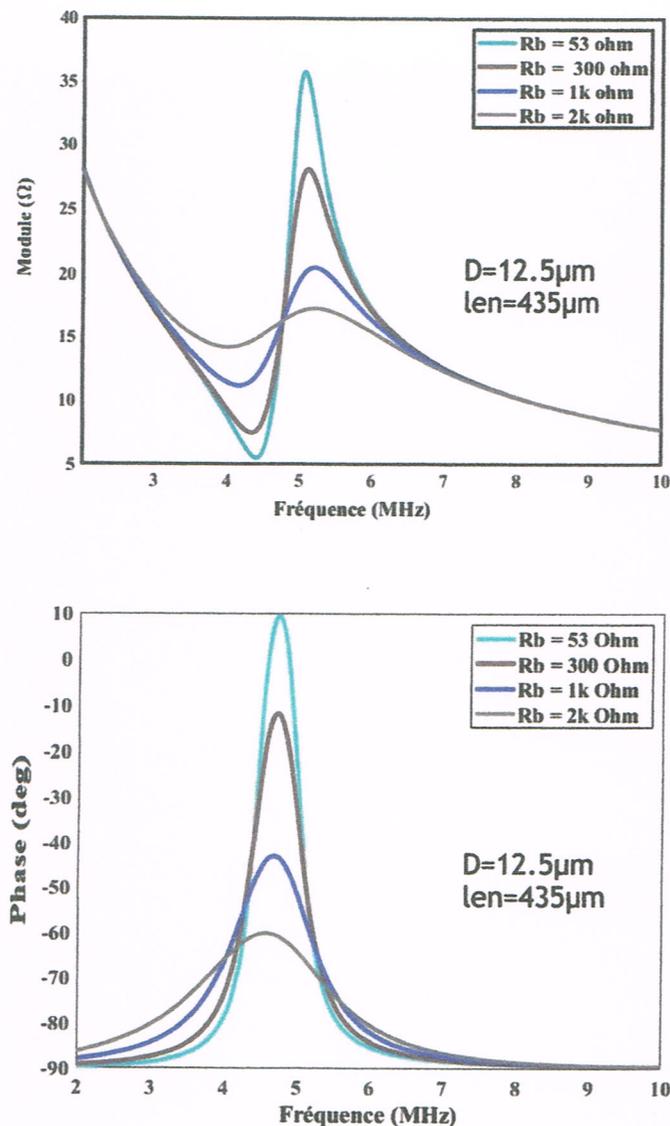
Dans cette section, l'influence du chargement arrière (baking ou damping) sur l'impédance électrique d'un transducteur piézoélectrique est discutée.

La figure (III. 6) montre les impédances électriques simulées pour des pastilles piézoélectriques (PZT-5A) d'épaisseur 435  $\mu\text{m}$ , couverts avec des électrodes de diamètre ( $D = 12.5 \text{ mm}$ ). Dans le **Netlist 2** (utilisé pour les simulations), seules les valeurs de  $R_b$  ont été modifiées à chaque simulation.

Les faces avant des pastilles sont laissées libres (soumises à l'effet de l'air). Les faces arrière des pastilles sont soumises à différents chargements ( $R_b = 53 \Omega, 300 \Omega, 1 \text{ K}\Omega$  et  $2 \text{ K}\Omega$ ).

La courbe du module de l'impédance montre que la variation du chargement arrière du transducteur n'affecte pas la résonance des transducteurs. La fréquence de résonance et d'anti-résonance obtenues sont les mêmes pour tous les chargements ( $f_0 = 44$  MHz) et ( $f_{\infty} = 506$  MHz). Ce qui se confirme par la position identique de la fréquence correspondante aux maxima des phases (Fig. III. 6b).

Cependant, le chargement arrière influence l'amplitude des impédances et l'élargissement des courbes. Plus le chargement (damping) est important, plus l'élargissement des courbes d'amplitude est important, moins l'amplitude est importante.



b)  
Figure III.6 : Impédance électrique de pastilles PZT-5A de différentes épaisseurs. a) Module et b) phase

### III.1.1.3. Influence de la nature du matériau piézoélectrique

Dans cette simulation nous allons discuter l'influence de la nature du matériau sur la variation de l'impédance d'un transducteur piézoélectrique. En plus du PZT-5A, deux autres matériaux piézoélectriques sont sélectionnés pour cette discussion : le Nitrure d'aluminium (AlN) et l'oxyde de zinc (ZnO).

Les paramètres physiques ( $\rho$ ,  $c$ ,  $\varepsilon^S$ ,  $e_{33}$ ,  $Q_m$ ) des deux matériaux sont donnés dans le tableau (III. vi). L'épaisseur des différentes pastilles est tenue constante ( $d = 435 \mu\text{m}$ ). Le diamètre des électrodes aux faces avant et arrière des différentes pastilles est tenu constant ( $D = 12.5 \text{ mm}$ ). Les faces avant ou arrière des pastilles sont libres.

Tableau vi : Les propriétés physiques de l'AlN

Paramètre	AlN	ZnO
$\rho(kg/m^3)$	3300	5680
C (m/s)	10127	5700
$\varepsilon^S(c^2/Nm^2) \times 10^{-9}$	75.22	76.64
$e_{33}(c/m^2)$	1.55	1.32
$Q_m$	2000	200

Les valeurs utilisées dans le **Netlist 2** pour les simulations de la figure (III.7) sont données dans le tableau (III. vii).

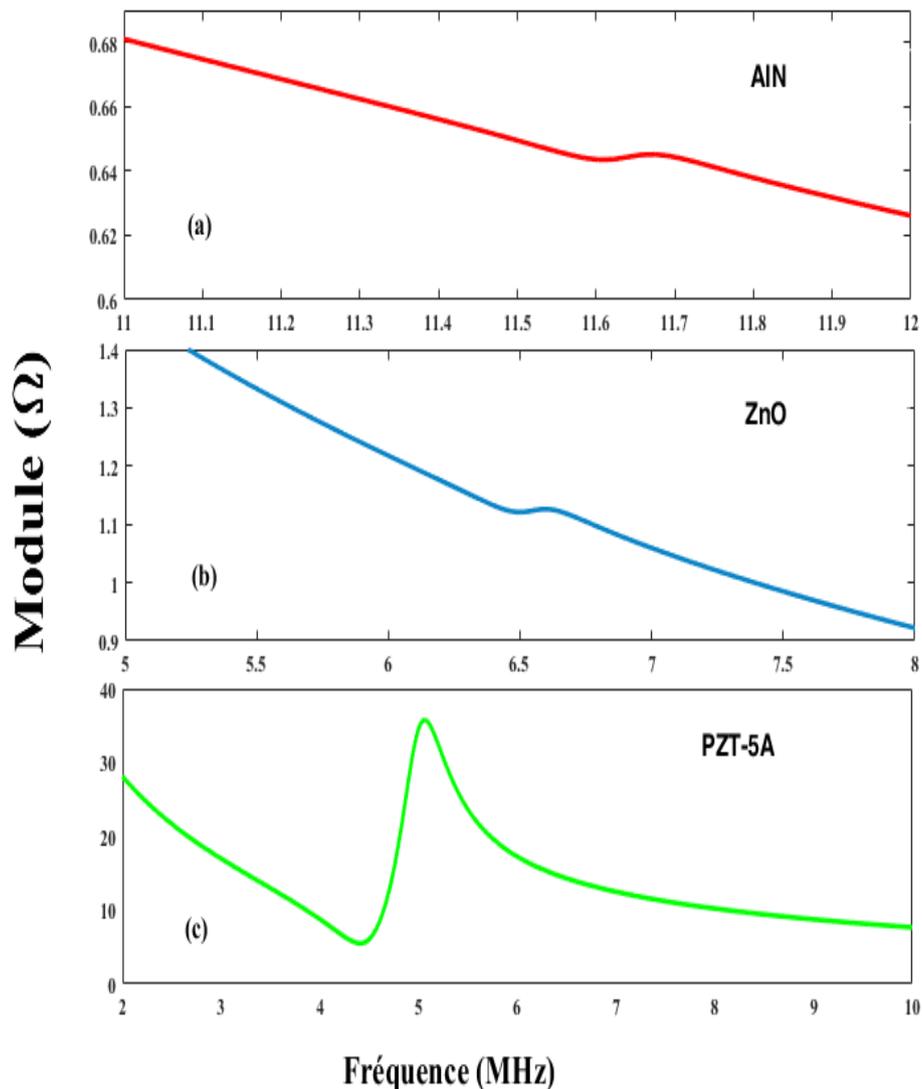
Tableau III. vii : Valeurs utilisées dans les simulations de la figure (III.4)

Diamètres (mm)	{R*} ( $\Omega$ )	{C} (nF)	{L} (H)	{C0} (nF)	{h} (GPa)	{hC0}
AlN	0.0013	24.07	0.405	21.22	0.02	0.42
ZnO	0.022	44.15	0.697	21.62	0.017	0.37

La figure (III. 7) montre les impédances électriques simulées sous le logiciel PSpice pour les pastilles piézoélectriques AlN, ZnO et PZT-5A. Les phases correspondantes sont présentées dans la figure (III. 8). Les modules et les phases des impédances montrent que les fréquences de résonance et d'anti-résonance varient avec la nature du matériau.

Pour une même épaisseur et un diamètre d'électrodes invariant, les fréquences de résonance et d'anti-résonance obtenues sont (11.6 MHz et 11.7 MHz), (6.5 MHz et 6.7 MHz) et (4.4 MHz et 5 MHz) pour les matériaux AlN, ZnO et PZT-5A, respectivement.

On constate également que pour un chargement de la face arrière constant, l'élargissement des courbes varie d'un matériau à un autre. De plus, il est à noter que les amplitudes sont fortement affectées par la variation du matériau.



**Figure III. 7:** Module des impédances électriques des pastilles.  
a) AlN et b) ZnO et c) PZT-5A

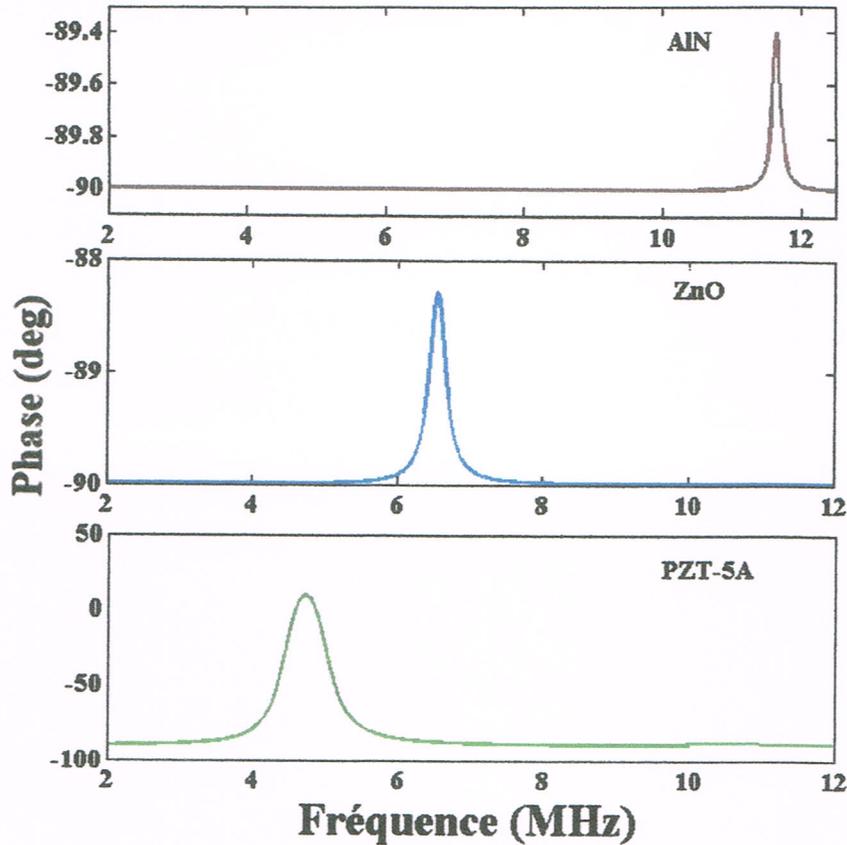


Figure III. 8 : Phases des impédances électriques des pastilles.  
a) AlN et b) ZnO et c) PZT-5A

### III. 1. 2. Simulation de la réponse impulsionnelle d'un transducteur

Dans cette section, nous allons simuler la réponse impulsionnelle du transducteur décrit dans la section (Sec. III. 1.1). Le transducteur est excité dans le domaine temporel par un générateur d'impulsion. Les faces avant et arrière ne sont mises à aucun chargement ( $R_b = R_f = 53 \Omega$ ).

La figure (III. 9) montre le schéma équivalent du circuit simulé. Le générateur d'impulsion est modélisé par : (1) une source de tension impulsionnelle ( $V_{in\_max} = 500V$ ,  $V_{in\_min} = 0V$ , durée d'impulsion 50ns), (2) un condensateur ( $C1 = 2nf$ ) mis en série avec la source de tension et connecté avec le port électrique (E) du transducteur et (3) une résistance de damping ( $R_{damp} = 5 \Omega$ ) parallèle à la source. Le transducteur est simulé par le tri-pôle (EBF). Les simulations se font dans le domaine temporel. Puisque l'objectif de ce travail se focalise sur

la réponse du transducteur et pour la simplicité des schémas, la partie réception du circuit ne sera pas modélisée.

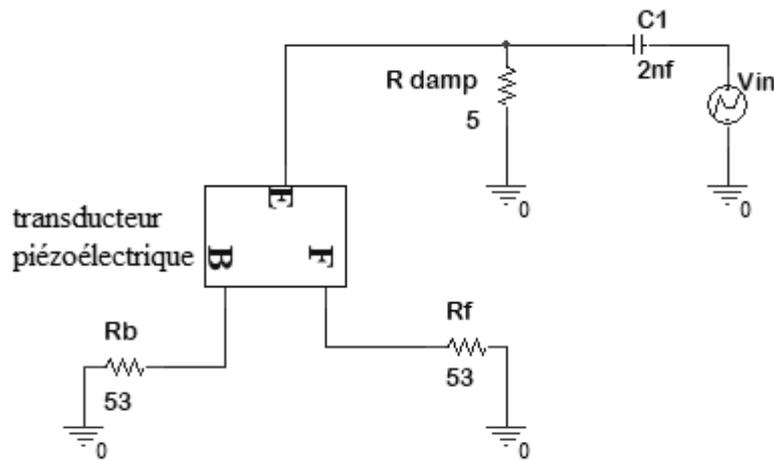
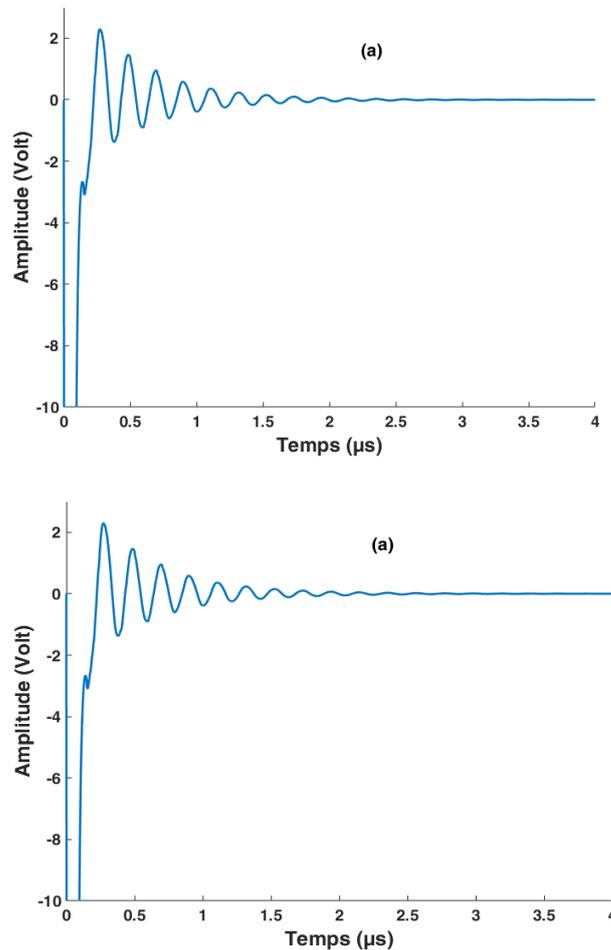


Figure III.9 : Circuit électrique utilisé pour la simulation la réponse impulsionnelle du PZT-5A

Le script PSpice (netlist) correspondant à ce circuit est donné comme suit :

Netlist 3	
. SUBCKT PZT-5A E B F	
T0	B 1 F 1 len=435u R=0.08*SQRT(-s*s) L=0.95 G=0 C=5.5e-8
V1	1 2
E1	2 0 LAPLACE {I(V2)}={2.1e9/s}
V2	E 3
C0	3 0 2.07e-9
F1	0 3 V1 4.5
.ENDS	
VIN	1 0 pulse (500 , 0 , 0 , 50n)
C1	1 2 2n
RG	2 0 5
RB	3 0 50
X1	2 3 4 PZT-5A
RF	3 0 50
.tran 20n 50u 0n 0n	
.PROBE	
.END	

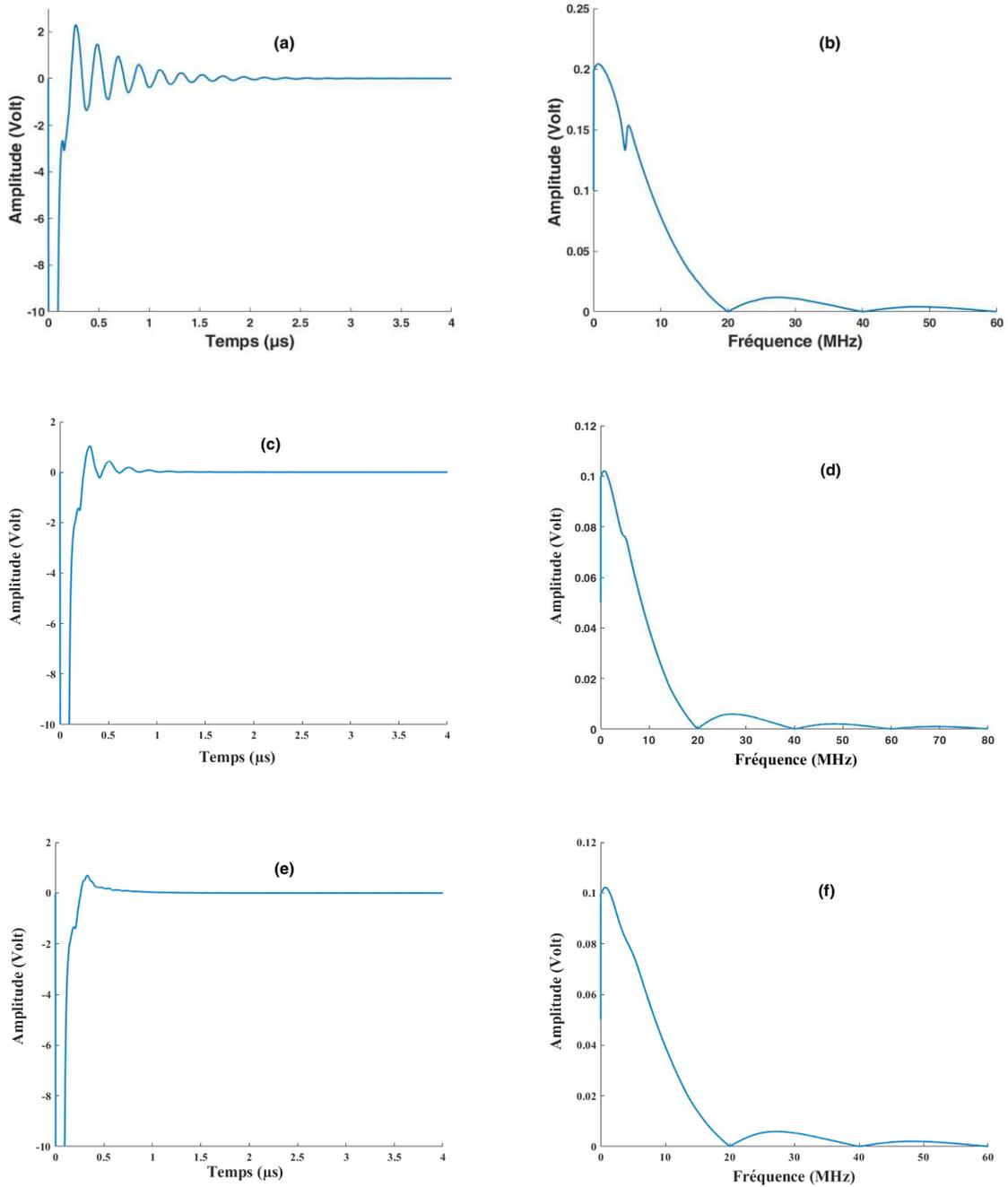
La figure (III. 10) montre la réponse impulsionnelle du transducteur (Fig. III. 10a) ainsi que son spectre de Fourier (FFT) (Fig. III. 10b).



**Figure III.10 :** Réponse simulée du transducteur (PZT-5A).  
a) réponse impulsionnelle et b) spectre FFT

À partir de la figure (III. 10a), on remarque que la réponse impulsionnelle d'un transducteur piézoélectrique présente des oscillations qui s'amortissent avec le temps. L'amplitude de ces oscillations dépend du chargement arrière du transducteur (Figs. III. 11 (a, c et e)), elle diminue avec l'augmentation de ce dernier.

Le spectre de Fourier de la réponse temporelle montre une discontinuité qui disparaît avec l'augmentation du chargement (Figs. III. 11 (b, d et f)). Ce résultat est très important dans le choix des transducteurs. Dans les commerces on distingue trois types de transducteurs selon leur damping (faible damp, moyen damp et damp élevé). Le choix se fait selon l'application désirée.



**Figure III. 11 :** Réponse impulsionnel du transducteur (PZT-5A) et son spectre FFT. (a) et (b)  $R_b=53\Omega$ , (c) et (d)  $R_b=1K\Omega$ , (e) et (f)  $R_b=3k\Omega$

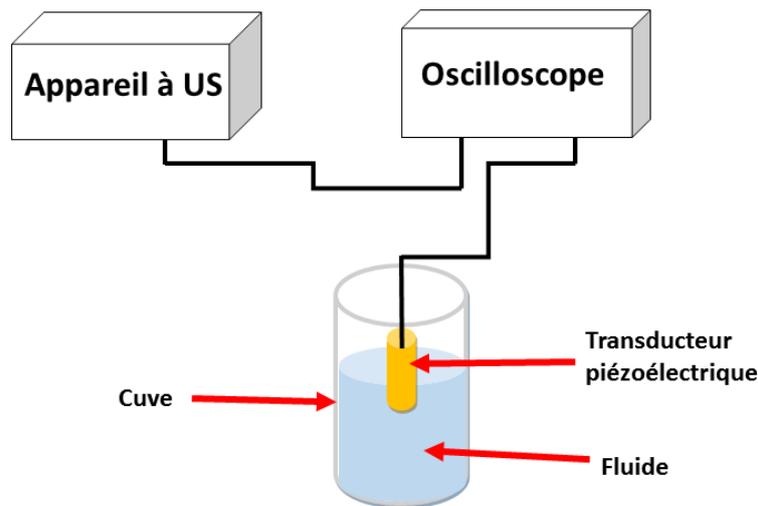
### III.2. Simulation de la réponse impulsionnelle d'un système ultrasonore

Dans cette partie, nous allons simuler la réponse impulsionnelle d'un système ultrasonore très utilisé dans la pratique pour la caractérisation des fluides.

#### III. 2.1. Configuration simulée

La figure (III. 12) montre le schéma représentatif de la configuration simulée. Le schéma est constitué d'

- un appareil à ultrason (émetteur-récepteur)
- un oscilloscope
- une cuve en PMMA (épaisseur de 5mm, de densité  $\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$  et  $\text{tg}\delta^{(5\text{MHz})} = 0.0085$ ) remplie d'un fluide
- un transducteur (PZT-5A) immergé dans le fluide.



*Figure III. 12 : Configuration simulée*

#### III. 2.2. Circuit électrique équivalent

Le schéma électrique équivalent de la configuration donnée dans la figure (III. 12) est montré dans la figure (III. 13).

Le transducteur en PZT-5A dont l'épaisseur est de  $435 \mu\text{m}$  est modélisé par un tri-pôle (EBF) selon la figure (III. 1). Ses caractéristiques sont décrites dans le tableau (III. iii).

Les électrodes qui couvrent le transducteur présentent une épaisseur supposée négligeable et un diamètre de 12.5 mm.

Nous supposons que le transducteur est soumis à un chargement arrière modélisé par une résistance  $R_b = 3K\Omega$ . Le transducteur est excité dans le domaine temporel.

Dans la partie électrique du système ultrasonore, seule la partie émission de l'émetteur-récepteur est prise en compte. Sa modélisation est décrite dans la section (III.2.3.1).

La partie réception de ce dernier ainsi que l'électronique de l'oscilloscope et des câbles sont négligées dans ce travail pour des raisons de simplification.

La partie mécanique du système ultrasonore définie par la propagation de l'onde (fluide et cuve en PMMA) est modélisée par des lignes de transmission  $T_{fluide}$  et  $T_{pmma}$ .

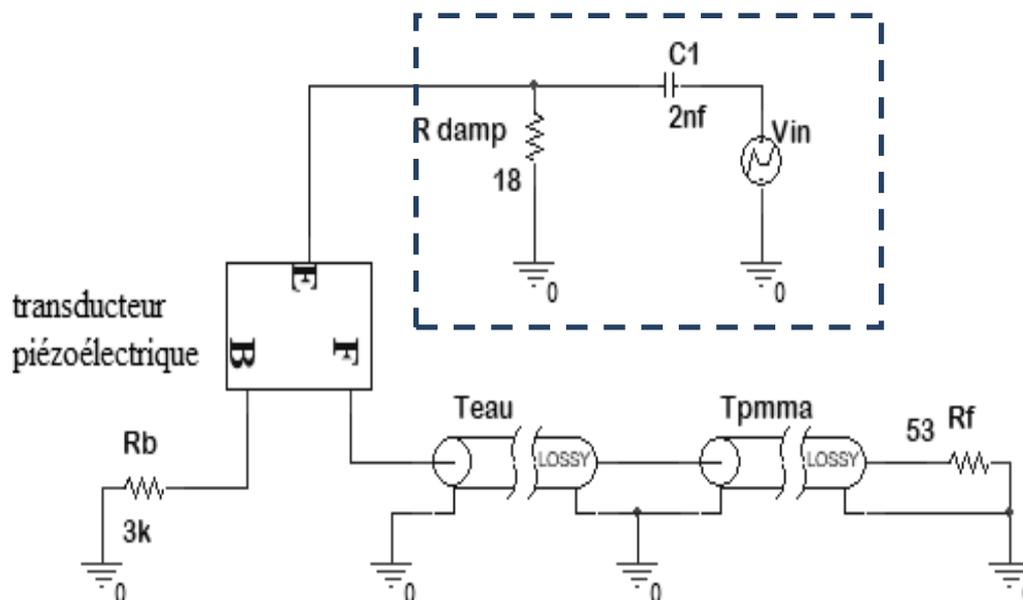


Figure III. 13 : Schéma électrique équivalent de la configuration Fig. (III.12)

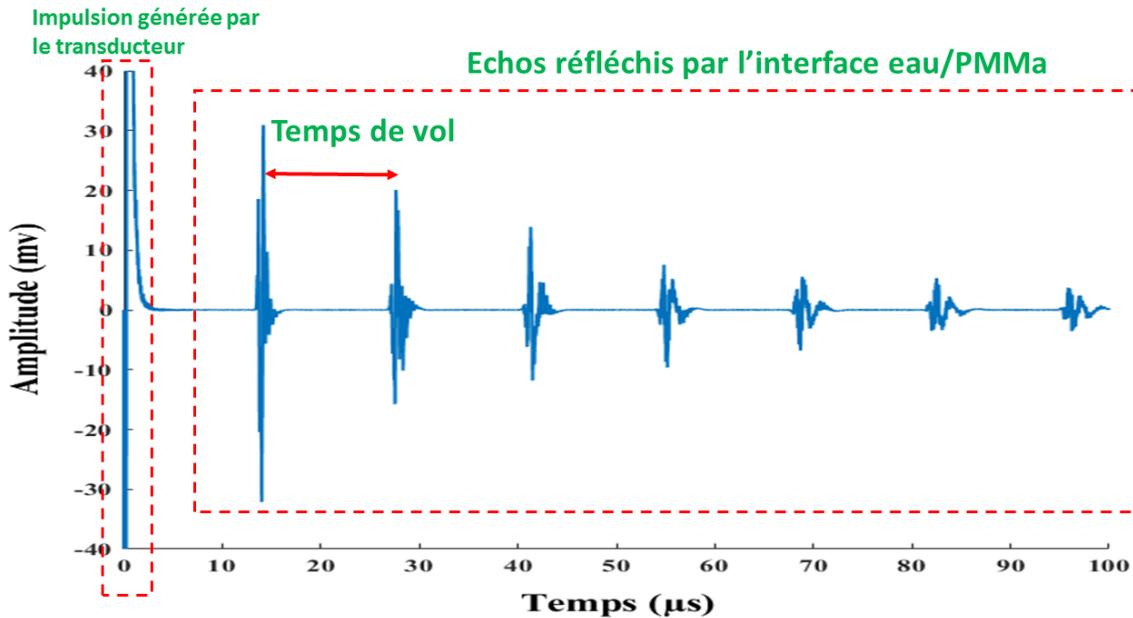
Le script PSpice (netlist) correspondant à ce circuit est donné comme suit :

Netlist 4	
. SUBCKT PZT-5A E B F	
T0	B 1 F 1 len=435u R=0.08*SQRT(-s*s) L=0.95 G=0 C=5.5e-8
V1	1 2
E1	2 0 LAPLACE {I(V2)}={2.1e9/s}
V2	E 3
C0	3 0 2.07e-9
F1	0 3 V1 4.5
.ENDS	
T14	0 5 0 len1=30000u R1=7.4e-11*(-s*s) L1=0.12 G=0 C1=3.7e-12
T25	0 6 0 len2=500u R2=0.003*SQRT(-s*s) L2=0.34G2=0 C2=8.8e-13
RF	3 0 53
VIN	1 0 pulse (500 , 0 , 0 , 50n)
C1	1 2 2n
Rdamp6	0 5
X1	2 3 4 PZT-5A
RB	3 0 3k
.tran 50n 100u 0n 0n	
.PROBE	
.END	

### III. 2. 3. Simulation PSpice

La figure (III. 14) montre la réponse impulsionnelle du système ultrasonore (Fig. III. 12) simulé sur PSpice selon le schéma de la figure (III.13).

Dans cette simulation, le fluide choisi est l'eau de densité ( $\rho = 998.20 \text{ kg/m}^3$ ), vitesse de propagation  $c = 1480\text{m/s}$  et de viscosité  $\eta = 1.002$ . La distance entre la face avant du transducteur et l'interface eau/PMMA est fixée à  $d = 10 \text{ mm}$ . Les valeurs des paramètres limpides de la ligne de transmission équivalente de l'eau sont données dans le tableau (III. ix).



*Figure III. 14 : Réponse impulsionnelle du système ultrasonore (III.12) simulé sur PSpice selon schéma (III.13) pour cas de fluide = eau.*

Nous constatons que la réponse impulsionnelle du système simulé présente plusieurs impulsions. La première impulsion est celle générée par le transducteur simulée dans la figure (III. 10a).

Les impulsions qui suivent représentent les échos réfléchis par l'interface eau/PMMA. L'amplitude de ces échos s'atténue avec le temps.

L'écart entre chaque deux échos successifs est constant, il représente le temps de propagation de l'onde ultrasonore dans l'eau, dit temps de vol dénommé TOF. Dans notre cas il est égal à  $TOF = 13.52 \mu s$ . Ce qui correspond à une vitesse de propagation  $v = (2d_{eau}/TOF) = 1.48 \text{ mm}/\mu s$ . La valeur calculée de la vitesse à partir de la réponse simulée est en concordance avec la valeur théorique introduite.

La figure (III. 15) montre les réponses impulsionnelles du même système simulé précédemment pour 3 distances de propagation dans l'eau (10 mm 20 mm et 30 mm).

On remarque que le temps de vol entre les échos augmente avec la distance de propagation. Il est de  $13.52 \mu s$ ,  $26.81 \mu s$  et  $40.34 \mu s$  pour les distances 10 mm, 20 mm et 30 mm, respectivement.

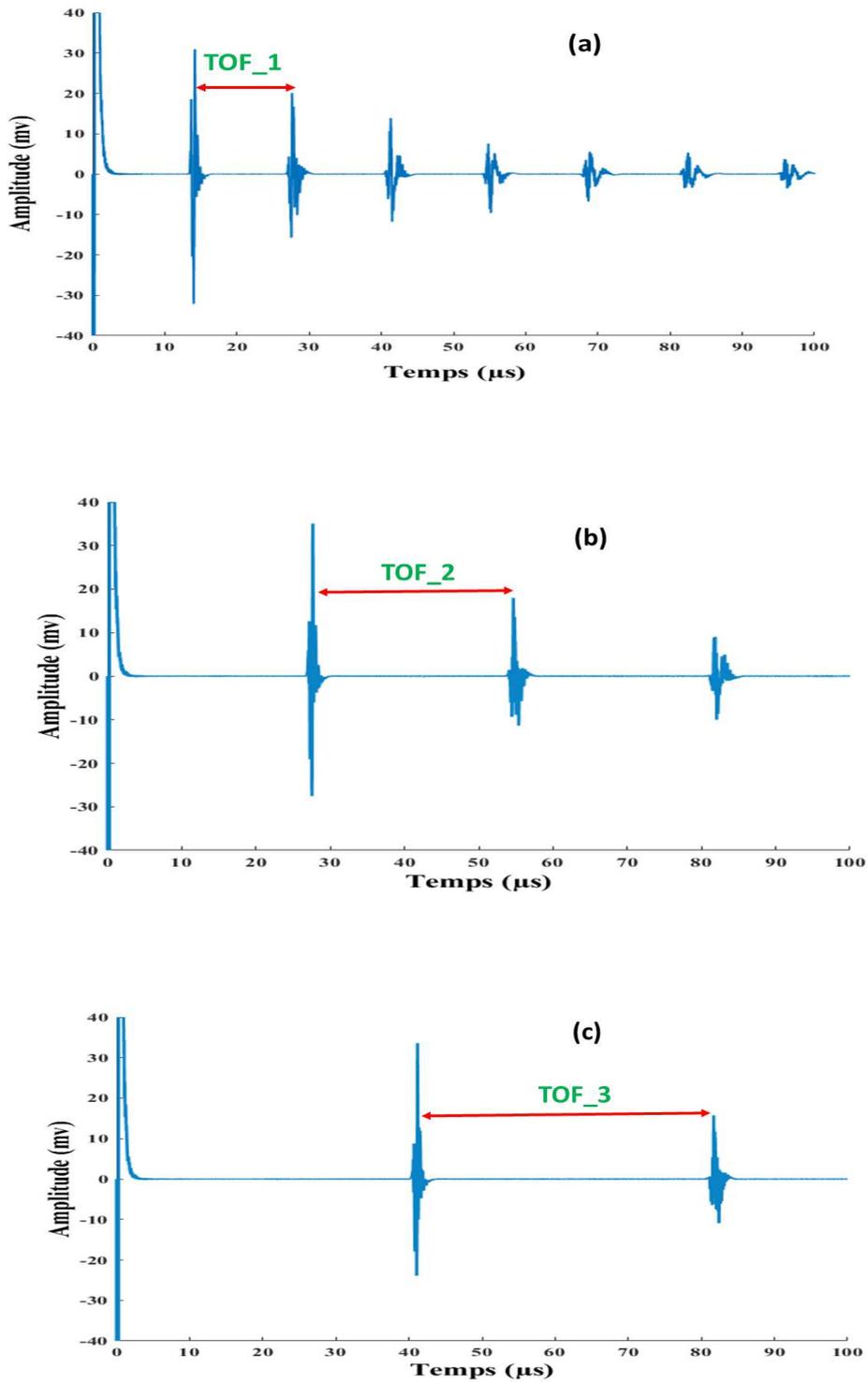


Figure III. 15 : Réponse impulsionnelle du système ultrasonore (III.12) simulé pour trois distances de propagation dans l'eau. (a) 10mm, (b) 20 mm et (c) 30 mm.

Les amplitudes crête à crête du 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> écho de chaque réponse impulsionnelle sont montrées dans le tableau (III. viii). Les valeurs de l'atténuation calculées à partir de la loi de Lambert (voir tableau (III. viii)) montre une valeur du coefficient d'atténuation de 0.02 Np/mm. Les pertes par réflexion ne sont pas prises en compte dans le calcul.

Tableau III. viii : Valeurs des amplitudes crête à crête et des atténuations

Distance de propagation	10mm	20mm	30mm
$A_1$	0.063	0.062	0.056
$A_2$	0.036	0.029	0.025
$\frac{A_2}{A_1}$	0.58	0.47	0.45
$\frac{1}{2d} \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$	0.027	0.02	0.013

La figure (III. 16) montre les réponses impulsionnelles du même système simulé précédemment pour 3 matériaux différents (eau, huile d'olive et glycérine). Les propriétés de l'huile d'olive sont  $\rho = 877.5 \text{ kg/m}^3$ ,  $\eta=96.1$  et  $c=1596 \text{ m/s}$ . Les propriétés de la glycérine sont  $\rho = 1258.8 \text{ kg/m}^3$ ,  $\eta=1146$  et  $C=1923 \text{ m/s}$ . La distance de propagation est tenue constante pour les trois matériaux, soit  $d = 20 \text{ mm}$ .

Dans ces simulations, nous avons utilisé le **Netlist 4** en changeant juste les valeurs des paramètres limpides L et R\* et C, affectées par le changement du fluide. Les valeurs sont données dans le tableau (III. ix).

Tableau III. ix : Valeurs des paramètres limpides correspondant aux lignes de transmission équivalentes de l'eau, huile d'olive et glycérine

Fluide	{R*} ( $\Omega$ )	{C} (nF)	{L} (H)
Eau	7.4e-11	3700	0.12
Huile d'olive	5.7e-9	15	0.1
Glycérine	49e-9	1750	0.15

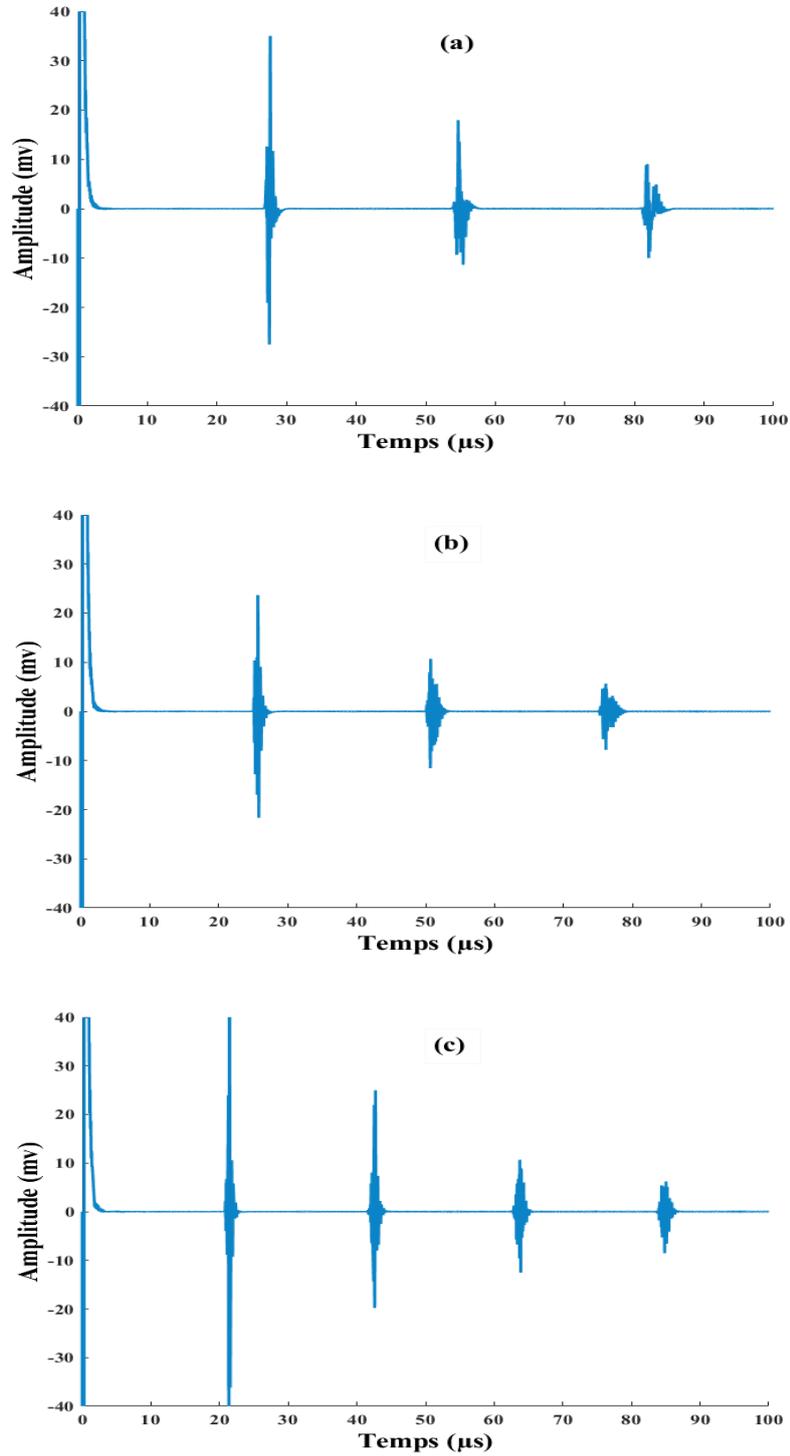
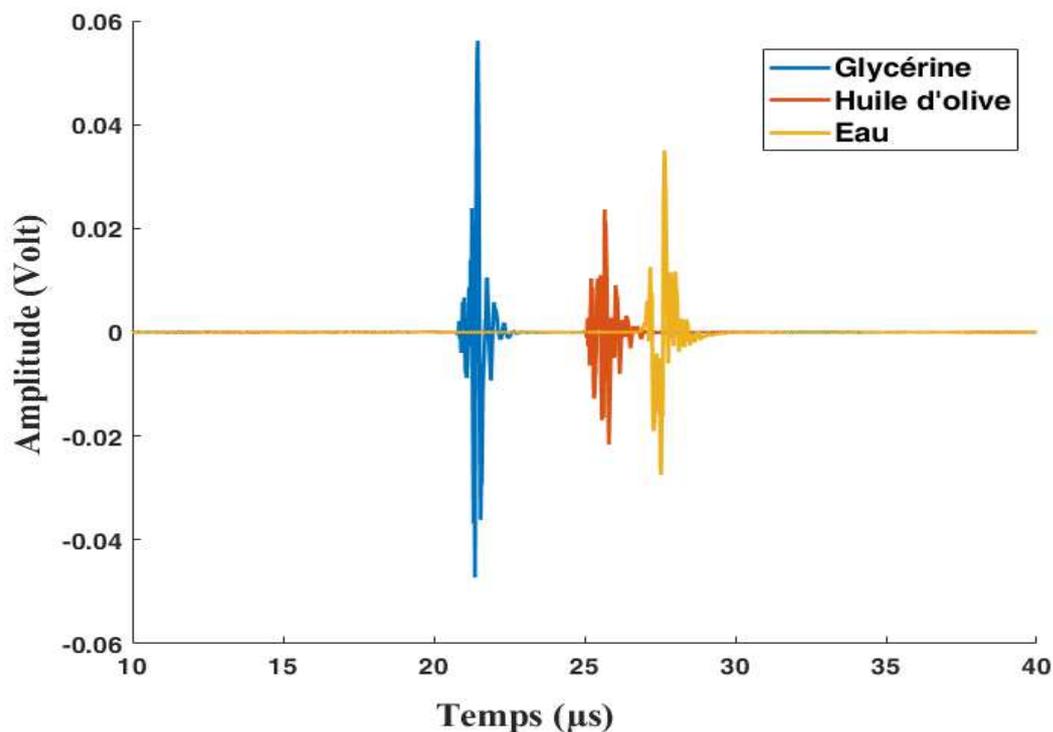


Figure III. 16 : Réponses impulsionnelles du système ultrasonore (III.12) simulées pour (a) eau , (b) huile d'olive et (c) glycérine .

La comparaison entre les réponses impulsionnelles des trois milieux de propagation simulées dans la figure (III. 16) montre que :

- pour un même transducteur et une même excitation électrique, la réponse impulsionnelle du système ultrasonore varie avec la nature du milieu de propagation ;
- pour une même distance de propagation, le temps de vol (TOF) varie avec le milieu de propagation ;
- pour une même excitation, un même transducteur et une même distance de propagation, l'amplitude des échos de réflexion varie avec le milieu de propagation.

La figure (III. 17) montre une comparaison entre les premiers échos de réflexion pour chaque réponse impulsionnelle de la figure (III. 17).



**Figure III. 17 :** Comparaison entre les premiers échos de réflexion dans les trois milieux de propagation (glycérine, huile d'olive et eau)

On remarque que l'amplitude du premier écho de réflexion dans la glycérine est la plus importante, cependant les échos de réflexion dans l'huile d'olive et l'eau sont comparables.

En effet, l'amplitude élevée de l'écho de glycérine est liée aux faibles pertes par réflexion entre la glycérine et le PMMA. Ceci est dû à la valeur de l'impédance acoustique de la

glycérine (2.4 MRay) qui est la plus proche à celle du PMMA (3.3 MRay). Les amplitudes comparables des deux autres échos dans l'eau et l'huile d'olive sont liées aux valeurs proches de leurs impédances acoustiques (1.4 MRay et 1.5 MRay pour l'huile d'olive et l'eau, respectivement).

## Conclusion

Dans ce Chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations basées sur les modélisations unidimensionnelles présentées dans le chapitre II. Les simulations ont été effectuées en utilisant le logiciel PSpice version 9.2.

Nous avons étudié l'influence de (1) la géométrie du transducteur (diamètre des électrodes, et épaisseur de la pastille piézoélectrique), (2) le chargement arrière (damping) et (3) la nature du matériau piézo-électrique, sur l'impédance du transducteur (domaine fréquentiel). Les résultats ont montré que : (1) la variation des diamètres des électrodes n'influence pas la position des fréquences de résonance et d'antirésonance, en revanche il affecte l'amplitude de l'impédance ; (2) la variation des épaisseurs affecte la résonance du transducteur; (3) le chargement arrière du transducteur n'affecte pas la résonance, mais il affecte son amplitude ; (4) la résonance (fréquence et amplitude) est largement affectée par la nature du matériau du matériau piézoélectrique.

Nous avons également étudié la variation de la réponse impulsionnelle (domaine temporel) du transducteur en fonction du chargement arrière. Les résultats ont montré que cette dernière est largement influencée. Son amplitude diminue avec le chargement (damping) et les discontinuités dans son spectre de Fourier disparaissent.

En dernière partie, nous avons simulé la réponse impulsionnelle d'une chaîne ultrasonore de configuration en immersion simple pour différentes distances de propagation et différents milieux de propagation. Les résultats ont montré que : (1) le temps de vol (TOF) entre les échos de réflexion augmente avec la distance de propagation ; (2) le temps de vol et l'amplitude varient avec le milieu de propagation ; (3) plus l'écart entre les impédances acoustiques de deux milieux de propagation est important, plus les pertes par réflexion à leur interface sont importantes.

# **Conclusion générale**

Dans ce travail, nous avons présenté certains modèles unidimensionnels utilisés pour la description de la conversion piézoélectrique dans les systèmes électromécaniques contenant des transducteurs vibrant en mode épaisseur. Ces modèles sont basés sur le principe du schéma électrique équivalent. L'implémentation du modèle de Mason et Redwood dans le logiciel de simulation PSpice est présentée. Le modèle adopté pour les simulations de ce travail est celui de Leach en tenant compte de l'hypothèse de Püttmer. Les simulations sont réalisées sous le logiciel PSpice version 9.2.

Les résultats de simulations de l'influence de la géométrie du transducteur (diamètre des électrodes, et épaisseur de la pastille piézoélectrique), du chargement arrière (damping) et de la nature du matériau piézo-électrique, sur l'impédance du transducteur (domaine fréquentiel) ont montré que :

(1) la variation des diamètres des électrodes n'influence pas la position des fréquences de résonance et d'antirésonance, en revanche il affecte l'amplitude de l'impédance ;

(2) la variation des épaisseurs affecte la résonance du transducteur ;

(3) le chargement arrière du transducteur n'affecte pas la résonance, mais il affecte son amplitude ;

(4) la résonance (fréquence et amplitude) est largement affectée par la nature du matériau du matériau piézoélectrique.

Les résultats de simulations de l'influence du chargement arrière sur la réponse impulsionnelle (domaine temporel) du transducteur ont montré que cette dernière est largement influencée. Son amplitude diminue avec le chargement (damping).

Les résultats de simulations de l'influence de la distance de propagation et du milieu de propagation sur la réponse impulsionnelle d'un système ultrasonore en mode écho et en configuration immersion ont montré que :

(1) le temps de vol (TOF) entre les échos de réflexion augmente avec la distance de propagation ;

(2) le temps de vol et l'amplitude varient avec le milieu de propagation ;

(3) plus les impédances acoustiques entre deux milieux de propagation sont importantes, plus les pertes par réflexion à leur interface sont importantes.

## Annexe

### Syntaxe des commandes et des fonctions PSpice utilisées dans les Netlists

Paramètres	Symbol	Syntaxe Netlist
Résistance	R	[nœud +] [nœud -] [valeur]
Capacité	C	[nœud +] [nœud -] [valeur]
Inductance	L	[nœud +] [nœud -] [valeur]
Sources indépendant	V	[nœud +] [nœud -] [valeur] [type]
Sources dépendant	E	[nœud +] [nœud -] [nœud de contrôle +] [nœud de contrôle -] [gain]
	F	[nœud +] [nœud -] [V <sub>branche</sub> ] [gain]
Source indépendant Type impulsion	Pulse	Pulse V <sub>1</sub> V <sub>2</sub> T <sub>Delay</sub> T <sub>rise</sub> T <sub>Fall</sub> [ω] période
Déclaration de sous-circuit	.SUBCKT	.SUBCKT nomdesous-circuit N1 N2...Nn
Déclaration de fin de sous-circuit	.Ends	.ends [nom de sous-circuit]
Déclaration de fin de circuit	End	.end
Analyse harmonique	.AC	.AC LIN nombre_des_points FStart FStop
Fonction	Laplace	Ename N+ N- LAPLACE { Expression }={TransformExpression }
Analyse transitoire	.TRAN	T <sub>STEP</sub> T <sub>STOP</sub> [T <sub>START</sub> [T <sub>MAX</sub> ]] [UIC]
Appel fenêtre graphique (plot utility)	.Probe	.probe [/CSDF] [spécification de sortie . . . ]

## Bibliographie

- [1] Mason, W. P. Electromechanical Transducers and Wave Filters; 2nd ed. Van Nostrand: New York, 1948; 201 pp., 399 pp.
- [2] Deventer, J. V.; Löfqvist, T.; Delsing, J. PSpice Simulation of Ultrasonic Systems. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control. 2000, 47 (4), 1014-1024.
- [3] CAO Electronique, Initiation à la simulation avec PSpice-QrCAD. Lien: [http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/cm\\_electronique/pspice\\_accueil.htm](http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/cm_electronique/pspice_accueil.htm)
- [4] Simulateur PSpice, [Intro\_PSPICE.DOC], pp.3, 12/12/2016.
- [5] C.G. Hutchens and S.A. Morris, A three-port model for thickness mode transducers using SPICE II, in proc. 1984 IEEE Ultrason.Symp.,1984, pp.897-902.
- [6] W. M. Leach, Controlled-Source Analogous Circuits and SPICES Models for Piezoelctric Transducers. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control. 1994, 41 (1), 60-66.
- [7] A. Püttmer, P. Hauptman, R. Lucklum, O. Krause, B. Henning, PSpice Model for Lossy Piezoceramic Transducers. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control. 1977, 44 (1), 60-66.
- [8] G. H. Haertling, R. C. Buchanan, Ceramic Materials for Electronics, piezoelectro optic ceramics, pp.139-225, 1968.
- [9] A. Safari, Akdogan EK. (eds) 2008, Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications. Springer, New York, p.53.
- [10] Michel Brissaud, Matériaux piézoélectriques : caractérisation, modélisation et vibration, PPUR presses polytechniques, 2007
- [11] Sonatest, catalogue transducteur. Lien: <https://pdf.directindustry.fr/pdf-en/sonatest-ltd/sonatest-transducer-catalogue/21671-16129.html>
- [12] muRata: innovation in electronics. Lien : <https://www.murata.com/en-us/products/timingdevice/crystalu/basic/glossary>
- [13] R.M.White, Generation of Elastic Waves by Transient Surface Heating. Journal of Applied Physics, 34(12):3559, 1963.
- [14] R.M.White, Elastic Wave Generation by Electron Bombardment or Electromagnetic Wave Absorption. Journal of Applied Physics, 34(7) :2123, 1963.
- [15] Safia LEMLIKCHI, propagation des ultrasons les Milieux Faiblement Hétérogènes, Eds Universitaires Européennes, 2011. ISBN-10 : 6131516545

- [16] Redwood, M. Transient Performance of Piezoelectric Transducer. *J. Acous. Soc. Am.* 1961, 33, 527-536.
- [17] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, and J.V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*. 3 ed. New York: Wiley, 1982.
- [18] Blanter, M. S.; Golovin, I. S.; Neuhäuser, H.; Sinning, H.-R. Internal Friction in Metallic Materials, In *Springer Series in Materials Science*, Vol. 90; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2007; p. 1.