



**HAL**  
open science

# Capteurs acoustiques pour la détection de fuites dans les réseaux de distribution d'eau et l'évaluation non destructive des structures: Conception, optimisation et étude comparative.

Najah Hamamed

## ► To cite this version:

Najah Hamamed. Capteurs acoustiques pour la détection de fuites dans les réseaux de distribution d'eau et l'évaluation non destructive des structures: Conception, optimisation et étude comparative.. Acoustique [physics.class-ph]. Le mans Université; l'université de Sfax, Tunisie, 2023. Français. NNT : . tel-04479996

**HAL Id: tel-04479996**

**<https://theses.hal.science/tel-04479996>**

Submitted on 27 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE DE DOCTORAT

DE  
Le Mans université  
Ecole nationale d'ingénieurs de Sfax, l'université de Sfax  
*Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes*  
Spécialité : *Acoustique/Mécanique*

**Najah HAMAMED**

**Capteurs acoustiques pour la détection de fuites dans les réseaux de distribution d'eau et l'évaluation non destructive des structures: Conception, optimisation et étude comparative**

**Thèse présentée et soutenue à l'université du Mans, le 15/12/2023**

**Structures de recherche :**

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR CNRS 6613

**Thèse N°: 2023LEMA1030**

## **Rapporteurs avant soutenance :**

Najla FOURATI                      Maîtresse de Conférences HDR, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris

Aimé LAY-EKUAKILLE            Professeur, Université de Salento, Lecce, Italie

## **Composition du Jury :**

Président :  
Pierre-Olivier MATTEI            Chargé de recherche HDR, LMA, CNRS – Aix-Marseille Université

Examineurs :  
Mounir Ben Amar                Maître de conférences HDR, Université Sorbonne Paris Nord

Directeurs de thèse :  
Rachid EL GUERJOUMA          Professeur des universités, Le Mans Université  
Slim BOUAZIZ                      Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax-ENIS

Co-directeur. de thèse :  
Nourdin YAAKOUBI                Maître de conférences, Le Mans Université

Co-encadrants de thèse :  
Charfeddine MECHRI              Enseignant chercheur, Le Mans Université  
Mohamed HADDAR                Professeur des universités, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax-ENIS

*“Finishing a PhD is like finishing a group project where your partner made a ton of mistakes at the beginning of the assignment. Except your partner is just you four years ago”*

**John M. Mola**

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail en guise de ma profonde reconnaissance et gratitude*

### **À MES CHERS PARENTS**

*C'est avec le cœur ému que je dédie cette thèse à mes chers parents, **Mbarka et Brahim**, pour leurs affections inépuisables. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitte jamais assez.*

### **À MES CHERS ET ADORABLES SŒURS ET FRÈRES**

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.*

### **À MES DEUXIÈMES PARENTS EN FRANCE Michèle et Philippe**

*Qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

### **À MON CHER FIANCÉ Bilel**

*Ton amour ne m'a procuré que confiance et stabilité. Tu as partagé avec moi les meilleurs moments de ma vie, aux moments les plus difficiles de ma vie. Tu étais toujours à mes côtés, Je te remercie de ne m'avoir jamais déçu. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère*

### **À MES CHERES Mawaheb, Hiba, Nour et Oumaima**

*En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon affection la plus sincère*

### **À MA DEUXIÈME FAMILLE EN FRANCE**

**Khouloud, Ferial, Hela, Mohammed, Sid ali, Firas,**

*Vous êtes devenu une deuxième famille à l'étranger. Vous restez dans mon cœur, affectueusement. Que vous trouvez ici, le témoignage de tout mon amour et toute ma reconnaissance pour votre inlassable soutien. Je vous souhaite une vie pleine de réussite, de santé et de bonheur*

# Remerciements

*Cette thèse, a été effectuée dans le cadre d'une cotutelle entre le **Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Productique « LA2MP » de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (Tunisie) et le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans « LAUM » (France)**. Ce contexte m'a permis de travailler dans un cadre particulièrement agréable avec plusieurs personnes à qui je tiens à dire profondément et sincèrement merci.*

*Cette thèse est l'aboutissement d'un long cheminement au cours duquel j'ai bénéficié de l'encadrement, des encouragements et du soutien de plusieurs personnes, à qui je tiens à dire profondément et sincèrement merci. Ce travail est l'aboutissement d'un long cheminement au cours duquel j'ai bénéficié de l'encadrement, des encouragements et du soutien de plusieurs personnes, à qui je tiens à dire profondément et sincèrement merci. Tout d'abord, Je tiens à remercier vivement mes directeurs de thèse côtés Français, Monsieur **EL GUERJOUA Rachid**, Monsieur **YAAKOUBI Nourdin** et Monsieur **MECHRI Charfeddine**, pour leurs soutiens, leurs disponibilités durant ces années ainsi que pour leurs précieux conseils qui ont permis de mener à bien ce travail. Je tiens à exprimer également ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse coté Tunisien Monsieur **BOUAZIZ Slim** et Monsieur **HADDAR Mohamed**, leurs aides, leurs collaborations ainsi que leurs conseils avisés.*

*Je voudrais adresser mes chaleureux remerciements à ceux qui ont accepté aimablement de juger ce travail de thèse et d'avoir consacré du temps pour assurer la soutenance de ma thèse. Ainsi je voudrais remercier : Monsieur **MATTEI Pierre-Olivier**, Chargé de Recherche au CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, d'avoir accepté de présider le jury de thèse. Madame **FOURATI Najla**, Maîtresse de Conférences au Conservatoire National des Arts et Métiers, et Monsieur **LAY-EKUAKILLE Aimé**, Professeur à l'université de Salento à Lecce en Italie, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail et pour tout l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux. Monsieur **BEN AMAR Mounir**, Maître de conférences à l'université Sorbonne Paris Nord, LSPM-CNRS, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner mes travaux et de les juger.*

# Table des matières

## Table des matières

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>11</b>
<b>Chapitre 1 : Etude bibliographique.....</b>	<b>17</b>
1.1 Introduction .....	17
1.2 Piézoélectricité et transducteurs IDT .....	17
<b>1.2.1 La piézoélectricité.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2 Les capteurs acoustiques.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.3 Les capteurs piézoélectriques .....</b>	<b>20</b>
1.3 Les transducteurs interdigités IDT .....	24
<b>1.3.1 Les capteurs à ondes acoustiques de surface .....</b>	<b>25</b>
<b>1.3.2 Application des capteurs SAW pour la détection de vibration .....</b>	<b>29</b>
1.4 État de l'art sur la modélisation et la simulation de capteurs à ondes acoustiques de surface par la méthode des éléments finis.....	32
1.5 La détection des fuites d'eau.....	34
<b>1.5.1 Etat de l'art des techniques de détection de fuite .....</b>	<b>34</b>
1.6 Contrôle Non destructifs Acoustique de l'endommagement des structures.....	41
<b>1.6.1 L'acoustique non linéaire .....</b>	<b>41</b>
1.7 Conclusion.....	44
<b>Chapitre 2 : Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats .....</b>	<b>45</b>
2.1 Introduction .....	45
2.2 Les dispositifs de transduction interdigités (IDT).....	46
2.3 Choix des propriétés du capteur .....	46
<b>2.3.2 Géométrie des capteurs SAW.....</b>	<b>47</b>
<b>2.3.3 Choix de la fréquence de travail .....</b>	<b>48</b>
2.4 Simulation numérique .....	48
<b>2.4.1 Modèle simplifié.....</b>	<b>51</b>
2.5 Fabrication des capteurs SAW .....	54
<b>2.5.1 Techniques en salle blanche.....</b>	<b>55</b>
<b>2.5.2 Géométrie et dessin de masque du dispositif SAW .....</b>	<b>58</b>
<b>2.5.3 Techniques de caractérisation morphologique .....</b>	<b>58</b>
<b>2.5.4 Caractérisation électrique des dispositifs SAW .....</b>	<b>59</b>
<b>2.5.5 Procédé de fabrication des dispositifs SAW.....</b>	<b>60</b>
2.6 Validation des résultats expérimentales par la simulation numérique : COMSOL Multiphysique.....	65
<b>2.6.1 Modèle 3D .....</b>	<b>65</b>

<b>2.6.2 Modèles 2D</b> .....	66
2.7 Validation des résultats expérimentaux par la modélisation analytique : MATLAB.....	68
2.8 Conclusion.....	73
<b>Chapitre 3: Etude comparatives de différents capteurs acoustiques pour la détection de fuites dans les conduites de réseau de distribution d'eau</b> .....	<b>74</b>
3.1 Introduction et contexte.....	74
3.2 Réseau de distribution d'eau .....	74
<b>3.2.1 Constitution d'un réseau de distribution</b> .....	74
<b>3.2.2 Types de réseaux de distribution d'eau</b> .....	76
<b>3.2.3 Matériaux des canalisations</b> .....	76
<b>3.2.4 Les fuites d'eau</b> .....	78
<b>3.2.5 Techniques de détection des fuites d'eau</b> .....	80
3.3 Applications des capteurs acoustiques céramiques PZT et polymères PVDF: Détection des fuites d'eau dans les tubes métalliques et plastiques : Résultats préliminaires.....	81
<b>3.3.1 Matériels et méthodes</b> .....	81
<b>3.3.2 Dispositif expérimental et capture du signal acoustique</b> .....	82
<b>3.3.3 Résultats et discussions</b> .....	84
3.4 Détection des fuites dans les conduites en plastiques PVC.....	90
<b>3.4.1 Capteurs</b> .....	92
<b>3.4.2 Acquisition des données</b> .....	93
<b>3.4.3 Dispositif expérimental</b> .....	94
<b>3.4.4 Prétraitement du signal</b> .....	95
<b>3.4.5 Résultats</b> .....	96
<b>3.4.6 Discussions</b> .....	105
3.5 Conclusions .....	106
<b>Chapitre 4 : Contrôle Non destructif et Contrôle de Santé par Acoustique Non Linéaire en Résonance des structures par capteurs acoustique PZT et PVDF</b> .....	<b>109</b>
4.1 Introduction.....	109
4.2 Contexte .....	111
<b>4.2.1 Acoustique Non-Linéaire</b> .....	111
4.3 Caractérisation des conditions d'ancrage d'une structure de type mât par la méthode NLRAS..	116
<b>4.3.1 Capteur PZT pour la réception</b> .....	116
<b>4.3.2 Capteur PVDF pour la réception</b> .....	117
<b>4.3.3 Comparaison des réponses des deux capteurs</b> .....	118
4.4 Conclusion.....	119
<b>Conclusions générales et perspectives</b> .....	<b>121</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>124</b>

# Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Principe de la piézoélectricité .....	19
<b>Figure 1.2.</b> Capteurs céramiques PZT :a) : Type OEM PZT, b) : Type PZ23.....	21
<b>Figure 1.3.</b> Capteur céramique PZT utilisé pour la détection des fuites [100] .....	22
<b>Figure 1.4.</b> Capteur polymère PVDF [102] .....	22
<b>Figure 1.5.</b> Capteur PVDF utilisé pour la détection des forces [103].....	23
<b>Figure 1.6.</b> Capteur PVDF utilisé pour la détection des mouvements [104] .....	23
<b>Figure 1.7.</b> Capteur à ondes de volume .....	25
<b>Figure 1.8.</b> Les différents types d'ondes acoustiques qui se propagent dans un matériau piézoélectrique [116] .....	27
<b>Figure 1.9.</b> Architecture d'un dispositif à ondes acoustiques de surface.....	27
<b>Figure 1.10.</b> Résonateur mono-port.....	29
<b>Figure 1.11.</b> Résonateur bi-port.....	29
<b>Figure 1.12.</b> Montage d'essai expérimental pour le capteur de déformation SAW : (a) Cas de l'étirement, (b) Cas de la flexion .....	31
<b>Figure 1.13.</b> Structure d'un capteur SAW de vibration .....	32
<b>Figure 1.14.</b> Classification des techniques de détection et de localisation des fuites [151], [153].....	36
<b>Figure 1.15.</b> Balle intelligente [11].....	37
<b>Figure 1.16.</b> a): Bâton d'écoute mécanique, b): Bâton d'écoute électronique.....	38
<b>Figure 1.17.</b> Principe de détection par le microphone au sol.....	38
<b>Figure 1.18.</b> Principe de détection par l'enregistreur de bruit sans fil.....	39
<b>Figure 2.1.</b> Les différentes géométries des dispositifs SAW .....	48
<b>Figure 2.2.</b> Géométrie 3D du capteur simplifié (une paire des doigts).....	52
<b>Figure 2.3.</b> Maillage du modèle.....	52
<b>Figure 2.4.</b> Principe de fonctionnement d'un capteur.....	53
<b>Figure 2.5.</b> Spectres des pertes d'insertion des deux capteurs : a) SAW avec une zone centrale de 50 $\mu\text{m}$ , b) SAW avec une zone centrale de 5 mm .....	54
<b>Figure 2.6.</b> Schéma représentatif des diverses étapes du processus de la photolithographie .....	56
<b>Figure 2.7.</b> Dispositif de dépôt de résine : tournette de type RC5.....	57
<b>Figure 2.8.</b> L'aligneur de masques MA6/BA6 .....	57
<b>Figure 2.9.</b> La géométrie utilisée pour la fabrication de notre dispositif SAW .....	58
<b>Figure 2.10.</b> Schéma de la mesure de l'épaisseur à l'aide d'un profilomètre.....	59
<b>Figure 2.11.</b> Les microscopes optiques que nous les avons utilisés .....	59
<b>Figure 2.12.</b> L'analyseur de réseau HMS-X SPECTRUM ANALYZE .....	60
<b>Figure 2.13.</b> Dispositif SAW fabriqué sur un substrat en Kapton .....	60
<b>Figure 2.14.</b> Pistolet d'azote ( $\text{N}_2$ ) pour le séchage du substrat .....	61
<b>Figure 2.15.</b> Principe de déposition et de séchage de la résine AZ5214 sur la surface du substrat.....	62
<b>Figure 2.16.</b> Principe de l'insolation de la résine .....	62
<b>Figure 2.17.</b> Principe de développement de la résine .....	63
<b>Figure 2.18.</b> Dispositif de pulvérisation cathodique PLASSYS MP 450S.....	64
<b>Figure 2.19.</b> Schéma représentatif des procédés de fabrication des capteurs SAW .....	64
<b>Figure 2.20.</b> Capteurs SAW fabriqué sur un substrat PVDF.....	65
<b>Figure 2.21.</b> Géométrie 3D du dispositif SAW : Modèle réel ayant 15 paires des peignes .....	65
<b>Figure 2.22.</b> Spectres S21 simulé (modèle 3D COMSOL: 15 paires des doigts avec une zone centrale de 50 $\mu\text{m}$ de longueur) et mesuré des IDTs.....	66
<b>Figure 2.23.</b> Spectres S21 simulé (modèle 2D COMSOL: 15 paires des doigts avec une zone centrale de 50 $\mu\text{m}$ de longueur) et mesuré des IDTs.....	67
<b>Figure 2.24.</b> Réponses fréquentielles pour différentes largeurs de la.....	67
<b>Figure 2.25.</b> Effet de la longueur d'onde sr la réponse fréquentielle.....	68
<b>Figure 2.26.</b> Circuit électrique équivalent du Mason: Modélisation des ondes acoustiques de surface.....	69
<b>Figure 2.27.</b> Les spectres S21 calculés et mesurés du capteur SAW fonctionnant à 5 MHz .....	71







# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1.</b> Propriétés des matériaux piézoélectriques: céramiques et polymères .....	24
<b>Tableau 2.1.</b> Propriétés des substrats piézoélectriques .....	47
<b>Tableau 2.2.</b> Propriétés physiques et électriques du dispositif SAW .....	51
<b>Tableau 2.3.</b> Paramètres d'entrée pour la modélisation du dispositif SAW réalisé sur un substrat piézoélectrique en PVDF.....	70
<b>Tableau 3.1.</b> Propriétés des tubes utilisés.....	82
<b>Tableau 3.2.</b> Les capteurs utilisés pour les mesures .....	94
<b>Tableau 3.3.</b> Dimensions des fissures .....	95
<b>Tableau 3.4.</b> Débit (F. R) admis par une fuite .....	96
<b>Tableau 3.5.</b> Comparaison des sensibilités des capteurs PVDF placés à différentes positions C1, C3 et C5 .....	101
<b>Tableau 3.6.</b> Comparaison des sensibilités des capteurs PVDF, SAW et PZT placés dans la même position.....	101
<b>Tableau 3.7.</b> Comparaison des sensibilités des capteurs PVDF placés à différentes positions C1, C3 et C5 .....	104
<b>Tableau 3.8.</b> Comparaison des sensibilités des capteurs PVDF C3, SAW C4 et PZT C2 placés dans la même position .....	105

# Introduction Générale

L'eau est une ressource irremplaçable qui assure la vie et alimente l'infrastructure de la communauté mondiale. Dans les environnements urbains, les réseaux de distribution d'eau répondent à de nombreux besoins, qu'il s'agisse de la consommation des foyers ou des industriels. Cependant, ces réseaux ne sont pas à l'abri des risques de fuites, qui peuvent engendrer un important gaspillage d'eau, une augmentation des frais d'entretien et des endommagements potentiels de l'infrastructure. En effet, Les fuites dans les systèmes d'approvisionnement en eau provoquent d'importantes pertes financières à l'échelle mondiale. Une part significative de ces conduites d'approvisionnement est située sous terre, ce qui permet aux fuites de rester inaperçues pendant des périodes prolongées. L'impact économique de ce problème est considérable, avec une perte annuelle estimée de 126 milliards de mètres cubes d'eau, évaluée de manière conservatrice à 39 milliards de dollars en 2019 [1]. L'accès à une eau potable propre et sûre est reconnu comme un droit fondamental de l'homme. Cependant, de nos jours, environ la moitié de la population mondiale connaît des pénuries d'eau au moins une fois par mois chaque année. Les projections indiquent que ce chiffre pourrait atteindre environ 4,8 à 5,7 milliards de personnes d'ici 2050 [2]. Actuellement, l'Union européenne affiche un taux moyen de fuites d'eau de 24 %, tandis que les États-Unis enregistrent un taux de 12 %. Selon les estimations de l'International Water Association (IWA), les pertes d'eau des réseaux d'approvisionnement en eau potable dans le monde s'élèvent à plus de 346 milliards de litres chaque jour. Réduire ces pertes d'au moins 30 % permettrait d'économiser suffisamment d'eau traitée pour approvisionner 800 millions de personnes [3]. Indéniablement, l'amélioration de l'efficacité des systèmes de distribution d'eau pour un transport de ce précieux liquide, efficace comporte d'importants avantages pour la société, l'environnement et l'économie. En conséquence, il existe une demande croissante pour le développement d'équipements fiable et peu onéreux dédiés à l'identification précise des fuites de canalisations.

La localisation des fuites implique de déterminer la position présumée de la fuite avant les travaux de réparation. Ce processus s'accompagne généralement de la gestion des fuites, qui englobe des activités de surveillance et de contrôle. Au fil du temps, diverses techniques de détection des fuites ont été développées, notamment des méthodes acoustiques, des traceurs chimiques, la thermographie infrarouge, le radar à pénétration de sol, les détecteurs de fuite en

ligne, et plus récemment, les fibres optiques [4]–[8]. Des discussions approfondies sur ces technologies, y compris une analyse de leurs forces et faiblesses, sont disponibles dans les références [9]. Il est toutefois important de noter que les méthodes non acoustiques présentent certaines limitations, notamment des coûts plus élevés, de la complexité et des délais plus longs, ce qui peut potentiellement restreindre leur utilisation pratique dans les opérations de détection des fuites. Par conséquent, les méthodes acoustiques restent le choix privilégié pour détecter et localiser les fuites dans les réseaux de distribution d'eau [10]–[15]. Ces méthodes sont souvent regroupées en catégories invasives ou non invasives. Cette classification repose sur le fait de savoir si les capteurs nécessitent une insertion dans la canalisation, tombant ainsi dans la catégorie invasive. Notre étude se concentre principalement sur les méthodes non invasives et passives, telles que l'Émission Acoustique (EA). L'EA se distingue des techniques de mesure qui stimulent activement un système par génération d'ondes. L'EA repose plutôt sur la collecte et l'analyse du bruit ambiant généré par la structure examinée. L'EA est une méthode de contrôle non destructif qui repose sur le principe de détection des ondes acoustiques résultant de la libération soudaine de contrainte ou de déformation dans un matériau ou une structure. Ces émissions surviennent généralement lorsqu'il y a un changement dans l'intégrité interne ou l'état du matériau, comme l'amorçage ou la propagation de fissures, de fractures ou d'autres défauts. Le processus de test par émission acoustique implique une surveillance continue et une analyse de ces signaux acoustiques pour identifier et localiser précisément les défauts ou les irrégularités dans les matériaux ou les structures. L'Émission Acoustique implique souvent le déploiement de plusieurs capteurs acoustiques, ce qui en fait une technique largement utilisée dans diverses industries, notamment l'énergie, les transports terrestres, navals, aéronautiques et aérospatiales, le génie civil et la science des matériaux... Il constitue un outil précieux pour évaluer l'intégrité structurelle et la sécurité des matériaux et des structures.

Les recherches actuelles dans le domaine de la détection acoustique des fuites dans les réseaux de distribution d'eau sont principalement axées sur le perfectionnement des techniques d'estimation des temps de propagation des ondes, avec une emphase notable sur les méthodes avancées de traitement du signal [16]–[20]. Les chercheurs travaillent également de plus en plus sur des algorithmes basés sur l'apprentissage automatique (Machine Learning) pour classer les ondes liées aux fuites et qui ne le sont pas [21]. De plus, des recherches sont en cours pour explorer différentes technologies de communication, en intégrant les systèmes Internet des objets (IoT) dans la recherche [11]–[13], afin d'accélérer les temps de réponse aux fuites et de réduire les pertes d'eau. Cependant, il est crucial de souligner qu'une attention relativement limitée a été accordée à l'évaluation de la sensibilité, de la performance et de l'efficacité globale

des capteurs dans la détection des fuites. Cela devient d'autant plus important car, bien que les méthodes acoustiques se soient avérées efficaces pour détecter les fuites dans les canalisations en métal, leur performance est moins marquée dans les canalisations en plastique. Cela est principalement dû à l'atténuation substantielle des signaux sonores de fuite dans ces canalisations [10], [22]–[26].

L'objectif principal de notre recherche est d'identifier des capteurs d'EA qui démontrent non seulement de la sensibilité, mais qui font également preuve d'efficacité et de fiabilité. Pour atteindre cet objectif, nous avons mené une évaluation complète de la performance de trois catégories distinctes de capteurs acoustiques utilisés de manière passive pour détecter les fuites d'eau dans les canalisations en plastique : les capteurs en titanate de plomb zirconate (PZT), les capteurs en polyfluorure de vinyleidène (PVDF) et les capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW). Notre évaluation a porté sur la performance des capteurs PVDF et SAW dans la détection de fuites, en les comparant aux capteurs PZT dans différentes conditions, notamment différentes tailles de fuite, débits et distances par rapport à la fuite.

Les capteurs PZT, basés sur le matériau Titanate de Plomb Zirconate, sont fréquemment utilisés dans les applications d'Émission Acoustique (EA) en raison de leurs caractéristiques notables, notamment un fort couplage piézoélectrique et un facteur de qualité mécanique élevé [27]. Dans notre étude, nous avons choisi un capteur PZT du commerce en raison de ses performances reconnues dans les applications de détection de fuites, comme le confirme la littérature disponible. Sa grande sensibilité aux signaux acoustiques et sa robustesse dans l'identification des fuites en ont fait une référence pour de telles études [10], [11]. En raison de ces avantages bien documentés, nous avons délibérément choisi d'incorporer le capteur PZT en tant que point de référence fiable dans notre étude comparative aux côtés des capteurs PVDF et SAW.

Le PolyFluorure de Vinyleidène (PVDF) est un matériau polymère piézoélectrique renommé pour ses propriétés remarquables notamment sa flexibilité, une grande sensibilité, une large réponse en fréquence, une faible inertie et un coût peu onéreux [28]. Ces avantages inhérents rendent les transducteurs PVDF exceptionnellement polyvalents, trouvant des applications dans divers domaines tels que l'imagerie ultrasonore, la mesure de pression, l'accélérométrie, la biomédecine et l'acoustique sous-marine, entre autres. La flexibilité du PVDF est une caractéristique notable, qui lui permet de s'adapter facilement à diverses configurations et formes. Pour ce qui nous concerne, il est dans l'établissement d'un contact optimal avec les surfaces complexes des canalisations en plastique [29]–[31]. Cette adaptabilité renforce considérablement son potentiel pour détecter des fuites dans divers scénarios

d'installation, ce qui en fait un ajout précieux à notre étude. Cela est particulièrement bénéfique lorsqu'il s'agit de canalisations qui ne suivent pas des formes et des dimensions standard.

Les capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) sont des dispositifs complexes conçus pour détecter les changements structurels grâce à des ondes acoustiques de surface [32]–[34]. Ces capteurs se composent de deux composants clés : un transducteur interdigital (IDT) et un substrat piézoélectrique. Lorsqu'un signal électrique est appliqué, le substrat piézoélectrique génère des ondes acoustiques, et inversement, lorsqu'il fonctionne passivement, le SAW peut traduire les changements induits par les ondes acoustiques dans la structure. Les capteurs SAW excellent dans la détection des variations de la propagation des ondes à l'intérieur d'une structure, provoquées par des modifications de température, de pression, d'humidité ou par la présence d'ions chimiques spécifiques. Leur réputation repose sur des attributs tels qu'une sensibilité remarquable, des temps de réponse rapides et la capacité à mesurer diverses propriétés physiques [35].

Notre préférence pour les capteurs SAW flexibles dans cette étude de détection de fuites provient de plusieurs raisons. Tout d'abord, notre choix est motivé par les résultats prometteurs observés dans les expériences avec le film PVDF. Contrairement aux capteurs rigides, les capteurs SAW flexibles ont la capacité de s'adapter à des surfaces complexes et à des géométries irrégulières. Cette adaptabilité facilite leur intégration dans différents systèmes, améliorant la couverture et la proximité des sources potentielles de fuite. Par conséquent, cela augmente la sensibilité et la précision de la détection. Cette caractéristique permet des mesures précises et la détection d'émissions acoustiques faibles associées aux fuites. De plus, en introduisant des revêtements spécifiques ou en fonctionnalisant la surface du capteur, la sélectivité peut être ajustée pour cibler des substances ou des gaz spécifiques susceptibles de provoquer des fuites. Une autre caractéristique remarquable des capteurs SAW est leur double rôle en tant que dispositifs de filtrage. La capacité inhérente à discriminer entre différentes fréquences leur permet de filtrer efficacement le bruit et les interférences parasites. Cela garantit que seuls les signaux de fuite pertinents sont détectés. Cette capacité de filtrage intégrée réduit les faux positifs, renforçant la fiabilité et la précision de la détection des fuites, en particulier dans des environnements complexes et bruyants. Enfin, il convient de noter que les capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) flexibles et passifs offrent des capacités de surveillance en temps réel. Lorsque ces capteurs sont intégrés de manière sans fil, ils suscitent un intérêt croissant dans diverses applications activées par l'Internet des objets (IoT). Cette fonctionnalité sans fil permet une détection rapide des fuites, ce qui peut simplifier la mise en œuvre de mesures

d'intervention et d'atténuation en temps opportun. Par conséquent, cela renforce considérablement l'efficacité globale des processus de détection de fuites.

A la suite de notre travail sur la détection acoustique des fuites dans les réseaux de distribution d'eau, nous concluons notre travail par une contribution explorant la capacité de ces capteurs, en particulier les PZT et PVDF, à caractériser l'état de santé de structures telles que les mâts d'éclairage public sur la base de l'analyse spectroscopique en résonance acoustique non linéaire.

Le premier chapitre de notre travail est consacré à une étude bibliographique approfondie. Il englobe un grand nombre de travaux de recherche et permet de mieux comprendre le contexte actuel des technologies des capteurs acoustiques, de leurs principes de fonctionnement et de leurs différentes applications.

Le deuxième chapitre est consacré à une modélisation analytique à l'aide de MATLAB et à une simulation numérique détaillée à l'aide de COMSOL. Ces simulations nous ont permis de mieux comprendre le comportement du capteur SAW et d'en fabriquer dans la salle blanche du LAUM.

Dans le troisième chapitre sont présentés les résultats expérimentaux dont les expériences sont réalisées en laboratoire dans des conditions contrôlées. Dans la première partie, des résultats préliminaires concernant les performances des capteurs PZT et PVDF pour la détection des fuites d'eau dans les conduites plastiques (PVC) et métalliques (cuivre) sont présentées. Dans la deuxième partie, nous présentons les résultats de l'application des capteurs SAW pour la détection de fuites sur des conduites en PVC. Ces résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus avec les capteurs classiques PZT et PVDF étudiés dans la première partie, mettant ainsi en lumière les avantages potentiels des capteurs SAW en termes de sensibilité et de précision pour la détection des fuites d'eau.

Enfin, le dernier chapitre de la thèse se penche sur l'utilisation des capteurs PZT et PVDF précédemment mentionnés pour caractériser l'état de santé des structures à l'aide de la méthode de la résonance acoustique non linéaire. L'objectif principal de ce chapitre est d'explorer de nouvelles perspectives pour l'utilisation des capteurs PVDF dans cette application. L'évaluation de l'état de structures, comme les mâts d'éclairage public, se fait généralement par des méthodes d'inspection visuelle, des méthodes statiques de déformation contrôlée pouvant potentiellement endommager la structure, et des méthodes de mesure des vibrations linéaires non destructives. Récemment, il a été observé que le comportement non linéaire caractérise l'élasticité d'une large gamme de matériaux, en particulier en raison d'hétérogénéités internes telles que les joints de grains, les interfaces fibre-matrice, les microfissures, etc [36]. Lorsque



ces matériaux hétérogènes sont soumis à une forte excitation harmonique, ils présentent un décalage en fréquence et une augmentation de l'atténuation des modes de vibration, résultant de changements continus et réversibles de leurs propriétés viscoélastiques durant la sollicitation [37]. Ces matériaux et structures ne retournent pas instantanément à leur état initial lorsque la perturbation acoustique non linéaire est supprimée, mais retrouve leur état d'équilibre progressivement. Le temps de retour à l'équilibre et le chemin poursuivi pour cela dépend du niveau d'endommagement du matériau, ce qui fait de cette méthode une méthode de caractérisation non destructive très sensible aux dommages [38].

Dans cette étude exploratoire, nous appliquons cette approche à l'évaluation non destructive de l'intégrité de mats d'éclairage public et de leurs conditions d'ancrage. Les mats sont représentés par un modèle réduit constitué d'un tube en acier cylindriques fixé à une plaque métallique à l'aide de quatre boulons constitués chacun d'une vis, d'un écrou et d'une rondelle qui après serrage maintient le tube. Nous utilisons un capteur piézoélectrique intégré à la base de la structure, tandis que la réception est assurée par un capteur piézoélectrique et un capteur PVDF, dont nous comparons les performances. Nous surveillons le relâchement des conditions d'ancrage des mats par le desserrage progressif de l'un des écrous de fixation.

# Chapitre 1 : Etude bibliographique

## 1.1 Introduction

Le premier paragraphe de ce chapitre donne une brève introduction de la piézoélectricité et des matériaux piézoélectriques. Ensuite, nous présentons succinctement les capteurs à ondes acoustiques, en mettant particulièrement l'accent sur les dispositifs à ondes de surface (SAW) qui reposent sur les transducteurs interdigités (IDT). Nous examinerons leurs variétés, leurs mécanismes de fonctionnement, leurs divers types, ainsi que leur réponse en termes de fréquence. Le troisième paragraphe de ce chapitre est consacré à une présentation des travaux antérieurs en matière de modélisation et de simulation des capteurs en particulier SAW. Enfin, la dernière partie est réservée à l'examen des applications liées à la détection de fuites d'eau et au suivi de l'intégrité des structures, en utilisant des capteurs acoustiques.

## 1.2 Piézoélectricité et transducteurs IDT

### 1.2.1 La piézoélectricité

#### 1.2.1.1 Historique

La piézoélectricité est un phénomène électrique observé dans certains matériaux lorsque ceux-ci sont soumis à une contrainte mécanique ou une tension électrique. L'effet piézoélectrique a été découvert par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880, qui ont constaté que certains cristaux, notamment le quartz, produisaient une charge électrique lorsqu'ils étaient déformés mécaniquement. Ce phénomène a été appelé effet piézoélectrique direct [39], [40]. Il est illustré sur la figure 1.1



**Figure 1.1.** Principe de la piézoélectricité

En 1881, le physicien français Gabriel Lippmann a proposé que le phénomène inverse, où une déformation mécanique est produite par l'application d'un champ électrique, pouvait

également exister. Cette hypothèse a été confirmée par les frères Curie la même année, et cet effet a été nommé effet piézoélectrique inverse [41].

Les premiers calculs mathématiques de la piézoélectricité ont été effectués par Voigt en 1910, où la théorie de l'élasticité des matériaux est intervenue [42]. Les premières applications réelles des composants piézoélectriques n'ont eu lieu que pendant la première guerre mondiale. Paul Langevin, sur une idée de Chilowsky, a développé un générateur d'ondes ultrasoniques pour la détection de sous-marins en utilisant du quartz : c'est l'invention du Sonar (fréquence de résonance autour de 40 kHz) [43].

La piézoélectricité est un couplage mutuel entre les variables électriques et mécaniques dans le matériau (contrainte mécanique, déformation, champ électrique ou charge). Cet effet peut être décrit par les équations constitutives linéaires suivantes [44].

$$S_{ij} = S^E_{ijkl}T_{kl} + d_{ijm}E_m \quad \text{et} \quad D_n = d_{nkl}T_{kl} + \varepsilon^T_{mn}E_m \quad (1)$$

Les termes  $S_{ij}$ ,  $T_{kl}$ ,  $D_n$  et  $E_m$  correspondent respectivement à la déformation spécifique piézoélectrique, au tenseur élastique du matériau, au tenseur des contraintes mécaniques, au coefficient piézoélectrique et au champ électrique,  $d_{ijm}$  est la densité de polarisation électrique et  $\varepsilon^T_{mn}$  est le tenseur de permittivité diélectrique du matériau. Bien que les équations constitutives de la piézoélectricité soient sous forme de tenseur, un matériau piézoélectrique peut être décrit dans une approche simplifiée par des équations plus simples. Sous l'hypothèse quasi-statique, qui néglige le comportement dynamique à la résonance du dispositif, des équations linéaires et indépendantes de la fréquence qui représentent le dispositif sont écrites comme suit [44].

$$\partial = S^V F + dV \quad \text{et} \quad Q = dF + C^F V \quad (2)$$

Avec:

$\partial$  : Déviation ou déplacement du dispositif piézoélectrique ;

$Q$  : Charge aux bornes du dispositif piézoélectrique ;

$F$  : Force exercée sur le dispositif ;

$V$  : tension aux bornes des électrodes ;

$S^V$  : Conformité sous tension constante ;

$d$  : Coefficient piézoélectrique ;

$C^F$  : capacité sous une force constante.

Au fil des années, la piézoélectricité a été largement étudiée et exploitée pour de nombreuses applications pratiques, notamment dans les transducteurs acoustiques (tels que les haut-parleurs et les microphones) [45]–[47], les détecteurs de pression [48]–[50] et les capteurs

de mouvement [51]. De nos jours, les matériaux piézoélectriques sont utilisés dans de nouveaux domaines tels que la médecine, la métallurgie, l'industrie automobile [51]–[54], etc...

### 1.2.1.2 Les matériaux piézoélectriques

Il existe cinq principales catégories de matériaux piézoélectriques, chacune ayant ses propres caractéristiques physiques, optiques, mécaniques, électriques et élastiques. Ces catégories comprennent les cristaux, les céramiques, les semi-conducteurs à couches minces composées d'AlN ou de ZnO [55], [56], les polymères [57]–[60] et les piézocomposites [61]. Chacun de ces matériaux est défini par des constantes et des coefficients spécifiques, tels que les constantes élastiques et le coefficient de couplage électromagnétique. Le choix du matériau piézoélectrique dépend essentiellement de l'application envisagée.

En ce qui concerne les capteurs SAW, plusieurs paramètres critiques sont à prendre en compte, notamment la vitesse de propagation des ondes de surface, l'impédance acoustique, et les coefficients de couplage électromécanique ainsi que de température/fréquence [62]. Le coefficient de couplage électromécanique ( $K^2$ ) est un indicateur essentiel qui mesure l'efficacité de la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Il est calculé en utilisant la formule (3) et s'exprime généralement en pourcentage (%).

$$K^2 = \frac{\text{Energie électrique stockée}}{\text{Energie mécanique fournie}} \quad (3)$$

Plus la valeur de  $K^2$  est élevée, plus la conversion des signaux mécaniques en signaux électriques est meilleure et réciproquement.

Le coefficient de couplage électromécanique est important dans de nombreuses applications, telles que les transducteurs électromécaniques, les actionneurs et les capteurs. Il est aussi utilisé pour les circuits électromagnétiques, où il peut aider à minimiser les pertes d'énergie [63], [64].

### 1.2.2 Les capteurs acoustiques

Les capteurs acoustiques sont des dispositifs sensibles aux ondes sonores, les convertissent en signaux électriques, pouvant les émettre et les recevoir. Ils trouvent leur application dans divers secteurs, notamment dans le contrôle non destructif, la localisation de fuites au sein des conduites. [65], la surveillance de l'environnement marine [66], la localisation de sources de bruit et la reconnaissance vocale [67].

Il existe différents types de capteurs acoustiques, tels que les microphones, les hydrophones, les capteurs de vibration [68]–[70] et les capteurs piézoélectriques [71]–[73]. Les microphones

sont les plus couramment utilisés pour capturer les sons dans l'air [74], tandis que les hydrophones sont utilisés pour détecter les sons sous l'eau [75].

Les données issues des capteurs acoustiques peuvent être utilisées de concert avec l'intelligence artificielle, pour analyser les signaux sonores et extraire des informations utiles [76], [77].

En émission acoustique, l'amplitude et le contenu fréquentiel de l'onde ne sont pas contrôlés par l'opérateur, contrairement au contrôle actif ultrasonore [78]. Pour cette raison, des capteurs spécifiques sont nécessaires. Il existe plusieurs technologies pour convertir une grandeur vibratoire en un signal électrique, utilisant des mécanismes de transduction différents pour mesurer le déplacement, la vitesse, la contrainte, etc [79]–[81]. Les technologies courantes incluent les capteurs piézoélectriques, capacitifs, les interféromètres laser et les réseaux de Bragg sur fibre optique. Le choix du capteur est essentiel pour prendre en considération plusieurs paramètres, comme la sensibilité [82], [83], la robustesse [84], la simplicité de mise en œuvre et le prix [85].

### 1.2.3 Les capteurs piézoélectriques

Un capteur piézoélectrique est un dispositif qui utilise l'effet piézoélectrique pour convertir l'énergie mécanique en signal électrique.

Ces dispositifs sont couramment utilisés pour mesurer les vibrations [86], les chocs [87], la pression [88] et la force. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles que les dispositifs médicaux [89], les instruments de mesure, les systèmes de surveillance des structures, et les dispositifs de sécurité [90], [91].

Les matériaux les plus utilisés pour la fabrication des capteurs piézoélectriques sont le quartz [92], le titanate de baryum [93], le titanate de plomb [94], le zirconate de plomb [95] et certains polymères [96].

Les capteurs piézoélectriques peuvent être conçus pour fonctionner dans divers conditions environnementales, notamment des températures élevées, des environnements corrosifs et des environnements soumis à des vibrations élevées. Ils sont également compacts et légers, ce qui les rend adaptés à de nombreuses applications industrielles. Dans ce travail on va s'intéresser aux capteurs piézoélectriques céramiques et polymères.

#### 1.2.3.1 Capteurs céramiques PZT

Les capteurs en céramique PZT sont des dispositifs de détection qui utilisent une céramique piézoélectrique à base de titanate de plomb-zirconate (PZT) pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Ils sont constitués d'une pastille cylindrique en PZT collée dans un boîtier

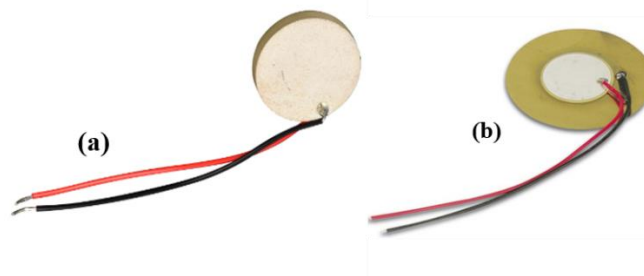
métallique (Figure 1.2). La pastille peut être amortie ou non pour optimiser la réponse en fréquence ou la sensibilité.

Les capteurs en céramique PZT sont destinés à mesurer diverses grandeurs physiques, notamment la pression [97], l'accélération [98], la force, le déplacement, la vitesse, etc.

Ils sont largement utilisés dans de nombreuses applications industrielles, telles que l'automobile, l'aéronautique, la médecine, la surveillance environnementale, l'énergie, etc. Ils sont appréciés pour leur haute sensibilité, leur large gamme de mesure et leur robustesse.

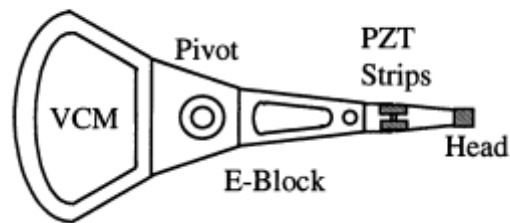
Cependant, il est important de noter que les capteurs en céramique PZT peuvent être sensibles aux interférences électromagnétiques et aux conditions environnementales extrêmes, ce qui peut affecter leur précision et leur durée de vie. Il est donc essentiel de les employer avec précaution et dans des environnements adaptés afin de garantir leur fonctionnement optimal.

Zhu, Ji et al [99] ont dressé un récapitulatif des méthodes de détection de fuites de gaz dans les pipelines utilisant des capteurs à base de matériaux céramiques piézoélectriques (PZT). Les capteurs PZT sont installés sur les pipelines pour mesurer les vibrations induites par le gaz en circulation. Lorsqu'une fuite se produit, les vibrations changent et les capteurs détectent ce changement, ce qui permet de localiser rapidement la fuite. Les résultats expérimentaux montrent que cette méthode est efficace pour la détection de fuites de gaz dans les pipelines et peut être utilisée comme méthode de surveillance en temps réel pour améliorer leurs sécurités.



**Figure 1.2.** Capteurs céramiques PZT :a) : Type OEM PZT, b) : Type PZ23

Yunfeng et al [100] ont développé une méthode de contrôle des vibrations d'un système de suspension à deux étages en utilisant un capteur PZT. Le PZT est utilisé comme capteur pour mesurer les vibrations et comme actionneur pour annuler les vibrations détectées. Les résultats expérimentaux vérifient que cette méthode de contrôle des vibrations est efficace pour réduire les vibrations dans le système, ce qui peut être utile dans de nombreuses applications industrielles.



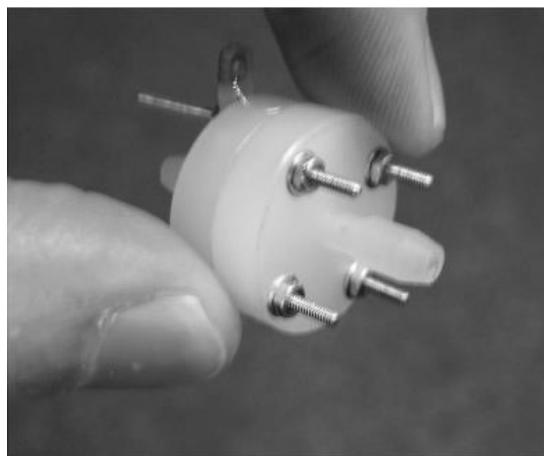
**Figure 1.3.** Capteur céramique PZT utilisé pour la détection de vibration[100]

### 1.2.3.2 Capteurs PVDF

Le PVDF (Polyvinylidène Fluorure ou Polyvinylidène difluorure), est un polymère thermoplastique fluoré couramment utilisé pour fabriquer des capteurs. L'histoire des capteurs à base de PVDF remonte aux années 1969, lorsque Kawai [101] a découvert que le PVDF avait un effet piézoélectrique. Depuis lors, de nombreuses études ont été menées pour améliorer les performances de ces capteurs.

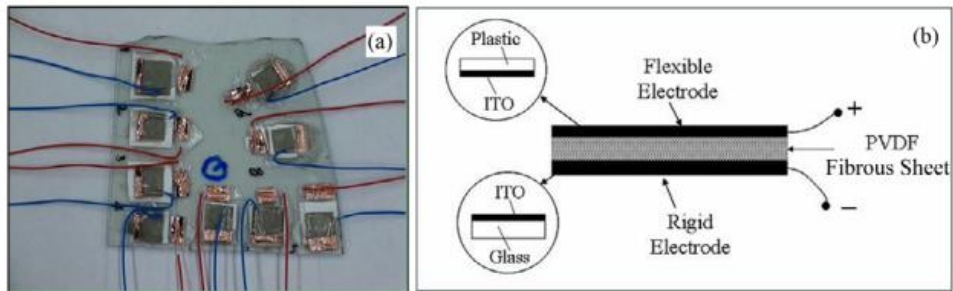
Ces capteurs sont utilisés dans de nombreux domaines, tels que la mécatronique, la robotique, l'aéronautique, l'énergie, l'environnement et la biologie.

AV Shirinov et al [102] ont élaboré un nouveau capteur de pression polymère à faible coût, mettant en œuvre un film piézoélectrique PVDF en tant qu'élément sensible. Les propriétés du capteur ont été examinées expérimentalement, incluant la sensibilité aux variations de température et d'humidité, ainsi que le temps de réponse. Des mesures ont également été prises pour évaluer les altérations de la courbe caractéristique résultant du vieillissement. Ils ont étudié l'influence de divers produits chimiques sur le signal de sortie du capteur de pression, rapportant et analysant les observations.



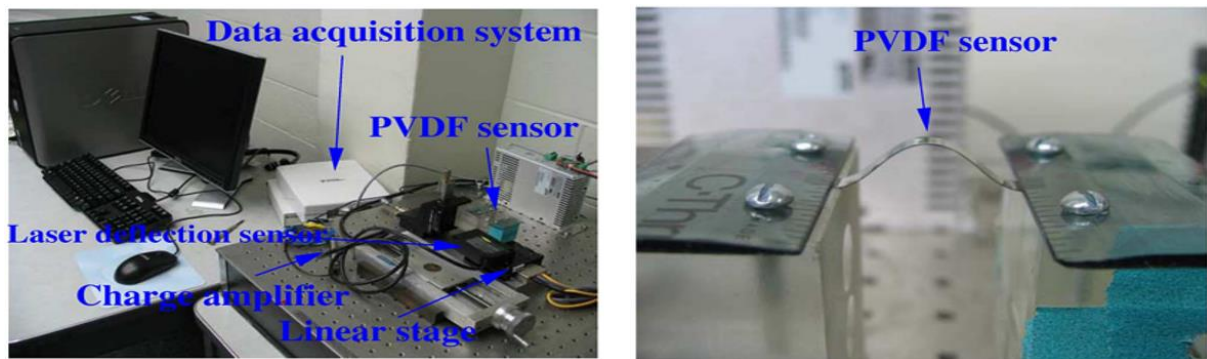
**Figure 1.4.** Capteur polymère PVDF de pression [102]

Y R Wang et al [105] ont développé un capteur de force piézoélectrique flexible à base de tissus PVDF. Ces capteurs ont été fabriqués en incorporant des fibres PVDF dans des tissus et en les reliant à des électrodes. Les capteurs ont été testés pour leur sensibilité et leur réponse à des forces de différentes amplitudes et fréquences. Les résultats ont montré que les capteurs étaient sensibles et pouvaient détecter des forces allant jusqu'à 3,5 N.



**Figure 1.5.** Capteur PVDF utilisé pour la détection des forces [103]

YI Jingang et al [104] ont développé un capteur de déformation et de mouvement à base de PVDF. Ils ont utilisé une approche de modélisation pour prédire le comportement. Les auteurs soulignent également la simplicité de la fabrication du capteur et sa faible consommation d'énergie.



**Figure 1.6.** Capteur PVDF utilisé pour la détection des mouvements [104]



**Tableau 1.1.** Propriétés des matériaux piézoélectriques: Céramiques et polymères

Matériau	Références	Avantages	Inconvénients	Caractéristiques physiques
Céramique	[96], [105], [106]	Haute sensibilité, haute résolution, faible bruit, résistance à la corrosion	fragilité, faible flexibilité	Haute densité
Polymère	[107]–[109]	Haute sensibilité, faible coût, légèreté, grande flexibilité, facile à fabriquer	Faible résolution, bruit élevé, dérive thermique	Faible densité

### 1.3 Les transducteurs interdigités IDT

Les matériaux possédant des propriétés piézoélectriques sont capables de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement, ce qui ouvre la voie à la production d'ondes acoustiques. En appliquant une tension électrique alternative sur un réseau d'électrodes métalliques, il est possible de générer une onde dans le matériau par effet piézoélectrique inverse. Selon la configuration géométrique et les propriétés des matériaux employés, une variété d'ondes peut être générée, comprenant des ondes de volume (BAW), des ondes de surface (SAW), des ondes de plaques formées par la combinaison d'ondes BAW et SAW, ainsi que des ondes guidées.

Les transducteurs interdigités, également appelés transducteurs à électrodes interdigitées (IDT), sont des dispositifs électromécaniques utilisés pour convertir des signaux électriques en ondes acoustiques et vice versa [110]. Les transducteurs interdigités sont constitués de deux

ensembles d'électrodes interdigitées disposées de manière à former un réseau de dents de peigne. Lorsqu'un signal électrique est appliqué aux électrodes, cela crée un champ électrique qui provoque des vibrations mécaniques dans le matériau piézoélectrique entre les électrodes, générant ainsi une onde acoustique. De même, lorsque des ondes acoustiques sont appliquées au transducteur, elles provoquent des vibrations mécaniques qui génèrent une charge électrique aux électrodes, créant ainsi un signal électrique.

### 1.3.1 Les capteurs à ondes acoustiques de surface

Les capteurs SAW (Surface Acoustic Wave) sont des dispositifs qui exploitent les propriétés des ondes acoustiques se propageant à la surface d'un matériau piézoélectrique. Il existe divers types de capteurs SAW classés selon le type d'ondes acoustiques de surface, chacune ayant ses caractéristiques distinctes.

Ondes de Rayleigh (R-SAW) : Ces ondes se propagent à la surface d'un matériau semi-infini. Elles présentent des mouvements longitudinaux et transversaux dont l'amplitude diminue quand la distance par rapport à la surface augmente. Les premiers dispositifs SAW ont été introduits grâce aux recherches menées par White et Voltmer à l'université de Berkeley sur les transducteurs interdigités. Ces dispositifs exploitent une onde de Rayleigh, ainsi nommée d'après Lord Rayleigh qui l'a découverte en 1887. Cette onde présente à la fois une composante longitudinale et une composante transverse verticale. Cette caractéristique entraîne un couplage significatif entre le déplacement mécanique et le milieu en contact direct avec la surface. L'énergie acoustique est concentrée en surface, dans une épaisseur inférieure à la longueur d'onde, ce qui résulte en une grande sensibilité aux perturbations de surface (Figure 1.7).

Ondes de Love (L-SAW): Lorsqu'un substrat est revêtu d'une fine couche, sous la condition que la vitesse de propagation de l'onde de volume transverse horizontale dans cette couche soit inférieure à celle dans le substrat, une onde transverse horizontale dispersive, connue sous le nom d'onde de Love, peut se propager. Dans ce contexte, l'énergie acoustique se confine dans cette couche, qualifiée de couche guidante. On suppose que l'amplitude des déplacements reste constante et atteint son maximum dans l'épaisseur de la couche guidante, décroissant de manière exponentielle dans le substrat piézoélectrique. La polarisation transverse horizontale facilite le fonctionnement en milieu liquide, car seule une interaction visqueuse opère entre l'onde et le liquide. Du fait que la majeure partie de l'énergie est confinée dans la couche guidante, les dispositifs à ondes de Love présentent une sensibilité élevée aux perturbations de la surface (Figure 1.7).

Les ondes de Bleustein-Gulyaev: Elles se caractérisent par leur nature purement transverse, avec une amplitude qui décroît de manière exponentielle à l'intérieur du volume.

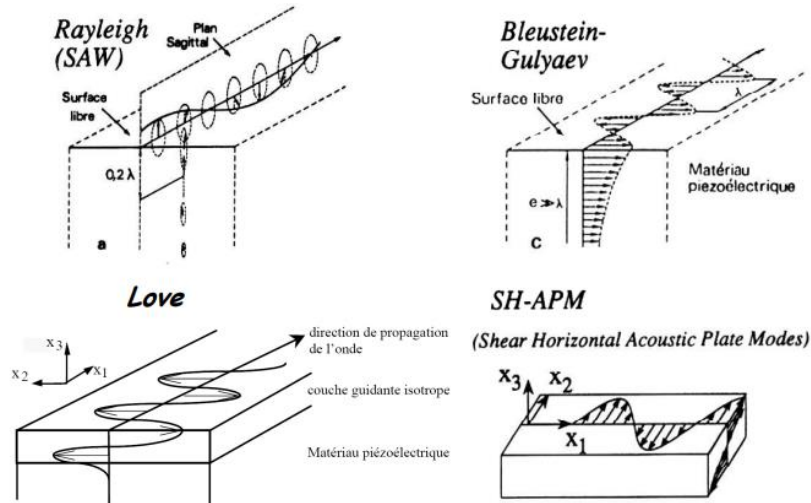
Comparativement aux ondes de Rayleigh, ces ondes présentent une énergie plus élevée, étant concentrée dans une épaisseur d'environ 100 fois la longueur d'onde ( $100\lambda$ ). Cette caractéristique confère au capteur à ondes de Bleustein-Gulyaev une faible sensibilité aux variations à la surface du substrat. Notamment, ce capteur peut fonctionner efficacement en milieu liquide en raison de la polarisation transverse de l'onde (Figure 1.7).

Ondes de Stoneley (S-SAW) : Ces ondes sont découvertes en 1924. Elles sont utilisées pour évaluer les propriétés de l'interface et le couplage entre deux milieux solides (Figure 1.7).

Les ondes de Lamb: Les ondes de Lamb représentent une catégorie spécifique d'ondes acoustiques qui se propagent à travers un milieu d'épaisseur limitée, avec chacune de ses faces induisant un mouvement. Bien que les capteurs à ondes de Lamb soient relativement peu fréquents dans la littérature des capteurs utilisés en milieu liquide en raison de leur fragilité, leur sensibilité aux perturbations de surface est directement liée à leur épaisseur, tout comme les capteurs TSM et SH-APM. Malgré leur vulnérabilité, ces capteurs détiennent un potentiel prometteur pour mesurer la masse volumique et la viscosité (Figure 1.7).

Et les ondes de Sezawa (SZ-SAW): L'onde de Sezawa est souvent considérée comme une onde du même type et de la même famille que les ondes de type Rayleigh. Cependant, selon certains auteurs, elle correspond au mode 1 des ondes de type Rayleigh. D'autres auteurs utilisent le terme "ondes de Sezawa" pour englober tous les modes de propagation supérieurs à celui des ondes de Rayleigh, appartenant à la famille des ondes de Rayleigh. Dans des matériaux massifs, en opposition aux matériaux multicouches, il est possible d'avoir des ondes de différents types, mais chaque type d'onde ne présente qu'un seul mode, souvent appelé le mode fondamental. La position du terme "harmonique" par rapport aux types d'ondes et aux modes de propagation reste à déterminer (Figure 1.7).

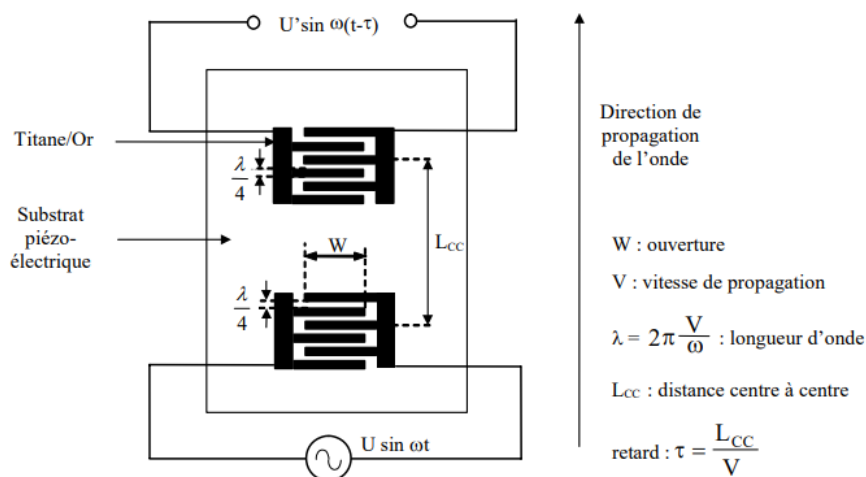
En 1965, R.M. White et F.W. Voltmer ont créé le premier dispositif des lignes à retard à ondes acoustiques de surface [111]. Un peu plus tard, plusieurs chercheurs ont continué à travailler sur les SAW pour multiples applications. Wohltjen a développé le premier détecteur de gaz basé sur un dispositif des lignes à retard [112].



**Figure1. 7.** Les différents types d'ondes acoustiques qui se propagent dans un matériau piézoélectrique [116]

Les SAW sont souvent utilisés pour mesurer des grandeurs physiques telles que la pression, la température, la viscosité, la densité, l'humidité, la tension superficielle et la vibration. Ils peuvent également être utilisés pour détecter des gaz, des liquides et des particules dans l'air ou dans un liquide.

Ces capteurs fonctionnent en utilisant des électrodes interdigitées qui sont placées de manière coplanaire sur un substrat piézoélectrique, ce qui permet la propagation d'une onde en surface. La Figure 1.8 illustre l'architecture et les caractéristiques d'un dispositif qui peut générer des ondes de surface.



**Figure 1.8.** Architecture d'un dispositif à ondes acoustiques de surface en mode ligne à retard

Ce type des capteurs fonctionnent à des fréquences qui peuvent aller jusqu'au des centaines

de MHz, et sont donc très sensibles. Ils ont fait l'objet de nombreuses études théoriques et applications qui peuvent être trouvées dans la littérature [113], [114].

En se basant sur la configuration des peignes interdigités, il est possible de distinguer différents types de dispositifs, tels que :

### 1.3.1.1 La ligne à retard

Le dispositif se compose de deux ensembles de transducteurs bidirectionnels disposés en forme de peignes interdigités sur un substrat piézoélectrique. Le premier transducteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, tandis que le second effectue la conversion inverse. Pour éviter les problèmes de réémission provoqués par les réflexions multiples des ondes acoustiques de surface entre les deux transducteurs interdigités, il est possible d'ajouter des absorbeurs aux extrémités du substrat [115], [116].

La réponse caractéristique d'une ligne à retard dépend de plusieurs paramètres, notamment les propriétés du matériau piézoélectrique, la configuration des peignes interdigités, et les conditions environnementales. Cette méthode atteint une performance optimale lorsque la longueur d'onde acoustique ( $\lambda$ ) est égale à la périodicité des peignes. La formule suivante exprime la fréquence de synchronisation :

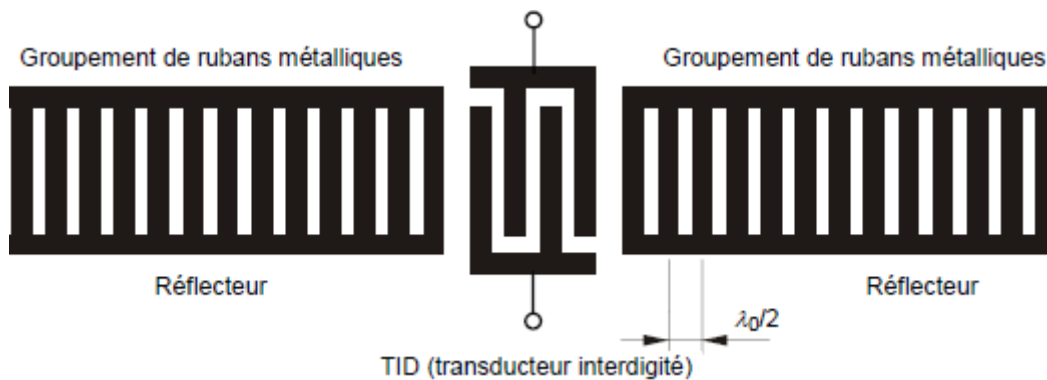
$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (5)$$

où  $f$  est la fréquence de fonctionnement [Hz],  $V$  représente la vitesse de propagation de l'onde de surface dans le substrat [m/s] et  $\lambda$  représente la longueur d'onde (m).

### 1.3.1.2 Les résonateurs SAW

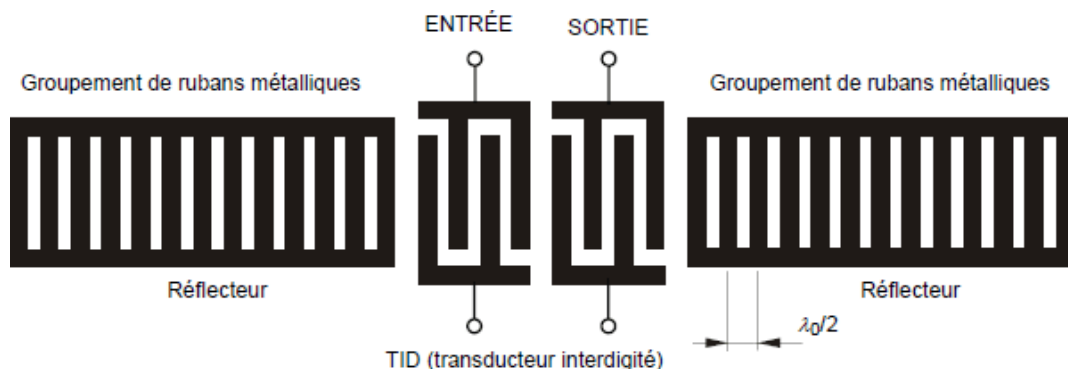
Les résonateurs SAW peuvent être classés en deux catégories : les mono-ports et les bi-ports. Les résonateurs mono-ports sont fabriqués en un unique dispositif d'interdigités transducteurs (IDT) qui à la fois génère et capte l'onde acoustique. De plus, ils comportent deux réseaux réflecteurs positionnés à chaque extrémité (Figure 1.9). Ces réseaux jouent un rôle crucial en réfléchissant l'onde et en créant une onde stationnaire. Les résonateurs mono-ports sont principalement utilisés dans des circuits d'oscillateurs tels que les oscillateurs VCO ou les

oscillateurs de type Colpitts.



**Figure 1.9.** Résonateur mono-port

Les résonateurs bipolaires se composent d'un IDT d'émission, responsable de la génération de l'onde acoustique, et d'un IDT de réception, qui enregistre cette onde. Tout comme dans le cas des résonateurs monopôles, deux ensembles de réflecteurs sont intégrés pour renvoyer et maintenir l'onde emprisonnée entre les deux IDT. Les résonateurs bipolaires trouvent principalement leur application en tant que filtres passe-bande à étroite bande passante. (Voir la Figure 1.10)



**Figure 1.10.** Résonateur bi-port

### 1.3.1.3 Lignes à retard réfléchives

Les lignes à retard réfléchives sont des lignes à retard à un seul IDT avec des réflecteurs multiples conçus pour réfléchir une partie de l'onde. Ces lignes à retard réfléchissantes sont souvent utilisées pour une identification unique à l'aide de techniques telles que le codage, le multiplexage de fréquence, la division du temps ou une combinaison de celles-ci [117]. Les capteurs passifs sans fil multifonctionnels ont bénéficié de l'utilisation répandue de la ligne à retard réfléchissante SAW.

### 1.3.2 Application des capteurs SAW pour la détection de vibration

Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour intégrer les capteurs SAW dans des

systèmes de surveillance en ligne pour la détection de vibrations de machines industrielles telles que les moteurs, les pompes et les turbines [118].

Jusqu'à présent, plusieurs types de capteurs de déformation utilisant différentes conceptions, matériaux et principes de fonctionnement ont été présentés dans la littérature scientifique, incluant les capteurs de contrainte de type jauge [119] et les capteurs capacitifs [120]. Cependant, bien que ces capteurs soient connus pour leur stabilité et leur fiabilité, ils présentent encore des limites en termes de performances telles qu'une grande consommation d'énergie, la complexité des systèmes de mesure et des difficultés à intégrer des communications sans fil. Pour résoudre ces problèmes, plusieurs types de capteurs de déformation basés sur les ondes acoustiques de surface (SAW) ont été rapportés [71], [121], [122]. Kalinin et al ont proposé un capteur de déformation utilisant une structure de ligne à retard réfléchissante, Nomura et al ont présenté un capteur de déformation SAW fixé à une structure en porte-à-faux.

Au cours des dernières années, les systèmes intelligents de surveillance des structures ont été présentés comme une nouvelle technologie de capteurs en temps réel permettant de collecter des informations sur les structures telles que la force du pneu, le coefficient de frottement de la route ou l'angle de dérapage. Ces systèmes intelligents utilisent la technologie capable de mesurer en temps réel la déformation du pneu dans n'importe quelle condition. Pour surveiller et contrôler les situations de déformation des systèmes en temps réel, il est essentiel de développer un capteur de déformation robuste et sensible [123].

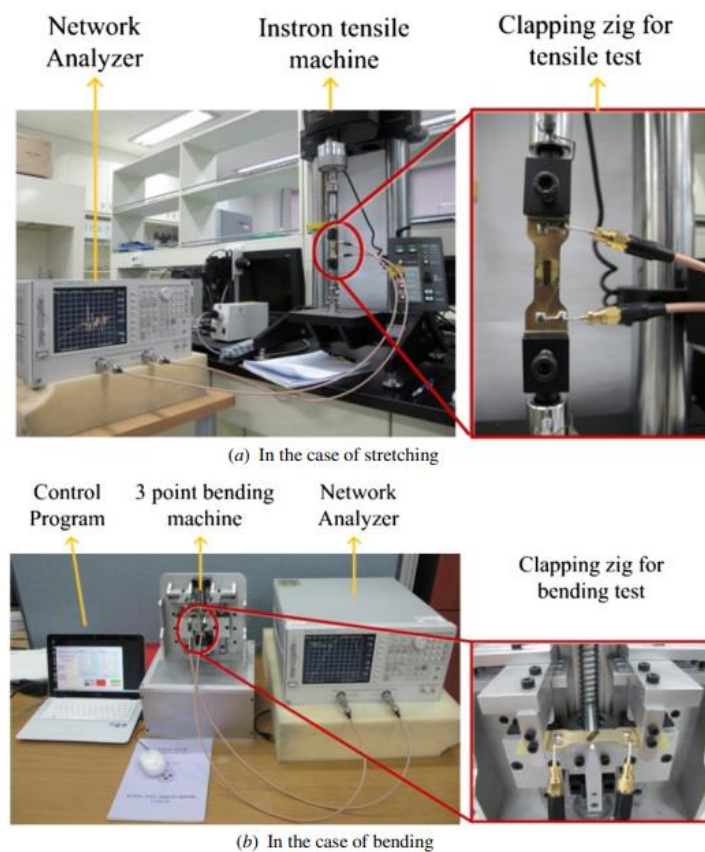
OH, Haekwan et al [124] ont développé un système de mesure de contrainte à haute sensibilité basé sur un capteur SH SAW. Les auteurs expliquent le fonctionnement du capteur et comment ils ont amélioré sa sensibilité en utilisant une conception optimisée du transducteur et une technique de traitement du signal. Pour évaluer ses performances, le capteur SAW a été fixé à une machine de traction (Instron5848 Micro Tester) et à une machine de flexion à trois points, comme illustré dans la figure 1.11.a. La fréquence du capteur SAW a été mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau pendant l'application progressive de contraintes.

Pour les tests de flexion, une machine de flexion à trois points a été conçue et construite, comme montré dans la figure 1.11.b. La conception a été réalisée en utilisant Autodesk Inventor, un outil de modélisation 3D, avec des dimensions de l'équipement de  $180 \times 300 \times 60$  mm<sup>3</sup>. La distance et la vitesse de déplacement ont été contrôlées par un programme informatique développé en interne. Un moteur pas à pas a été utilisé comme actionneur, avec des spécifications de 3200 impulsions par révolution, assurant un contrôle précis du déplacement avec une précision inférieure à 1  $\mu$ m. La vis à billes avait une avance de 1 mm par tour, garantissant une déformation minimale d'environ 0,3  $\mu$ m lors du déplacement d'un circuit

imprimé de 60 mm.

L'ensemble du capteur SAW a été fixé à la machine de mesure à l'aide de gabarits, et la déformation a été induite en déplaçant l'un des gabarits à l'aide du moteur pas à pas. Les essais ont été effectués à une vitesse de transport minimale de  $0,02 \text{ mm s}^{-1}$  pour minimiser les effets externes résultant de la vitesse de transport sur le capteur SAW pendant les mesures. Pour l'essai d'étirement, la déformation a été appliquée jusqu'à 2,5 % par incréments de 0,2 %. L'essai de flexion a été conçu de manière à induire la déformation par incréments de hauteur de 0,1 mm, avec une vitesse de  $0,02 \text{ mm s}^{-1}$ .

Les résultats montrent que le système est capable de détecter de très petites déformations avec une grande précision, ce qui le rend utile pour des applications telles que la surveillance de structures ou la détection de défauts.

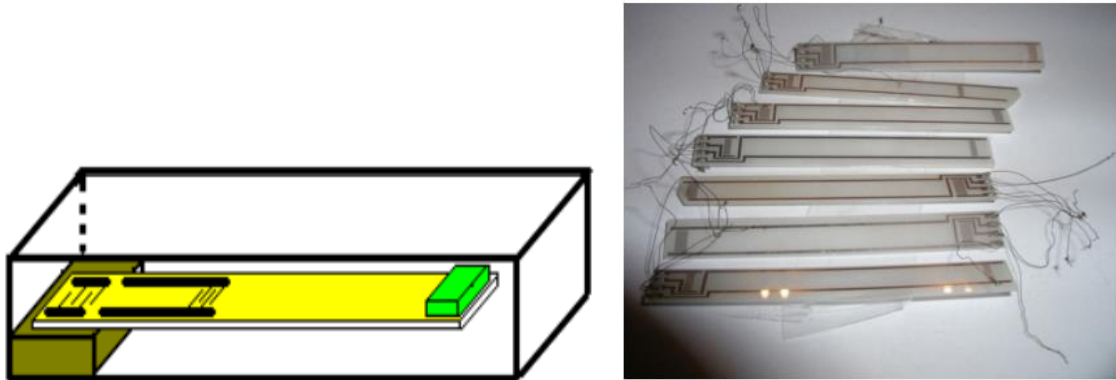


**Figure 1.11.** Montage d'essai expérimental pour le capteur de déformation SAW : (a) Cas de l'étirement, (b) Cas de la flexion [124]

Jerzy Filipak et al [118] ont étudié l'utilisation d'ondes acoustiques de surface pour détecter de petites vibrations dans des structures. Ils ont expliqué comment les ondes acoustiques peuvent être générées et détectées à l'aide de dispositifs à transduction piézoélectrique. Ils ont discuté également la sensibilité et la résolution de cette méthode de détection, ainsi que de son potentiel pour diverses applications telles que la détection de défauts dans les matériaux, la



surveillance des structures de génie civil et la détection des mouvements tectoniques. Les résultats expérimentaux présentés dans l'article ont démontré l'efficacité de cette méthode pour détecter des vibrations avec une grande précision et une sensibilité élevée.



**Figure 1.12.** Structure d'un capteur SAW de vibration [118]

Les capteurs SAW fabriqués du substrat en polymère PVDF sont des capteurs flexibles qui peuvent être utilisés pour détecter une variété de propriétés physiques et chimiques. Les capteurs SAW fabriqués en PVDF sont souvent utilisés dans des applications nécessitant un capteur flexible, léger et de faible puissance, comme les dispositifs portables et les emballages intelligents [125].

### **1.4 État de l'art sur la modélisation et la simulation de capteurs à ondes acoustiques de surface par la méthode des éléments finis**

Les dispositifs à ondes acoustiques de surface (SAW) sont des composants essentiels dans les domaines des communications et de l'électronique. Leur polyvalence se manifeste à travers divers rôles, tels que ceux d'actionneurs électroniques, de modulateurs, de filtres RF, ainsi que de capteurs biochimiques et de gaz. Pour concevoir, optimiser et mettre au point ces dispositifs de haute performance, l'utilisation de simulations s'avère incontournable. Ces simulations permettent de réduire à la fois les délais et les coûts de production, tout en renforçant notre compréhension des principes physiques sous-jacents.

Plusieurs techniques et méthodes de simulation ont été élaborées et appliquées dans le domaine de la modélisation acoustique. Cependant, il reste encore beaucoup de potentiel d'amélioration. Les méthodes traditionnelles pour modéliser et analyser les transducteurs interdigités (IDT) incluent le modèle à fonction delta, le modèle de circuit équivalent, le modèle à matrice P, et la théorie du couplage des modes. Bien qu'efficaces pour les applications RF, ces méthodes demandent des ressources de calcul substantielles.

La Méthode des Eléments Finis (MEF), mise en œuvre à travers des logiciels tels qu'ANSYS ou COMSOL, émerge comme une alternative plus efficace pour la modélisation et l'analyse des

capteurs SAW. La MEF simplifie l'analyse de géométries complexes, caractéristiques des dispositifs à ondes acoustiques de surface, tout en fournissant une compréhension approfondie des phénomènes physiques sous-jacents, avant leur fabrication en salle blanche.

En outre, un aperçu des travaux de recherche précédents utilisant la MEF pour modéliser les dispositifs SAW est présenté. Ces études portent sur divers aspects, tels que l'effet du chargement massique sur les lignes à retard revêtues de films minces, l'étude des microcavités sur les lignes à retard SH-SAW, la modélisation de dispositifs SAW à base de ZnO, et l'analyse harmonique temporelle de dispositifs SAW. Ces travaux illustrent la puissance de la MEF dans la compréhension et l'amélioration des dispositifs SAW.

Plusieurs équipes de recherche se sont penchées sur l'évaluation de la sensibilité des capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) en utilisant la méthode des éléments finis. Par exemple, Sankara Narayanan et ses collaborateurs [126] ont employé cette approche pour concevoir un micro-accéléromètre SAW à distance. D'un autre côté, El Gowini et Moussa [127] ont opté pour un modèle 3D simplifié basé sur des solutions à ondes planes pour modéliser un capteur SAW, réduisant considérablement les temps de calcul nécessaires à l'analyse de la réponse du dispositif.

Les travaux de Hofer et al. [128] se sont concentrés sur l'interaction entre les ondes acoustiques de surface et les ondes acoustiques de volume dans les dispositifs SAW, tandis que Tao Wang et ses collaborateurs [129] ont introduit un modèle 3D pour étudier la corrélation entre la sensibilité du dispositif SAW, le déphasage et la perte d'insertion. Lin et al. [130] ont quant à eux simulé la propagation d'une onde acoustique de surface dans un échantillon en acier en utilisant la méthode des éléments finis pour la détection de défauts en surface.

D'autres équipes de recherche se sont également penchées sur l'évaluation de la sensibilité des capteurs SAW. Han et Yong [131] ont utilisé le PMMA comme matériau modèle, tandis que Wu et al. [132] ont adopté la méthode d'Abdollahi et al. [133] pour évaluer la sensibilité de masse du dispositif SAW en calculant les vitesses de propagation des ondes et les distributions d'énergie.

Dybwad [134] a été précurseur en modélisant un système de résonance couplé composé d'un résonateur en quartz et d'une particule sphérique attachée à sa surface, suivi par les travaux de Scherr et al. [135]. Zhang et al. [136] ont mené une étude numérique et expérimentale sur la détection de l'humidité à l'aide d'un dispositif QCM/micropilier en PMMA, étendant ensuite leur utilisation à la détection d'espèces biologiques dans des milieux liquides [137]. Aslam et al. [138] se sont penchés sur la sensibilité d'un dispositif SAW multicouche à ondes de Sezawa (AlN/SiO<sub>2</sub>/Si) fonctionnalisé avec une couche sensible de polyisobutylène (PIB) pour la

détection de divers composés organiques volatils.

Plus récemment, Abraham et al. [139] ont utilisé COMSOL Multiphysics pour effectuer des simulations 2D de deux capteurs SAW fonctionnalisés avec une couche de nanotubes de carbone (NTC) pour l'un, et avec des nanosphères de ZnO et CuO incorporées dans la couche de NTC pour l'autre. Ces modèles ont été employés pour évaluer la sensibilité aux composés organiques volatils.

Achour et al. [140] ont modélisé et simulé, par le logiciel COMSOL, un dispositif SAW déposé sur du LiTaO<sub>3</sub> 36° rot. Le but étant de détecter divers types d'analytes à l'aide de capteurs SAW fonctionnant à 104 MHz.

### 1.5 La détection des fuites d'eau

#### 1.5.1 Etat de l'art des techniques de détection de fuite

Une fuite est un défaut dans le système de distribution d'eau qui engendre un écoulement non contrôlé d'eau. Les fuites peuvent être classées en deux catégories : les fuites de fond et les ruptures, en fonction de leur débit. Si le débit de la fuite est inférieur à une valeur seuil fixée par les compagnies d'eau, on parle de fuite de fond ; en revanche, si elle dépasse ce seuil, elle est classée comme une rupture. Pour la plupart des systèmes de distribution d'eau, la gestion des fuites est la forme la plus difficile et la plus coûteuse de perte d'eau à contrôler. Les fuites causent non seulement des pertes d'eau, mais peuvent parfois entraîner des pertes physiques telles que l'affaissement des routes par érosion du sol sous-jacent [141]. Les fuites entraînent également une augmentation de l'énergie de pompage, des coûts de réhabilitation du système et un risque de compromission de la qualité de l'eau en permettant l'intrusion d'eau souterraine polluée [142]. Par exemple, Le Chevallier a mentionné que les vitesses plus élevées de l'eau qui fuit au niveau des fuites ont une influence sur la qualité de l'eau en favorisant un transport plus important des désinfectants dans tout le système, ce qui augmente la probabilité de détachement des biofilms [143]. Ainsi, si les connexions non autorisées et les fuites peuvent être complètement évitées, cela peut aider de manière significative à réduire la pénurie d'eau potable.

Pour gérer cette perte d'eau, les industries de l'eau se concentrent sur deux stratégies : pomper plus d'eau que nécessaire et/ou détecter et réparer les fuites. Cependant, le fait de pomper plus d'eau que nécessaire aggrave les fuites en augmentant leur taille. Par conséquent, les compagnies d'eau se sont engagées dans un programme actif de localisation et de réparation des fuites [144]. Cette reconnaissance implique que des économies importantes peuvent être réalisées en localisant et en réparant les fuites comme souligné par la publication de nombreux

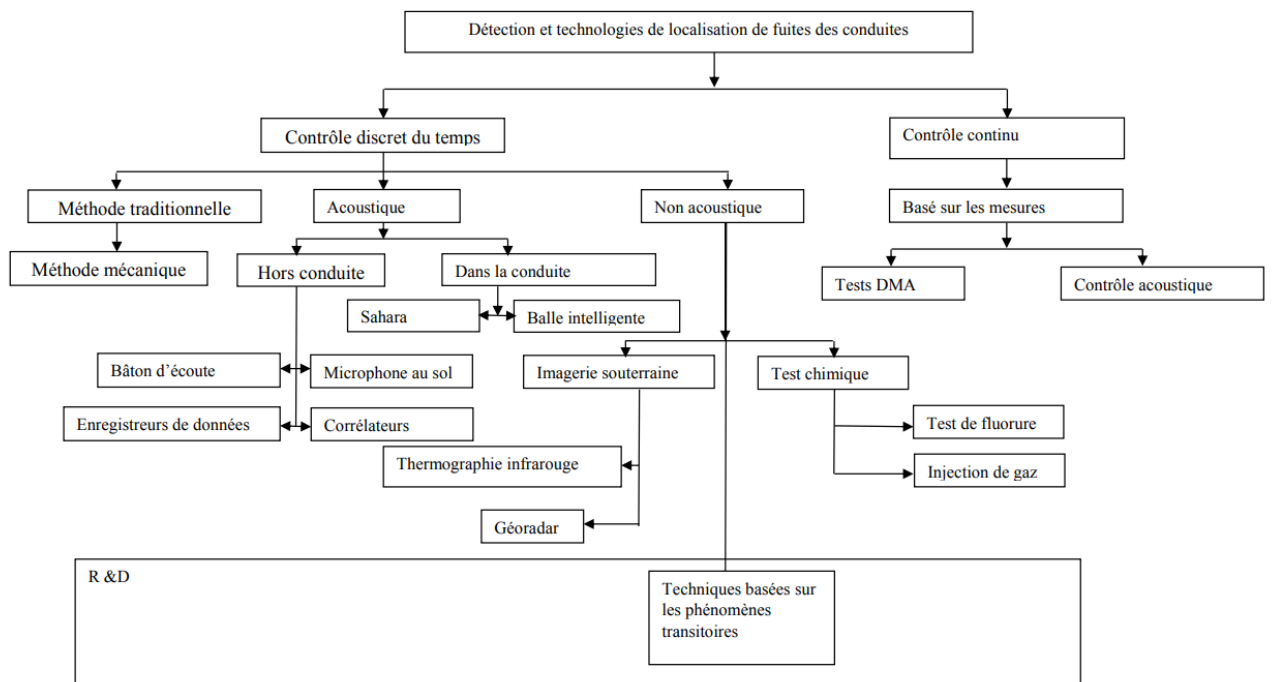
# Chapitre 1: Étude bibliographique

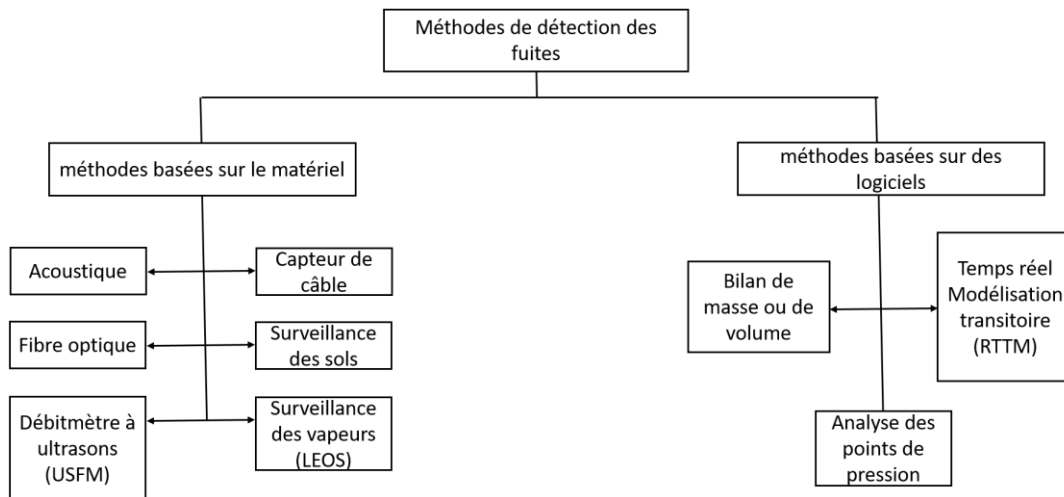
articles sur la détection et le contrôle des fuites par différents chercheurs [145]–[147].

En général, les fuites sont coûteuses pour plusieurs raisons, notamment la perte d'eau et de produits chimiques de traitement, le risque accru de détérioration de la qualité de l'eau, l'expansion inutile de la capacité et l'augmentation des dépenses d'énergie nécessaires pour alimenter les fuites. Ainsi, les efforts déployés pour localiser et réparer les fuites contribuent non seulement à minimiser les pertes d'eau, mais aussi à économiser de l'énergie et des infrastructures.

Depuis les années 1850, la bibliographie rapporte l'utilisation d'une méthode ancienne pour détecter les fuites d'eau consistant à placer des tiges d'écoute en bois sur tous les points de contact accessibles avec le système de distribution et les raccords. Ces émetteurs de sons simples détectent le bruit de la fuite d'eau des conduites pressurisées, similaire à un médecin écoutant un battement de cœur à travers un stéthoscope. Les fuites soupçonnées sont repérées en écoutant la surface du sol directement au-dessus de la conduite à des petits intervalles le long de celle-ci. Cette méthode est généralement simple et peu coûteuse, mais elle est inefficace et prend beaucoup de temps, car les inspecteurs peuvent chercher des fuites au mauvais endroit et elle n'est pas adaptée aux conduites non métalliques comme l'amiante-ciment en raison de la propagation du son.

Diverses techniques sont utilisées pour la détection et la localisation des fuites dans les conduites d'eau, telles que les méthodes acoustiques, non acoustiques, transitoires et basées sur la surveillance continue des fuites.





**Figure 1.13.** Classification des techniques de détection et de localisation des fuites [148], [149]

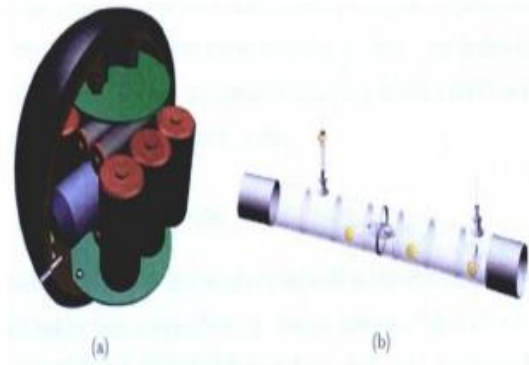
### 1.5.1.1 Les méthodes acoustiques

Les méthodes acoustiques peuvent être classées en deux catégories, les méthodes invasives et les méthodes non invasives :

#### 1.5.1.1.1 Les méthodes invasives

Les méthodes invasives procèdent avec des dispositifs acoustiques installés à l'intérieur de la conduite. Cette méthode utilise des capteurs insérés dans la conduite pour capter le bruit acoustique produit par une fuite. En détectant et en localisant le bruit, ces capteurs peuvent identifier la source de la fuite. Actuellement, le détecteur Sahara est le seul dispositif disponible. La balle intelligente développée par Pure Technologies, est une méthode de détection de fuites dans les tubes en utilisant le bruit acoustique généré par les fuites pour localiser leur emplacement dans les conduites de distribution d'eau [150]. Cette boule en mousse, plus petite que le diamètre du pipeline, contient un noyau en aluminium de 65 mm de diamètre, équipé d'un capteur acoustique, d'un système d'acquisition de données, d'une alimentation électrique et d'autres instruments. La balle intelligente utilise un seul capteur acoustique, contrairement aux dispositifs traditionnels qui en utilisent deux ou plus. Elle parcourt silencieusement le pipeline, enregistrant le bruit acoustique qui est ensuite analysé pour détecter les fuites. Elle est capable de fonctionner jusqu'à 17 heures en une seule utilisation et peut parcourir jusqu'à 25 km à un débit d'eau de 0,5 m/s. Son principal avantage est que son principe de fonctionnement est indépendant du matériau du pipeline, mais elle ne peut être utilisée que dans des pipelines dont le diamètre est supérieur à 10 mm [151]. La balle intelligente ne peut pas être utilisée efficacement dans les pipelines de diamètre inférieur à 125 mm et ceux fonctionnant à des pressions plus élevées, ce qui le rend moins adapté aux eaux industrielles. Pour minimiser le

bruit de fond, une couche élastique est placée autour de la bille pour contrôler le bruit lors de son déplacement dans le tuyau.



**Figure 1.14.** Balle intelligente [11]

Inconvénients : le bruit important généré par les pompes voisines et autres équipements, peut compliquer l'analyse des signaux de fuite. De plus, elle ne peut pas déterminer la taille de la fuite et il est difficile de suivre précisément sa position dans la conduite [152] .

### 1.5.1.1.2 Les dispositifs acoustiques non invasives

Cette méthode utilise des capteurs ou des accéléromètres installés à l'extérieur du tube, à des points d'accès tels que des vannes ou des bouches d'incendie, ou directement connectés à la surface du pipeline. Les techniques les plus courantes comprennent l'utilisation de :

- Bâtons d'écoute,
- Microphones au sol,
- Enregistreurs de bruit de fuite
- Corrélations acoustiques.

#### **Bâton d'écoute**

Depuis les années 1850, le bâton d'écoute, est utilisé pour détecter les bruits acoustiques et les vibrations causées par des fuites. Ce dispositif peut être mécanique ou électronique [153].

Le bâton d'écoute mécanique est composé d'une barre en acier et d'un diaphragme en laiton qui amplifie les vibrations et les envoie au diaphragme pour les convertir en signaux audibles.

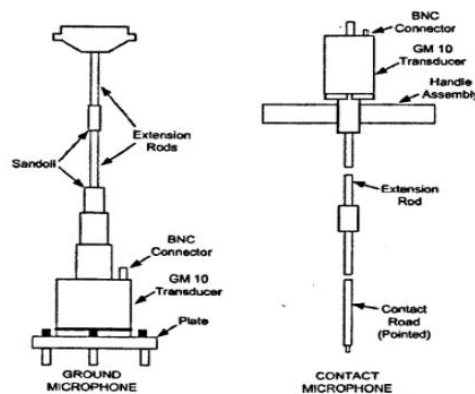
De son côté, le bâton d'écoute électronique utilise des transducteurs piézoélectriques pour détecter les vibrations mécaniques et les convertir en signaux électriques.



**Figure 1.15.** a): Bâton d'écoute mécanique, b): Bâton d'écoute électronique

### Microphone au sol

Cette méthode est similaire à celle du bâton d'écoute, sauf que pour cette méthode: le capteur de détection est en contact direct avec le sol plutôt que d'être placé sur la conduite d'eau. Les microphones situés au sol sont plus sensibles que les bâtons d'écoute, mais leur capacité à détecter les fuites dépend de plusieurs facteurs, tels que la distance entre la fuite et le capteur. En s'éloignant de la position de la fuite, la précision de la sensibilité diminue et les signaux acoustiques s'atténuent [154].



**Figure 1.16.** Principe de détection par le microphone au sol [154]

### Enregistreur de bruit sans fil

Les dispositifs d'enregistrement sonore sont déployés pour repérer et géolocaliser les fuites d'eau en exploitant les fonctionnalités de communication sans fil. Ils sont différents des bâtons d'écoutes mécaniques et électroniques et peuvent être installés de manière permanente ou temporaire à l'aide de fixateurs magnétiques sur des points d'accès tels que des bouches d'incendie et des vannes. Les enregistreurs sont programmés pour enregistrer le bruit

acoustique pendant la nuit à intervalles d'une seconde pendant deux heures. Les données sont ensuite téléchargées ou transmises simultanément pour une analyse statistique qui permet de détecter la présence de fuites. Bien que les enregistreurs soient efficaces pour fouiller de grandes surfaces, ils ne sont pas adaptés pour localiser des fuites individuelles [155]. Cependant, il y a des doutes quant à la rentabilité et à l'efficacité de la détection de fuites à l'aide d'enregistreurs, que ce soit temporairement ou en permanence. Des études ultérieures ont révélé que les enregistreurs ne sont pas une alternative économique aux inspecteurs de fuite qualifiés et bien équipés.



**Figure 1.17.** Principe de détection par l'enregistreur de bruit sans fil [155]

### *1.5.1.2 Les méthodes non acoustiques*

La détection des fuites peut également être effectuée en utilisant des méthodes non acoustiques basées sur la surveillance de la pression et de débit. On distingue deux groupes des méthodes non acoustiques :

- Les appareils d'imagerie souterraine tels que la thermographie et le Géo radar (Ground penetrating radar) ou GPR.
- Les méthodes de détection chimiques telles que le test de fluorure et le gaz traceur.

### *1.5.1.3 Les méthodes transitoires*

C'est une nouvelle approche basée sur l'analyse transitoire qui a progressivement émergé dans la recherche en détection de fuites d'eau. Bien que ces techniques soient encore en phase de test, les chercheurs espèrent qu'elles pourraient fournir une solution à l'avenir [155]. Les méthodes transitoires de détection de fuites reposent sur l'extraction d'informations sur la présence de fuites à partir d'un événement transitoire mesuré. Pour introduire cet événement



dans le réseau de distribution d'eau, il est possible d'ouvrir ou de fermer une bouche ou une vanne d'incendie, de démarrer ou d'arrêter une pompe, ou d'utiliser des dispositifs spéciaux comme des électrovannes. L'onde transitoire générée se déplace à la fois en amont et en aval le long de la canalisation. Pendant l'événement transitoire, la pression est mesurée à différents endroits du réseau, puis analysée en détail pour obtenir des informations sur les fuites. Les différentes méthodes d'analyse de ces signaux mesurés sont les suivantes:

### 1.5.1.3.1 La méthode de réflexion de fuite

Cette approche s'appuie sur la mesure et l'analyse des ondes transitoires qui sont réfléchies par une fuite. Selon Brunone et Ferrante [156], [157], les fuites reflètent partiellement l'onde transitoire, qui est celle qui retourne à la section où la pression est mesurée. La grandeur de l'onde réfléchie dépend de la grandeur de l'onde transitoire générée et de la taille de l'orifice de fuite, ainsi que de sa distance par rapport à la position de la fuite. Par conséquent, une fuite de plus grande taille produira une onde réfléchie d'amplitude plus grande. Pour localiser une fuite, on calcule la différence de temps entre l'onde transitoire incidente et l'onde réfléchie mesurée. Bien que cette méthode soit plus efficace avec une onde de forme transitoire, en pratique, il est extrêmement difficile de détecter les variations de pression causées par la réflexion de la fuite. C'est pourquoi son application dans les réseaux de tuyaux réels est encore en cours de développement.

### 1.5.1.3.2 Analyse transitoire inverse

Proposée la première fois en 1994 par Liggett & Chan [158], la méthode d'analyse transitoire inverse (ITA) pour détecter les fuites a été l'objet de recherches intenses menées par plusieurs groupes de recherche tels que Covas et al. (2001), Kapelan et al. (2003), Vitkovsky et al. (2000) et Stephens et al. (2004) [159]–[162]. Cette méthode implique la réalisation et l'étalonnage d'un modèle de simulation du réseau par analyse transitoire pour les zones nodales de fuite inconnues, en comparant les pressions prédites du modèle avec les mesures de pression réelles prises. Pour ce faire, elle utilise la régression des moindres carrés entre les courbes de pression transitoires modélisées et mesurées, en modélisant les fuites à des positions discrètes dans le réseau. En minimisant l'écart entre les pressions mesurées et calculées à l'aide du modèle simulé, la méthode ITA permet de localiser et de connaître la taille de la fuite. Cependant, le principal défi à relever pour l'application de l'ITA est la modélisation précise des transitions et des conditions aux limites du système de conduites.

### 1.5.1.2.4 Méthode d'amortissement transitoire

Selon Wang et al. (2002), les fuites dans une conduite sont responsables de l'amortissement

des ondes transitoires, qui peut être exprimé en termes de séries de Fourier [163]. Normalement, toutes les composantes de Fourier sont amorties uniformément en raison du frottement constant du pipeline. Cependant, lorsque des fuites sont présentes, chaque composante est amortie différemment. Pour détecter des fuites, il est possible de comparer la réponse en fréquence de la pression mesurée contenant l'amortissement induit par une fuite avec celle des valeurs de pression calculées pour la même canalisation sans fuite. L'amplitude de l'amortissement indique la taille de la fuite, tandis que les différents rapports d'amortissement des composantes de Fourier peuvent être utilisés pour localiser la fuite. Il convient de noter que la vitesse de l'amortissement induit par la fuite dépend de divers facteurs tels que les caractéristiques de la fuite, la pression dans la canalisation, l'emplacement de la génération des phénomènes transitoires, le point de mesure de pression et la forme du phénomène transitoire généré. En outre, en situation réelle, d'autres éléments physiques tels que les joints, les raccords, les bouches d'incendie et la paroi des pipelines peuvent également causer un amortissement transitoire. La modélisation transitoire de certains de ces éléments est très complexe, ce qui rend difficile le calcul précis de l'amortissement sans fuite pour un tube réel.

### 1.5.1.2.5 Analyse dans le domaine fréquentiel

En se basant sur l'analyse des caractéristiques de la réponse de l'onde transitoire dans le domaine temporel, la méthode d'analyse du domaine fréquentiel permet de détecter la présence d'une fuite dans une canalisation [157], [164]. En effet, la réponse en fréquence des ondes transitoires dans une canalisation comportant une fuite inclut des pics de grande amplitude supplémentaires qui ne sont généralement pas présents dans la réponse en fréquence des pipelines sans fuites. Ainsi, pour détecter une fuite, il suffit de comparer les fréquences dominantes de la réponse en fréquence transitoire des signaux avec et sans fuite.

## **1.6 Contrôle Non destructifs Acoustique de l'endommagement des structures**

### **1.6.1 L'acoustique non linéaire**

Le terme "linéaire" désigne la linéarité de l'interaction d'un signal acoustique avec la matière. Cette interaction est dite linéaire si la réponse de la matière et l'intensité du signal de sortie évoluent proportionnellement à l'intensité du signal d'entrée comme dans la loi de Hooke, que l'on retrouve dans de nombreux phénomènes acoustiques bien connus [165], [166]. Cependant, dans les cas où l'intensité du signal d'entrée est élevée ou lorsque les matériaux présentent des caractéristiques particulières, nous nous trouvons face à des phénomènes "non linéaires" complexes.

Ces phénomènes non linéaires comprennent la perturbation de la forme d'onde acoustique

due à la variation de la vitesse de propagation en fonction de l'amplitude du signal, la présence d'harmoniques plus élevées, la correction acoustique du signal d'entrée, la génération de fréquences résultantes à partir de multiples signaux d'entrée, l'écoulement acoustique et l'autofocalisation. Certains de ces phénomènes ont des équivalents en optique et dans d'autres domaines de la physique, ce qui élargit leur champ d'application à la caractérisation non destructive des matériaux et à la détection des défauts dans les produits industriels.

Les problèmes liés à l'acoustique non linéaire sont abordés depuis le XVIIIe siècle, et une vaste collection de documents de référence établie par Beyer documente les premiers travaux dans ce domaine [167]. L'application de l'acoustique non linéaire, notamment dans un contexte sous-marin, a fait l'objet d'une attention accrue entre les années 1960 et 1970, l'accent étant mis sur les réseaux paramétriques [168]. Pendant cette période, les réseaux paramétriques ont été utilisés à des fins civiles et militaires, ce qui a donné lieu à des recherches approfondies dans ce domaine.

Des avancées significatives ont été accomplies pour comprendre les phénomènes acoustiques non linéaires au cours de cette période, ainsi que des progrès théoriques remarquables. Plus récemment, un livre publié par Blackstock et Hamilton a consolidé les synthèses sur la théorie et certaines applications de l'acoustique non linéaire.

La présence d'inclusions microscopiques ou de défauts répartis dans un matériau se traduit par des phénomènes non linéaires, tels que des variations de la fréquence de résonance en réponse à une augmentation de l'amplitude de l'excitation [169]. En principe, un matériau intact subit une faible variation de sa fréquence de résonance lorsque l'amplitude de l'excitation augmente. Cependant, dans le cas d'un matériau hétérogène ou endommagé, notamment avec des microfissures, l'augmentation de la contrainte acoustique est accompagnée d'une diminution de la rigidité. Cette diminution de la rigidité peut se produire même à des taux de déformation très faibles.

L'équation suivante décrit le module élastique en séparant les effets non linéaires classiques et hystérétiques :

$$K = K_0(1 + \beta\varepsilon + \delta\varepsilon^2 + \alpha(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) + \dots)$$

$K_0$  est le module élastique linéaire,  $\varepsilon$  la déformation,  $\beta$  et  $\delta$  représentent respectivement les coefficients élastiques quadratiques et cubiques,  $\alpha$  est le coefficients de non-linéarité hystérétique.

Lorsqu'un signal monochromatique se propage dans un milieu non linéaire, la vitesse de l'onde, qui dépend du module élastique  $K$  et de l'amplitude. L'onde sinusoidale se déforme en se propageant et nous assistons à la création d'harmonique d'ordres 2 et 3. Le taux de génération

de ces harmoniques est représenté par les paramètres élastiques quadratiques et cubiques  $\beta$  et  $\delta$ . Le paramètre de non linéarité hystérétique  $\alpha$  met en exergue la baisse durable dans le temps des propriétés mécaniques et donc un effet mémoire par rapport à un état précédent avec un retour à l'équilibre progressif.

Les différents coefficients de non linéarité,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\delta$  peuvent être déterminés expérimentalement grâce à la méthode spectroscopique de résonance acoustique non linéaire - Non Linear Resonance Acoustic Spectroscopy (NLRAS).

### 1.6.2 Résonance non linéaire NLRAS

La méthode NLRAS consiste à exciter une structure tout d'abord à faible intensité puis en augmentant l'intensité d'excitation sur une plage de fréquence autour d'une de ses fréquences de résonance. La résonance étant un phénomène qui correspond à l'amplification naturelle des ondes de manière sélective de par les propriétés du matériau et les conditions aux limites conduit à l'accumulation de l'énergie à une fréquence particulière, les niveaux d'énergies acoustiques atteints permettent de générer des non linéarités dans les milieux étudiés sans dégrader le matériau où la structure.

### 1.6.3 Dynamique rapide

En dynamique rapide, on utilise la méthode NLRAS pour étudier le comportement acoustique non linéaire hystérétique. Pour cela, on excite une structure à faible intensité autour d'une de ses fréquences de résonance. Ensuite, on augmente progressivement l'amplitude de l'excitation autour de la fréquence de résonance identifiée, ce qui permet de constater d'une part, un déplacement vers des fréquences inférieures à la fréquence de résonance appelé ramollissement (ou Softening) du matériau ou de la structure qui correspond pendant la sollicitation à une baisse du module et un élargissement des spectres de résonance indiquant une augmentation de l'atténuation [170]. Lorsque la sollicitation acoustique est arrêtée, le milieu recouvre ses propriétés initiales sur une durée plus ou moins grande. Une mesure des variations de fréquence, d'amplitude, de facteur qualité à chaque niveau d'excitation et le temps de retour à l'équilibre renseignent sur les coefficients de non linéarité et l'état structural du matériau [171].

### 1.6.4 Dynamique lente

En dynamique lente, on utilise la méthode NLRAS également pour étudier le comportement acoustique non linéaire hystérétique. Pour cela le matériau est soumis à une faible excitation durant quelques mesures afin de déterminer ses propriétés élastiques à l'équilibre. Suite à cela une série de forts niveaux d'excitation sont générés, c'est l'étape de conditionnement pendant

laquelle on mesure les propriétés du matériau en régime non linéaire. Finalement une série de faibles signaux est de nouveau utilisée afin de sonder le retour à l'équilibre du matériau, le temps de retour à l'équilibre renseigne sur le comportement hystérétique et l'état structural du matériau [172].

### 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre bibliographique, nous avons démarré par une introduction à la piézoélectricité, les capteurs acoustiques et les capteurs piézoélectriques.

Nous avons ensuite consacré une section spécifique aux transducteurs interdigités, abordant en détail les capteurs à ondes acoustiques de surface et de volume, tout en mettant l'accent sur leur rôle dans la détection de vibration.

Après cela, une section de ce chapitre a été consacrée à une revue de la littérature sur la modélisation numérique des transducteurs, impliquant une exploration des travaux antérieurs sur les techniques numériques d'éléments finis utilisées pour la conception et l'optimisation des capteurs SAW avant leur fabrication. Par la suite, nous nous sommes orientés vers les méthodes et les techniques de détection des fuites d'eau. Enfin, nous avons présenté les méthodes du contrôle non destructif des structures et de l'acoustique non linéaire, enrichissant ainsi notre compréhension des méthodes de contrôle et de surveillance des structures.

# Chapitre 2 : Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

## 2.1 Introduction

Le développement rapide de la technologie des transducteurs interdigités a apporté des solutions innovantes dans divers secteurs. Parmi ces solutions, les capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) apparaissent comme un outil prometteur pour la mesure précise, la détection et la surveillance. Ces capteurs tirent parti des propriétés inhérentes aux ondes sonores se propageant à la surface des matériaux solides, offrant une haute sensibilité, une faible consommation d'énergie et une compatibilité avec une large gamme d'applications [33], [34].

Ce chapitre est dédié à la simulation numérique et à la modélisation analytique qui permettent d'optimiser le capteur SAW avant sa fabrication et également de prédire sa réponse fréquentielle. En intégrant la modélisation mathématique et la simulation numérique, nous avons pu optimiser la conception, les performances et le rendement des capteurs SAW afin de répondre aux exigences d'applications spécifiques.

Tout au long de ce chapitre, nous explorerons l'importance des simulations numériques et mathématiques pour prédire et analyser le comportement des capteurs SAW. En outre, nous nous pencherons sur le processus de la fabrication des dispositifs SAW dans la salle blanche du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans LAUM. En testant la convergence de la simulation et de la fabrication, nous pouvons trouver des moyens de surmonter quelques défis, de résoudre quelques hypothèses et, en fin de compte, de produire de meilleurs capteurs SAW.

Cette étude, était réalisée pour explorer une nouvelle approche en concevant, modélisant et fabriquant des capteurs SAW (Surface Acoustic Wave) sur un substrat flexible (PVDF), une étude qui n'avait pas encore été largement documentée dans la littérature. Le but initial était de développer ce type des capteurs pour une application standard d'une ligne à retard. Cependant, dans notre cas, nous avons orienté l'utilisation de ce capteur à un autre domaine d'application: la détection de fuites par écoute passive, où il joue juste le rôle d'un récepteur. Bien que l'orientation de l'application ait changé, cette étude reste pertinente, car elle constitue une contribution importante à la compréhension et à la caractérisation de ces capteurs SAW sur substrat flexible, ouvrant la voie à une utilisation innovante dans le domaine de la détection de fuites. En conséquence, cette recherche demeure une référence précieuse pour tous les futurs

développements et applications de cette technologie.

## **2.2 Les dispositifs de transduction interdigités (IDT)**

Les dispositifs de transduction interdigités (IDT) sont des composants électroniques utilisés pour convertir des signaux électriques en signaux mécaniques ou acoustiques, et vice versa.

Structure de l'IDT (Figure 1.9): cette structure comprend une série d'électrodes métalliques, disposées en alternance, comme les doigts d'une main. Les électrodes sont imprimées sur un substrat piézoélectrique qui, soumis à un champ électrique, est capable de générer des ondes acoustiques [112].

Fonctionnement des IDTs: lorsqu'un signal électrique est appliqué aux électrodes du transducteur interdigital, il crée un champ électrique qui induit des ondes acoustiques dans le substrat. Ces ondes se propagent dans le substrat et elles peuvent être détectées par d'autres électrodes du transducteur. Leur fréquence dépend de l'espacement entre les électrodes et de la vitesse de propagation du substrat.

Application des IDTs: les IDTs sont couramment utilisés dans les filtres pour sélectionner des fréquences spécifiques dans un signal électrique. Dans un filtre, le signal électrique est appliqué à une paire de transducteurs interdigités créant des ondes acoustiques dans le substrat. Les ondes acoustiques sont ensuite captées par d'autres paires de transducteurs interdigités placés le long de la trajectoire de propagation des ondes. En fonction de la fréquence de l'onde acoustique, certaines paires de transducteurs interdigités captent plus ou moins l'onde, ce que permet de sélectionner des fréquences spécifiques [33].

Ils sont aussi utilisés dans les capteurs pour mesurer des paramètres physiques tels que la température, la pression et la force. Dans un capteur, les ondes acoustiques générées par les transducteurs interdigités sont modifiées par les propriétés physiques de l'environnement [173].

## **2.3 Choix des propriétés du capteur**

### **2.3.1 Choix du matériau du substrat**

Le choix du matériau pour les substrats des capteurs SAW dépend de plusieurs paramètres, tels que :

- La vitesse de propagation des ondes acoustiques,
- La constante diélectrique,
- L'impédance acoustique,
- Le coefficient de dérive en température,
- Le facteur de couplage électroacoustique ( $K^2$ ).

Ce dernier est important car il détermine la capacité de conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Ainsi, plus la valeur de  $K^2$  est élevée, plus la conversion

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

des signaux est meilleure. Le tableau suivant présente les principales propriétés des matériaux piézoélectriques généralement utilisés pour la réalisation de capteurs SAW.

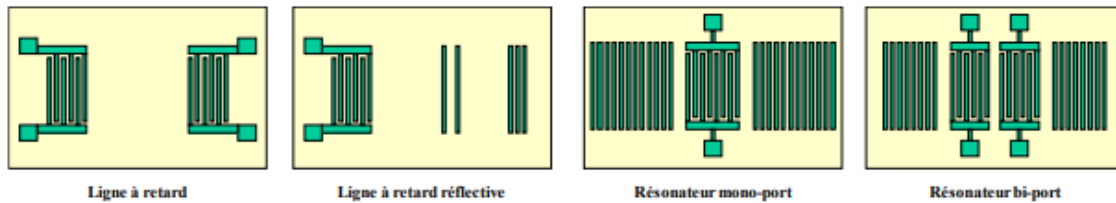
**Tableau 2.1.** Propriétés des substrats piézoélectriques [174]–[176]

Substrat piézoélectrique	Constante diélectrique $\epsilon$	Coefficient de couplage $K^2$ (%)	Vitesse (m/s)	Coefficient de dérive en température (ppm/°C)	Avantages
Quartz (ST-X)	4.3	0.11	3159	0	-Faible cout, TCF=0
LiTaO3(36°Y-X)	43	4.7	4160	32	-Couplage électromécanique important
LiNbO3 (64° Y-X)	85	11.3	4742	80	- Coefficient de couplage électromécanique fort - Faible atténuation
La3Ga5SiO14	18.23	0.32	2734	$\approx 0$	- Résistant à des hautes températures
ZnO	8.66	1.5-1.7	6336	40 à 60	- Couplage Electromécanique élevé
AlN	8.5	3.1-8	5700	19	- Fonctionnement à haute fréquence - Résistant à haute température
Polyfluorure de vinylidène (PVDF)	6-8	15	2600	–	- Fort couplage électromécanique - Isolant électrique. - Flexible

### 2.3.2 Géométrie des capteurs SAW

Les transducteurs interdigités peuvent prendre différentes formes géométriques, telles que les résonateurs monoport ou bi-ports, les lignes à retard ou les lignes à retard réfléchives. Le choix de la géométrie dépend de l'application. La figure ci-dessous illustre les différentes géométries des dispositifs SAW.





**Figure 2.1.** Les différentes géométries des dispositifs SAW

Dans notre cas, nous avons opté pour des capteurs en PVDF piézoélectrique, dotées de peignes interdigités en Cr/Au. Le chrome agit comme une couche d'adhérence qui permet un dépôt uniforme de l'or. Pour les dispositifs SAW, la fréquence de fonctionnement est déterminée par la formule :

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (2)$$

où  $V$  est la vitesse acoustique et  $\lambda$  est la périodicité des peignes.

La conception des masques peut être réalisée à l'aide des différents logiciels tels que MEMSPro - SoftMEMS, CleWin, Layout Editor etc... Pour notre travail, on a utilisé MEMS Pro.

### 2.3.3 Choix de la fréquence de travail

Notre étude se focalise sur le développement de capteurs de type SAW avec une fréquence de fonctionnement d'environ 5 MHz. Le choix de cette fréquence dépend de plusieurs facteurs, dont les dimensions, l'atténuation et la surface utile. Nous avons considéré la taille du capteur SAW, formé d'une paire d'électrodes pour la génération et la détection des ondes acoustiques de surface, et d'une zone de propagation entre l'émission et la réception.

Nous avons choisi de construire ces transducteurs sur des substrats en PVDF, un matériau piézoélectrique flexible qui présente plusieurs avantages. En effet, plus la fréquence des ondes acoustiques de surface est élevée, plus l'atténuation est forte. Nous avons donc choisi de travailler sur des fréquences pas tout à fait assez élevées, inférieures à 10 MHz.

Toutes ces conditions nous ont amenés à choisir une fréquence de travail d'environ 5 MHz. Cette décision a permis d'obtenir une longueur d'onde d'environ 500  $\mu\text{m}$ , avec 15 paires d'électrodes, et une surface totale de capteur d'environ 360  $\text{mm}^2$ . Dans la suite de l'étude, il sera démontré que ce choix de fréquence était tout à fait approprié.

### 2.4 Simulation numérique

La simulation par la méthode des éléments finis FEM, quant à elle, est une technique numérique qui permet de résoudre des problèmes complexes en découpant un système en éléments plus simples. Ces éléments sont ensuite résolus individuellement et assemblés pour

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

---

fournir une solution globale. La méthode des éléments finis permet de modéliser des systèmes avec une grande précision, mais elle nécessite des ressources informatiques importantes. Il existe plusieurs outils de simulation par FEM telles que ANSYS [177], Abaqus [178] et COMSOL® Multiphysique [179].

Dans notre travail, nous avons utilisé COMSOL® Multiphysique grâce à son interface dédiée et efficace pour la piézoélectricité, et donc pour les dispositifs à ondes acoustiques de surface.

C'est un logiciel puissant et polyvalent qui offre un environnement complet de simulation pour les problèmes d'ingénierie et de sciences appliquées. Il permet de modéliser et de résoudre des systèmes complexes qui interagissent avec différents phénomènes physiques, tels que la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, la thermique et bien plus encore. Grâce à son interface utilisateur graphique, COMSOL® Multiphysique facilite la création, la modification et l'analyse de modèles. Il fonctionne en suivant les principes des équations aux dérivées partielles (EDP), qui constituent les fondements des phénomènes scientifiques. Il offre également une grande flexibilité en permettant l'intégration de modules complémentaires spécialisés, tels que ceux dédiés à la mécanique des structures, à l'électrochimie, aux matériaux spécifiques, aux acoustiques et bien d'autres domaines.

L'interface de piézoélectricité permet de coupler les deux domaines de la mécanique des solides et de l'électrostatique en appliquant les équations constitutives de la piézoélectricité pour les effets directs et inverses. Pour ce domaine d'application, certains modules complémentaires sont nécessaires. Le module MEMS (système micro électromécanique) se distingue ici pour la simulation d'un dispositif piézoélectrique. Il offre de nombreuses fonctionnalités, telles que la prise en compte de la piézoélectricité, de l'électrostatique et des interfaces thermiques, qui couvrent un large éventail d'outils pour la simulation de microsystèmes. De plus, il permet d'évaluer différentes solutions pertinentes pour les réponses des dispositifs SAW, notamment les paramètres standardisés (S-paramètres, Z-paramètres, et Y-paramètres).

Les différentes étapes du processus de modélisation sur COMSOL® se déroulent comme suit :

- Déterminez la dimension géométrique appropriée pour le modèle (1D, 2D ou 3D) en fonction des besoins.
- Sélectionner le domaine physique spécifique de l'analyse (par exemple, électromagnétisme, mécanique des structures, acoustique, etc.).
- Choisir le type d'analyse requis, qu'il s'agisse d'une analyse fréquentielle, temporelle, stationnaire ou autre.

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

---

- Élaborer un modèle géométrique détaillé du dispositif à étudier en fonction des paramètres pertinents.
- Définir les propriétés des matériaux impliqués dans le modèle.
- Établir les conditions aux limites appropriées pour les aspects physiques de l'étude.
- Générer un maillage structuré pour le modèle, garantissant une représentation précise des caractéristiques de la structure.
- Analyser et post-traiter les résultats.

Afin de prédire et optimiser les réponses du dispositif SAW, nous avons modélisé par éléments finis sur COMSOL® une ligne à retard sur un substrat piézoélectrique flexible PVDF, dont ses propriétés sont présentées dans le tableau 2.2, fonctionnant à une fréquence de  $f_0 = 5$  MHz. Notre substrat est le PVDF ayant une épaisseur de  $110 \mu\text{m}$  et une vitesse acoustique de  $2500 \text{ m/s}$ . Dans notre cas, nous avons visé un capteur ayant une largeur de peigne de  $125 \mu\text{m}$  et une longueur d'onde, et donc, d'après le calcul théorique ( $f = v / \lambda$ ), le capteur doit fonctionner à une fréquence de 5 MHz.

La principale contribution scientifique de cette étude repose sur la modélisation détaillée de transducteurs à peignes interdigités sur un substrat flexible en polymère, à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Ce travail fait suite aux travaux de Achour. B [204], qui se sont concentrés sur les capteurs SAW reposant sur un substrat de tantalate de lithium et dédiés à la détection d'ions lourds métalliques. Notre travail est une continuation de son exploration de la modélisation des capteurs SAW, mais en élargissant leur portée en mettant en évidence les transducteurs avec des peignes interdigités flexibles sur un substrat polymère qui ne se sont pas évoqués précédemment dans la littérature. En utilisant COMSOL Multiphysics, nous pouvons simuler en détail les interactions électromécaniques au sein de ces transducteurs, ce qui permet d'optimiser leur conception pour une meilleure réponse.

Cette modélisation permet d'envisager de nouvelles perspectives pour améliorer la sensibilité et la sélectivité des capteurs SAW flexibles, ce qui renforce leur potentiel dans différents contextes, tout en permettant d'élargir leurs applications au-delà des substrats conventionnels vers des structures flexibles mieux adaptées aux exigences spécifiques de chaque environnement.

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

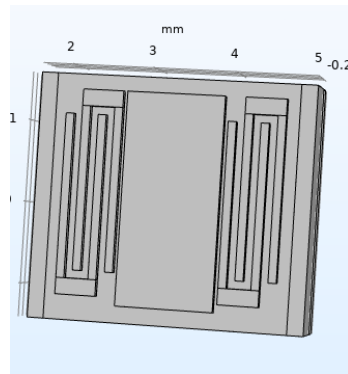
**Tableau 2.2.** Propriétés physiques et électriques du PVDF

### 2.4.1 Modèle simplifié

Notre modélisation du capteur SAW a débuté par l'utilisation d'un modèle simplifié (une paire de peignes) afin de faciliter les calculs. Ce modèle simplifié nous a permis d'obtenir une

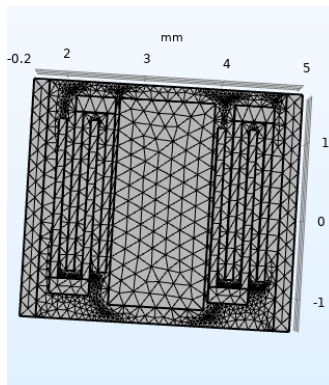
Matériau	Description [untie]	Valeur					
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	Densité [ $kg/m^3$ ]	1780					
	Module d'Young E [ $GPa$ ]	3					
	Poisson's ratio $\nu$	0.24					
	Matrice de conformité élastique [ $10^{-10} Pa^{-1}$ ]	3.781	1.482	1.724	0	0	0
		1.482	3.781	1.724	0	0	0
		1.724	1.724	10.92	0	0	0
		0	0	0	14.28	0	0
		0	0	0	0	11.1	0
	0	0	0	0	0	11.1	
Matrice de déformation piézoélectrique [ $10^{-12}$ $C/N$ ]	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	
	13.58	1.476	33.8	0	0	0	
Matrice de permittivité S	7.4	0	0				
	0	9.3	0				
	0	0	7.74				
Temperature de fusion [ $^{\circ}C$ ]	195						
Facteur de couplage électromécanique $k^2$	0,15						

première approche du comportement électrique du capteur. Il est constitué des deux transducteurs à peignes interdigités (l'un émetteur et l'autre récepteur). Chaque transducteur comporte une paire de peigne et sont séparés par une zone centrale métallisée de 5 mm de longueur. Les peignes et la zone centrale sont composés d'une couche d'accroche de chrome de 20 nm d'épaisseur, suivie d'une couche d'or de 80 nm d'épaisseur. La longueur d'onde est de 500  $\mu m$  et la largeur de chaque doigt est de 125  $\mu m$  et la zone centrale est de longueur de 5 mm. (Figure 2.2)



**Figure 2.2.** Géométrie 3D du capteur simplifié (une paire des doigts)

Pour le maillage de la géométrie de notre capteur SAW, nous avons utilisé des éléments triangulaires extrêmement fins et une méthode de maillage par extrusion, qui est présenté dans la figure suivante.



**Figure 2.3.** Maillage du modèle

Les simulations ont été effectuées sur une plage de fréquences allant de 0,1 MHz à 12 MHz, avec un incrément de fréquence de 100 kHz.

Lors de nos essais de simulation, nous avons remarqué qu'il y a plusieurs paramètres qui peuvent affecter la réponse de notre capteur.

Dans cette partie nous allons étudier l'effet de ces paramètres sur la réponse du capteur.

### *2.4.1.1 L'effet de la longueur d'onde*

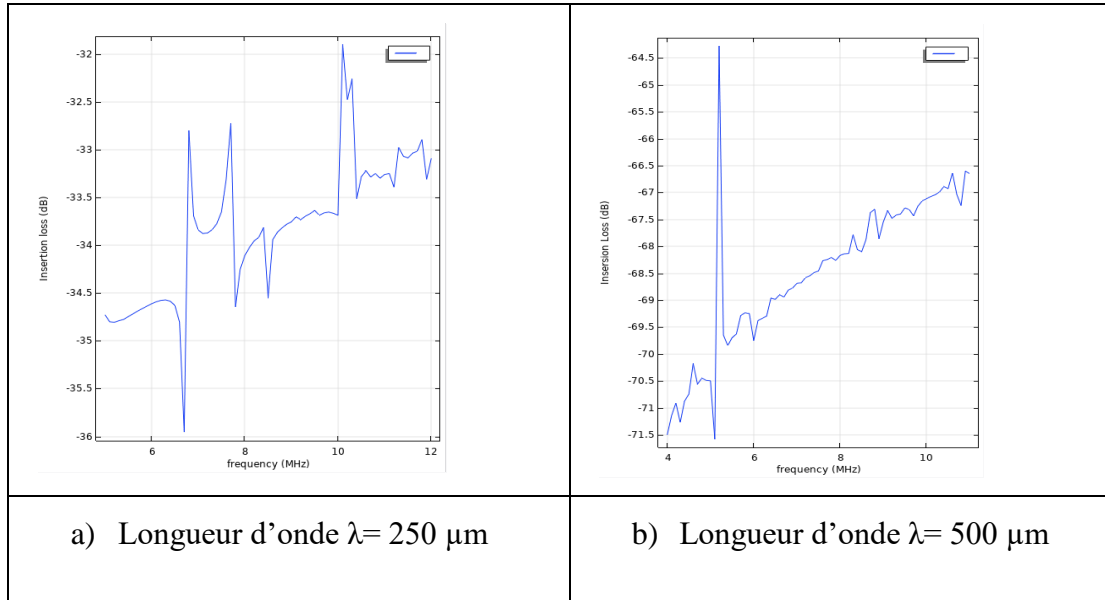
Dans cette section, nous avons modélisé deux dispositifs ayant deux différentes longueurs d'ondes 250  $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$ .

Pour le capteur ayant une longueur d'onde de 500  $\mu\text{m}$ , les résultats montrent bien l'allure prévue pour la fonction de transfert, avec un gain maximum de -64 dB pour une fréquence autour de 5 MHz.

Tandis que pour une longueur d'onde de 250  $\mu\text{m}$ , nous avons eu une fréquence autour de 10 MHz avec un gain maximum de -32 dB. Ce qui est logique, en effet, en divisant la longueur d'onde par deux, la fréquence centrale s'est doublée. (Voir Figure 2.4)

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

Aussi, on peut remarquer l'existence des ondes rapides de volume et des réflexions acoustiques autour de la fréquence de 8 MHz et un dédoublement du pic de la fréquence de résonance (10 MHz et 10,5 MHz). Et ça s'explique par les calculs pour les longueurs d'ondes les plus petites sont plus sensibles aux réflexions acoustiques.



**Figure 2.4.** Effet de la longueur d'onde sur la réponse fréquentielle

### 2.4.1.2 Effet de la zone centrale sur la réponse fréquentielle

Le but de cette partie est d'étudier l'effet de la longueur de la zone centrale sur la réponse fréquentielle du dispositif SAW.

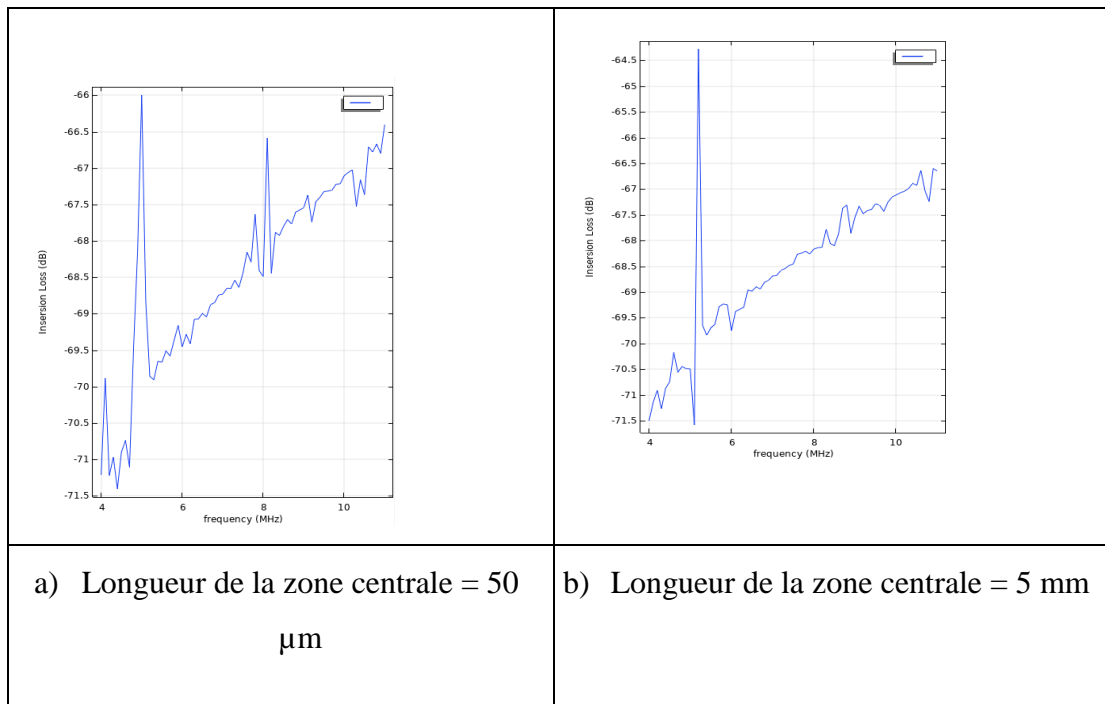
Nous avons comparé le modèle avec la longueur réelle de la zone centrale du capteur et un modèle réduit dans lequel, nous avons réduit cette longueur jusqu'à 50  $\mu\text{m}$ .

Les résultats obtenus pour les deux cas montrent la présence d'une onde de surface à une fréquence de 5 MHz ce qui confirme la théorie avec un gain maximum à l'environ de -65 dB, mais aussi, d'autres ondes se propageant dans le substrat piézoélectrique, telles que les ondes de volume. Malgré le fait que nous avons essayé de réduire les réflexions en imposant des conditions limites appropriées, celles-ci peuvent quand même se produire.

Lors de notre simulation numérique, nous avons observé qu'en diminuant cette longueur, les ondes de volume apparaissent progressivement et les calculs deviennent plus sensibles aux réflexions malgré leur atténuation.

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 2.5. Cette figure montre que l'onde de volume observée pour une longueur de 50  $\mu\text{m}$  disparaît lorsque la longueur atteint 5 mm, ce qui confirme nos hypothèses sur les réflexions insuffisamment atténuées qui deviennent visibles en minimisant la taille de la structure.

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats



**Figure 2.5.** Spectres des pertes d'insertion des deux capteurs : a) SAW avec une zone centrale de 50  $\mu\text{m}$ , b) SAW avec une zone centrale de 5 mm

### 2.5 Fabrication des capteurs SAW

Les dispositifs SAW sont produits en plusieurs étapes dans la salle blanche du LAUM. La salle blanche est un environnement où sont étudiés et fabriqués des MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) tels que des capteurs, des résonateurs et des actionneurs. Le contrôle de la concentration de particules est crucial pour minimiser les risques d'introduction, de déplacement et d'accumulation de particules à l'intérieur. La température, la pression et l'humidité sont autant de paramètres qui peuvent influencer la fabrication dans la salle blanche. Pour travailler dans cet environnement, il est nécessaire de porter des combinaisons spéciales afin de limiter la propagation des particules (poussières, cheveux ...). Les salles blanches, qui sont utilisées dans divers domaines tels que l'électronique, les semi-conducteurs, la nanotechnologie, la biotechnologie, la transformation des aliments et la pharmacie, sont classées en fonction de la quantité de particules par unité de volume.

Le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM) possède une Salle Blanche d'une superficie de 60 mètres carrés, qui est conforme aux normes de la classe 1000 en ce qui concerne les particules de 0,5  $\mu\text{m}$  de diamètre dans 1 pied cube (ft<sup>3</sup>) à l'intérieur et à la classe 100 sous le capot. Cette salle est spécialement aménagée pour mener à bien le processus de fabrication de microstructures. Elle est équipée de dispositifs nécessaires tels que la photolithographie, le dépôt de couches minces, la gravure chimique, la gravure au plasma, le

traitement thermique et diverses techniques de caractérisation. Dans la section suivante, nous allons fournir une explication détaillée sur les processus et les méthodes employés pour la création des capteurs à ondes acoustiques de surface que nous avons utilisés.

### 2.5.1 Techniques en salle blanche

#### 2.5.1.1 La pulvérisation cathodique (*Sputtering*)

La pulvérisation cathodique est une technique de production des couches minces. Cette technique consiste à utiliser un plasma (gaz partiellement ionisé) pour disperser les atomes d'un matériau sur un substrat en utilisant la surface d'une cible (cathode) pour le décomposer. Pour générer le plasma, un gaz pur (typiquement de l'argon) est ionisé à l'aide d'une différence de potentiel ou d'une excitation électromagnétique. Ce plasma est constitué d'ions  $Ar^+$  qui sont accélérés et enfermés autour de la cible par la présence d'un champ magnétique, puis transfèrent leur énergie à la cible lorsqu'ils entrent en collision avec elle. La pression du plasma est élevée (de  $10^{-1}$  à  $10^{-3}$  mbar), mais doit être démarrée à une pression inférieure pour éviter la contamination. Il existe deux types de pulvérisation : les pulvérisations simples et les pulvérisations réactives, qui impliquent l'utilisation d'un gaz réactif tel que l'oxygène ( $O_2$ ) ou l'azote ( $N_2$ ) en plus de l'argon ( $Ar$ ).

La technique de pulvérisation cathodique est la méthode la plus facile pour la mise en œuvre et donc, la plus utilisée par rapport aux autres techniques de dépôt chimique en phase vapeur.

Il existe deux méthodes de la pulvérisation cathodique :

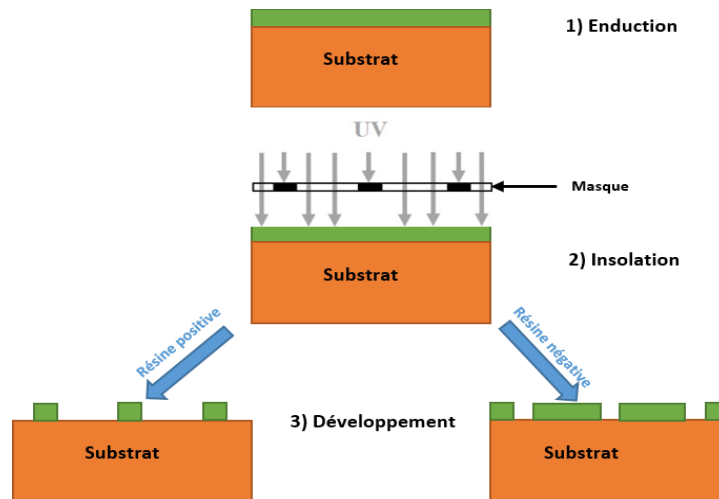
- La pulvérisation cathodique de courant direct (DC)
- La pulvérisation cathodique radiofréquence (RF)

#### 2.5.1.2 La photolithographie

La photolithographie dite aussi, lithographie optique, est la technique la plus cruciale de la fabrication des composants micro-électroniques. Elle implique l'utilisation d'une résine photosensible préalablement enduite sur la surface du substrat via une technique de centrifugation, afin de transférer l'image du masque sur ledit substrat. Les différentes phases de cette technique sont exposées dans la Figure 2.6.



## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats



**Figure 2.6.** Schéma représentatif des diverses étapes du processus de la photolithographie

### 2.5.1.2.1 L'enduction

Il consiste à créer des couches fines et régulières de résine à l'aide d'une tournette et à en contrôler l'épaisseur. Dans notre étude, nous avons utilisé une centrifugeuse de type RC5 qui a une vitesse maximale de 5000 rpm et peut déposer de la résine sur des substrats d'une taille allant jusqu'à 4 pouces (Figure 2.7). La formation de films minces et uniformes de résine photosensible par la centrifugeuse dépend de plusieurs facteurs, tels que la vitesse de rotation, l'accélération et le temps de dépôt. Il existe trois types de résine photosensible qui sont couramment utilisés :

Les résines négatives sont des résines dont les parties non exposées au rayonnement ultraviolet (UV) se diluent dans la solution de développement, tandis que les zones exposées restent intactes (telles que SU-8, AZ 125nXT, KMPR...) [180].

D'autre part, les résines positives sont celles dans lesquelles les zones exposées au rayonnement UV se dissolvent dans le développeur, tandis que les zones non exposées restent non solubles (telles que AZ 111 XFS, S1813, AZ 9260...) [181].

Il existe également des résines réversibles, qui sont des résines positives capables de renverser l'image du masque après un processus de recuit d'inversion et d'exposition aux rayons ultraviolets, sans nécessiter l'utilisation d'un masque additionnel. Des exemples de telles résines incluent l'AZ 5209E, l'AZ 5214E, et le TI09XR, entre autres [182].

Quel que soit le type de résine photosensible utilisé, il faut d'abord étaler la résine sur un substrat et la chauffer sur une plaque chauffante pour évaporer les solvants avant l'exposition.

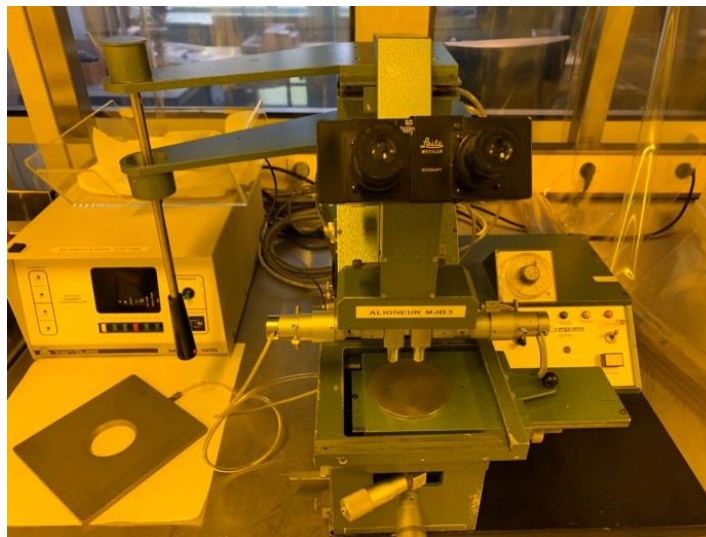


**Figure 2.7.** Dispositif de dépôt de résine : tournette de type RC5

### 2.5.1.2.2 L'insolation

L'insolation est l'étape dans laquelle la résine photosensible est exposée à une source de lumière, généralement des rayonnements ultraviolets (UV), à travers un masque qui définit les zones qui doivent être gravées. Les zones exposées à la lumière deviennent soit solubles (dans le cas des résines positives), soit insolubles (dans le cas des résines négatives), tandis que les zones non exposées conservent leurs propriétés chimiques. L'insolation est donc une étape clé pour la création de motifs ou de structures dans les circuits électroniques.

La Figure 2.8 présente une photo de l'aligneur MJB3 qui a été utilisé dans le cadre de cette étude.



**Figure 2.8.** L'aligneur de masques MJB3

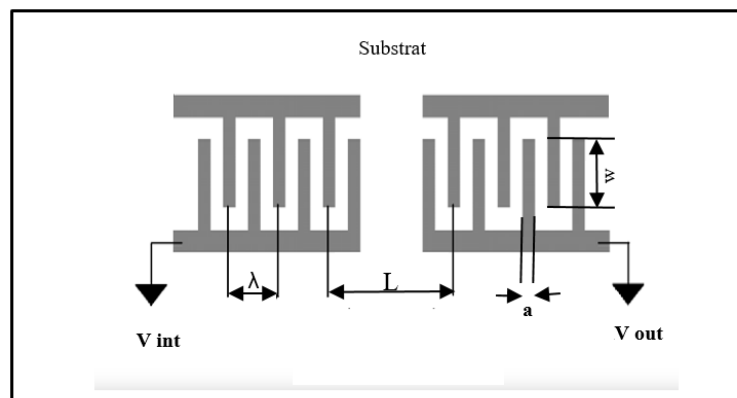
Le bon fonctionnement de la photolithographie par contact repose en grande partie sur un plaquage parfait entre le masque et le substrat afin de transmettre le motif chromé à la résine. Cette technique est simple et peu coûteuse, mais elle peut entraîner des défauts sur le masque et le substrat. Enfin, un liquide de développement peut faire apparaître des motifs créés à la

surface du substrat, en fonction de la résine utilisée.

Les masques photolithographiques sont généralement réalisés sur des plaques transparentes aux UV, telles que le quartz, sur lesquelles des motifs chromés opaques peuvent être déposés pour bloquer la lumière UV. Les masques sont généralement plus grands que le substrat à produire. Les masques sont conçus à l'aide de nombreux logiciels tels que CADENCE, Layout Editor, MEMS Pro, SoftMEMS, CleWin et Tanner.

### 2.5.2 Géométrie et dessin de masque du dispositif SAW

La Figure 2.9 illustre la configuration géométrique des dispositifs SAW utilisés dans cette recherche. Ces dispositifs sont constitués de deux transducteurs, à savoir un émetteur et un récepteur, conçus sous la forme de peignes interdigités (IDTs) qui sont déposés sur un substrat piézoélectrique en PVDF. Les peignes IDTs sont constitués de couches métalliques minces, présentant une périodicité spatiale de  $125 \mu\text{m}$ , et comprennent chacun 15 paires de doigts. Ces doigts ont une largeur  $a$  équivalente à  $\lambda/4$  et sont espacés de  $\lambda/4$ . La longueur du trajet acoustique  $L$  mesure  $5000 \mu\text{m}$ , tandis que l'ouverture du doigt  $w$  atteint  $5000 \mu\text{m}$ .

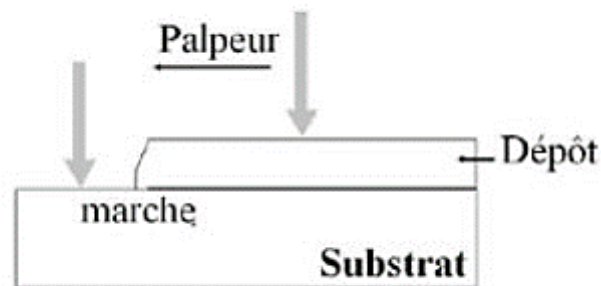


**Figure 2.9.** La géométrie utilisée pour la fabrication de notre dispositif SAW

### 2.5.3 Techniques de caractérisation morphologique

#### 2.5.3.1 La profilométrie mécanique à contact

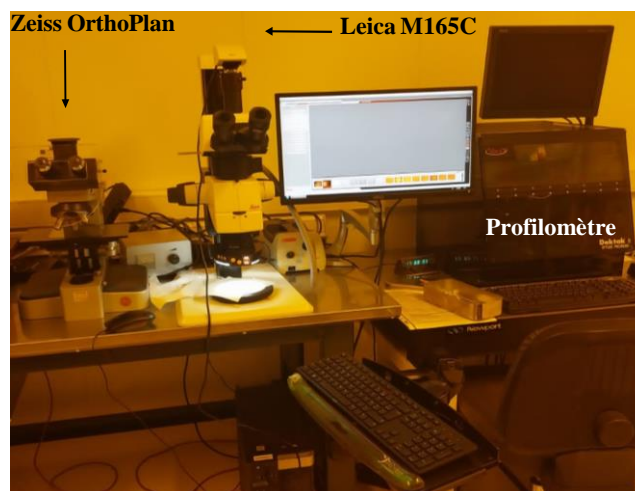
La profilométrie mécanique est une méthode de caractérisation destinée à mesurer l'épaisseur des matériaux et à évaluer la rugosité de leur surface. Elle permet de créer un décrochement entre deux zones de la surface de l'échantillon, qui est alors mesuré à l'aide d'un stylet muni d'une pointe de diamant sensible (voir Figure 2.10). Ce stylet peut aussi balayer la surface de l'échantillon afin d'analyser les imperfections.



**Figure 2.10.** Schéma de la mesure de l'épaisseur à l'aide d'un profilomètre Dektac 8

### 2.5.3.2 La microscopie optique

Cette approche est couramment employée pour identifier les anomalies et les irrégularités présentes dans les spécimens. Dans le cadre de notre recherche, nous avons exploité deux microscopes optiques munis de caméras CCD. Le premier, un Zeiss OrthoPlan, offre la flexibilité d'utiliser des objectifs interchangeables (10x, 40x, 70x) et une caméra d'acquisition d'images. Le second, un Leica M165C, se caractérise par un puissant grossissement de 960× (comme illustré dans la Figure 2.11). Ces équipements se révèlent particulièrement utiles pour examiner en détail l'état de la surface ainsi que les structures en deux et trois dimensions des dispositifs.



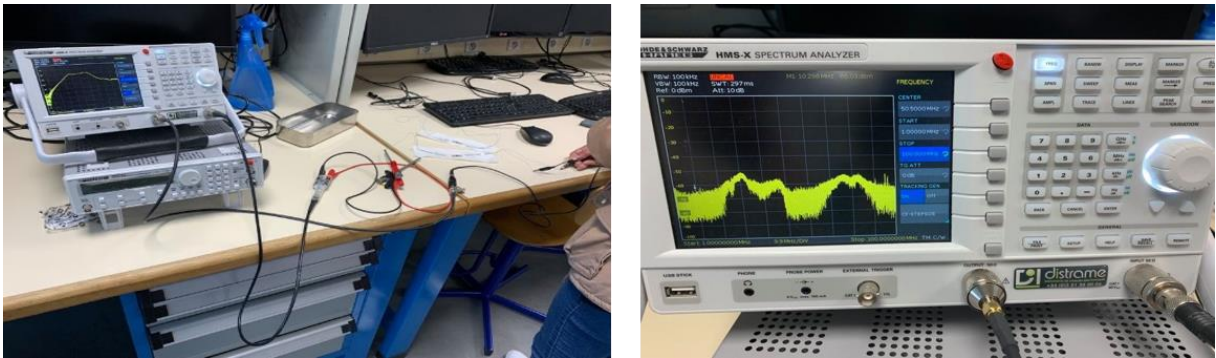
**Figure 2.11.** Les microscopes optiques que nous les avons utilisés

### 2.5.4 Caractérisation électrique des dispositifs SAW

Au cours de cette thèse, une série de mesures a été effectuée sur les capteurs SAW en utilisant un analyseur de réseau afin d'obtenir leurs S-paramètres. Plus précisément, le paramètre S<sub>21</sub>, qui évalue la transmission de puissance entre le transducteur émetteur et le transducteur récepteur, a été systématiquement enregistré. Ces mesures ont été réalisées en utilisant un analyseur de réseau de type HMS-X SPECTRUM ANALYZER (tel qu'illustré dans

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

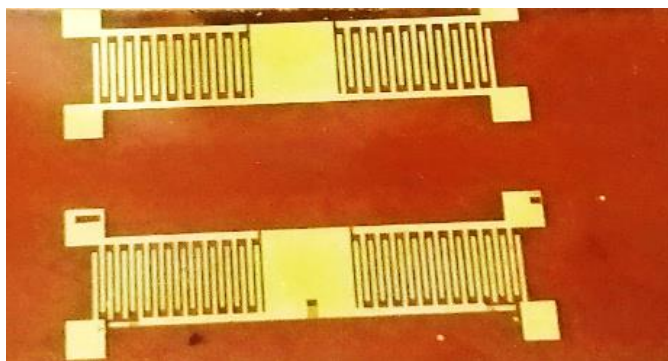
la Figure 2.12), qui est capable d'effectuer des analyses de fréquence sur une plage allant de 100 kHz à 3 GHz.



**Figure 2.12.** L'analyseur de réseau HMS-X SPECTRUM ANALYZE

### 2.5.5 Procédé de fabrication des dispositifs SAW

Les débuts de la mise en œuvre du dispositif SAW sur un substrat piézoélectrique en PVDF ont eu lieu dans la salle blanche du LAUM. Pour ce faire, nous avons utilisé un masque que nous avons conçu avec MEMS PRO (dont la largeur du doigt était de 125  $\mu\text{m}$  et la fréquence  $f_0$  de 5 MHz). Les premiers essais de fabrication de capteurs ont été réalisés sur le Kapton en raison du coût élevé du PVDF jusqu'à l'optimisation des conditions de fabrication. (Figure 2.13)



**Figure 2.13.** Dispositif SAW fabriqué sur un substrat en Kapton

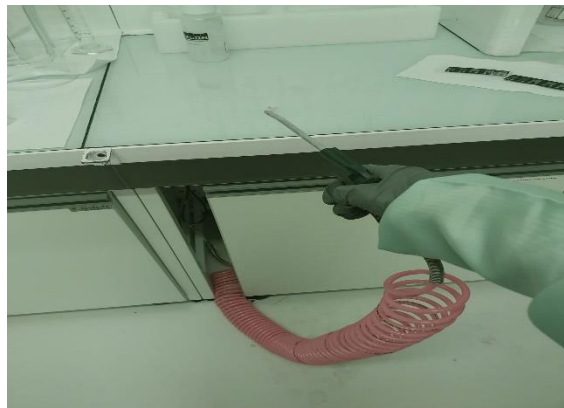
Nous avons commencé par la reconnaissance des obstacles inhérents à l'amélioration du processus de production, notamment en ce qui concerne les délais de recuit, d'exposition à la lumière et de développement de la résine. Nous avons également pris en compte les paramètres relatifs au dépôt et à l'évaluation des couches métalliques.

Il est à noter que lors du développement d'un processus de fabrication reproductible, diverses difficultés liées à la sensibilité du processus de fabrication microtechnologique et à la fragilité du substrat en PVDF, qui est très délicat et translucide, ont été rencontrées. Dans cette section, seules les étapes optimisées du processus de fabrication seront abordées.

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

### 2.5.5.1 Nettoyage du substrat

Le nettoyage du substrat est crucial pour la photolithographie, car il permet d'éliminer les impuretés existantes à la surface du wafer. La présence des impuretés peut provoquer des défauts lors du carottage, entraînant ainsi la formation de trous ou de courts-circuits après les étapes de métallisation. Dans notre travail de thèse, nous avons utilisé des substrats de PVDF d'une épaisseur d'environ 110 nm, qui ont d'abord été nettoyées avec de l'acétone et de l'alcool isopropylique (IPA), puis rincées avec de l'eau désionisée. Elles ont ensuite été séchées avec un courant d'azote ( $N_2$ ) (Figure 2.14) et placées dans une étuve à vide ( $P= 400$  mbar) à une température de  $75^\circ C$  durant 30 minutes pour sécher la surface des wafers.



**Figure 2.14.** Pistolet d'azote ( $N_2$ ) pour le séchage du substrat

### 2.5.5.2 Enrésinement

Pour élaborer les motifs de notre dispositif SAW, nous avons utilisé une résine photosensible réversible appelée AZ5214. Afin de favoriser l'adhérence de cette résine au substrat en PVDF, nous avons préalablement traité le wafer. Par la suite, le wafer a été positionné sur la tournette (Figure 2.15), et une quantité mesurée de résine AZ5214 a été déposée avec soin.

Le choix méticuleux des paramètres de la tournette, tels que la vitesse de rotation, l'accélération et le temps de dépôt, s'est avéré crucial pour obtenir une couche de résine uniforme, d'une épaisseur précise. Les paramètres tels que la viscosité de la résine, la vitesse de rotation de la tournette, ainsi que les dimensions du substrat, ont joué un rôle déterminant dans la détermination de l'épaisseur de la couche de résine. Dans notre cas, nous avons opté pour une vitesse de rotation de 2000 tr/min, une accélération de 500 rpm/s, et un temps de dépôt de 8 secondes. Les résultats obtenus ont été une couche uniforme d'AZ5214 d'une épaisseur d'environ  $1,6 \mu m$ .

Par la suite, le substrat en PVDF a été placé sur une plaque chauffante électrique à  $75^\circ C$

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

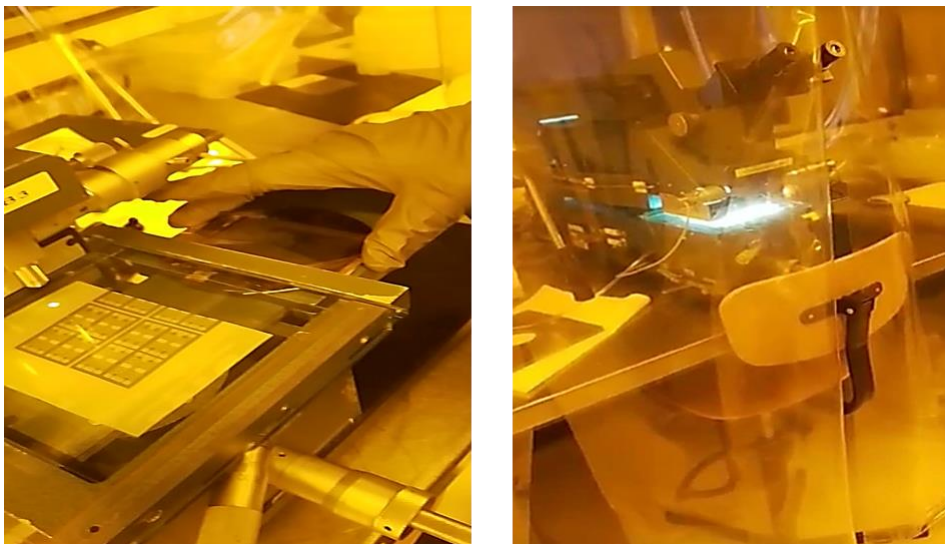
pendant 30 minutes, permettant ainsi l'évaporation des solvants contenus dans la résine et l'amorçage de sa prépolymérisation.



**Figure 2.15.** Principe de déposition et de séchage de la résine AZ5214 sur la surface du substrat

### 2.5.5.3 Exposition aux rayonnements UV

Le substrat en PVDF a subi une exposition aux rayonnements UV à l'aide d'un aligneur de masque équipé d'une lampe au mercure. L'exposition optimale a duré 3 secondes avec une énergie de  $30 \text{ mJ/cm}^2$ . Cette étape a été réalisée à l'aide de la machine MJB3 (Figure 2.16), qui offre la possibilité d'un masquage par contact.



**Figure 2.16.** Principe de l'insolation de la résine

### 2.5.5.4 Développement de la résine

C'est une étape nécessaire pour développer la résine exposée et de révéler les zones non exposées aux UV à l'aide d'un révélateur compatible pour achever le processus. Le délai de

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

---

développement varie en fonction de l'épaisseur de la résine et du temps d'insolation. Dans notre cas, nous avons choisi un développeur de type AZ726MIF, avec un temps d'exposition de 25 secondes. Lors de cette étape, le substrat est rincé verticalement dans une cuve en verre tout en effectuant des mouvements de va-et-vient afin d'obtenir un développement homogène. Après la fin du développement de la résine, celle-ci est rapidement rincée avec une grande quantité d'eau déminéralisée pendant environ 30 secondes. Un jet d'azote est appliqué pour sécher le substrat. Une fois ces étapes achevées, on peut procéder à la métallisation de l'échantillon.



**Figure 2.17.** Principe de développement de la résine

### 2.5.5.5 Métallisation par pulvérisation cathodique (*Sputtering*)

Pour la métallisation de notre capteur, nous avons utilisé deux couches de chrome/or. Nous avons choisi d'utiliser de l'or pour protéger des peignes et la zone sensible l'oxydation. Le chrome est utilisé pour améliorer l'adhérence de l'or sur le substrat en PVDF. Le dépôt métallique a été réalisé par pulvérisation cathodique, ce qui permet d'obtenir des dépôts minces de l'or. Nous avons déposé une couche de 20 nm de chrome (Cr) suivie d'une couche de 80 nm d'or (Au). Le substrat a ensuite été immergé dans de l'acétone pendant environ dix minutes pour faire disparaître la résine restante et révéler les électrodes. Il a ensuite été rincé à l'eau déminéralisée et déshydratée à l'azote sec.

Un dispositif de pulvérisation RF PLASSYS MP450S a été utilisé pour déposer les couches métalliques.

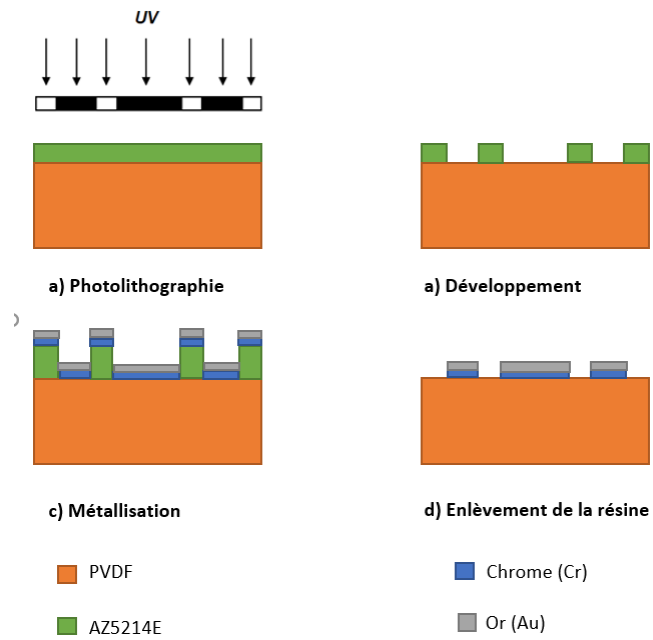


## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

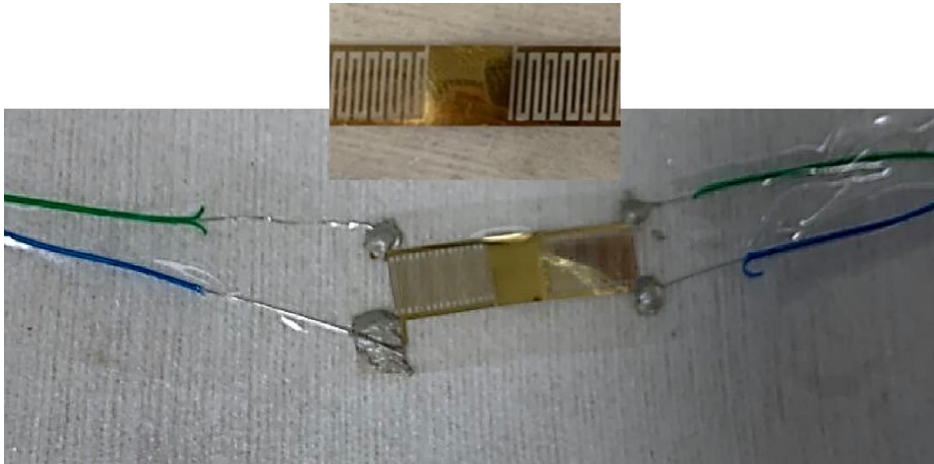


**Figure 2.18.** Dispositif de pulvérisation cathodique PLASSYS MP 450S

La Figure ci-dessous montre les différentes étapes impliquées dans la fabrication des capteurs SAW.



**Figure 2.19.** Schéma représentatif des procédés de fabrication des capteurs SAW



**Figure 2.20.** Capteurs SAW fabriqué sur un substrat PVDF

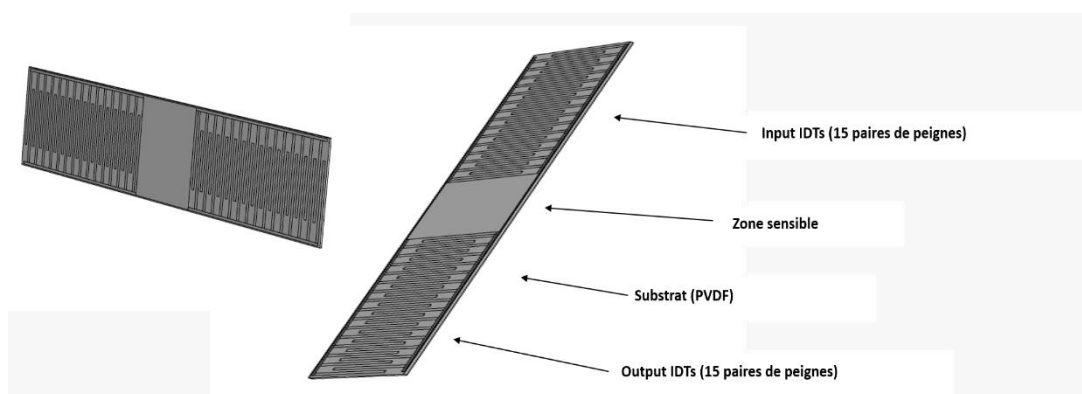
### 2.6 Validation des résultats expérimentales par la simulation numérique : COMSOL Multiphysique

Pour valider les résultats expérimentaux, nous avons refait la simulation numérique 3D et nous avons appliqué les paramètres du modèle réel.

#### 2.6.1 Modèle 3D

Pour améliorer les réponses de la simulation et s'approcher des résultats réels, nous avons refait le modèle avec le même nombre de paires de peigne que le capteur fabriqué.

Le capteur est constitué des deux transducteurs à peignes interdigités (l'un émetteur et l'autre récepteur), séparés par une zone centrale métallisée de 5 mm de long. Les peignes et la zone centrale sont composés d'une couche d'accroche de chrome de 20 nm d'épaisseur, suivie d'une couche d'or de 80 nm d'épaisseur. La longueur d'onde est de 500  $\mu\text{m}$  et la largeur de chaque doigt est de 125  $\mu\text{m}$ .

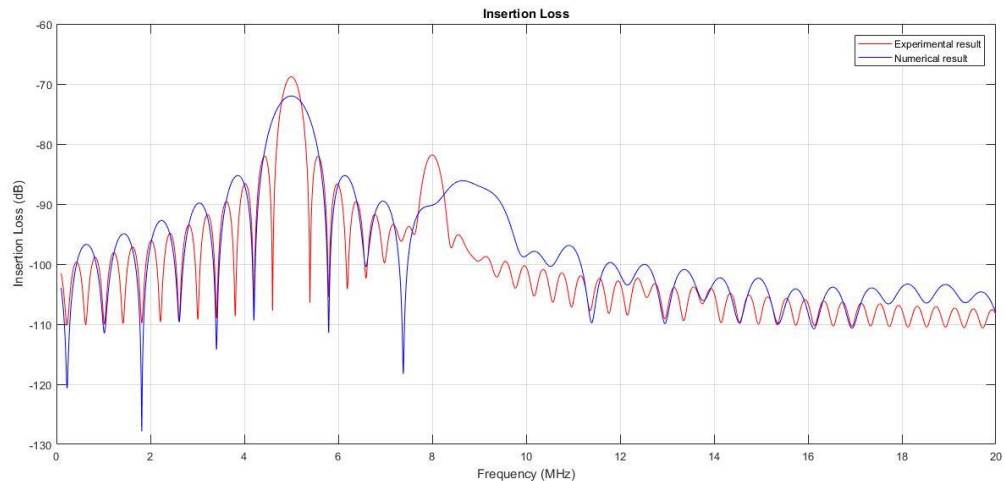


**Figure 2.21.** Géométrie 3D du dispositif SAW : Modèle réel ayant 15 paires des peignes

Pour mailler la géométrie de notre capteur SAW, nous avons utilisé des éléments triangulaires extrêmement fins et une technique de maillage par extrusion.

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

Les simulations ont été réalisées sur une plage fréquentielle allant de 0,1 MHz jusqu'à 20 MHz, avec un incrément de fréquence de 100 kHz. Le spectre S21 généré a été comparé au spectre expérimental comme le montre la figure 2.22. Les résultats ont montré une correspondance favorable entre les spectres calculés et mesurés concernant la forme autour de la fréquence de fonctionnement ( $f_0 = 5$  MHz), les valeurs de perte d'insertion et la largeur de bande. En plus, un pic prévu à environ 8 MHz, caractérisant les ondes de volume rapides, a été constaté.

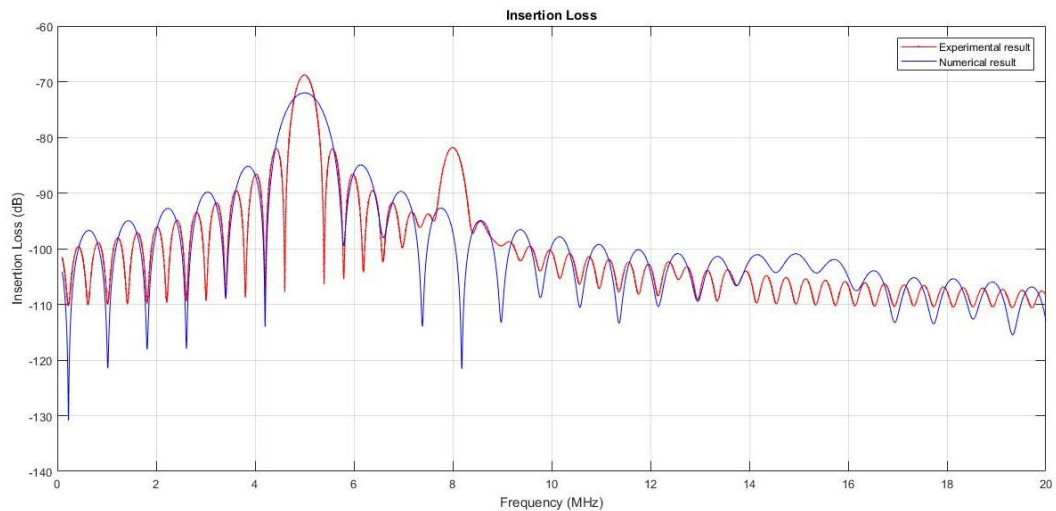


**Figure 2.22.** Spectres S21 simulé (modèle 3D COMSOL: 15 paires des doigts avec une zone centrale de 50  $\mu$ m de longueur) et mesuré des IDTs

Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre le calcul et les mesures. Cependant, ce modèle est très long à calculer, puisqu'il nécessite environ quatre semaines de travail. Ce temps de calcul extrêmement long rend la valeur du modèle inutile. C'est la raison pour laquelle nous avons envisagé une modélisation en 2D, dans le but de réduire le temps de calcul.

### 2.6.2 Modèles 2D

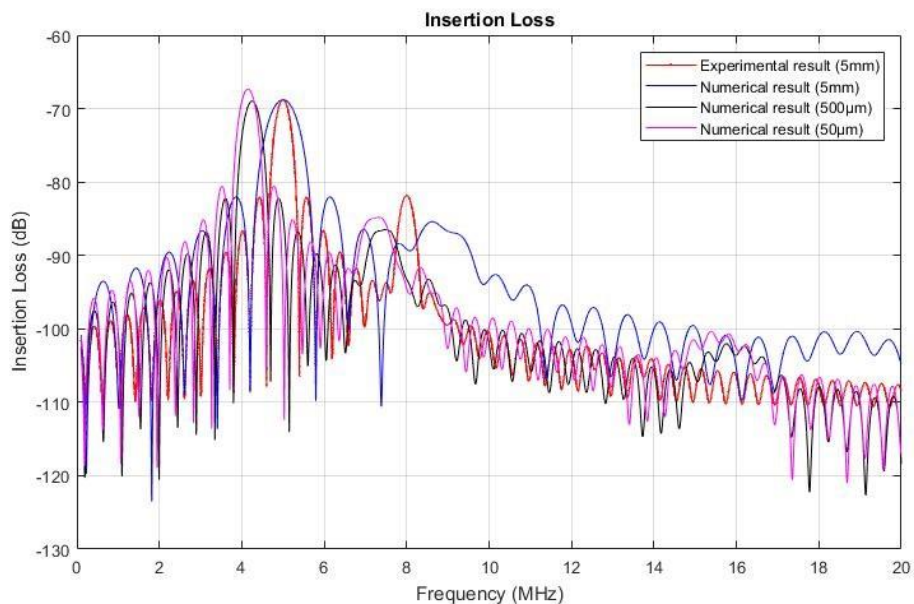
Nous avons modélisé une structure 2D comportant 15 paires de doigts, avec une zone sensible de 5 mm de long. Les simulations ont été effectuées de 0,1 MHz à 20 MHz, avec un pas de 100 kHz, pour obtenir les paramètres S21. Le temps de calcul a été réduit à 8 heures environ, ce qui est beaucoup plus court que le temps de calcul du modèle 3D. La figure 2.23 illustre une comparaison entre les spectres calculés et mesurés, révélant une bonne adéquation entre les deux en termes de gain et de forme prévue autour de 5 MHz. En outre, l'absence de la fréquence de volume autour de 8 MHz, qui indique la présence d'ondes de volume, peut être attribuée aux erreurs de discrétisation numérique ou d'approximations mathématiques, les conditions aux limites.



**Figure 2.23.** Spectres S21 simulé (modèle 2D COMSOL: 15 paires des doigts avec une zone centrale de 50  $\mu\text{m}$  de longueur) et mesuré des IDTs

### 2.6.2.1 Effet de la longueur de la zone centrale sur la réponse fréquentielle

Dans cette section, nous avons étudié l'effet de la longueur de la zone centrale sur les réponses fréquentielles. Nous avons étudié différentes valeurs (50  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , et 5 mm). La figure 2.24 indique que le spectre S21 pour la zone la plus longue (5 mm) est le plus similaire au spectre expérimental (pour les ondes de surface uniquement). Cette configuration a donc été choisie pour la suite de notre travail.



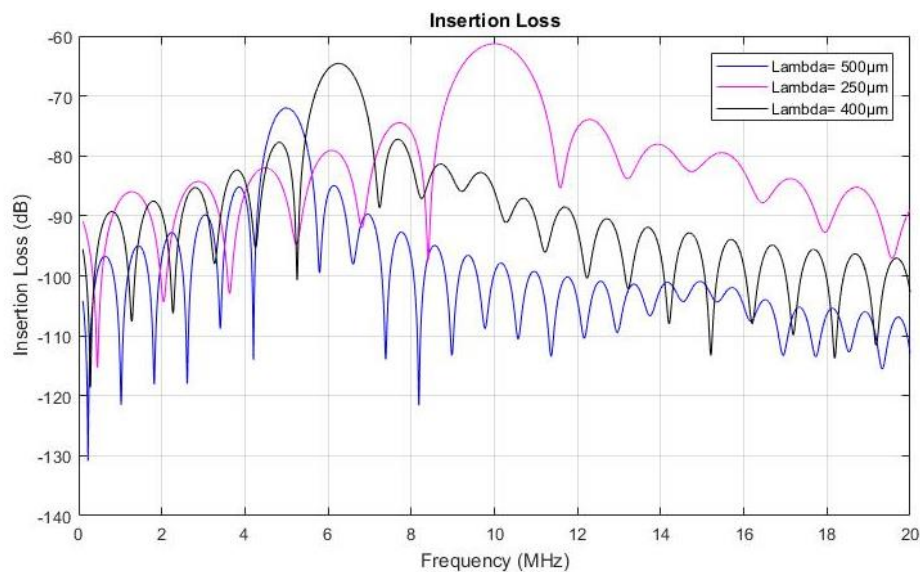
**Figure 2.24.** Réponses fréquentielles pour différentes largeurs de la zone centrale

### 2.6.2.2 Effet de la longueur de la zone centrale sur la réponse fréquentielle

Il est crucial d'étudier l'effet de la longueur d'onde sur la réponse en fréquence pour

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

confirmer l'efficacité de la modélisation en 2D. Nous avons simulé les lignes à retard pour trois différentes longueurs d'onde (500  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$ ), en conservant tous les autres paramètres. Nous avons constaté une bonne concordance avec la théorie. Cependant, la fréquence de travail du capteur a été doublée pour ( $\lambda$ )  $\lambda = 250 \mu\text{m}$  et la perte d'insertion a été améliorée de (-72 dB à -61 dB). Les résultats obtenus accordent la validité de la théorie : en augmentant la fréquence de fonctionnement de la ligne à retard, la sensibilité augmente également, comme le montre la figure 2.25. Les résultats montrent bien que le capteur ayant une longueur d'onde de 250  $\mu\text{m}$  et fonctionnant à 10 MHz est le plus sensible.



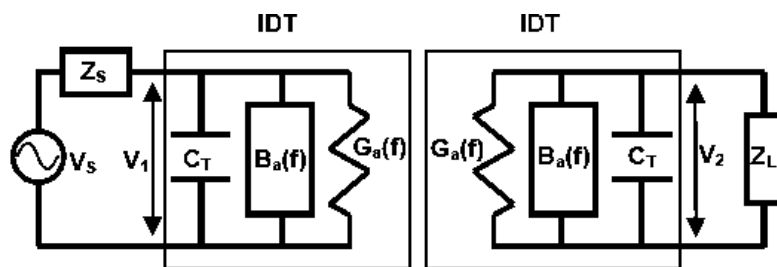
**Figure 2.25.** Effet de la longueur d'onde sur la réponse fréquentielle

### 2.7 Validation des résultats expérimentaux par la modélisation analytique : MATLAB

La modélisation analytique est considérée aussi comme une méthode efficace pour modéliser les transducteurs interdigités. Différents logiciels ont été utilisés pour modéliser le comportement des IDTs, tels que les langages de modélisation mathématique (Matlab, Python...). Dans notre cas, nous avons utilisé le Matlab pour modéliser le comportement mathématique du dispositif SAW en appliquant la méthode de la réponse impulsionnelle. C'est une méthode qui permet de simuler un modèle du premier ordre en tenant compte du comportement piézoélectrique, mécanique et électrique des transducteurs interdigités.

L'objectif de cette étude est de prédire les pertes d'insertion de notre capteur SAW, pour valider les résultats expérimentaux et numériques.

La représentation du comportement électrique des IDTs est effectuée à l'aide du circuit équivalent de Mason [183] (Figure 2.26).



**Figure 2.26.** Circuit électrique équivalent du Mason [183]:  
Modélisation des ondes acoustiques de surface

Le circuit équivalent d'un transducteur interdigité est constitué d'une capacité totale ( $C_T$ ) et d'une admittance de rayonnement qui est définie par Royer et al [184] et exprimée dans l'équation suivante :

$$Y(f) = G(f) + i(B(f) + 2\pi f C_T) \quad (2)$$

Avec:

$G(f)$  : Conductance de rayonnement ;

$B(f)$  : Susceptance de rayonnement ;

$C_T$  : Capacité statique ;

$V_1$  et  $V_2$  : Tensions d'entrée et de sortie ;

$Z_s$  et  $Z_L$  : Impédance de la source et de la charge

L'équation 2 révèle que l'admittance électrique est composée d'une partie réelle (la conductance du rayonnement) et une partie imaginaire (la susceptance de rayonnement et la capacité statique).

La partie réelle est calculée à partir de la fonction de la réponse fréquentielle  $H(f)$  et de la largeur de recouvrement  $Wa$ . Ce qui montre que l'énergie mécanique générée par le transducteur est égale à l'énergie électrique perdue.

$$G(f) = 2Wa |H(f)|^2 \quad (3)$$

$$G(f) = \pi^2 \cdot k^2 \cdot N^2 f_0 \cdot C_1 \cdot Wa \cdot (\sin(x) \cdot x)^2 = G_0 \cdot (\sin(x) \cdot x)^2 \quad (4)$$

$$G_0 = \pi^2 \cdot k^2 \cdot N^2 f_0 \cdot C_1 \cdot Wa$$

Avec  $G_0$ , la conductance de rayonnement à la fréquence de résonance

La partie imaginaire de l'admittance électrique est la susceptance  $B(f)$ . Elle est déterminée par la transformée de Hilbert, de la partie réelle de l'admittance la conductance de rayonnement.

$$B(f) = \pi^2 \cdot k^2 \cdot N^2 f_0 \cdot C_1 \cdot Wa \cdot \left( \frac{\sin(2x) - 2x}{2x^2} \right) = G_0 \cdot \left( \frac{\sin(2x) - 2x}{2x^2} \right) \quad (5)$$

La capacité statique pour  $N$  paires d'électrodes est calculée par :

$$C_T = N \cdot C_1 \cdot Wa \quad (6)$$

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

Avec,  $C_1$  est la capacité statique par une paire d'électrodes et par unité de longueur.

Les paramètres  $S$  de réflexion et de transmission, tout comme la perte d'insertion ( $IL$ ), sont des paramètres qui servent à évaluer les performances des capteurs SAW. En effet, les  $S$ -paramètres de réflexion indiquent la quantité de signal réfléchi par le capteur par rapport à la quantité de signal reçu. Les paramètres  $S$  de transmission indiquent la quantité de signal transmise par le capteur. Ils renseignent sur la capacité du transducteur à transmettre les ondes acoustiques de manière efficace. Finalement, la perte d'insertion indique la quantité de signal perdue lorsqu'il passe à travers le transducteur. Le calcul de la perte d'insertion dans les dispositifs SAW est un paramètre très utile pour étudier les performances des dispositifs SAW. Elle est une fonction de la fréquence et est obtenue à partir de la conductance, de la susceptance et de la résistance de la charge.

La perte d'insertion est minimale lorsque la fréquence  $f$  est égale à la fréquence de fonctionnement  $f_0$ , et s'exprime par la formule suivante :

$$IL = -20 \log_{10} |S_{21}| \text{dB} = -10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (7)$$

$$IL(f) = -10 \log_{10} \left[ \frac{2.G(f).R}{(1+G(f).R)^2 + [R.(2.\pi.f.C_T + B(f))]^2} \right] \quad (8)$$

Dans notre cas, nous avons modélisé un dispositif SAW qui comprend 15 paires de doigts fonctionnant à une fréquence d'environ 5 MHz. Pour coder le programme, nous avons utilisé la méthode de réponse impulsionnelle. Le Tableau 2.3 présente les paramètres d'entrée implémentés dans le code MATLAB pour cette ligne à retard SAW.

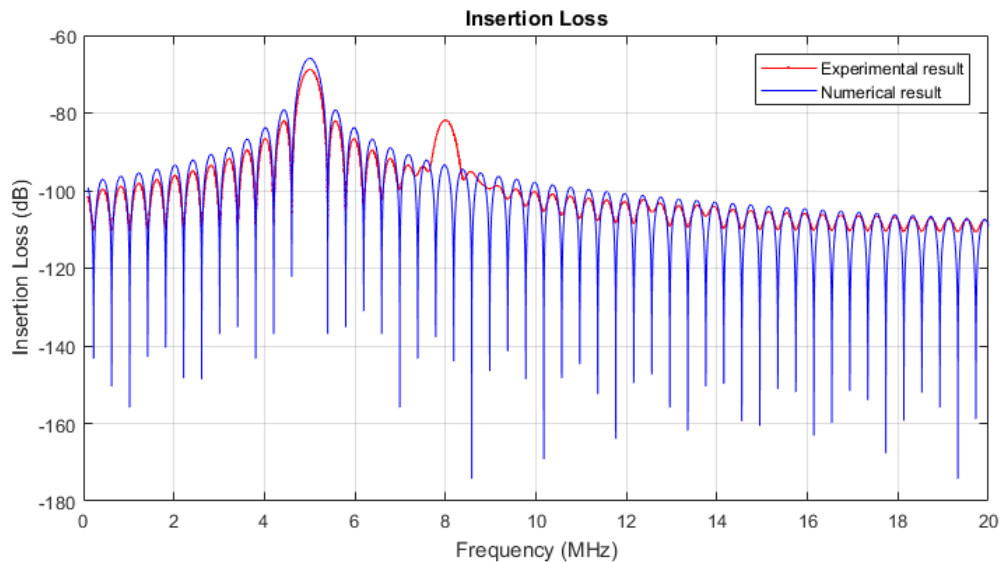
**Tableau 2.3.** Paramètres d'entrée pour la modélisation du dispositif SAW réalisé sur un substrat piézoélectrique en PVDF

Paramètres	Valeurs
Coefficient de couplage électromécanique ( $K^2$ )	0.015
Vitesse de l'onde de surface	2500 m/s
Fréquence de fonctionnement ( $f_0$ )	5 MHz
Nombre des paires de doigts ( $N_p$ )	15
Ouverture du doigt ( $W_a$ )	10000 $\mu\text{m}$
Impédance de la source et de la charge ( $Z_s$ Et $Z_L$ )	50 $\Omega$
Capacité par unité de longueur pour une paire de doigts ( $C_s$ )	15 pF/m

La figure 2.27 présente les réponses fréquentielles  $S_{21}$  (perte d'insertion) en dB calculés

## Chapitre 2: Modélisation et fabrication des capteurs SAW: Comparaison et validation des résultats

(MATLAB) et mesurés (à l'aide de l'analyseur de réseau HMS-X SPECTRUM ANALYZER), la fréquence de fonctionnement est de 5 MHz, ce qui correspond à l'estimation initiale (équation 1). Les résultats montrent un bon accord en termes de perte d'insertion ( $ILS_{21}(\text{mesurée}) = -69$  dB et  $ILS_{21}(\text{calculée}) = -68$  dB). Il est important de noter que cette modélisation ne tient pas compte de divers autres facteurs, notamment les interactions réfléchies entre les électrodes appariées ainsi que les réflexions aux extrémités du substrat.

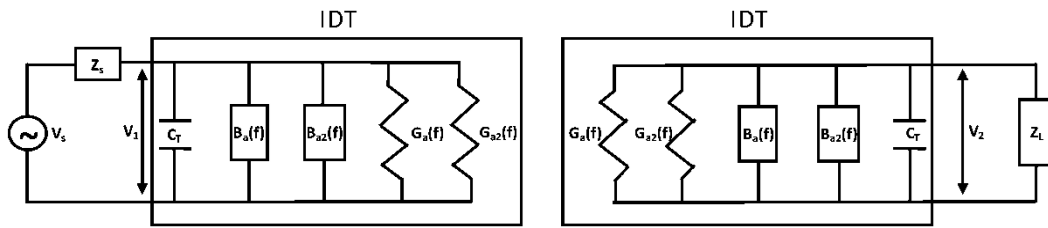


**Figure 2.27.** Les spectres S21 calculés et mesurés du capteur SAW fonctionnant à 5 MHz

Nous observons la présence d'ondes de volume dans le spectre mesuré, une caractéristique absente du spectre calculé à l'aide de MATLAB. Afin d'améliorer la concordance entre les données expérimentales et les prédictions théoriques, nous avons proposé l'intégration d'un second circuit parallèle, identique au premier, comme illustré dans la Figure 2.28. Le modèle équivalent du transducteur IDT se compose désormais d'une capacité combinée ( $C_T$ ) et de deux admittances de rayonnement ( $Y_i$ ) pour tenir compte des ondes acoustiques de surface et de volume, conformément à l'équation 9. Cette démarche a été entreprise pour corriger les divergences entre les mesures expérimentales et les simulations, en particulier en ce qui concerne la présence inattendue des ondes de volume dans les résultats expérimentaux.

$$Y_i(f) = G_i(f) + i(B_i(f) + 2\pi f C_T) \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

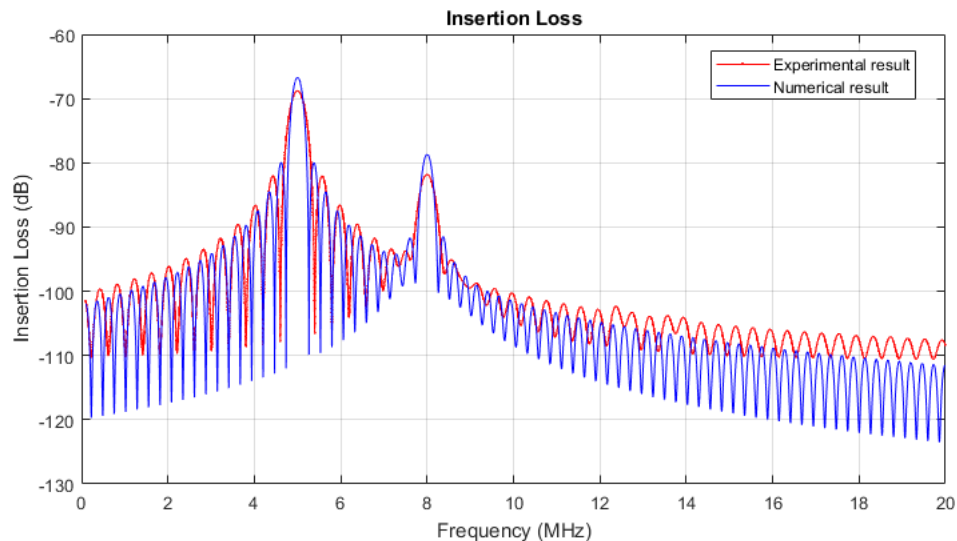




**Figure 2.28.** Schéma du circuit électrique équivalent du Mason:  
Modélisation des ondes acoustiques de volume et surface

Le modèle électrique équivalent présenté précédemment a été effectué d'une façon à être le plus proche possible de la configuration réelle du capteur SAW fabriqué.

La figure 2.29 révèle un accord bon entre les spectres de fréquence mesurés et calculés. Les résultats présentés indiquent un accord entre les spectres de perte d'insertion  $S_{21}$  calculés et mesurés en fonction des fréquences de fonctionnement des ondes de surface ( $f_0 = 5$  MHz) ou des ondes de volume ( $f = 8$  MHz) et en fonction de la largeur de bande. Toutefois, il existe une légère différence d'amplitude. Cette différence peut être attribuée aux pertes réelles dans le matériau piézoélectrique, ainsi qu'aux défauts de la géométrie SAW réelle qui ont été idéalisés dans les calculs.



**Figure 2.29.** Résultats expérimentaux et numériques (Matlab) du spectre de perte d'insertion des SAW du PVDF

Nous avons clairement établi que MATLAB peut être utilisé en tant qu'outil initial pour modéliser le comportement électrique d'une ligne à retard à surface d'onde acoustique (SAW). Cependant, il est important de noter que cette simulation présente des limitations, car elle ne prend pas en considération d'autres paramètres cruciaux tels que les réflexions qui se produisent entre les paires de doigts et aux extrémités du substrat.

### 2.8 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons investigué le comportement et les réponses fréquentielles des dispositifs SAW. En effet, la modélisation analytique (Matlab), la simulation numérique (COMSOL) et la fabrication de capteurs SAW dans la salle blanche du LAUM ont été réalisées. Cette étude nous a permis d'obtenir des connaissances qui améliorent notre compréhension et notre capacité à développer des dispositifs SAW.

La modélisation analytique a prouvé qu'elle était un outil clé pour prédire et évaluer le comportement des capteurs à ondes acoustiques de surface. En concevant un modèle basé sur les paramètres physiques des du capteur, nous avons pu anticiper les performances attendues et identifier les paramètres clés qui influencent la sensibilité du capteur. En plus, les simulations numériques ont joué un rôle crucial dans la visualisation et la validation des phénomènes complexes associés aux dispositifs SAW. La simulation numérique par COMSOL nous a permis d'optimiser et affiner nos conceptions avant leur mise en œuvre physique.

La fabrication des capteurs SAW est une étape importante de notre travail, c'est une référence pour valider les résultats de la modélisation analytique et la simulation numérique. Nous avons pu traduire les concepts tirés de la modélisation et de la simulation en dispositifs fonctionnels.

En combinant ces trois volets - modélisation, simulation et fabrication - nous avons construit un pont entre la théorie et la pratique, entre les prédictions et les résultats expérimentaux. Le capteur SAW conçu sera utilisé dans le chapitre suivant en tant que récepteur pour détecter les fuites d'eau.

# Chapitre 3: Etude comparatives de différents capteurs acoustiques pour la détection de fuites dans les conduites de réseau de distribution d'eau

## **3.1 Introduction et contexte**

Les réseaux de distribution d'eau se composent d'une combinaison de tuyaux, de réservoirs, de pompes et d'autres équipements permettant de transporter et de pressuriser l'eau. Ils ont pour objectif de répondre aux besoins en eau de la population desservie, en prenant en compte des critères tels que la taille de la communauté, la nécessité d'utiliser l'eau, les variations saisonnières et les prédictions de croissance future.

L'un des enjeux majeurs des réseaux de distribution d'eau est la durabilité et l'efficacité. La gestion rationnelle de l'eau devient de plus en plus importante, compte tenu de la rareté de la ressource en eau dans de nombreuses régions du monde. Il est essentiel pour cela de mettre en place des pratiques de gestion efficaces, telles que la détection et la localisation des fuites et la mise en œuvre de technologies de pointe pour optimiser les exploitations.

Le contrôle non destructif CND utilisé pour contrôler l'intégrité des matériaux et des structures sans les avoir endommager, a évolué pour contenir des méthodes de la détection des fuites par émission acoustique. Cette technique se réfère sur la captation des ondes acoustiques émises par les fuites d'eau, offrant une méthode non destructive et préventive pour identifier les endommagements dans les conduites d'eau.

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu des réseaux de distribution d'eau et des différents types de tuyaux utilisés pour l'eau potable. Nous mettons en évidence les méthodes et les techniques utilisées pour détecter les fuites, mettant en évidence l'utilisation des capteurs acoustiques piézoélectriques.

## **3.2 Réseau de distribution d'eau**

### **3.2.1 Constitution d'un réseau de distribution**

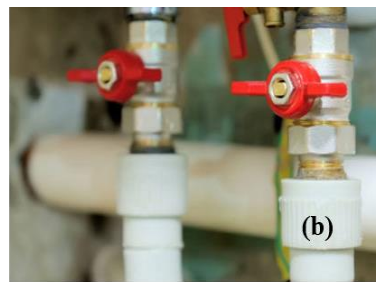
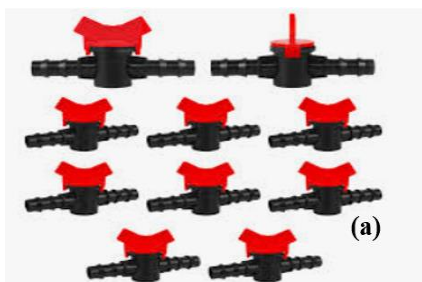
Un réseau d'eau est constitué d'un certain nombre d'éléments essentiels qui fournissent de l'eau potable aux consommateurs et assurent l'évacuation des eaux usées [185]. Les éléments clés d'un tel réseau comprennent les sources d'eau, telles que les rivières, les lacs ou les nappes phréatiques, qui fournissent l'eau non traitée. Ces sources sont raccordées à des stations de traitement où l'eau est purifiée avant d'être distribuée. Le réseau est constitué également d'un

certain nombre d'éléments essentiels qui fournissent de l'eau potable aux consommateurs et assurent l'évacuation des eaux usées. Les principales composantes d'un réseau sont les suivantes:

Les sources d'eau: Elles fournissent de l'eau brute, comme les rivières, les lacs ou les nappes phréatiques. Ces sources sont reliées à des stations de traitement où l'eau est purifiée et désinfectée avant d'être distribuée.

Les compteurs d'eau: Ils mesurent la consommation d'eau.

Les vannes: Elles contrôlent le débit.



**Figure 3.1.** a) Vannes en plastique

b) Vannes métalliques

Les pompes: Elles maintiennent la pression.



**Figure 3.2.** Marquis pompe à eau mjm101x

Les canalisations et les conduites: Elles transportent l'eau traitée jusqu'aux consommateurs, via des réservoirs de stockage intermédiaires.

Il existe des conduites principales, des conduites secondaires et des conduites locales.

#### *3.2.1.1 Conduites principales*

Elles relient la station d'épuration aux différents quartiers de la ville. Elles ont souvent un diamètre de 350 mm ou plus.

#### *3.2.1.2 Conduites secondaires*

Ce sont des conduites connectées aux conduites principales. Elles ont un diamètre de l'ordre de 300 mm et sont espacées d'environ 1000 m. Elles se détachent du réseau principal pour desservir des bâtiments individuels, des quartiers ou des zones spécifiques. Elles acheminent

l'eau depuis le réseau principal vers des utilisateurs particuliers.

### *3.2.1.3 Les conduites locales*

Ce sont les plus petites conduites du réseau, cependant leur diamètre ne doit pas être moins de 150 mm pour assurer la protection contre l'incendie. Elles sont mises en place dans le but de fournir de l'eau potable aux utilisateurs locaux, tels que les habitations, les entreprises, les institutions et d'autres infrastructures situées à proximité.

## **3.2.2 Types de réseaux de distribution d'eau**

Il existe divers types de réseaux de distribution d'eau, qui répondent aux besoins spécifiques de chaque région.

**Les réseaux en boucle:** Il s'agit du type de réseau le plus répandu, dans lequel les conduites sont reliées entre elles pour constituer une boucle qui assure un apport d'eau continu et permet une meilleure gestion des flux.

**Les réseaux en étoile:** Ce type de réseau est également très répandu. Les conduites principales partent d'un point principal pour rejoindre les différentes zones, ce qui permet une distribution efficace de l'eau.

**Les réseaux maillés:** Ils se caractérisent par de multiples interconnexions entre les conduites principales, ce qui garantit la redondance et une plus grande résilience en cas de fuites ou de problèmes.

**Réseaux en série:** Ils sont employés dans les régions présentant une topographie particulière, où l'eau est acheminée de manière successive à travers une série de tuyaux pour atteindre les zones en amont. Chaque variante de systèmes de distribution d'eau présente ses propres atouts et inconvénients, et la sélection du système approprié repose sur les particularités géographiques, des exigences de la société et des disponibilités en ressources.

## **3.2.3 Matériaux des canalisations**

Les canalisations utilisées dans les réseaux de distribution d'eau sont conçues à partir de différents types de matériaux, ayant chacun des propriétés spécifiques. Les matériaux les plus utilisés sont le PVC (polychlorure de vinyle), le PE (polyéthylène), la fonte ductile, l'acier galvanisé et le béton.

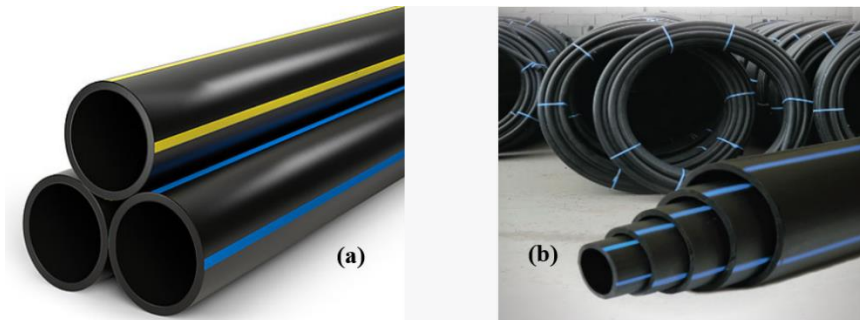
**PVC (POLYCHLORURE DE VINYLE):** Le PVC est réputé pour sa légèreté, sa simplicité d'installation et sa bonne résistance mécanique et à la corrosion.

Les tuyaux en PVC sont généralement utilisés pour des applications en superficie. (Voir Figure 3.3).



**Figure 3.3.** Tubes en PVC

PE (polyéthylène) et PEHD (polyéthylène haute densité) : Ils sont aussi connus pour leurs qualités de légèreté, de souplesse et de résistance aux chocs, ce qui en fait un choix populaire pour les canalisations souterraines.



**Figure 3.4.** Tubes PE

b) Tubes PEHD

Le cuivre: Les tubes en cuivre sont connus pour leur résistance à la corrosion, à l'usure à la détérioration, grâce et à leur résistance et durabilité. Cela permet de minimiser les prix d'entretien à long terme et de prolonger la durée de vie des systèmes de plomberie.



**Figure 3.5.** Tubes en cuivre

La fonte ductile: Elle est célèbre pour sa solidité et sa longévité, ce qui en fait un matériau privilégié pour les tuyaux de grande taille. Elle présente des caractéristiques qui lui permettent

d'être très durable:

- Une résistance élastique élevée.
- Une grande résistance à la traction.
- Une capacité à supporter les chocs.



**Figure 3.6.** Canalisation en fonte ductile

L'acier galvanisé: Les tubes en acier galvanisé sont destinés à être utilisés pour leur résistance à la corrosion.

Le béton à âme en tôle: Il est couramment employé dans les canalisations de grande taille grâce à son prix, de sa résistance et de sa durabilité exceptionnelle, ainsi que de sa nature non réactive et peu corrosive. Le choix du matériau dépend des contraintes particulières du réseau de distribution d'eau, telles que la pression hydraulique, les conditions environnementales et les exigences en termes de longévité.



**Figure 3.7.** Canalisation en béton à âme en tôle

### **3.2.4 Les fuites d'eau**

#### *3.2.4.1 Définition*

Les fuites dans les canalisations d'eau sont des pertes d'eau non désirées qui se produisent dans un réseau de tuyaux. Elles sont généralement causées par des fissures, des joints défectueux ou l'usure normale des tuyaux. On peut classer les fuites en deux catégories

principales:

**Les fuites visibles**

Elles sont détectés par des signes visuels tels que des mares ou des zones humides.

**Les fuites invisibles**

Elles se produisent à l'intérieur des murs ou sous terre et peuvent passer inaperçues pendant une longue période.

*3.2.4.2 Types des fuites*

Il existe différents types de fuites qui peuvent avoir lieu dans les conduites d'eau:

**Fissure Circulaire**

Les fissures circulaires dans les canalisations ont plusieurs causes:

- La contrainte de flexion provoquée par le gel est une des causes les plus fréquentes.
- Le gonflement de l'argile peut également entraîner une tension de flexion sur la canalisation, ce qui provoque des fissures.
- Les contractions thermiques, résultant des variations de température, contribuent à la fissuration circulaire. Les efforts longitudinaux exercés à proximité des robinets peuvent causer des failles circulaires dans les conduites.

**Fissure Longitudinale:** Les fissures longitudinales constituent un autre type de fissure fréquent dans les canalisations d'eau. Elles sont dues à plusieurs phénomènes :

- La contrainte périphérique liée à la pression interne de l'eau est l'un des facteurs les plus importants. Quand la pression de l'eau excède la capacité de la conduite, elle peut entraîner une fissure longitudinale.
- La surcharge exercée par la couche de sol entraîne une contrainte annulaire sur la conduite, ce qui conduit à des fissures longitudinales.
- Les contraintes périphériques causées par l'eau gelée peuvent également contribuer à ces ruptures.

**Fissures circonférentielles:** Les fuites circonférentielles ou les fuites annulaires, se produisent lorsque des fuites se développent autour de la circonférence d'un tuyau ou d'une conduite. Ce type de défaut peut avoir plusieurs causes, dont les suivantes :

- La corrosion : Une exposition à l'humidité ou aux produits chimiques peut conduire à une dégradation de la surface intérieure ou extérieure du tuyau, entraînant des points faibles propices à l'apparition de fuites.
- L'usure et le vieillissement: au fil du temps, les matériaux des canalisations peuvent



s'user et se détériorer, ce qui accroît le risque de fuites circonférentielles

- Les défauts d'installation: Une mauvaise installation des conduites risque de causer des contraintes excessives sur les jonctions ou les soudures, conduisant à des fuites circonférentielles.
- La pression excessive: Une pression élevée dans le réseau de tuyauterie peut provoquer des tensions excessives sur les conduites, ce qui peut entraîner des fuites sur le contour des tuyauteries.
- Les facteurs environnementaux: Ils peuvent exercer une grande influence sur le comportement des canalisations, comme les tremblements de terre, les infiltrations d'eau souterraine ou encore les racines des arbres.

### **3.2.5 Techniques de détection des fuites d'eau**

Il existe diverses techniques de détection des fuites d'eau qui permettent d'identifier et de résoudre ces problèmes par anticipation.

Inspection visuelle: C'est la méthode la plus simple pour détecter les fuites d'eau: une inspection visuelle soigneuse de tous les éléments du système de distribution d'eau. Il s'agit de rechercher des fissures dans les conduites, des défauts d'assemblage, des résidus d'humidité ou tout autre signe visible de fuite [186].

Usage d'outils de détection acoustique: Les fuites d'eau peuvent produire des bruits particuliers, tels que des vibrations et des bruits de coulée. Les instruments de détection acoustique servent à identifier les fuites en écoutant les variations de sons à l'aide de capteurs, de microphones ou de géophones [187].

Détection par ultrasons: Les ultrasons sont utilisés dans la détection des fuites d'eau en enregistrant les ondes sonores à haute fréquence émises par la source de la fuite. Un équipement spécial doit être utilisé pour convertir les ondes ultrasoniques en signaux sonores, ce qui permet de détecter les fuites avec précision [188].

Les caméras d'inspection: Les caméras d'inspection sont des appareils utiles pour détecter les fuites d'eau dans les endroits difficilement accessibles, tels que les canalisations souterraines ou les espaces confinés. Les caméras sont introduites dans les conduites pour observer en temps réel les fuites.

Systèmes intelligents de détection des fuites: Ils sont des systèmes de détection des fuites qui surveillent en continu les niveaux d'eau, la pression et les débits inhabituels à l'aide de capteurs. Ils peuvent détecter et notifier automatiquement les fuites, ce qui favorise une intervention préventive rapide.

L'inspection acoustique du réseau: L'inspection acoustique des canalisations est une méthode très utile pour détecter les fuites et les dans les tubes en métal et en plastique, à l'aide de capteurs piézoélectriques. Ces capteurs transforment les différences de pression acoustique en signaux électriques, ce qui donne une mesure précise des ondes sonores qui se propagent dans le réseau de canalisations. Cette technique est très utile pour surveiller les différents débits d'eau dans les conduites. Les capteurs piézoélectriques sont placés à des endroits spécifiques de la canalisation.

L'écoulement de l'eau dans les conduites génère des vibrations et des ondes sonores. Les capteurs piézoélectriques détectent ces signaux acoustiques et les convertissent en signaux électriques, qui seront analysés pour détecter les changements suspects.

En raison du débit de l'eau, les signaux acoustiques peuvent changer d'amplitude, et de fréquence. Les capteurs piézoélectriques sont capables de relever ces caractéristiques et de les comparer à des références prédéfinies, pour évaluer l'existence ou pas de fuites dans le réseau de canalisations.

Cette méthode offre de multiples bénéfices, parmi lesquels se distinguent la capacité à détecter les fuites à un stade précoce et la réduction significative des pertes d'eau. De plus, elle permet une surveillance en temps réel des réseaux de canalisations et du débit d'eau, facilitant ainsi la détection précoce et la résolution des problèmes avant qu'ils ne prennent de l'ampleur.

### **3.3 Applications des capteurs acoustiques céramiques PZT et polymères PVDF: Détection des fuites d'eau dans les tubes métalliques et plastiques : Résultats préliminaires**

#### **3.3.1 Matériels et méthodes**

Pour assurer les mesures de détection des fuites, nous présentons d'abord le dispositif expérimental et la procédure conçus pour évaluer la sensibilité de divers capteurs sur des tubes métalliques et plastiques avec une zone de fuite délibérément créée. Pour atteindre cet objectif, nous avons établi les étapes suivantes :

Acquisition des données: Nous avons enregistré en continu des données acoustiques à l'aide de différents types de capteurs, en utilisant une méthode d'écoute passive. Cette approche a permis une surveillance ininterrompue de la zone spécifique étudiée, offrant un moyen de collecte de données non intrusif et très instructif.

Prétraitement: Cette phase est essentielle dans l'amélioration de la qualité des données collectées. Les bruits de fond, susceptibles de perturber les signaux, ont été méticuleusement éliminés. En outre, des techniques avancées de traitement des signaux, telles que le filtrage passe-bande, ont été appliquées au cours de cette étape. Ces techniques, mises en œuvre sous la forme d'un filtre analogique de premier ordre, ont permis de conserver les éléments essentiels

du signal tout en éliminant les interférences indésirables.

Traitement spectral: Une analyse des plages de fréquences actives du signal acoustique a été effectuée, facilitant une exploration approfondie des caractéristiques spectrales. Cette phase d'analyse nous a permis de découvrir des signatures distinctives associées à la présence de la fuite.

### 3.3.2 Dispositif expérimental et capture du signal acoustique

L'inspection acoustique a été réalisée sur le réseau de distribution d'eau de l'École Nationale d'Ingénieurs du Mans (ENSIM). Afin de limiter les interférences telles que les courants hydrauliques et les bruits parasites qui pourraient influencer les mesures, les essais ont été réalisés la nuit. Pour effectuer les mesures, différents composants ont été utilisés.

Nous avons utilisé des tuyaux en métal (cuivre) et en plastique (PVC) présentant les propriétés indiquées dans le tableau 3.1, ainsi qu'un débitmètre pour mesurer les débits :

**Tableau 3.1.** Propriétés des tubes utilisés

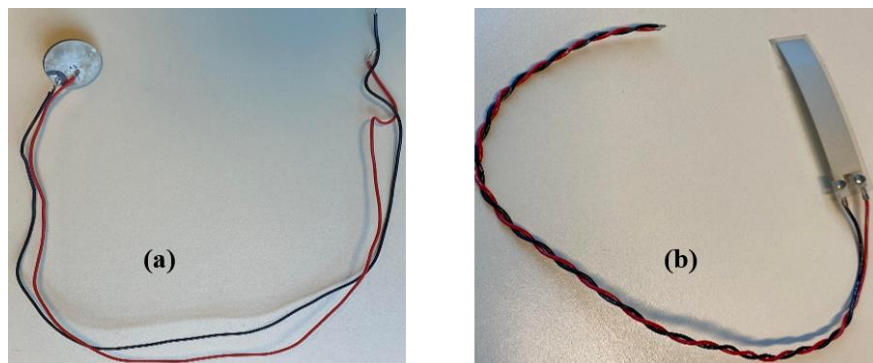
Propriétés	Tubes métalliques (Cuivre)	Tubes plastiques (PVC)
Diamètre (mm)	12,7	12
Densité ( $g/cm^3$ )	8,88	1,38
Epaisseur (mm)	1,14	2
Modules d'Young ( $N/m^2$ )	$1,3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^8$

#### 3.3.2.1 Capteurs

Différents types de transducteurs piézoélectriques ont été utilisés pour enregistrer les champs acoustiques générés par le bruit de l'eau à l'intérieur de la canalisation. Pour ces mesures, les capteurs constituent l'élément essentiel de la chaîne de mesure. Un capteur PVDF flexible (figure 3.8.b) sous la forme d'un film flexible de  $0,052 \times 72 \times 16 \text{ mm}^3$  a été utilisé. Il s'agit d'un film piézoélectrique ayant une large bande passante [mHz~GHz], une sensibilité élevée, une grande rigidité diélectrique, une faible impédance acoustique et une stabilité élevée. Dans cette étude, le miel a été utilisé comme élément de liaison pour lier le capteur PVDF à la surface du tube, puisque c'est un liquide visqueux qui peut fixer le capteur en place et garantir un contact intime avec la surface de mesure. En revanche, un capteur PZT (figure 3.8.a) est un capteur sous la forme d'un disque de céramique piézoélectrique d'un diamètre de 20 mm et d'une épaisseur de 1 mm.

Pour le couplage des capteurs avec les tubes, nous avons choisi d'utiliser le salol comme agent de couplage entre le transducteur PZT et le tuyau. Une caractéristique avantageuse du salol est sa capacité à préserver l'intégrité des capteurs PZT lors de leur retrait, ce qui contraste

avec les éventuels dommages causés par l'utilisation fréquente d'adhésifs époxy. Des recherches antérieures menées par Goursolle [189] ont révélé que le salol présente un coefficient de réflexion plus faible par rapport à d'autres agents de couplage tels que le gel ultrasonique et l'huile de silicone lorsqu'il est en contact avec divers matériaux, notamment la silice, le verre, l'aluminium et le plastique. Cette découverte a des implications importantes, car l'utilisation du salol en tant qu'agent de couplage s'avère plus efficace en raison de la rigidité accrue qu'il confère à l'interface, facilitant ainsi la transmission optimale des signaux acoustiques. Le salol est disponible sous forme de poudre, cristallisant à température ambiante et passant à l'état liquide à environ 40°C. Pour éviter la cristallisation lorsqu'il est appliqué sur le capteur PZT, la pastille céramique doit être chauffée à la même température. En revanche, le film polymère PVDF ne peut pas supporter le collage et décollage avec le salol, et lorsque le solvant liquide est appliqué sur le capteur PVDF, il cristallise et ne parvient pas à adhérer au tube. C'est précisément pourquoi le miel a été utilisé comme agent de couplage pour coller le PVDF aux tubes en plastique. Ce choix repose sur ses coefficients de transmission élevés démontrés, comme le confirment des études précédentes [190].



**Figure 3.8.** a) Capteur céramique PZT, b) Capteur polymère PVDF

### *3.3.2.2 acquisition des signaux acoustique*

Les signaux acoustiques issus des capteurs sont pré- amplifiés avant d'être envoyés sur la carte d'acquisition. Le filtre utilisé comporte un étage de conditionnement du signal suivi d'un filtre passe-bas d'une fréquence de coupure inférieure à 20 kHz et une amplification de 20 dB :

Ensuite, un système d'acquisition a été employé pour enregistrer les signaux à une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz avec une résolution dynamique de 16 bits. La carte utilisée pour l'acquisition est de modèle TiePie HS5 XM cf.



Figure 3.9. Carte d'acquisition Tiepie HS5

Pour notre système de surveillance acoustique, nous avons utilisé plusieurs outils de programmation scientifique : Matlab et Python. Ces logiciels ont été utilisés pour programmer des acquisitions, pré-traiter les données et réaliser les opérations temporelles et fréquentielles pour étudier les signaux acoustiques issus des fuites.

La figure 3.10 illustre l'organigramme et le schéma descriptifs du système de détection de fuites. Cette disposition du banc de mesure a été utilisée pour étudier la sensibilité de la détection de fuites dans le système de distribution d'eau de l'ENSIM (canalisations métalliques et plastiques).

Les tests ont été effectués pour chaque tube, chaque capteur et chaque débit, soit un total de 60 tests (2 tubes, 2 capteurs, 3 débits, chaque test étant répété 5 fois).

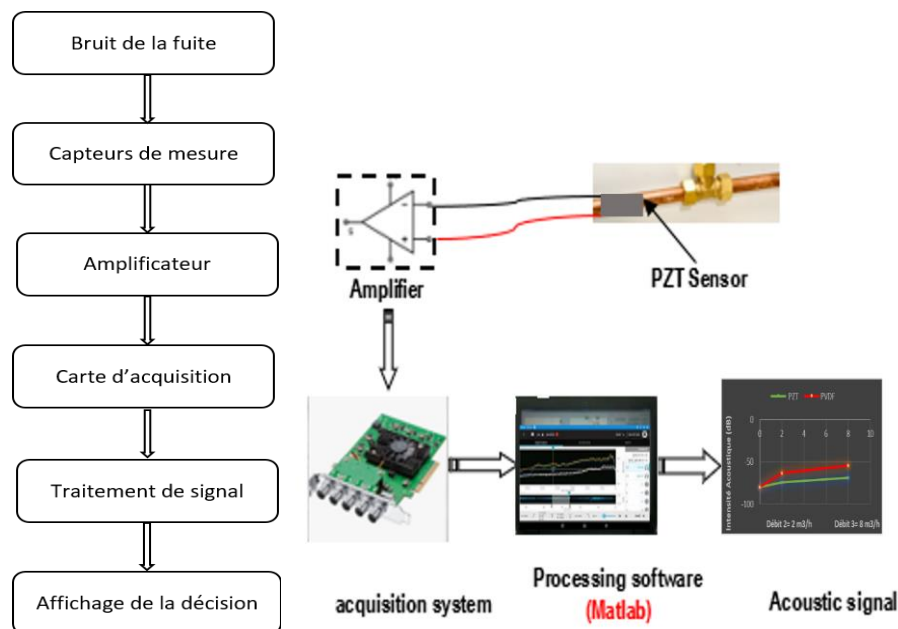


Figure 3.10. Organigramme et schéma du système de détection des fuites

### 3.3.3 Résultats et discussions

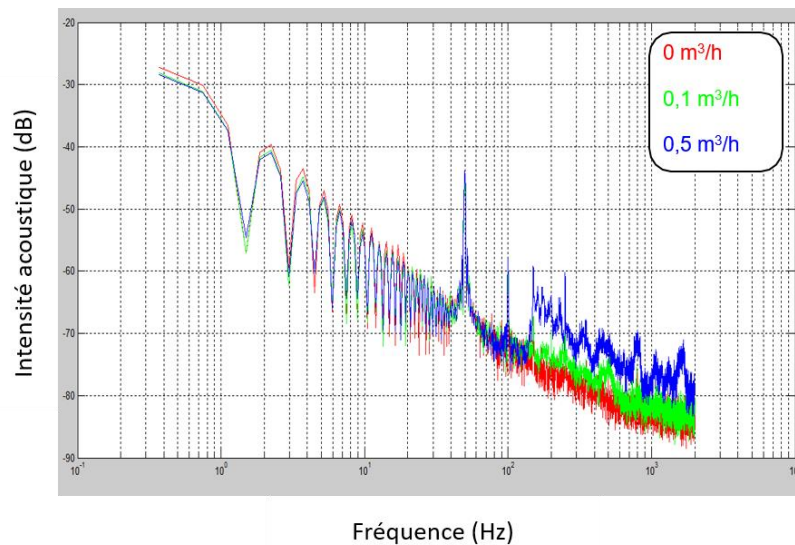
Dans cette section, nous présenterons les résultats de la détection des fuites obtenus à partir de l'inspection acoustique pour divers débits d'eau dans les tubes métalliques et plastiques[191]

. Nous étudierons aussi les variations des signaux acoustiques en fonction des caractéristiques des conduites, notamment le matériau et le diamètre, pour mieux comprendre leur impact sur la détection. Ces résultats améliorent la gestion et la maintenance préventive des systèmes de distribution d'eau, en favorisant l'identification rapide des fuites.

### 3.3.3.1 Tubes métalliques

#### 3.3.3.1.1 Mesures avec un capteur PZT

Après avoir effectué les mesures et traité les résultats, nous avons pu obtenir les signaux présentés dans la figure suivante:



**Figure 3.11.** Intensité acoustique d'un tube métallique à l'aide d'un capteur PZT

Le traitement des résultats des mesures d'inspection acoustique sur des conduites en cuivre à l'aide de capteurs PZT révèle des informations sur les variations de l'intensité acoustique en fonction des différents débits. Dans le cadre de notre étude, nous avons obtenu trois courbes distinctes illustrant les mesures pour des débits différents : la rouge correspond à un débit de 0 m<sup>3</sup>/h ou silence acoustique, la verte correspond à un débit D1 de 0,1 m<sup>3</sup>/h et la bleue correspond à un débit D2 de 0,5 m<sup>3</sup>/h avec l'intensité acoustique la plus élevée.

En analysant les courbes présentées à la figure x, nous constatons qu'il existe une zone active de [150 Hz-10 kHz], ce qui permet d'observer une corrélation claire entre le débit d'eau et l'intensité acoustique relevée (Figure 3.11). Quand le débit est nul, la courbe rouge traduit un silence acoustique, puisqu'il n'y a pas de circulation d'eau dans la canalisation. Il s'agit de la courbe de référence.

Par contre, quand le débit augmente à D1, la courbe verte indique une augmentation

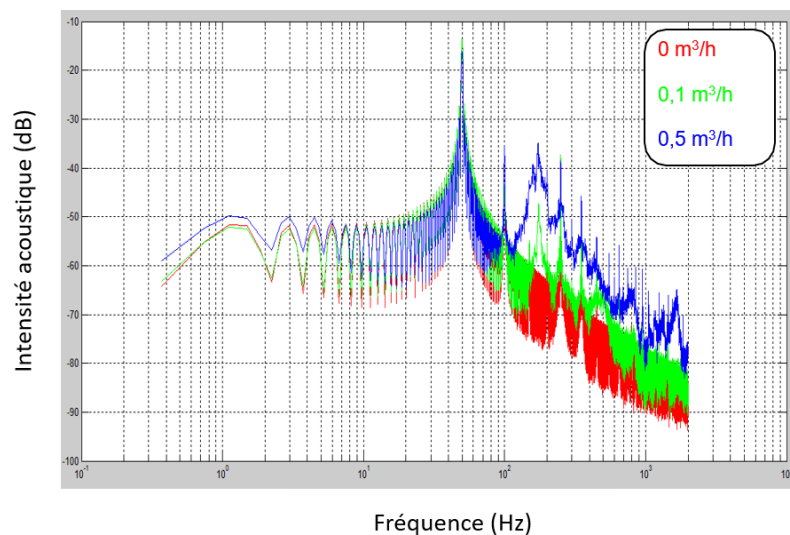
importante de l'intensité acoustique avec une amplitude de -72 dB. Ceci indique que le mouvement de l'eau provoque des vibrations et des ondes sonores qui sont captées par le capteur PZT. Cette corrélation entre le débit et l'intensité acoustique atteste de l'efficacité du capteur à détecter les changements de débit dans les tubes en cuivre.

De plus, la courbe bleue relative au débit D2 est celle qui présente l'intensité acoustique la plus élevée des trois, avec une amplitude de -59 dB. Ce résultat indique une augmentation de l'activité acoustique due à un débit d'eau plus élevé. Ces résultats témoignent de la capacité du capteur PZT à détecter avec précision les différences de débit dans les conduites en cuivre.

Ils justifient l'efficacité de l'inspection acoustique à l'aide de capteurs PZT pour la surveillance des débits d'eau dans les conduites en cuivre.

#### 3.3.3.1.2 Mesures avec un capteur PVDF

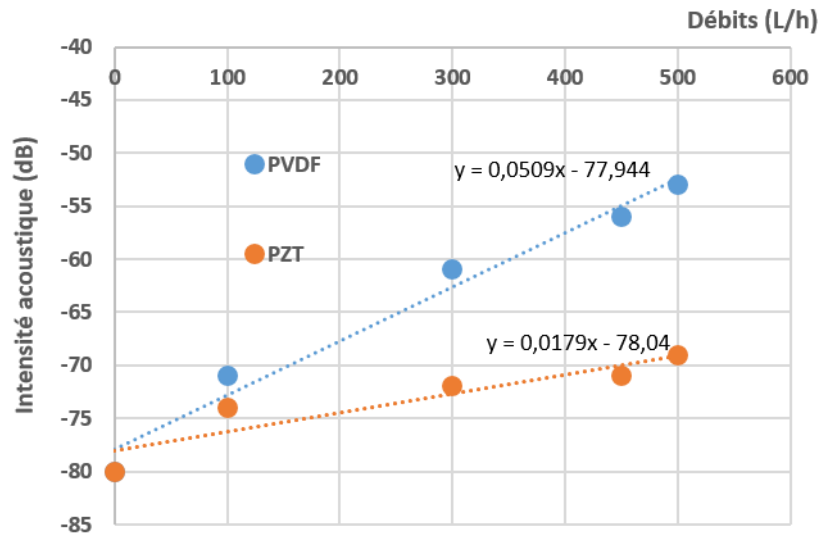
Après avoir effectué les mesures et traité les résultats, nous avons réussi à avoir les signaux présentés par la figure 3.12 :



**Figure 3.12.** Intensité acoustique d'un Tube métallique à l'aide d'un capteur PVDF

Dans nos mesures de contrôle acoustique sur des tubes en cuivre avec des capteurs en PVDF, nous avons constaté que les résultats trouvés avec le capteur en PVDF étaient meilleurs par rapport à ceux obtenus avec le capteur en PZT. Les courbes présentées dans la figure 3.13 montrent que la zone active s'est élargie et devient de [100 Hz-10 kHz], et nous notons même l'amélioration de l'amplitude de l'intensité acoustique (pour D1, IA= -58 dB et pour D2, IA= -45 dB). Cette amélioration des performances peut être expliquée par la flexibilité du polymère PVDF utilisé comme matériau piézoélectrique. Cette flexibilité lui confère une meilleure adaptation aux vibrations et aux ondes acoustiques émises par les conduites en cuivre, ce qui se reflète dans une sensibilité et une précision accrue dans la détection des fuites.

Comparaison de la sensibilité des deux capteurs :



**Figure 3.13.** Comparaison de la sensibilité des deux capteurs PZT et PVDF (Tube métallique)

Dans cette partie, nous avons utilisé la régression linéaire pour effectuer une comparaison de la sensibilité de deux capteurs utilisés. Nous avons constaté une corrélation linéaire entre l'amplitude des signaux acoustiques capturés et les débits d'eau pour les deux capteurs (Figure 3.13). Cette relation linéaire confirme la sensibilité des deux capteurs pour la détection des fuites. Nous constatons encore que pour tous les débits, l'amplitude de l'intensité acoustique mesurée par le capteur PVDF est plus élevée que celle mesurée par le capteur PZT. Cette caractéristique montre que le capteur PVDF était plus sensible, ce qui laisse supposer qu'il pourrait être plus performant pour l'inspection acoustique des conduites en cuivre.

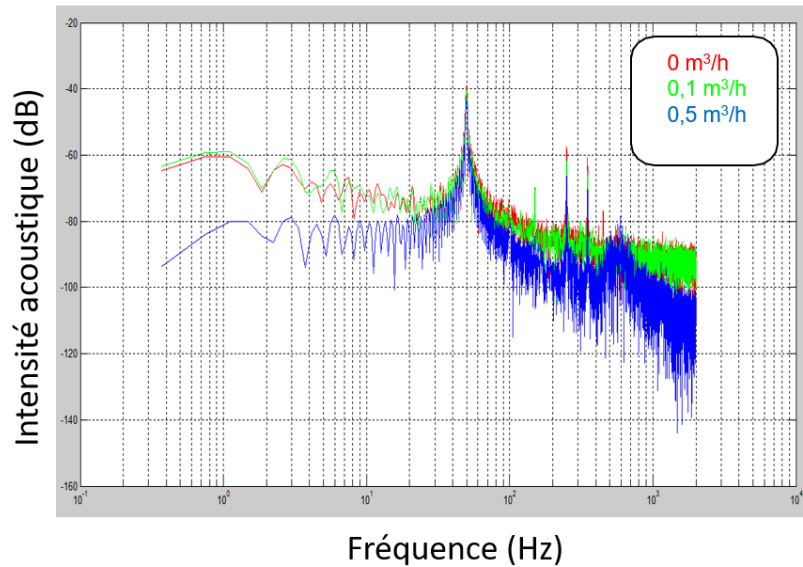
Il est important de noter que des recherches plus approfondies sont nécessaires pour optimiser les mesures et les configurations des capteurs PVDF dans le but d'obtenir des résultats encore plus précis et reproductibles. Aussi, les résultats acquis attestent l'efficacité de capteur PVDF pour l'inspection acoustique basée sur la surveillance des conduites en cuivre, cela ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de la détection des fuites dans les réseaux de distribution d'eau, ouvrant ainsi des horizons inexplorés pour la recherche et les applications pratiques.

### 3.3.3.2 Tubes plastiques

#### 3.3.3.2.1 Mesures avec un capteur PZT

Les résultats de l'inspection acoustique sur les conduites en plastique, à l'aide de capteurs PZT, ont permis de faire des observations intéressantes, qui sont illustrées dans la figure 3.14.





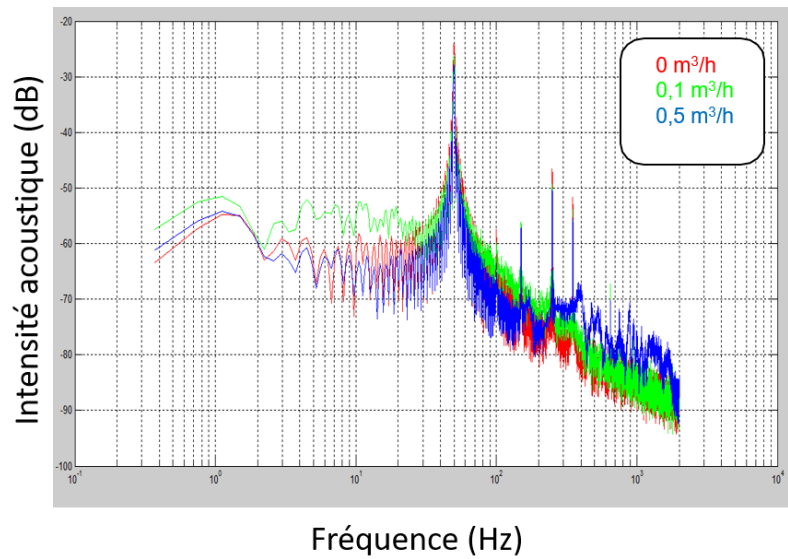
**Figure 3.14.** Intensité acoustique d'un Tube plastique à l'aide d'un capteur PZT

Toutefois, les résultats de l'inspection acoustique effectués sur les conduites en plastique sont moins satisfaisants que ceux obtenus sur les conduites en cuivre. En effet, en augmentant le débit, les résultats ont perdu leur cohérence. Et c'est dû au fait que propriétés acoustiques des tubes en plastique différentes de celles des tubes en cuivre, la qualité des mesures peut s'en trouver affectée.

Il est donc essentiel de tenir compte de ces limitations lors de l'inspection acoustique sur les conduites en plastique. Des améliorations techniques peuvent être nécessaires, telles que l'optimisation des nombres et des formes des capteurs PZT ou la mise en œuvre de techniques de traitement des signaux plus avancées, afin d'obtenir des résultats plus fiables et plus cohérents.

#### 3.3.3.2.2 Mesures avec un capteur PVDF

Les résultats des mesures de l'inspection acoustique sur tube en plastique par capteur PVDF sont illustrés dans la figure 3.15.

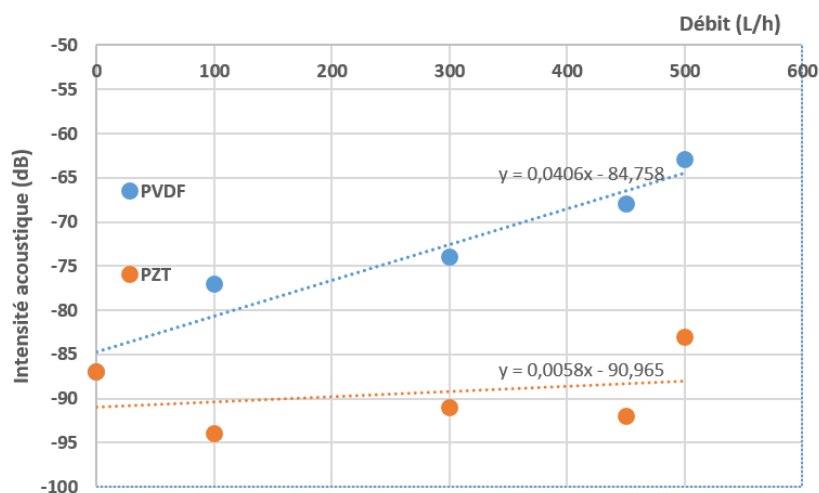


**Figure 3.15.** Intensité acoustique d'un Tube plastique à l'aide d'un capteur PVDF

Les résultats observés avec les conduites en plastique sont moins satisfaisants que ceux obtenus avec les conduites en cuivre. Toutefois, il est à noter aussi que les résultats du capteur en PVDF sont plus cohérents et meilleurs que ceux du capteur en PZT.

Cette amélioration est due aux propriétés du capteur PVDF. Ce dernier est un matériau polymère doté d'une grande sensibilité acoustique et d'une large bande de fréquence en réponse. Ces propriétés lui confèrent la capacité de détecter avec exactitude les variations d'intensité acoustique générées par les divers débits d'eau qui traversent la conduite en plastique.

Comparaison de la sensibilité des deux capteurs :



**Figure 3.16.** Comparaison de la sensibilité des deux capteurs PZT et PVDF (Tube plastique)

Après avoir analysé les résultats obtenus dans cette étude, nous avons utilisé la régression

linéaire pour mieux évaluer et comparer la sensibilité des deux capteurs, PVDF et PZT, lors de l'inspection acoustique des conduites en plastique (Figure 3.16). Une observation significative émerge de cette analyse, soulignant la bonne linéarité entre l'amplitude du signal acoustique et les débits d'eau pour le capteur PVDF. Cette corrélation linéaire montre la sensibilité accrue du capteur PVDF, qui répond de plus proportionnellement aux variations des débits d'eau. Par contre, pour le capteur PZT, la relation entre l'amplitude et les débits ne présente pas une linéarité semblable. Cette remarque indique que la sensibilité du capteur PZT peut ne pas suivre une tendance linéaire lors de l'inspection acoustique de tuyaux en plastique, ce qui souligne les différences de comportement des deux capteurs lors de la surveillance des fuites d'eau dans les canalisations en plastique.

En résumé, cette étude a montré que l'inspection acoustique des fuites d'eau dans les tubes en PVC posait des problèmes. Ces problèmes peuvent être expliqués par plusieurs facteurs tels que la compatibilité des capteurs et la sensibilité aux hautes fréquences. Pour lever ces difficultés, nous avons décidé de concentrer nos efforts de recherche sur l'étude spécifique de détecter les fuites dans des canalisations en PVC.

En nous concentrant sur les tuyaux en PVC, nous serons en mesure de mieux comprendre les défis associés à la détection des fuites dans ce type de tuyaux et d'identifier des solutions appropriées. Notre but sera de rendre plus efficaces et plus fiables les méthodes de détection acoustique pour les canalisations en PVC, en utilisant au mieux les capteurs et les techniques de traitement des données.

En se penchant spécifiquement sur cette problématique, notre objectif est de jouer un rôle significatif dans l'optimisation des méthodes de détection des fuites d'eau au sein des systèmes de distribution en PVC.

### **3.4 Détection des fuites dans les conduites en plastiques PVC**

Compte tenu des résultats préliminaires obtenus dans la première partie ce chapitre, nous avons décidé de focaliser notre recherche sur la détection de fuites dans les tubes en plastique (PVC), toujours avec les mêmes capteurs PVDF et PZT. En plus de ces deux capteurs, nous allons procéder à une comparaison avec le capteur SAW que nous avons développé et fabriqué pour cette application. Cette comparaison nous permettra de mieux évaluer les performances de notre capteur en situation réelle et de comparer son efficacité à celle des capteurs classiques [192].

Auparavant, de nombreuses méthodes de détection des fuites nécessitaient plusieurs capteurs placés dans des directions différentes le long du pipeline, ce qui entraînait une

augmentation des coûts de main-d'œuvre et coûts de main-d'œuvre et d'inefficacité. Les chercheurs ont toutefois relevé ces défis en mettant au point un nouveau système de détection d'événements qui utilise des capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) dans des réseaux dans les réseaux hydrauliques [6]. Cette approche exploite les nombreux avantages offerts par les capteurs SAW. Les capteurs SAW peuvent être fabriqués d'une manière personnalisable, adaptée à des applications spécifiques et à la structure mesurée. En outre, les capteurs SAW éliminent le besoin de filtres supplémentaires et permettent une surveillance à distance même dans des environnements difficiles [23]. Ils se caractérisent par leur structure robuste et compacte, leur stabilité exceptionnelle, leur sensibilité élevée, leur rentabilité, leur réponse en temps réel et leur taille compacte [35]. En outre, les capteurs SAW peuvent facilement être fixés ou intégrés à divers types de matériaux de conduites d'eau.

Par ailleurs, les capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) sont des dispositifs qui utilisent les ondes acoustiques pour détecter les changements dans les structures. Ces capteurs se composent d'un transducteur interdigital (IDT) et d'un substrat piézoélectrique qui génère des ondes acoustiques lorsqu'un signal électrique est électrique. Ces ondes acoustiques se propagent le long de la surface du matériau et sont utilisées pour détecter les changements de propagation dans la structure, tels que les changements de température, de température, de pression et d'humidité, ou la présence de certains ions chimiques. Les capteurs SAW sont connus pour sensibilité élevée, leur temps de réponse rapide et leur capacité à mesurer une large gamme de propriétés physiques. Selon la littérature, il existe quatre principaux types de capteurs acoustiques de surface: Les capteurs d'ondes de Rayleigh, les capteurs Bleustein-Gulyaev (SSBW), les capteurs d'ondes acoustiques de surface de cisaillement à l'horizon (SH-SAW) et les capteurs d'ondes de Love. Les recherches se concentrent sur la détection des fuites par éclatement des tuyaux en plastique reliant aux canalisations d'eau. Ces fuites ont généralement un faible débit et peuvent passer inaperçues pendant une longue période, ce qui entraîne de longs délais avant la réparation. Ce retard entraîne des pertes importantes pertes importantes, presque comparables à celles des grosses fuites dans les conduites d'eau, qui sont détectées beaucoup plus rapidement. La détection de ces fuites est encore compliquée par l'utilisation croissante de tuyaux en plastique dans les réseaux d'approvisionnement en eau. Malgré les problèmes connus d'atténuation des phénomènes vibroacoustiques dans les tuyaux en plastique, la possibilité de détection des fuites d'eau dans ces tuyaux est toujours possible [29], et certains chercheurs ont étudié le comportement des tuyaux en plastique à l'aide de méthodes acoustiques.

Dans cette partie, nous étudierons les performances de trois capteurs différents pour la détection des fuites d'eau dans les conduites en plastique : les capteurs en titanate de zirconate de plomb (PZT), les capteurs en fluorure de polyvinylidène (PVDF) et les capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW). Pour évaluer la sensibilité et la précision de la détection des pertes d'eau, les capteurs ont été testés dans diverses conditions, notamment en fonction du débit et de la distance par rapport à la fuite. Les résultats ont montré que les trois capteurs étaient capables de détecter des fuites d'eau dans des tuyaux en plastique avec des sensibilités différentes. Les capteurs PVDF et SAW ont montré une plus grande sensibilité que le capteur PZT pour la détection des fuites d'eau dans la gamme de fréquences acoustiques considérée. Les résultats de cette recherche peuvent être utiles pour développer des systèmes efficaces et fiables de détection des fuites d'eau dans les conduites en plastique. Plusieurs travaux ont étudié l'utilisation des capteurs PVDF et PZT, mais aucun n'a utilisé le capteur SAW pour la détection des fuites dans les tuyaux en plastique et comparé leurs performances. Ce travail vise à réduire les connaissances dans ce domaine et de fournir des informations précieuses sur l'utilisation de capteurs acoustiques pour la détection des fuites d'eau.

### **3.4.1 Capteurs**

Pour capturer les champs acoustiques résultant des fuites d'eau, nous avons utilisé les deux capteurs PZT et PVDF, que nous avons utilisés précédemment.

Les capteurs PZT sont connus pour leur sensibilité aux ondes de volume, ce qui les rend sensibles à la détection des vibrations générées par les fuites d'eau. Et La détection des fuites d'eau avec les capteurs PZT repose sur le principe de la conversion des variations de pression acoustique en signaux électriques. Tandis que les capteurs PVDF sont sensibles aux ondes de surface, exploitant leurs capacités à convertir les vibrations mécaniques engendrées par les fuites en signaux électriques.

En outre, avec ces deux capteurs, un troisième type de capteur, le transducteur interdigité (figure 3.17.c), a été utilisé dans notre étude.



**Figure 3.17.** Capteurs utilisés pour les mesures

Comme on le sait, un dispositif à ondes acoustiques de surface (SAW) comprend une couche piézoélectrique sur laquelle une structure métallique interdigitée en forme de peigne, connue sous le nom de transducteur interdigité (IDT), est méticuleusement façonnée. Cette disposition structurée de l'IDT détermine la longueur d'onde de l'onde acoustique générée à la surface du substrat piézoélectrique. En appliquant des potentiels électriques alternatifs à ces deux structures en peigne, elles induisent la formation de crêtes et de creux sur la couche piézoélectrique, ce qui entraîne la création d'une onde acoustique de surface (SAW). Notamment, le dispositif ne permet de manière sélective qu'une gamme limitée de fréquences de se propager à travers lui, un phénomène qui est régi par la vitesse acoustique à l'intérieur du matériau piézoélectrique. Cette vitesse peut être calculée à l'aide de la formule suivante

$$f = \frac{V}{\lambda}$$

où "f" correspond à la fréquence de résonance, "V" représente la vitesse acoustique à l'intérieur du matériau et "λ" la longueur d'onde de l'onde acoustique de surface (SAW). Dans notre projet spécifique, nous avons entrepris la fabrication d'un dispositif SAW flexible, utilisant un substrat PVDF, dans l'installation de microtechnologie du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM). Ce capteur particulier, avec une largeur de doigt (a) de 125 μm, une longueur d'onde de 500 μm et une vitesse acoustique de 2500 m/s, présente une grande sensibilité et offre une large bande passante, comme l'illustre clairement la figure 1c. Par conséquent, notre capteur atteint une fréquence de résonance de 5 MHz. En outre, la catégorisation des ondes acoustiques de surface (SAW) en modes distincts, tels que les ondes de Rayleigh, les ondes de Lamb (cas particulier des ondes de surface) ou les ondes de Love, dépend des propriétés du substrat piézoélectrique, en particulier de son épaisseur, désignée par "e" (où  $e < \lambda$ ).

### **3.4.2 Acquisition des données**

Dans cette partie, l'acquisition des données a été réalisée grâce à un programme Python contrôlant à distance une carte d'acquisition Piscocope 4262 comme illustrée dans la figure 3.18, réglée avec une fréquence d'échantillonnage de 100 KHz sur une dynamique de 16 bits. Les acquisitions ont été réalisées en mode streaming pour une durée de 21 secondes.



**Figure 3.18.** La carte d'acquisition Picoscope 4262

### 3.4.3 Dispositif expérimental

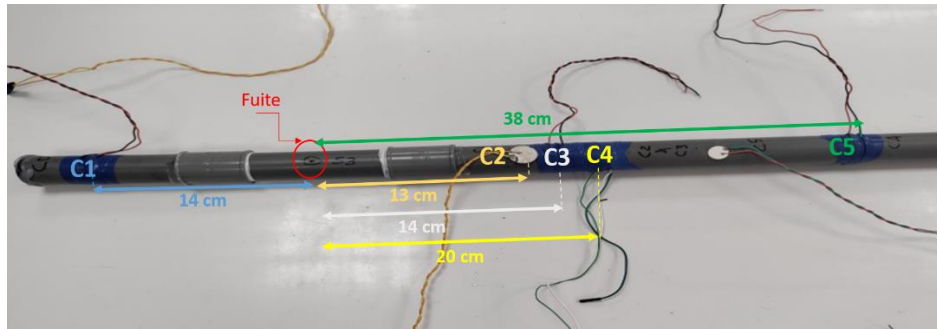
La figure 3.19 montre le dispositif expérimental. Il se compose d'un tuyau en plastique de chlorure de polyvinyle (PVC) d'un diamètre extérieur de 32 mm et d'une épaisseur de 3 mm qui est relié au réseau d'alimentation en eau. Des capteurs ont été installés à la surface du tuyau, de part et d'autre de la fuite. Les tests ont été effectués à trois débits différents, allant de faibles à élevés. Pour estimer la signature de tension de la conduite saine, la sortie des capteurs PVDF a été enregistrée pendant cinq minutes à chaque débit, la sortie des capteurs PVDF a été enregistrée. Les tests ont été répétés trois fois pour obtenir des données statistiquement significatives et réduire l'influence des valeurs aberrantes sporadiques.

Quatre trous de dimensions et de formes différentes ont été percés dans quatre échantillons différents de tuyaux en PVC pour simuler différentes conditions de fuite. Des essais ont été réalisés pour chaque fuite et chaque condition de capteur, 180 tests au total (5 conditions de capteur, 4 tailles de fuites, 3 débits et chaque test a été répété 3 fois).

Les différents capteurs utilisés pour la détection des rayonnements acoustiques sont présentés dans le Tableau 3.2 avec leurs acronymes correspondants.

**Tableau 3.2.** Les capteurs utilisés pour les mesures

Capteur	Type
C1	Capteur PVDF
C2	Capteur PZT
C3	Capteur PVDF
C4	Capteur SAW
C5	Capteur PVDF



**Figure 3.19.** Prototype de détection des fuites d'eau : Tuyau en PVC et capteurs

Nous avons utilisé plusieurs échantillons comportant des trous de tailles et de formes, créés à l'aide d'une perceuse ayant des forets de différentes dimensions. Des fuites artificielles de différentes dimensions et de formes différentes ont été introduites le long du tuyau afin d'examiner l'impact du diamètre et de la forme du trou sur le niveau d'amplitude et les gammes de fréquences du signal acoustique. Le tableau 3.3 et la figure 3.20 énumèrent les échantillons représentant les différentes tailles et formes des fissures, représentés par des chiffres de 1 à 4, par exemple, l'échantillon S1 correspond à une fuite de 1 mm.

**Tableau 3.3.** Dimensions des fissures

Echantillons	Formes et dimensions des fissures
S1	Diamètre : 1 mm
S2	Diamètre : 2 mm
S3	Petite ligne circonférentielle: 4 x 1 mm <sup>2</sup>
S4	Grande ligne circonférentielle : 10 x 1 mm <sup>2</sup>



**Figure 3.20.** Échantillons pour différentes fuites : S1(1 mm), S2(2 mm), S3(4 x 1 mm<sup>2</sup>), S4(10 x 1 mm<sup>2</sup>)

### 3.4.4 Prétraitement du signal

Le dispositif expérimental fournit des enregistrements acoustiques de 21 secondes. Ces



enregistrements sont découpés en séquences de 3 secondes. Afin de sélectionner le signal le moins bruyant et le moins perturbé parmi ces enregistrements sont découpés en séquences de 3 secondes. Afin de sélectionner le signal le moins bruyant et le moins perturbé parmi ces séquences, deux critères ont été pris en compte ; l'énergie totale et le coefficient sont calculés pour chaque séquence. La séquence présentant la meilleure planéité temporelle aux niveaux d'énergie les plus bas (dans une fourchette de 3 dB par rapport au minimum) sera alors la bonne pour représenter le signal acoustique au niveau de fuite correspondant.

Lorsque l'eau s'écoule dans les canalisations, la détection des fuites peut être difficile en raison des radiations acoustiques causées par l'écoulement de l'eau. En fait, ces radiations acoustiques peuvent souvent dépasser celles générées par les fuites réelles. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé la transformée de Fourier rapide (FFT) qui permet d'obtenir des informations quantitatives sur les signatures acoustiques des fuites dans les canalisations malgré la présence de radiations acoustiques induites par l'écoulement de l'eau.

Le fenêtrage de Blackman a été utilisé pour éviter les ondulations dans le domaine des fréquences, ce qui est plus pratique pour le traitement des signaux à large bande de traitement des signaux à large bande.

### **3.4.5 Résultats**

L'objectif de ce travail de recherche est de comparer la sensibilité de différents capteurs pour la détection des fuites dans les conduites d'eau en plastique.

Les résultats obtenus pour différents échantillons (différentes géométries et tailles de sources de fuites) sont présentés dans cette section.

Dans notre étude, nous avons considéré trois niveaux de débit de fuite d'eau, qui sont dans le tableau 3.4.

**Tableau 3.4.** Débit (F. R) admis par une fuite

Débites	S1	S2	S3	S4
F.R. 1	0,01 m <sup>3</sup> /h	0,02 m <sup>3</sup> /h	0,06 m <sup>3</sup> /h	0,08 m <sup>3</sup> /h
F.R. 2	0,05 m <sup>3</sup> /h	0,06 m <sup>3</sup> /h	0,1 m <sup>3</sup> /h	0,11 m <sup>3</sup> /h
F.R. 3	0,08 m <sup>3</sup> /h	0,1 m <sup>3</sup> /h	0,2 m <sup>3</sup> /h	0,22 m <sup>3</sup> /h

#### *3.4.5.1 Échantillons de défauts circulaires S1 et S2*

##### 3.4.5.1.1 Signatures acoustiques

###### 3.4.5.1.1.1 Mesure avec capteurs PVDF

Trois capteurs PVDF ont été utilisés dans cette étude : C1, C3 et C5. Les capteurs C1 et C3 sont positionnés à la même distance à droite et à gauche de la source de fuite (14 cm).

Ces capteurs captent les ondes acoustiques de surface générées par la fuite, ces ondes se propagent le long de la surface extérieure du matériau, en restant confinées à la région proche de la surface, et les convertit après en signaux électriques.

Les signaux électriques sont ensuite amplifiés, traités et analysés pour mettre en évidence les fréquences spécifiques associées aux ondes générées par les fuites.

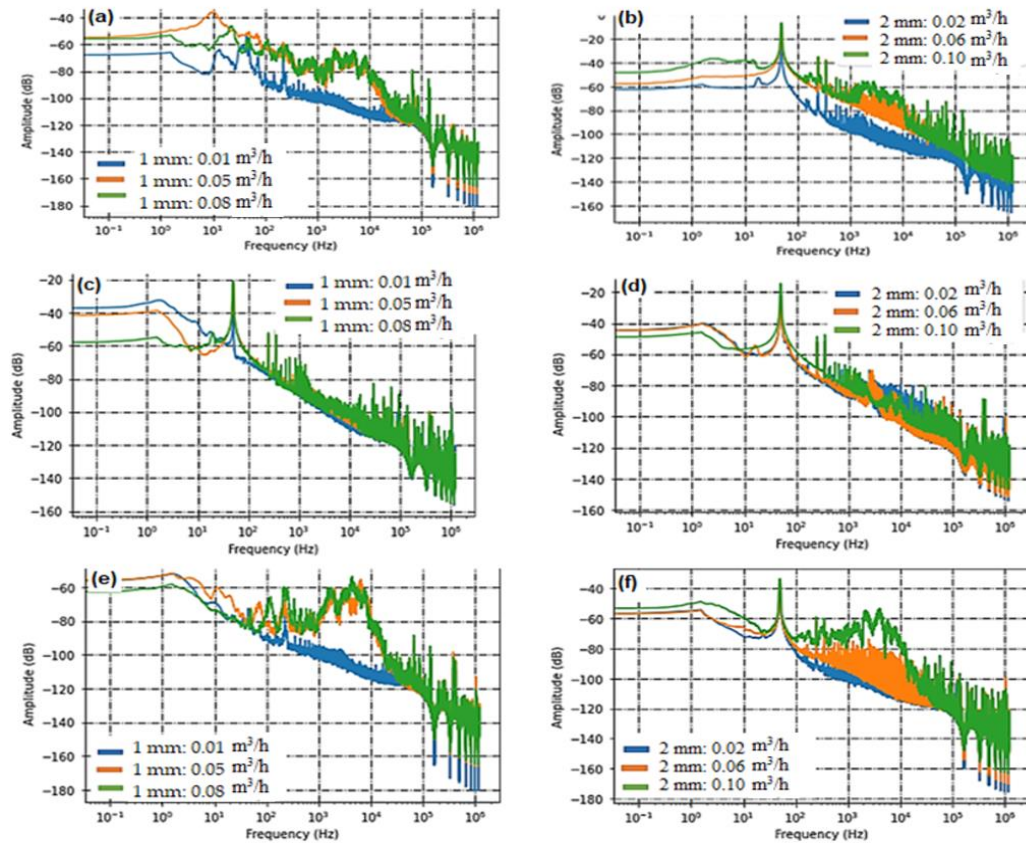
Une comparaison de leurs performances peut indiquer la directivité du défaut des capteurs par rapport aux nœuds de résonance dans les applications SHM.

La figure 3.21 montre que pour les deux trous de 1 et 2 mm de diamètre, la bande de fréquence de l'activité acoustique se situe dans la plage [80 Hz-20 kHz]. Les hautes fréquences disparaissent rapidement, comme le montre la figure 3.20.c et 3.20.d; la gamme de fréquences captée par le capteur PVDF C5 situé à 38 cm tombe à [80 Hz-2 kHz].

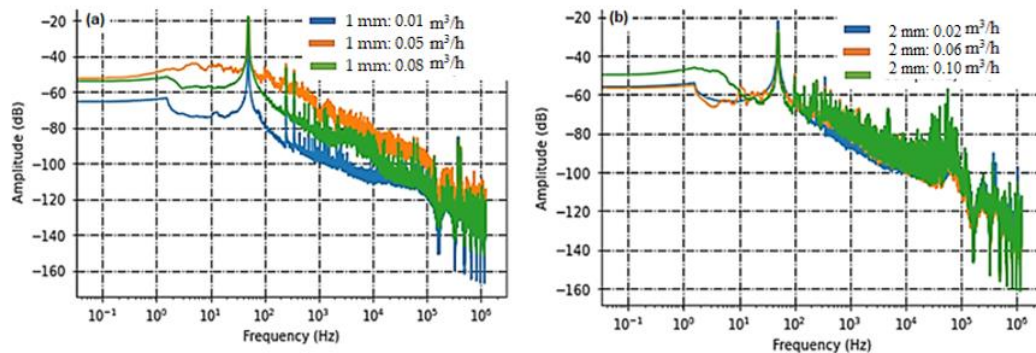
#### 3.4.5.1.1.2 Mesure avec le capteur PZT

Lorsqu'une fuite d'eau a lieu, elle produit des ondes acoustiques qui se propagent à travers l'épaisseur du matériau. Lorsque ces ondes atteignent le capteur, il réagit et génère des signaux électriques proportionnelles à la pression mécanique exercée sur lui, qui sont ensuite amplifiés, traités et analysés pour mettre en évidence les fréquences spécifiques associées aux ondes générées par les fuites.

La figure 3.22 montre l'intensité acoustique des trois échantillons testés avec des débits d'écoulement. L'analyse spectrale montre que la ligne de contact du capteur PZT ne permet pas une bonne détection. En effet, le disque en céramique PZT a été fixé avec une colle réversible (Salol) et a un contact axial avec le tuyau. Il sera donc principalement sensible aux modes axiaux.



**Figure 3.21.** Intensité acoustique mesurée avec les capteurs PVDF C3 (a et b), C5 (c et d) et C1 (e et f) pour des défauts de fuite de 1 et 2 mm de diamètre



**Figure 3.22.** Intensité acoustique mesurée avec le capteur PZT C2 sur des diamètres de fuite de 1 mm (a) et 2 mm (b)

### 3.4.5.1.1.3 Mesure avec le capteur SAW

Le capteur SAW, qui est sensible aux variations de la vitesse de propagation des ondes de surface, capte les ondes de surface générées par la fuite au fur et à mesure qu'elles se propagent et les convertit en signaux électriques.

Le capteur SAW est sensible aux basses fréquences à partir de 100 Hz, mais sa sensibilité à l'activité acoustique augmente dans la plage [1 kHz-20 kHz] qui correspond à la signature

acoustique capturée par les capteurs PVDF. (Voir Figure 3.23)

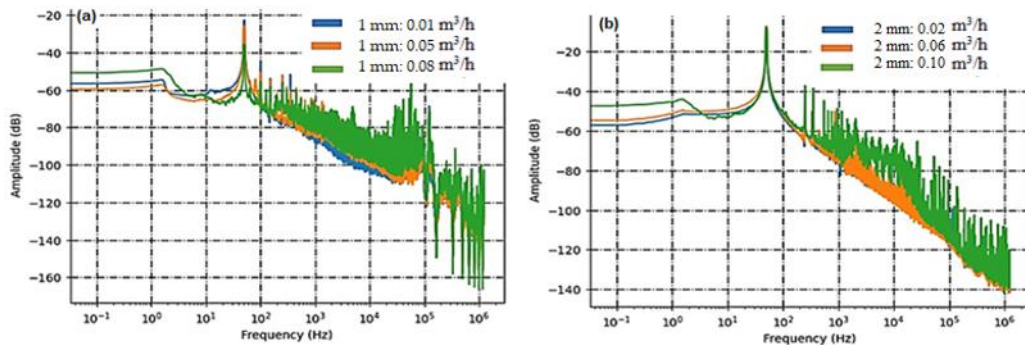
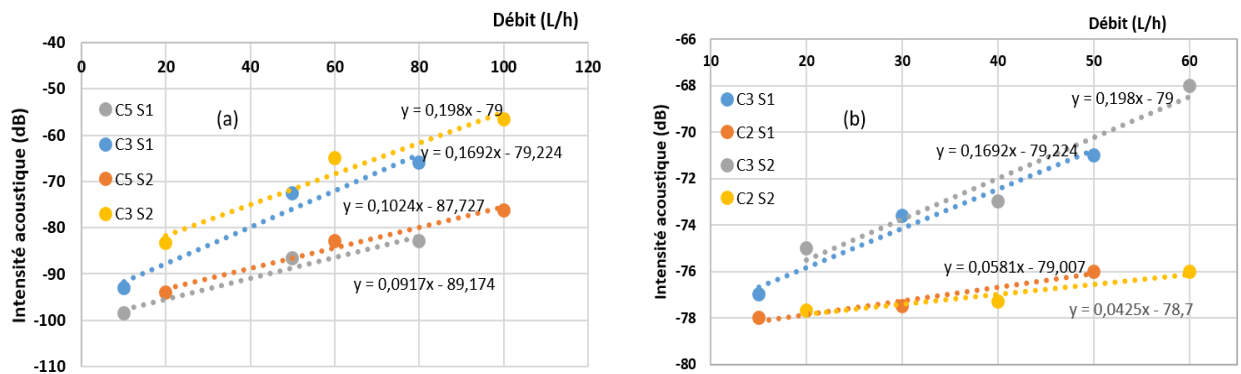
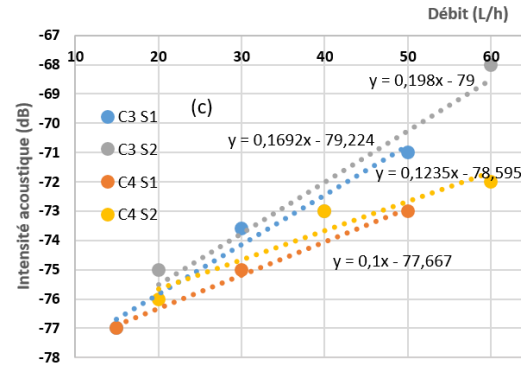


Figure 3.23. Intensité acoustique mesurée avec le capteur SAW C4 sur des diamètres de fuite de 1 mm (a) et 2 mm (b)

### 3.4.5.1.2 Comparaison des sensibilités des capteurs

La sensibilité des capteurs reflète leur capacité à percevoir et à réagir aux modifications du paramètre ou de la quantité observée. Essentiellement, la sensibilité quantifie à quel point la sortie d'un capteur se modifie en réponse à une altération spécifique de l'entrée. Les résultats de nos mesures, obtenus dans le spectre de fréquences allant de 80 Hz à 20 KHz, ont été résumés de manière concise et sont présentés dans les figures suivantes. Ces figures représentent l'intensité acoustique en fonction du débit pour chaque capteur. Cette méthode de présentation permet une évaluation visuelle directe et facilite la comparaison des réponses des capteurs dans des intervalles de débit variables.





**Figure 3.24.** Résumé de l'intensité acoustique en fonction du débit pour (a) : PVDF (C3, C5), (b) : SAW (C4) et (c) : capteurs PZT (C2)

La figure 3.24.a montre clairement que l'intensité acoustique, mesurée par les capteurs PVDF, augmente de manière directement proportionnelle au débit. Cette tendance constante se vérifie dans divers scénarios de fuite, ce qui indique que tous les capteurs sont sensibles à la détection des fuites. Cependant, il est important de noter que le rapport de proportionnalité diminue avec la distance en raison des effets d'atténuation. Lorsque l'énergie acoustique se déplace du capteur C3, situé à 14 cm, au capteur C5, situé à 38 cm, les ondes acoustiques perdent de l'énergie, ce qui rend la détection moins sensible.

Le tableau 3.5 nous permet de quantifier cette diminution de sensibilité sur la distance, en particulier de C3 à C5. La diminution calculée est d'environ 0,33 [dB/(L/h)]/m avec une marge d'erreur d'environ 12 %. Cette mesure offre des indications précieuses pour la conception d'un système industriel de surveillance passive pour la détection des fuites d'eau dans les habitations. En positionnant stratégiquement les capteurs, nous pouvons maintenir des performances optimales. Avec la mise en œuvre de systèmes de filtrage et d'amplification appropriés, il est possible de s'assurer que l'intensité acoustique reste dans une plage de 6 dB sur une distance de 12 mètres de la source de la fuite.

La figure 3.24.b met en évidence une caractéristique distincte: la relation entre l'intensité acoustique et le débit de fuite pour le capteur PZT ne présente pas la linéarité observée dans le capteur PVDF placé au même endroit. En outre, la courbe illustrant la tendance de l'intensité acoustique par rapport au débit de fuite présente un schéma non linéaire pour le capteur PZT. Cette non-linéarité peut contribuer de manière significative au défi que représente la détection des fuites diminue lorsque l'on utilise au capteur PZT. En outre, les données du tableau 3.6 montrent clairement que le capteur PZT est nettement moins sensible, avec une sensibilité de 0,12 dB/L/h pour S1 et de 0,13 dB/L/h pour S2, ce qui en fait le moins sensible des capteurs. En revanche, le capteur SAW présente une forte corrélation entre l'intensité acoustique et le

débit de fuite. Notamment, lorsque le capteur SAW est placé au même endroit qu'un capteur PVDF, il présente une sensibilité de 0,16 dB/L/h pour l'échantillon S1 et de 0,14 dB/L/h pour S2. En comparaison, le capteur SAW est 50 % moins sensible que les films PVDF placés au même endroit.

**Tableau 3.5.** Comparaison des sensibilités des capteurs PVDF placés à différentes positions C1, C3 et C5

	<b>C3</b>	<b>C5</b>	<b>C1</b>	
Sensibilité pour S1 (dB/L/h)	0,17	0,1	0,12	+/- 3%
Sensibilité pour S2 (dB/L/h)	0,2	0,11	0,17	+/- 3,5%

**Tableau 3.6.** Comparaison des sensibilités des capteurs PVDF, SAW et PZT placés dans la même position

	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C2</b>	<b>Incertitude</b>
Sensibilité pour S1 (dB/L/h)	0,17	0,11	0,1	+/- 3,5%
Sensibilité pour S2 (dB/L/h)	0,2	0,13	0,12	+/- 4,5%

#### 3.4.5.2 Défauts circonférentielles grandes et petites S3 et S4

##### 3.4.5.2.1 Signatures acoustiques

###### 3.4.5.2.1.1 Capteurs PVDF

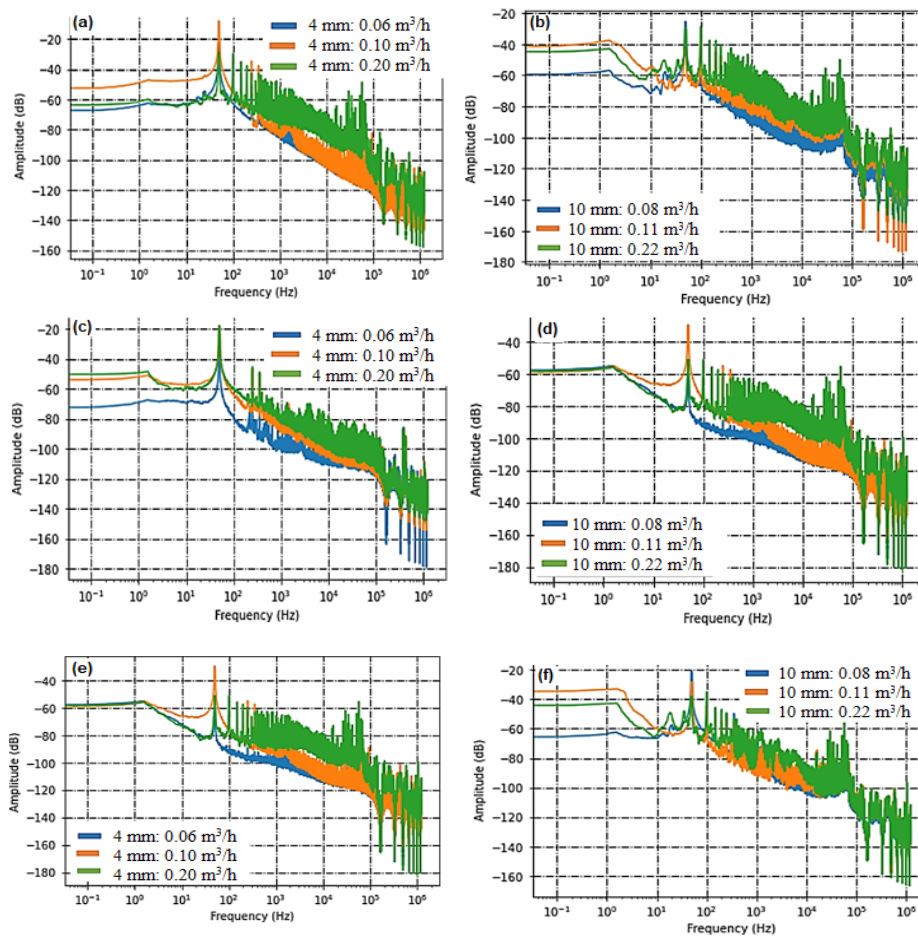
Les fentes conçues pour ces mesures sont de tailles de 4x1 mm<sup>2</sup> (S3) et de 10x1 mm<sup>2</sup> (S4) (Figure 3.25). La surface de fuite de la petite fente est 4 fois plus grande que le défaut circulaire de l'échantillon 1 et 2 fois plus grande que S2. Ceci explique les débits élevés observés et donc l'activité acoustique plus importante mesurée. Le capteur C5, qui était à peine capable de détecter les fuites générées par S1 et S2, est tout à fait capable de distinguer la signature acoustique générée par les fentes circonférentielles conçues. L'activité acoustique la plus importante a été générée dans la gamme de fréquences [500 Hz-10 kHz].

###### 3.4.5.2.2.1 Capteurs PZT

Malgré l'augmentation de l'intensité acoustique, le capteur PZT est à peine capable de détecter l'activité acoustique générée par les fentes. La figure 3.26 présente une comparaison de l'intensité acoustique pour les deux tailles de fentes avec différentes vitesses d'écoulement. L'analyse spectrale montre que les signaux de fuite enregistrés produisent généralement des radiations acoustiques dans une bande de fréquence [1 kHz-10 KHz].

3.4.5.2.1.3 Capteur SAW

La figure 3.27 présente les données traitées obtenues à partir des fuites détectées à l'aide du capteur à ondes acoustiques de surface (SAW). Comme nous l'avons observé précédemment avec les défauts circulaires, le capteur SAW s'avère être un candidat très efficace pour détecter les signatures de fuites pour différents débits. L'analyse des données montre clairement des modèles et des caractéristiques distinctes associés aux fuites détectées. Cela renforce encore la fiabilité et la précision du capteur SAW dans l'identification et la localisation des fuites dans le système testé.



**Figure 3.25.** Intensité acoustique mesurée avec les capteurs PVDF C3 (a et b), C5 (c et d) et C1 (e et f) sur un défaut d'étanchéité circconférentiel rectangulaire de largeur de 4 et 10 mm

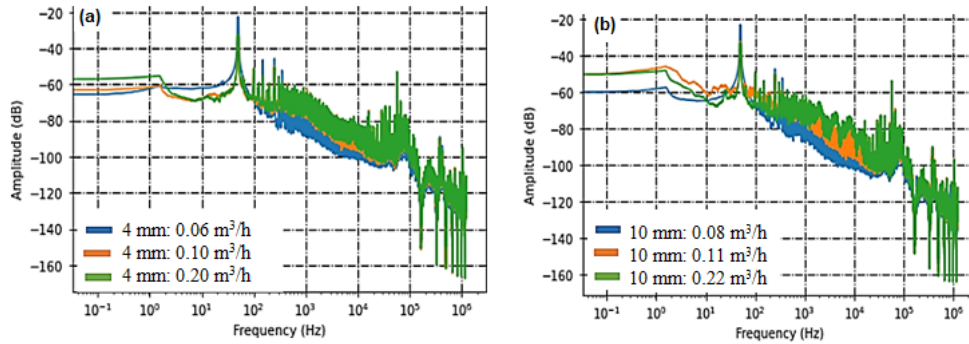


Figure 3.26. Intensité acoustique mesurée avec le capteur PZT C2 pour 2 défauts circonférentiels de largeurs différentes (a) : 4 mm et (b) : 10 mm

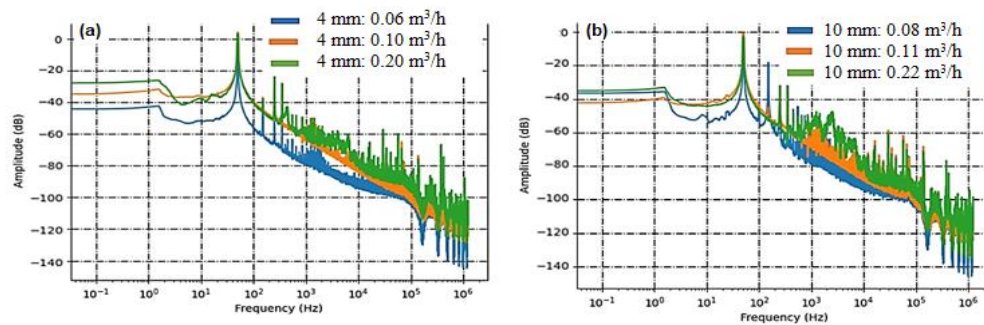


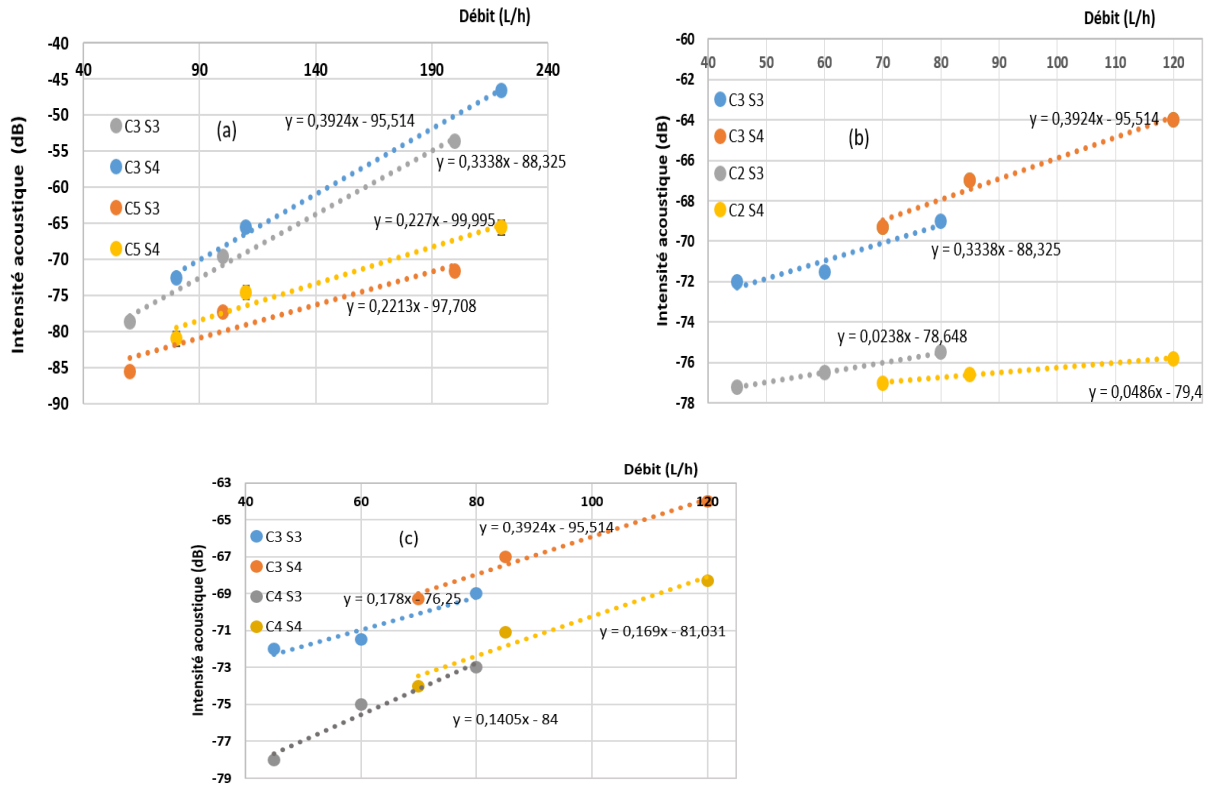
Figure 3.27. Intensité acoustique mesurée avec le capteur SAW C4 pour 2 défauts circonférentiels de différentes largeurs (a) : 4 mm et (b) : 10 mm

#### 3.4.5.2.2 Comparaison des performances des capteurs étudiés

Dans cette section, nous avons comparé les performances de trois capteurs différents (PVDF, PZT et SAW) pour la détection des fuites d'eau. La comparaison s'est appuyée sur une analyse complète de leurs capacités et de leurs caractéristiques. Les résultats ont été résumés dans un graphique de comparaison (Figure 3.28) et dans le tableau 3.7, qui donnent un aperçu clair des performances de chaque capteur.

Dans la figure 3.28.a, nous observons que la sensibilité des capteurs PVDF aux fuites augmente proportionnellement au débit, tous les capteurs présentent la même tendance dans différentes conditions de fuite. Le rapport de proportionnalité diminue en fonction de la distance en raison de l'atténuation ; l'énergie acoustique se propageant du capteur C3 positionné à 14 cm vers le capteur C5 positionné à 38 cm, les ondes acoustiques sont moins énergiques et permettent une détection moins sensible. Le tableau 3.8 permet de calculer la diminution de la sensibilité en fonction de la distance entre les sensibilités C3 et C5: nous obtenons une diminution de  $0,55 \text{ [dB/(L/h)]/m} \pm 9 \%$ .





**Figure 3.28.** Résumé de l'intensité acoustique en fonction du débit pour (a) : PVDF (C3, C5), (b) : SAW (C4) et (c) PZT (C2)

La figure 3.27 indique qu'il y a une certaine amélioration de la linéarité à mesure que le diamètre de la fuite augmente. Cependant, on peut clairement observer que la relation entre l'intensité acoustique et le débit de la fuite pour le capteur PZT ne présente pas une forte linéarité. L'absence d'une forte linéarité dans cette courbe peut être attribuée à divers facteurs, que nous examinerons plus en détail dans la section de discussion. En revanche, le capteur SAW présente une corrélation solide entre l'intensité acoustique et le débit de fuite, comme le montre la figure 3.27.c. Par conséquent, nous pouvons conclure que le capteur SAW conserve une sensibilité inférieure de 50 % à celle des films PVDF dans cette configuration, et que les capteurs SAW et PVDF restent plus sensibles que le PZT.

**Tableau 3.7.** Comparaison des sensibilités des capteurs PVDF placés à différentes positions C1, C3 et C5

	C3	C5	C1	Incertitude
Sensibilité pour S1 (dB/L/h)	0,33	0,18	0,3	+/- 4%
Sensibilité pour S2 (dB/L/h)	0,4	0,28	0,35	+/- 4,5%

**Tableau 3.8.** Comparaison des sensibilités des capteurs PVDF C3, SAW C4 et PZT C2 placés dans la même position

	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C2</b>	<b>Incertitude</b>
Sensibilité pour S1 (dB/L/h)	0,33	0,14	0,12	+/- 5%
Sensibilité pour S2 (dB/L/h)	0,4	0,16	0,13	+/- 5%

### 3.4.6 Discussions

Les fréquences inférieures à 100 Hz ne sont généralement pas affectées par les signaux de fuite analysés ici. Cela s'explique principalement par le fait qu'elles sont surtout influencées par le bruit ambiant et la fréquence de résonance longitudinale du tuyau en plastique. Cependant, les fréquences comprises entre 100 Hz et 10 KHz sont extrêmement affectées pour tous les types de fuites et de capteurs.

Il convient de souligner que les signaux acoustiques examinés dans cette étude sont principalement constitués de fréquences relativement élevées. Ces résultats s'alignent sur de nombreuses études dans la littérature, qui se sont concentrées sur la détection des signaux acoustiques à haute fréquence. Ces études utilisent souvent des capteurs d'émission acoustique qui fonctionnent généralement dans la gamme des MHz [193], [194]. Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que la taille de l'ouverture de la fuite est un facteur important dans la dissipation de l'intensité acoustique. Cependant, les petites fuites ont un impact minimal sur l'atténuation de l'intensité acoustique se propageant au-delà de l'ouverture de la fuite, car les petites fuites ont généralement une ouverture plus petite, ce qui limite l'écoulement de l'eau et les turbulences générées. Par conséquent, moins d'énergie est transférée depuis la fuite, ce qui conduit à la génération d'un signal acoustique plus faible.

Le capteur PZT, comparé au capteur PVDF et au capteur SAW avec un substrat PVDF, était moins sensible dans la détection des fuites lorsqu'il travaillait à des fréquences élevées, ce qui s'explique par le fait que les capteurs PZT ont généralement une plage de réponse en fréquence limitée par rapport aux capteurs PVDF et SAW. Les vibrations à haute fréquence causées par les fuites peuvent se situer en dehors de la plage effective du capteur PZT, ce qui réduit la sensibilité. En outre, les problèmes de compatibilité du capteur PZT avec la forme du tube peuvent affecter la précision des mesures. Si le capteur n'est pas positionné de manière optimale ou n'est pas en contact direct avec la zone de la fuite, il peut ne pas capter avec précision l'énergie acoustique générée par la fuite, ce qui entraîne des écarts par rapport à la linéarité. Enfin, d'autres facteurs environnementaux, tels que le bruit de fond et les variations de la dynamique de l'écoulement dans la conduite, peuvent affecter la réponse du capteur PZT et

d'autres capteurs. Ce phénomène peut également affecter les capacités de détection d'un capteur PVDF situé loin de la fuite. Par conséquent, les capteurs SAW et PVDF flexibles ont une meilleure réponse pour détecter les fuites dans les canalisations en PVC. Par conséquent, il est clair que plusieurs paramètres peuvent affecter la détection des fuites dans les canalisations :

✓ **Effet du matériau du tuyau:** La détection dans les tuyaux en plastique est plus difficile que dans les tuyaux métalliques en raison de la forte atténuation de la propagation acoustique dans les tuyaux en plastique.

✓ **Effet de la distance entre la fissure et le capteur:** On peut remarquer que plus le capteur s'éloigne de la position de la fuite, moins il détecte de bruit provenant de la fuite.

✓ **Effet du diamètre du tuyau:** Le diamètre du tuyau peut influencer plusieurs facteurs liés à la détection des fuites, notamment l'ampleur du signal de fuite, la vitesse de propagation de la fuite et la sensibilité de la méthode de détection.

✓ **Effet du type de fuite:** La taille et la forme de la fuite affectent la gamme de fréquences des signaux de fuite.

✓ **Effet du débit de la fuite:** Le débit de la fuite a été augmenté en augmentant la taille de la fuite. En outre, pour toutes les mesures, nous remarquons que le débit et l'amplitude des signaux de fuite sont proportionnels; l'augmentation du débit accroît l'amplitude du signal.

Les résultats obtenus avec le capteur SAW pour la détection des fuites sont actuellement au stade préliminaire. Néanmoins, il convient de souligner que le capteur affiche une sensibilité prometteuse en matière de détection des fuites, comparable à celle du film PVDF. Une caractéristique avantageuse du capteur SAW réside dans sa capacité à agir comme un filtre intégré, éliminant ainsi le besoin d'un composant de filtrage supplémentaire. Cette capacité découle de la sélectivité et de la sensibilité inhérentes des capteurs SAW aux modifications de l'environnement de détection. En pratique, cela signifie qu'ils peuvent différencier efficacement divers types de signaux et ne détecter que ceux qui sont pertinents pour le système de détection des fuites. D'autres améliorations du processus d'optimisation contribueront à accroître les performances du capteur, le rendant encore plus adapté aux applications avancées de détection des fuites.

### **3.5 Conclusions**

En conclusion, dans ce chapitre, nous nous sommes concentrée sur la détection des fuites dans les conduites d'eau en utilisant la surveillance de l'intensité acoustique grâce à la méthode de l'écoute passive. Initialement, nous avons présenté des résultats préliminaires de la détection dans les tubes métalliques et plastiques. Après avoir analysé ces résultats, nous avons orienté

notre attention vers la détection dans des tuyaux en plastique PVC.

Notre recherche a offert une analyse de la sensibilité de différents types de capteurs, à savoir les capteurs PZT, PVDF et SAW, lorsqu'ils sont appliqués aux mêmes tuyaux et aux mêmes conditions. En identifiant les forces et les faiblesses de chaque capteur dans des situations spécifiques, notre recherche constitue une ressource précieuse pour les recherches impliquées dans le développement de systèmes de détection de fuites, en notant que dans la littérature, il n'existe pas encore une évaluation de l'efficacité des capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) pour la détection des fuites d'eau. De plus, en mettant en évidence les performances des capteurs en fonction des formes et positions de fuites, notre étude permettra une sélection avisée des capteurs en fonction des besoins de chaque application.

Les résultats mettent en évidence la faisabilité de l'identification acoustique des fuites dans les canalisations grâce aux mesures des capteurs. La gamme de fréquences des signaux acoustiques émis par les fuites peut varier en fonction des dimensions et des formes de ces dernières. Tous les capteurs utilisés dans cette étude ont montré leur capacité à détecter les fuites, bien que le capteur PZT ait rencontré des difficultés avec les fuites légères en raison de sa plage de réponse en fréquence limitée et de son incompatibilité avec la forme des tubes. Tandis que, le capteur PVDF et le capteur SAW flexible ont montré des performances supérieures dans la détection des fuites. Nous avons donc remarqué que l'utilisation du capteur SAW pour la détection des fuites présente des avantages évidents. Contrairement aux autres capteurs, le SAW ne nécessite pas de filtre supplémentaire lors des tests et offre une sensibilité sur une large plage de fréquences. Toutefois, une optimisation plus avancée est nécessaire pour augmenter sa sensibilité. Il convient toutefois de reconnaître certaines limites de notre étude. Tout d'abord, le dispositif expérimental a été conçu pour simuler des conditions de détection de fuites contrôlées dans un contexte spécifique, ce qui signifie qu'il pourrait ne pas refléter toutes les types et formes des réseaux de canalisations les plus complexes, notamment ceux enterrés. De plus, nous n'avons pas pris en compte la composition des fluides transportés dans les canalisations qui peuvent influencer les performances des capteurs.

Suite aux résultats obtenus sur la détection des fuites d'eau par les capteurs PZT, PVDF, et SAW dans le présent chapitre, nous avons décidé d'explorer une nouvelle application des capteurs PZT et PVDF pour mieux comprendre leurs réponses et performances dans le domaine du CND et du Contrôle de Santé par Acoustique Non Linéaire en Résonance des structures de type mât d'éclairage public. Cette étude marque une continuité de notre recherche, démontrant la polyvalence de ces capteurs dans des applications variées, de la détection de fuites d'eau à des

applications novatrices de surveillance et de diagnostic structurel.

# Chapitre 4 : Contrôle Non destructif et Contrôle de Santé par Acoustique Non Linéaire en Résonance des structures par capteurs acoustique PZT et PVDF

## 4.1 Introduction

Le contrôle non destructif (CND) est un sujet vaste et pluridisciplinaire qui joue un rôle important dans la fiabilité et la durabilité des structures. Les CND permettent de détecter et caractériser les défauts dans les matériaux et des structures. Ils sont particulièrement important dans les secteurs où la sécurité est critique, tels que l'aéronautique, l'astronautique, l'énergie nucléaire, le génie civil et la construction d'infrastructures.

L'Evaluation Non Destructive (END) est un terme souvent utilisé de manière indistincte avec les méthodes de CND, bien qu'elle se focalise techniquement sur les mesures quantitatives. Contrairement au CND, qui a pour objectif la détection des défauts, et leur caractérisation. L'END contient ces aspects (taille, forme et orientation des défauts) mais a également pour objectif de caractériser les propriétés des matériaux (élasticité, viscosité, porosité) et d'autres caractéristiques physiques. Ces mesures peuvent être utilisées à des fins de contrôle.

Le contrôle de l'état de santé des structures ou Structural Health Monitoring (SHM) permet d'identifier les endommagements des matériaux et des structures et de surveiller en temps réel l'évolution de ces endommagements à travers l'utilisation de capteurs physiques adaptés qui peuvent être intégrés aux structures. Les endommagements sont définis comme étant des altérations des propriétés physiques et mécaniques d'un matériau. Ils sont définis comme des altérations des propriétés matérielles et géométriques, y compris des changements dans les conditions limites et la connectivité, ayant un effet néfaste sur les performances. Le but est de contrôler l'état de santé de la structure, la gravité des défauts et leur impact sur la santé de la structure à réaliser sa fonction et sur sa durée de vie.

Le SHM peut être assuré par une variété de capteurs et d'appareils, impliquant des méthodes de CND et d'END. Parmi les méthodes prometteuses émergentes, on peut distinguer les méthodes acoustiques non linéaires, que nous allons étudier plus en détail dans ce quatrième chapitre, en mettant l'accent sur la spectroscopie acoustique en résonance non linéaire, que nous allons appliquer pour la 1<sup>ère</sup> fois selon la littérature ouverte à l'évaluation de la stabilité mécanique de structures de type mâts d'éclairage publique.

Les structures de type mât d'éclairage public, telles que les candélabres, jouent un rôle essentiel dans le système d'éclairage public. Outre leur fonction d'éclairage, ils sont aussi d'une grande utilité en tant que support de certains dispositifs (relais téléphonique, caméras,...). Les conditions auxquelles peuvent être exposées ces structures peuvent conduire à leur dégradation mettant en cause leur fonctionnement et la sécurité des habitants. Il est donc essentiel de diagnostiquer et de surveiller leur état, afin de cibler au mieux les opérations de maintenance et de renouvellement. Différents facteurs peuvent accélérer la détérioration des candélabres, tels que la mauvaise qualité des matériaux, la corrosion rapide, les charges mécaniques et les facteurs environnementaux comme les conditions climatiques, en particulier les vents violents dans les zones les plus exposées.

Il existe deux approches principales actuellement utilisées sur le terrain pour vérifier la stabilité des mâts d'éclairage public: l'approche statique et l'approche dynamique.

La première consiste à appliquer progressivement une force statique horizontale à une hauteur donnée sur le mât supportant la lanterne, et à mesurer en même temps le déplacement d'un point du mât placé en général à une hauteur différente. Ces principes sont définis dans la note n°132 du SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leur aménagement) de juin 2009, révisée en décembre 2011 [188], [195].

Les méthodes dynamiques sont fondées sur l'analyse des vibrations de la structure. Une première méthode implique la soumission du mât à une charge statique, très rapidement relâchée, ce qui a pour résultat de faire vibrer la structure librement. Le test produit une oscillation amortie qui peut être exploitée pour identifier les fréquences naturelles et les caractéristiques d'amortissement du mât. Celles-ci permettent donner des informations sur la stabilité et l'état de santé de la structure [190].

Le caractère non destructif n'est pas assuré pour ces techniques car l'application d'une force statique peut endommager le mât, voire conduire à sa rupture pendant l'essai. Afin de prévenir tous risques pour les personnes et les biens pendant l'essai, il convient d'installer un système de retenue en cas de rupture.

Dans le cadre des approches non destructives, citons la méthode dynamique, proposée par la société REILUX qui fait vibrer la structure par la fixation d'une masselotte en rotation à une hauteur donnée du mât. Ce mouvement de rotation produit un effet dynamique vibratoire qui se reflète dans les 360° de la circonférence de la structure, sur toute sa hauteur, jusqu'à ce que la structure atteigne sa fréquence propre sans qu'aucune force horizontale ou de coupe ne soit imposée. Les déplacements du mât sont mesurés grâce à deux lasers fixés sur la structure

enregistrée par une caméra. Ce dispositif permet d'inspecter tous les types de structures de type mât et de caractériser de façon non destructive leur de stabilité.

Dans le cadre de notre travail, notre contribution consiste à explorer les potentialité d'une méthode dynamique non destructive novatrice émergente, la méthode Acoustique Non Linéaire. Cette approche pourraient être plus sensibles pour le CND des mât d'éclairage publique. Outre la faisabilité de la méthode sur ces structures, nous comparons en outre pour cette application les performances de deux types de capteurs, l'un PZT et l'autre PVDF. La méthode concernée est la méthode NLRAS (NonLinear Resonance Acoustic Spectroscopy), très prometteuse et jamais testée sur des structures de type mât. Dans ce but nous utilisons un modèle de mât réduit, réalisé pour cette étude et composé d'un tube métallique creux fixé à une plaque métallique par quatre écrous (Figure 4.1).

## **4.2 Contexte**

### **4.2.1 Acoustique Non-Linéaire**

#### *4.2.1.1 Le comportement acoustique non linéaire*

Les différentes méthodes de contrôle et d'évaluation non destructifs et de surveillance continue des structures (SHM) [196] sont généralement basées sur des approches linéaires, dans le domaine de l'acoustique ou de la physique en général (électrique, mécanique et thermique). Cependant, dans certaines situations, l'hypothèse de linéarité ne peut plus être considérée comme valide. Dans les matériaux homogènes (cristaux), les non-linéarités acoustiques classiques sont faibles et principalement dues à l'anharmonicité du potentiel interatomique. Elles sont d'autant plus prononcées dans les matériaux inhomogènes, où elles sont causées par la nature hétérogène même du milieu, interfaces, gradient de propriétés mécaniques...

La première situation, celle de l'élasticité non linéaire classique à l'échelle atomique, est souvent utilisée pour décrire le comportement non linéaire des fluides et des matériaux homogènes tels que les monocristaux, et est définie par la théorie de Landau. Cette dernière repose sur le développement de l'énergie de déformation élastique en puissances du tenseur des déformations. Les coefficients d'expansion correspondent aux composantes du tenseur élastique du deuxième ordre et du tenseur élastique du troisième ordre, respectivement. Pour les matériaux isotropes, la théorie se présente sous la forme suivante, où  $K_0$  le module d'Young,  $\beta$  et  $\delta$  représentent respectivement les constants élastiques du deuxième et du troisième ordre [197].



$$\begin{array}{c}
 \text{Elasticité linéaire} \quad \text{Elasticité non linéaire} \\
 \begin{array}{c}
 \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---} \\
 \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---} \\
 \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---}
 \end{array} \\
 K(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = K_0(1 + \beta\varepsilon(t) + \delta\varepsilon^2(t) + \dots) \quad (1)
 \end{array}$$

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses études ont été consacrées au comportement acoustique non linéaire des matériaux inhomogènes, présentant des discontinuités à plusieurs échelles, microscopique, mésoscopique et macroscopique. Le terme d'inhomogénéité est souvent utilisé pour décrire un milieu contenant des éléments mécaniques comme les grains, les joints de grains, les fissures, les pores et les interfaces, avec une échelle spatiale plus grande que l'espace inter-atomique, mais généralement plus petite que les longueurs d'onde acoustiques concernées. Ainsi le comportement des matériaux non linéaires a été étudié dans de nombreux travaux de recherche. À de faibles amplitudes de déformation (de l'ordre de  $10^{-3}$  et moins), ces matériaux se plient à la théorie classique de Landau. Cependant, à des amplitudes de déformation plus élevée (de l'ordre de  $10^{-3}$  et plus), de multiples observations expérimentales indiquent que la théorie classique ne décrit plus leur comportement élastique acoustique. À ces niveaux de déformation, les fortes non-linéarités observées sont dues aux propriétés élastiques contrastées des constituants du matériau, aux mouvements de glissement, aux déplacements aux interfaces, et à l'ouverture et à la fermeture de microfissures lorsqu'elles sont présentes dans le matériau ou la structure. Les propriétés des ondes à un endroit donné sont alors fonction de l'amplitude de la source d'excitation, avec éventuellement un effet de mémoire hystérétique. Une théorie du champ moyen, établie par McCall et Guyer, a été proposée pour étudier le comportement quasi-statique et dynamique de ces matériaux [198]. Ces auteurs ont intégré le principe de l'hystérésis dans l'équation d'état, ce qui permet de décrire le comportement élastique non linéaire avec un effet de mémoire en rajoutant un paramètre hystérétique  $\alpha$  à la loi de Hooke.

$$\begin{array}{c}
 \text{Elasticité linéaire} \quad \text{Elasticité non linéaire} \quad \text{Effet hystérétique} \\
 \begin{array}{c}
 \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---} \\
 \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---} \\
 \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---} \text{---} \uparrow \text{---}
 \end{array} \\
 K(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = K_0((1 + \beta\varepsilon(t) + \delta\varepsilon^2(t) + \dots) + \alpha(\beta\varepsilon + \text{sign}(\dot{\varepsilon}))) \quad (2)
 \end{array}$$

Le comportement acoustique non linéaire prend de nombreuses formes, notamment la dynamique lente, la dynamique rapide, la génération d'harmoniques, et l'interaction acoustoélastique.

#### *4.2.1.2 Modulation non-linéaire de fréquences ou interaction paramétrique, l'interaction acoustoélastique*

L'interaction paramétrique, aussi appelée modulation de fréquence non linéaire ou acousto-élasticité, est un phénomène qui survient entre deux ondes produites en même temps dans un matériau non linéaire. Ces ondes interagissent: la première est une onde de sonde à haute fréquence ( $f_1$ ), alors que la deuxième est une onde à plus faible fréquence ( $f_2$ ). Les non-linéarités locales dans la microstructure du matériau conduisent à des composantes d'intermodulation dans le spectre de fréquences. Des phénomènes à basse fréquence et à forte amplitude déclenchent la non-linéarité et modifient l'amplitude de la composante à haute fréquence (la sonde). Le spectre de l'onde comprend des composantes de fréquence provenant de la somme ( $f_+ = f_1 + f_2$ ) et de la différence ( $f_- = f_1 - f_2$ ) des fréquences de ces deux ondes.

Lorsque l'interaction se réalise entre une déformation élastique statique et une onde acoustique, on parle précisément d'acousto-élasticité. Ce phénomène offre des perspectives prometteuses pour la caractérisation et l'étude des propriétés non linéaires des matériaux, et est appliqué dans divers secteurs de la science des matériaux et de l'acoustique.

#### *4.2.1.3. La génération d'harmoniques*

Dans un environnement non linéaire, la génération d'harmoniques est provoquée par une vitesse de propagation hétérogène, conduisant à une déformation de l'onde au cours du temps. Cette déformation entraîne une apparition directe de composantes de fréquence, composées de plusieurs harmoniques de la fréquence fondamentale de l'onde émise. Ces harmoniques sont générées au détriment de la fréquence fondamentale.

Du fait de la conservation de l'énergie pendant la propagation, les perturbations subies par l'onde s'accumulent, entraînant un transfert accru d'énergie entre la fréquence fondamentale et les fréquences harmoniques. Les fréquences harmoniques montrent une atténuation plus marquée que la fréquence fondamentale. Par conséquent, une onde distordue par des effets non linéaires, dont le contenu spectral est plus dense en harmoniques, perd davantage d'énergie qu'une onde non distordue.

#### *4.2.1.4 Dynamique rapide*

La dynamique rapide se produit lorsque le matériau subit des conditions transitoires ou des ondes permanentes avec une excitation croissante. Ce phénomène conduit à une baisse de la fréquence de résonance, du module d'élasticité et du facteur de qualité  $Q$  en fonction du niveau d'excitation. Ce phénomène révèle un adoucissement du matériau soumis à des niveaux d'excitation élevés, qui est toutefois réversible, le matériau retournant à son état initial dès que

l'excitation prend fin.

#### *4.2.1.5 Dynamique lente*

La dynamique lente désigne une phase de relaxation du matériau dans laquelle le module d'élasticité et l'amortissement reviennent logarithmiquement à leurs niveaux initiaux après que le matériau a subi une déformation dynamique de grande amplitude, comme c'est le cas dans une expérience de conditionnement par dynamique rapide. La durée du conditionnement peut varier de quelques secondes à quelques minutes, alors que la relaxation peut prendre beaucoup plus de temps, entre quelques dizaines de minutes et quelques jours, en fonction de la configuration.

Dans le cadre du modèle non linéaire hystérétique et de la technique acoustique non linéaire spectroscopique pour la caractérisation des défauts, deux paramètres non linéaires hystérétiques relatifs au paramètre  $\alpha$ , au module d'élasticité et à l'amortissement sont définis. Le premier est le décalage de la fréquence de résonance ( $\Delta f$ ), qui varie en fonction du niveau de déformation et traduit la différence entre la fréquence de résonance obtenue à un faible niveau d'excitation ( $f_0$ ) et celle obtenue à un niveau d'excitation donné ( $f_i$ ). Le second paramètre correspond à la variation du facteur de qualité ( $\Delta Q$ ), qui est calculée à partir des valeurs du facteur de qualité à un niveau d'excitation faible ( $Q_0$ ) et du facteur de qualité à un niveau d'excitation donné ( $Q_i$ ), mesurées à -3 dB de part et d'autre de la fréquence de résonance.

Ces deux paramètres,  $\Delta f$  et  $\Delta Q$ , seront contrôlés dans le cadre de notre étude sur une structure de type mât d'éclairage public. Nous effectuerons des essais de dynamique rapide et de dynamique lente en utilisant la méthode de résonance pour déterminer le niveau d'endommagement des structures considérées. En surveillant ces paramètres, nous serons en mesure de mieux comprendre l'évolution de l'endommagement de ces matériaux soumis à différents niveaux d'excitation, et de ce fait, de mieux évaluer leur durabilité et leurs caractéristiques de fonctionnement.

Le méthodologie expérimentale utilisée dans ce travail a été mise au point par O. Achouham dans le cadre de sa thèse en cours de réalisation [199]. Nous l'avons appliquée à un modèle réduit du mât d'éclairage instrumenté par capteurs acoustiques réalisé pour cette étude. Ce modèle réduit est conçu pour se rapprocher des mâts d'éclairage public réels, comme le montre la figure 4.1. Le tube est ancré à la plaque par un assemblage boulonné, et les conditions de l'ancrage sont progressivement dégradées par le desserrage d'un écrou sur l'assemblage.

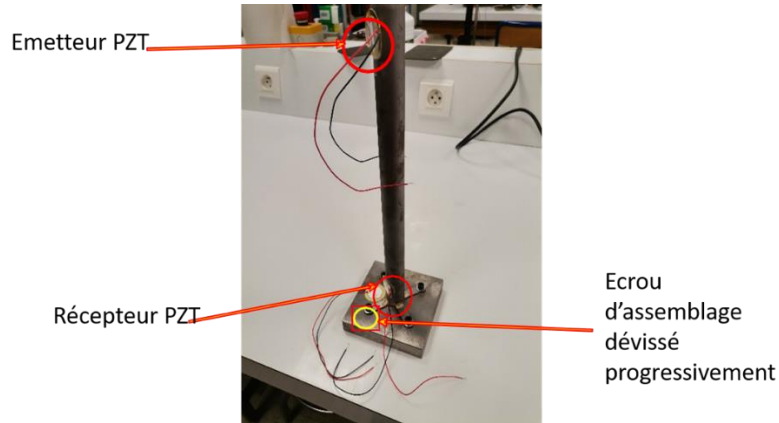


Figure 4.1. Modèle d'assemblage boulonné entre un tube creux et une plaque métallique

Le système d'acquisition [199] est schématisé à la figure 4.2. Il comprend une carte de génération et d'acquisition de signaux "TiePie", un amplificateur de puissance à haute tension et à large bande passante WMA-300 et des transducteurs piézoélectriques utilisés à la fois pour la transmission et la réception des signaux. Deux différents types de transducteurs piézoélectriques sont utilisés : l'un pour l'émission et l'autre pour la réception. Ces capteurs sont fixés à la structure. Les deux types des capteurs que nous avons utilisés sont des capteurs céramique PZT pour l'excitation, nous comparons en réception un capteur PZT à un et un capteur polymère PVDF en termes de performance.

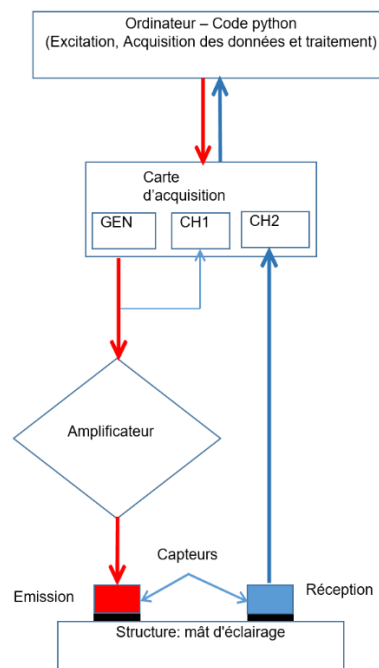


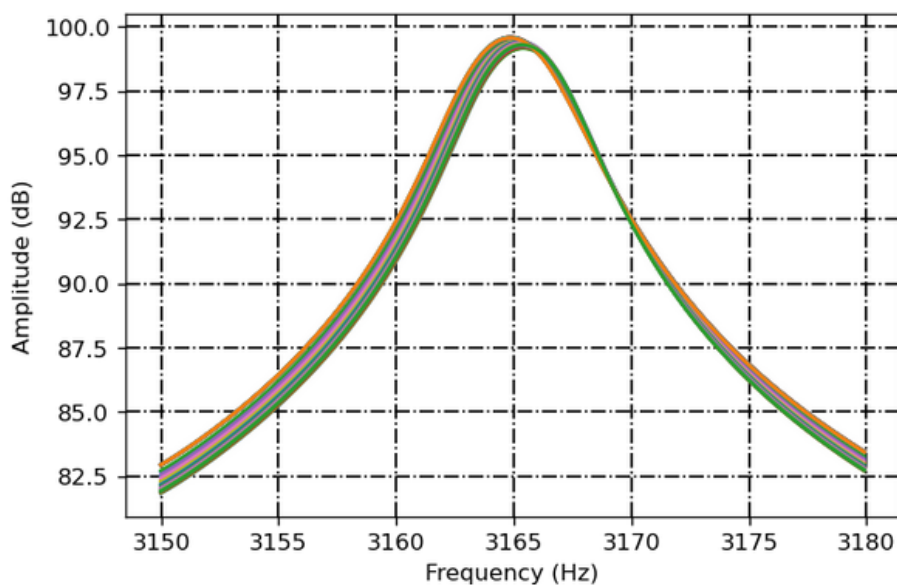
Figure 4.2. Dispositif expérimental de la méthode NLRAS [199]

### 4.3 Caractérisation des conditions d’ancrage d’une structure de type mât par la méthode NLRAS

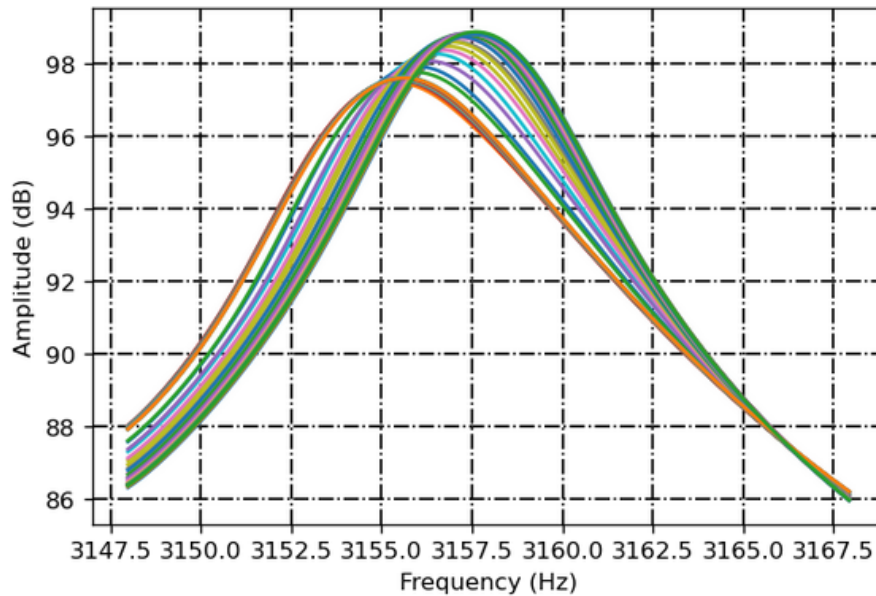
#### 4.3.1 Capteur PZT pour la réception

Nous avons tout d’abord testé les performances du capteur POZT en réception et présentons les résultats correspondant. Cette étude porte sur deux situations différentes. Dans un premier temps, nous avons appliqué la méthode NLRAS quand les quatre écrous sont serrés au maximum et au même niveau. Puis, nous avons étudié l’assemblage en desserrant l’un des écrous à 90° du serrage initial maximum.

Les figures 4.3 et 4.4 montrent les effets du desserrage sur des courbes de résonance. Nous pouvons observer un effet notable de ce desserrage sur les courbes de résonance notamment l’augmentation du décalage fréquentiel, ainsi que l’atténuation avec l’augmentation du niveau d’excitation dans la phase d’augmentation progressive du niveau d’excitation acoustique (dynamique rapide). Quand le niveau d’excitation est progressivement remis à 0 (dynamique lente), la courbe de résonance revient à son état initial ce qui prouve la réversibilité de l’essai qui dépend du niveau de serrage.



**Figure 4.3.** Courbes de résonance du premier niveau correspondant aux vibrations du mode de résonance pour l’assemblage Tube creux et plaque métallique



**Figure 4.4.** Courbes de résonance du deuxième niveau correspondant aux desserrage de l'écrou de 90°

#### 4.3.1.1 Dynamique lente, dynamique rapide

Les figures 4.3 et 4.4 montrent les résultats du décalage de fréquence en dynamique lente et rapide respectivement. La figure 4.3 illustre le cas où les quatre écrous sont serrés, présentant une faible non-linéarité attesté par un très faible décalage de fréquence. Lorsque l'un des écrous est desserré, nous observons à la figure 4.4 un décalage fréquentiel significatif, ce qui indique la sensibilité de la méthode NLRAS utilisant un capteur PZT en réception, aux conditions de fixation par le biais du taux de desserrage de l'assemblage boulonné.

#### 4.3.2 Capteur PVDF pour la réception

Les résultats obtenus en termes de décalage fréquentiel pour les courbes de réception du capteur PVDF sont illustrés dans la figure suivante. Nous observons comme indiqué sur la figure 4.5 une très faible non-linéarité, lorsque tous les écrous sont serrés au maximum. Lorsque l'un des écrous est desserré à 90° de sa position de serrage maximum, nous observons (figure 4.6) un décalage de fréquence significatif avec un élargissement des courbes de résonance montrant l'augmentation de la dissipation liée au desserrage.

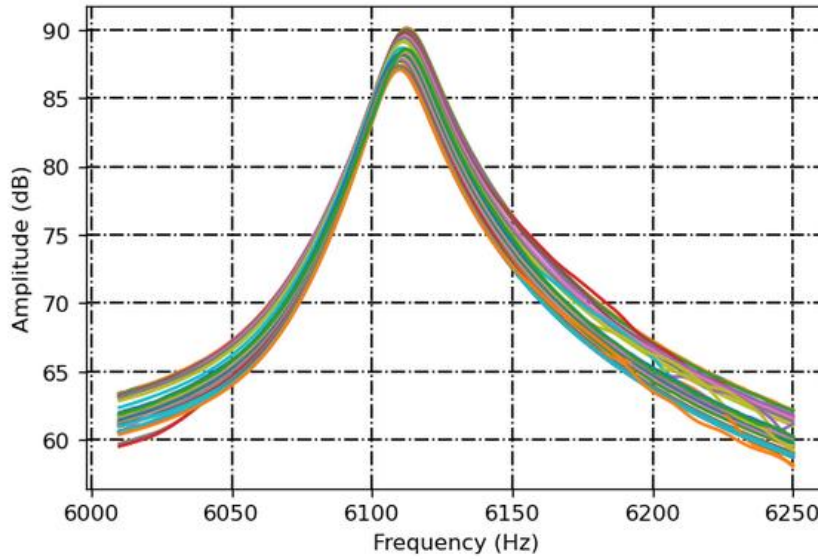


Figure 4.5. Courbes de résonance correspondant au premier niveau

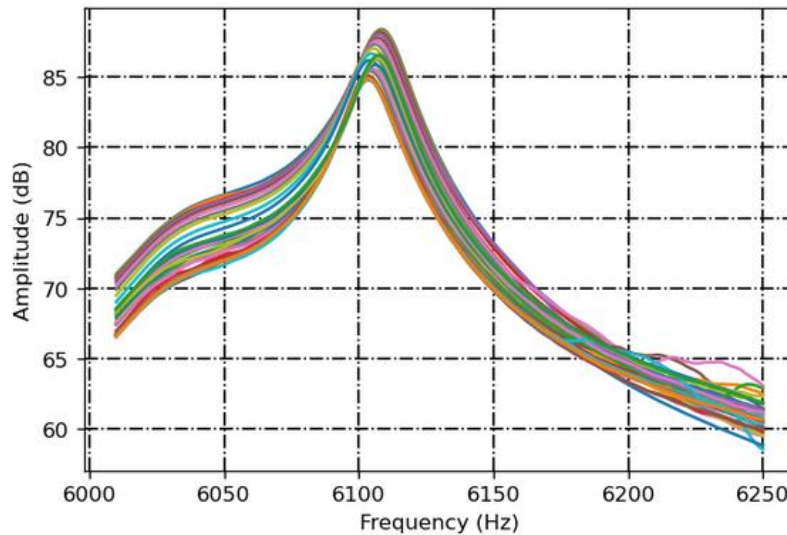


Figure 4.6. Courbes de résonance du deuxième niveau correspondant aux desserrage de l'écrou de 90°

### 4.3.3 Comparaison des réponses des deux capteurs

De manière à mieux visualiser les effets du desserrage sur le comportement non linéaire, nous avons reporté sur la figure x le décalage en fréquence pour chaque état, écrous serrés et 1 écrou desserré respectivement, pour les deux capteurs PZT et PVDF en dynamique rapide et en dynamique lente. Pendant que nous augmentons au fur et à mesure le niveau d'excitation acoustique, nous observons pour le capteur PZT (courbe rouge), lorsque tous les écrous sont serrés au maximum un très faible décalage en fréquence et lors du processus de dynamique lente le retour à la fréquence initiale se fait en repassant quasiment par le même chemin sans phénomène hystérétique notable. Nous observons la

même tendance pour le capteur PVDF lorsque tous les écrous sont serrés au maximum avec cependant une non-linéarité plus marquée (courbe noire), suggérant une plus grande sensibilité du capteur PVDF par rapport au capteur PZT (Figure 4.7). Lorsque l'un des écrous est desserré à 90° de sa position de serrage, nous observons pour les deux capteurs que les effets non linéaires augmentent avec un plus grand décalage en fréquence en dynamique rapide et un retour vers l'état initial qui ne passe pas par le même chemin en dynamique lente ce qui montre une augmentation du phénomène hystérétique avec le desserrage. Il est à noter que ces phénomènes sont plus forts sur les réponses du capteur PVDF que pour le capteur PZT, suggérant une plus grande sensibilité du capteur PVDF. Ces résultats témoignent de la grande sensibilité de la méthode NLRAS aux conditions de fixation en fonction du taux de dévissage de l'assemblage boulonné. Ils montrent en outre, la plus grande sensibilité du capteur PVDF pour cette application.

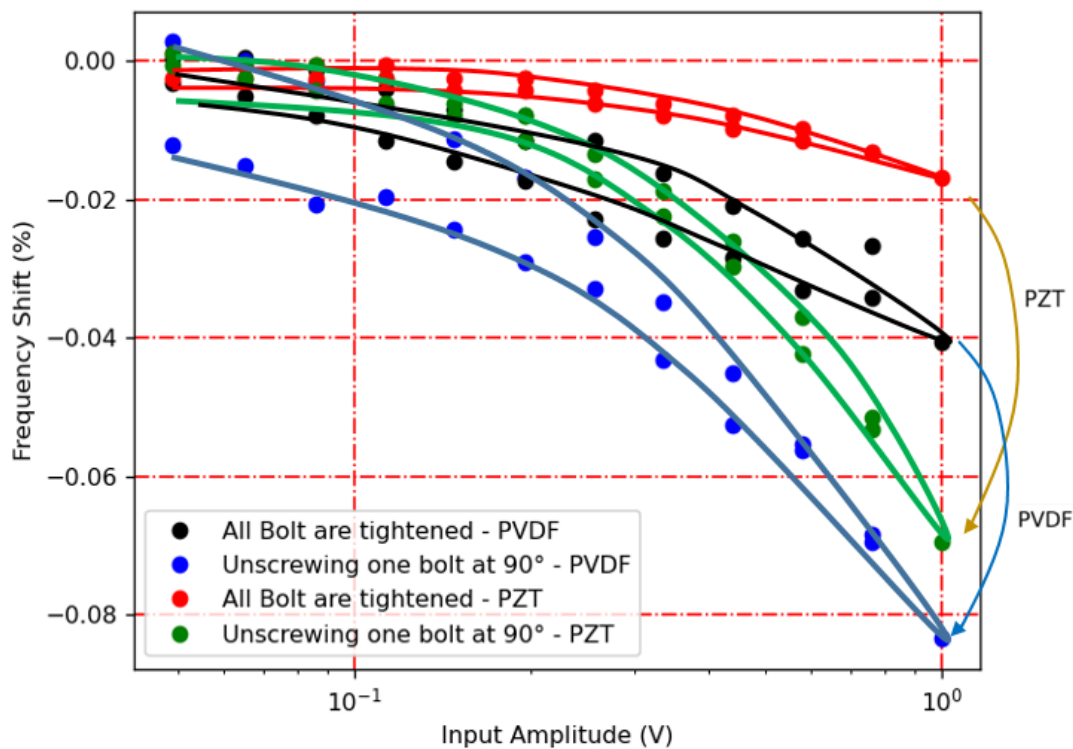


Figure 4.7. Comparaison des réponses de décalage fréquentiel des deux capteurs

#### 4.4 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur la démonstration des possibilités de l'acoustique non linéaire en résonance pour détecter et caractériser les dommages dans les matériaux et les structures. Nous avons développé une méthode exploitant les phénomènes de dynamique lente et rapide contrôlées, appliquées à une structure simulant un mât d'éclairage public. Cette structure était



composée d'un tube métallique fixé à une plaque via un dispositif boulonné. Dans le cas du mât, nous avons observé une corrélation claire entre le relâchement des points d'ancrage et le comportement non linéaire hystérétique de la structure. Ces résultats préliminaires, bien que nécessitant confirmation sur des structures réelles, sont, à notre connaissance, présentés pour la première fois dans la littérature ouverte. L'approche en résonance que nous avons utilisée, relativement facile à mettre en œuvre, offre un moyen simple et sensible pour le contrôle non destructif et la surveillance de la santé des matériaux et des structures. Nous soulignons également l'intérêt particulier de cette méthode pour les structures instrumentées, permettant un suivi in situ des dommages et un contrôle continu de la santé des matériaux et des structures. Notre travail met en évidence le potentiel significatif des méthodes acoustiques non linéaires dans le domaine du contrôle non destructif des matériaux et de la surveillance de la santé des structures.

# Conclusions générales et perspectives

La majeure partie de notre travail s'est focalisée sur la problématique de la détection des fuites dans les conduites d'eau en plastique (PVC) par une méthode acoustique non invasive d'écoute passive comparant les sensibilités et les performances de trois capteurs : PZT, PVDF et SAW, lorsqu'ils sont utilisés sur les mêmes tuyaux et dans les mêmes conditions.

Les résultats obtenus confirment la faisabilité de l'identification acoustique des fuites dans les canalisations en PVC par méthode d'écoute acoustique. La plage de fréquences des signaux acoustiques émis par les fuites peut varier en fonction de leurs dimensions et formes. Bien que tous les capteurs utilisés dans cette étude aient montré leur capacité à détecter des fuites, le capteur PZT était moins performant pour identifier les fuites les plus petites en raison de sa réponse en fréquence limitée et de son incompatibilité avec la forme des canalisations. En revanche, le capteur PVDF et le capteur SAW flexible ont affiché une performance supérieure, y compris pour les fuites plus ténues. Aussi, il est important à noter que contrairement aux autres capteurs étudiés, le capteur SAW élimine le besoin d'un filtre supplémentaire lors des tests et offre une sensibilité sur un large spectre de fréquences. Toutefois, des améliorations supplémentaires sont nécessaires pour augmenter sa sensibilité.

Il est essentiel de reconnaître les limites de notre étude. En premier lieu, la configuration expérimentale a été conçue pour simuler des conditions contrôlées de détection de fuites dans un contexte spécifique, ce qui pourrait ne pas refléter toutes les subtilités des réseaux de canalisations du monde réel, notamment les canalisations enterrées. De plus, d'autres facteurs pouvant influencer les performances des capteurs, tels que la composition des fluides transportés dans les canalisations, n'ont pas été pris en compte.

Dans la dernière partie de notre travail, nous avons cherché à démontrer les capacités de la spectroscopie acoustique résonante non linéaire pour caractérisation de la stabilité mécanique de structures de type mât comparant en outre pour cette application les performances d'un capteur PZT du commerce par rapport à un capteur PVDF réalisé au laboratoire. Nous avons utilisé une méthode de résonance non linéaire qui permet d'exploiter les phénomènes de dynamique lente et rapide sous contrôle de matériaux et de structures. Cette technique a été appliquée à un modèle miniaturisé de structure de mât d'éclairage public constitué d'un tube métallique fixé à une plaque métallique par un assemblage boulonné.

Nous avons constaté, une corrélation entre le desserrage d'un des points d'ancrage et la

réponse hystérétique non linéaire de la structure. Nous avons par ailleurs montré la grande sensibilité des capteur PVDF par rapport aux capteurs PZT pour cette application. Ces résultats préliminaires, nouveaux dans la littérature, devront être confirmés sur des structures réelles.

Cette étude, relativement simple à mettre en œuvre, offre un moyen fiable de réaliser des contrôles non destructifs et de contrôler l'état des matériaux et des structures. De plus, nous avons prouvé que cette méthode est très adaptée aux structures instrumentées, permettant un suivi in situ des endommagements et une surveillance continue de l'état des matériaux et des structures. Ces résultats mettent en évidence le potentiel considérable des méthodes acoustiques non linéaires pour le contrôle non destructif des matériaux et la surveillance de l'état mécanique des structures.

Toutefois, il est important de noter que tous ces résultats demandent à être confirmés, notamment dans d'autres configurations. En termes de perspectives pour le futur, des travaux complémentaires doivent être menés, notamment en ce qui concerne la modélisation des processus sous-jacents, en vue d'obtenir une interprétation plus approfondie des phénomènes physiques mis en jeu.

Nos futurs travaux comprendront des expériences dans des réseaux de canalisations plus complexes dotés de configurations diverses. Nous mettrons l'accent sur l'affinage et l'expansion de la gamme de types de capteurs adaptables à des scénarios complexes. De plus, nous donnerons la priorité à l'amélioration des capacités du capteur SAW pour accroître sa sensibilité et sa précision dans les applications de détection de fuites. Par ailleurs, il est important de noter que les capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) n'ont pas été évalués auparavant dans la littérature pour leur efficacité dans la détection de fuites d'eau. En mettant en lumière les avantages et les limites de chaque capteur dans des contextes spécifiques, notre recherche pourrait être une ressource d'information intéressante pour les chercheurs dans le développement de systèmes de détection de fuites, facilitant la sélection éclairée de capteurs adaptés aux besoins spécifiques de l'application.

Poursuivre les recherches sur les performances des capteurs dans diverses conditions de fluides et dans des configurations plus complexes promet d'apporter des connaissances précieuses. En outre, le développement de méthodes de traitement et d'analyse des données, qui tirent parti des capacités des capteurs haute performance, offre le potentiel d'améliorer notre capacité à identifier, localiser et résoudre les fuites de manière plus efficace.

Aussi, nous avons l'intention de mettre à profit le potentiel du capteur SAW dans le contexte de la méthode de résonance non linéaire, une perspective que nous n'avons pas encore eu l'occasion de concrétiser à cause de contraintes temporelles. Ces résultats encourageants

ouvrent des perspectives intéressantes pour la détection et la caractérisation des endommagements dans divers matériaux et structures

# Références bibliographiques

- [1] R. Liemberger et A. Wyatt, « Quantifying the global non-revenue water problem », *Water Supply*, vol. 19, no 3, p. 831-837, 2019.
- [2] U. N. Water, « 2018 un world water development report, nature-based solutions for water », 2018.
- [3] « Where is Earth's Water? » [169] U.S. Geological Survey, 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>.
- [4] S. Demirci, E. Yigit, I. H. Eskidemir, et C. Ozdemir, « Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method », *Ndt & E International*, vol. 47, p. 35-42, 2012.
- [5] A. Atef, T. Zayed, A. Hawari, M. Khader, et O. Moselhi, « Multi-tier method using infrared photography and GPR to detect and locate water leaks », *Automation in Construction*, vol. 61, p. 162-170, 2016.
- [6] R. F. Rahmat, I. S. Satria, B. Siregar, et R. Budiarto, « Water pipeline monitoring and leak detection using flow liquid meter sensor », in *IOP conference series: materials science and engineering*, IOP Publishing, 2017, p. 012036.
- [7] L. Yang, Y. Guo, et S. Gao, « Multi-leak detection in pipeline based on optical fiber detection », *Optik*, vol. 220, p. 164996, 2020.
- [8] K. B. Adedeji, Y. Hamam, B. T. Abe, et A. M. Abu-Mahfouz, « Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview », *IEEE Access*, vol. 5, p. 20272-20285, 2017.
- [9] M. R. Islam, S. Azam, B. Shanmugam, et D. Mathur, « A review on current technologies and future direction of water leakage detection in water distribution network », *IEEE Access*, 2022.
- [10] A. Martini, M. Troncosi, et A. Rivola, « Vibroacoustic measurements for detecting water leaks in buried small-diameter plastic pipes », *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, vol. 8, no 4, p. 04017022, 2017.
- [11] N. V. S. Korlapati, F. Khan, Q. Noor, S. Mirza, et S. Vaddiraju, « Review and analysis of pipeline leak detection methods », *Journal of Pipeline Science and Engineering*, p. 100074, 2022.
- [12] L. Bykerk et J. Valls Miro, « Vibro-acoustic distributed sensing for large-scale data-driven leak detection on urban distribution mains », *Sensors*, vol. 22, no 18, p. 6897, 2022.
- [13] A. Awwad, M. Yahyia, L. Albasha, M. M. Mortula, et T. Ali, « Communication network for ultrasonic acoustic water leakage detectors », *IEEE Access*, vol. 8, p. 29954-29964, 2020.
- [14] J. M. Muggleton, M. J. Brennan, et P. W. Linford, « Axisymmetric wave propagation in fluid-

- filled pipes: wavenumber measurements in in vacuo and buried pipes », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 270, no 1-2, p. 171-190, 2004.
- [15] W. Duan, R. Kirby, J. Prisutova, et K. V. Horoshenkov, « On the use of power reflection ratio and phase change to determine the geometry of a blockage in a pipe », *Applied Acoustics*, vol. 87, p. 190-197, 2015.
- [16] Y. Gao, M. J. Brennan, P. F. Joseph, J. M. Muggleton, et O. Hunaidi, « A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 277, no 1-2, p. 133-148, 2004.
- [17] M. J. Brennan, Y. Gao, et P. F. Joseph, « On the relationship between time and frequency domain methods in time delay estimation for leak detection in water distribution pipes », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 304, no 1-2, p. 213-223, 2007.
- [18] M. Bracken et B. Cain, « Transmission main and plastic pipe leak detection using advanced correlation technology: Case studies », in *Pipelines 2012: Innovations in Design, Construction, Operations, and Maintenance, Doing More with Less*, 2012, p. 147-157.
- [19] M. J. Brennan et al., « On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes », *Procedia engineering*, vol. 199, p. 1350-1355, 2017.
- [20] A. Martini, A. Rivola, et M. Troncossi, « Autocorrelation Analysis of Vibro-Acoustic Signals Measured in a Test Field for Water Leak Detection », *Applied Sciences*, vol. 8, no 12, p. 2450, déc. 2018, doi: 10.3390/app8122450.
- [21] X. Fan, X. Zhang, et X. ( B. Yu, « Machine learning model and strategy for fast and accurate detection of leaks in water supply network », *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, vol. 2, p. 1-21, 2021.
- [22] J. Xu et al., « Low-cost, tiny-sized MEMS hydrophone sensor for water pipeline leak detection », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no 8, p. 6374-6382, 2018.
- [23] S. Yazdekhashti, K. R. Piratla, J. Sorber, S. Atamturktur, A. Khan, et H. Shukla, « Sustainability analysis of a leakage-monitoring technique for water pipeline networks », *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, vol. 11, no 1, p. 04019052, 2020.
- [24] M. J. Brennan et al., « On the effects of soil properties on leak noise propagation in plastic water distribution pipes », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 427, p. 120-133, 2018.
- [25] K. Marmarokopos, D. Doukakis, G. Frantziskonis, et M. Avlonitis, « Leak detection in plastic water supply pipes with a high signal-to-noise ratio accelerometer », *Measurement and Control*, vol. 51, no 1-2, p. 27-37, 2018.
- [26] A. Martini, M. Troncossi, et A. Rivola, « Automatic leak detection in buried plastic pipes of water supply networks by means of vibration measurements », *Shock and Vibration*, vol. 2015, 2015.
- [27] Q. C. Xu, S. Yoshikawa, J. R. Belsick, et R. E. Newnham, « Piezoelectric composites with high sensitivity and high capacitance for use at high pressures », *IEEE transactions on ultrasonics*,

- ferroelectrics, and frequency control, vol. 38, no 6, p. 634-639, 1991.
- [28] F. C. Lobato de Almeida, « Improved acoustic methods for leak detection in buried plastic water distribution pipes », University of Southampton, 2013.
- [29] P. Sun, Y. Gao, B. Jin, et M. J. Brennan, « Use of PVDF wire sensors for leakage localization in a fluid-filled pipe », *Sensors*, vol. 20, no 3, p. 692, 2020.
- [30] C. Guo, K. Shi, et X. Chu, « Cross-correlation analysis of multiple fibre optic hydrophones for water pipeline leakage detection », *International Journal of Environmental Science and Technology*, p. 1-12, 2022.
- [31] J. Choi, J. Shin, C. Song, S. Han, et D. I. Park, « Leak detection and location of water pipes using vibration sensors and modified ML prefilter », *Sensors*, vol. 17, no 9, p. 2104, 2017.
- [32] M. I. M. Ismail, R. A. Dziyauddin, et N. A. A. Samad, « Water pipeline monitoring system using vibration sensor », in *2014 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSE)*, IEEE, 2014, p. 79-84.
- [33] B. Drafts, « Acoustic wave technology sensors », *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 49, no 4, p. 795-802, 2001.
- [34] B. Liu et al., « Surface acoustic wave devices for sensor applications », *Journal of semiconductors*, vol. 37, no 2, p. 021001, 2016.
- [35] X. Ding et al., « Surface acoustic wave microfluidics », *Lab on a Chip*, vol. 13, no 18, p. 3626-3649, 2013.
- [36] A. Mazzoni, « Comportement thermomécanique d'un béton réfractaire: effets du renforcement par des fibres minérales », thèse de doctorat, Université Paul Sabatier (Toulouse 3), 2009.
- [37] R. DRAI, C. MECHRI, M. KECHOUANE, et P. NOM, « CARATERISATION DES MATERIAUX COMPLEXE ET DE LEURS ENDOMMAGEMENTS PAR LA TECHNIQUE DE LA CODA ULTRASONORE ALLIEE A L'ACOUSTIQUE NON LINEAIRE ».
- [38] R. El Guerjouma, M. Bentahar, T. Monnier, L. Deville, et J. Baboux, « Acoustique nonlinéaire pour le contrôle non-destructif et le contrôle santé des matériaux et de structures », *Acoustique & Technique*, vol. 36, p. 20-25, 2004.
- [39] M. Brissaud, *Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration*. PPUR presses polytechniques, 2007.
- [40] G. Feld, E. Labouré, E. Hoang, et B. Revol, « Mesure de la déformation d'un matériau piézoélectrique par interférométrie », *J3eA*, vol. 7, p. 1013, 2008.
- [41] L. Petit, « Nouvelles structures de moteurs piézoélectriques: conception, réalisation et caractérisation », Lyon, INSA, 1996.
- [42] W. Voigt, *Lehrbuch der kristallphysik:(mit ausschluss der kristalloptik)*, vol. 34. BG Teubner, 1910.
- [43] I. Basha, V. Mukerji, P. Langevin, M. Kushner, M. Alpert, et B. D. Beitman, « Atypical angina in patients with coronary artery disease suggests panic disorder », *The International Journal of*

- Psychiatry in Medicine, vol. 19, no 4, p. 341-346, 1990.
- [44] H. Pailloux, « Piézoélectricité. Calcul des vitesses de propagation », *Journal de Physique et le Radium*, vol. 19, no 5, p. 523-526, 1958.
- [45] M. Bédard, Développement d'un transducteur piézoélectrique à directivité contrôlée pour la reproduction sonore. Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa, 2009.
- [46] R. Dejaeger, « Modélisations multiphysiques, réalisation et expérimentations d'un haut-parleur digital matriciel piézoélectrique MEMS », thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2014.
- [47] E. Sturtzer, « Modélisation en vue de l'intégration d'un système audio de micro puissance comprenant un haut-parleur MEMS et son amplificateur », thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2013.
- [48] M. Bruma, « Generation D'ondes Elastiques par Pression de Radiation Laser », *Le Journal de Physique Colloques*, vol. 28, no C1, Art. no C1, 1967.
- [49] O. Gallot-Lavallée, V. Griseri, G. Teysse, et C. Laurent, « Mesure de la charge d'espace par la méthode électro-acoustique pulsée », in *SFE*, 2002, p. 1-6.
- [50] J. Li, Y. Xue, F. Li, et Y. Narita, « Active vibration control of functionally graded piezoelectric material plate », *Composite Structures*, vol. 207, pp. 509-518, 2019.
- [51] A. Parent, « Apport des nouveaux matériaux piézoélectriques dans le domaine des microgyromètres vibrants », Université Paris Sud-Paris XI, 2008.
- [52] G. Ü. L. Mert, M. Karaer, et A. Doğan, "Design of a Piezoelectric Acceleration Sensor for Automobile Applications," *International Journal of Automotive Science and Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 398-403, 2021.
- [53] I. Kerroum, « Capteurs d'hydrogène pour l'industrie de l'automobile et de la sécurité », thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
- [54] F. Bartoli, « Croissance de films minces piézoélectriques de ScxAl1-xN par pulvérisation cathodique pour la réalisation de dispositifs à ondes élastiques confinées, destinés à des applications haute-température », thèse de doctorat, CentraleSupélec, 2019.
- [55] L. Fan, X. Sun, C. Xiong, C. Schuck, et H. X. Tang, « Aluminum nitride piezo-acousto-phonic crystal nanocavity with high quality factors », *Applied Physics Letters*, vol. 102, no 15, Art. no 15, 2013.
- [56] R. Araneo et al., « Effect of the scaling of the mechanical properties on the performances of ZnO piezo-semiconductive nanowires », in *AIP conference proceedings*, American Institute of Physics, 2014, p. 14-22.
- [57] P. Ueberschlag, « PVDF piezoelectric polymer », *Sensor review*, vol. 21, no 2, Art. no 2, 2001.
- [58] A. Qaiss, « Mise en oeuvre des films polymères cellulaires piézoélectriques », thèse de doctorat, Université Laval, 2010.
- [59] L. Rittmeier, T. Losch, M. Sinapius, R. Lammering, "Investigation of in-plane wave motion in a



- Fibre Metal Laminate using PVDF foil sensors," *Procedia Manufacturing*, vol. 52, pp. 174-180, 2020.
- [60] F. Levassort, M. Lethiecq, D. Certon, et F. Patat, « A matrix method for modeling electroelastic moduli of 0-3 piezo-composites », *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 44, no 2, Art. no 2, 1997.
- [61] J. Deboucq, « Caractérisation ultrasonore de structures à couche et à gradient de contraintes par ondes de surface haute fréquence générées par capteurs MEMS de type IDT-SAW », , thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2012.
- [62] S. Siddiqui, H. B. Lee, D. I. Kim, L. T. Duy, A. Hanif, & N. E. Lee, "An omnidirectionally stretchable piezoelectric nanogenerator based on hybrid nanofibers and carbon electrodes for multimodal straining and human kinematics energy harvesting," *Advanced Energy Materials*, vol. 8, no. 2, p. 1701520, 2018.
- [63] H. D. Mousselmal, « Conception de dispositifs piézoélectriques de récupération d'énergie utilisant des structures multidirectionnelles et nanostructurés », thèse de doctorat, INSA Lyon, 2014.
- [64] D. Caron, *DéTECTABILITÉ DES FUITES PAR ÉMISSION ACOUSTIQUE*. Ed. Techniques Ingénieur, 2004.
- [65] A. Sheldon-Duplaix, « Les enjeux de la surveillance sous-marine en Asie », *Revue Défense Nationale*, no 7, Art. no 7, 2018.
- [66] P. C. Quispe, « Contrôle intelligent de la domotique à partir d'informations temporelles multi sources imprécises et incertaines », thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.
- [67] Z. Ghemari, « Modélisation et simulation d'un capteur de vibration (Accéléromètre) », thèse de doctorat, Annaba, 2006.
- [68] B. GARNIER, « Capteurs industriels de vibration », 2010.
- [69] A. Kachroudi, « Développement de nouveaux matériaux polymères pour micro-capteurs de vibrations », thèse de doctorat, Université de Tunis El-Manar. Faculté des Sciences de Tunis (Tunisie), 2016.
- [70] D. Roche, « Conception et réalisation d'un capteur piézoélectrique de contraintes de cisaillement pour structure adaptative », thèse de doctorat, université de Lyon, INSA, 1995.
- [71] J. M. Dilhac, M. Bafleur, "Energy harvesting in aeronautics for battery-free wireless sensor networks," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 29, no. 8, pp. 18-22, 2014.
- [72] E. Drean, « Contribution au développement de capteurs piézoélectriques pour la caractérisation mécanique des étoffes », Mulhouse, 2006.
- [73] T. Verdot, C. Guianvarch, J. Czarny, E. Redon, K. Ege, et J.-L. Guyader, « Modélisation d'une architecture innovante de microphone MEMS à détection par nano jauges », in *CFM 2013-21ème Congrès Français de Mécanique, AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie*, 2013.
- [74] S. Tariq, Z. Hu, et T. Zayed, « Micro-electromechanical systems-based technologies for leak

- detection and localization in water supply networks: A bibliometric and systematic review », *Journal of Cleaner Production*, vol. 289, p. 125751, 2021.
- [75] C. Pfister, « Getting started with the Internet of things: connecting sensors and microcontrollers to the cloud », O'Reilly Media, Inc, 2011.
- [76] H. Pujol et al., « Deepomatics: Localisation et reconnaissance acoustique de drones », in 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA, 2022.
- [77] A. Satour, « Contrôle non-destructif, par la technique ultrasonore, des matériaux composites », thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB), 2015.
- [78] G. Akhras, « Des matériaux intelligents et des systèmes intelligents pour l'avenir », revue militaire canadienne, 2012.
- [79] K. Kouzi, « Contribution des techniques de la logique floue pour la commande d'une machine à induction sans transducteur rotatif », thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2008.
- [80] A. Dalmora, A. Imperiale, S. Imperiale, et P. Moireau, « Solveur numérique générique pour la modélisation de l'influence des contraintes mécaniques sur la propagation des ondes guidées pour les applications SHM », 2023.
- [81] L. Ding, « Etude et amélioration des performances en bruit de capteurs à MagnétoImpédance Géante: Application à la magnétométrie à très haute sensibilité », thèse de doctorat, université de Caen, 2008.
- [82] G. Asch et B. Poussery, *Les capteurs en instrumentation industrielle*-8e éd. Dunod, 2017.
- [83] H. Bizagwira, « Réseaux de capteurs sans fil étendu robuste exploitant des liens atypiques », thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2016.
- [84] T. ROUBACHE, « Commande Non Linéaire Tolérante aux Défauts de la Machine à Induction sans Capteur de Vitesse », thèse de doctorat, Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2, Département de l'électrotechnique, 2017.
- [85] A. Kachroudi, S. Basrou, L. Rufer, et F. Jomni, « Etude des propriétés piézoélectriques d'un matériau piézo-électret polymère pour micro-capteurs de vibrations mécaniques », Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micronanoélectronique, JNRDM, p. 5, 2016.
- [86] J. Bordet, P. Le Goff, et F. Vergnes, « Mesures statistiques de la vitesse horizontale de particules solides fluidisées par un liquide à l'aide d'un capteur piézoélectrique. Analogie avec la théorie cinétique des gaz », *Powder Technology*, vol. 5, no 6, p. 365-375, 1972.
- [87] M. Guilhem, « Conception et optimisation d'un capteur piezo-optique de pression, application à la mesure de hautes pressions hydrostatiques », thèse de doctorat, université de Strasbourg, 2010.
- [88] S. Poeggel, D. Tosi, D. Duraibabu, G. Leen, D. McGrath, et E. Lewis. Optical fibre pressure sensors in medical applications. *Sensors*, 15(7), 17115-17148, 2015.
- [89] M. Chen-Glasser, P. Li, J. Ryu, et S. Hong, « Piezoelectric materials for medical applications », *Piezoelectricity-Organic and Inorganic Materials and Applications*, vol. 2, p. 64, 2018.

- [90] K. Divya, S. Puneeth, et V. A. Belle, « Home security using Piezoelectric sensor », *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 2018.
- [91] A. R. A. Rashid et F. Zakaria, « Design and Implementation of Home Security System Using Piezoelectric Sensor », *Malaysian Journal of Science Health & Technology*, vol. 5, 2020.
- [92] O. CAGNARD et al., « Tests de capteurs biologiques pour l'évaluation de l'écotoxicité d'eaux usées traitées ».
- [93] O. Santawitee, « Study of piezoelectric devices based on free-standing printed thick-films: application to VOCs detection using micro-cantilevers with mesoporous silicasensitive coating », thèse de doctorat, université de Bordeaux, 2020.
- [94] K. NONAKA, M. AKIYAMA, C.-N. XU, T. HAGIO, et A. TAKASE, « A critical review of the photovoltaic effect in Pb (Zr, Ti) O<sub>3</sub>-based ceramics and their application for photodriven microactuators », *Recent research developments in materials science*, p. 141-162, 2002.
- [95] S. A. Piletsky et A. P. Turner, « Electrochemical sensors based on molecularly imprinted polymers », *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, vol. 14, no 5, p. 317-323, 2002.
- [96] N. V. Krishna Prasad et al., « Ceramic Sensors: A mini-review of their applications », *Frontiers in Materials*, vol. 7, p. 593342, 2020.
- [97] C. J. Dias, R. Igreja, R. Marat-Mendes, P. Inacio, J. N. Marat-Mendes, et D. K. Das-Gupta, « Recent advances in ceramic-polymer composite electrets », *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, vol. 11, no 1, p. 35-40, 2004.
- [98] P. Muralt, R. G. Polcawich, et S. Trolier-McKinstry, « Piezoelectric thin films for sensors, actuators, and energy harvesting », *MRS bulletin*, vol. 34, no 9, p. 658-664, 2009.
- [99] J. Zhu et al., « Progress in TENG technology—A journey from energy harvesting to nanoenergy and nanosystem », *EcoMat*, vol. 2, no 4, p. e12058, 2020.
- [100] Y. Li et X. Li, « Research on water distribution systems from the past to the future: a bibliometric review », *Environmental Technology Reviews*, vol. 10, no 1, p. 161-176, 2021.
- [101] H. Kawai, « The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride) », *Japanese journal of applied physics*, vol. 8, no 7, p. 975, 1969.
- [102] A. V. Shirinov et W. K. Schomburg, « Pressure sensor from a PVDF film », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 142, no 1, p. 48-55, 2008.
- [103] X. Wang, F. Sun, G. Yin, Y. Wang, B. Liu, et M. Dong, « Tactile-sensing based on flexible PVDF nanofibers via electrospinning: A review », *Sensors*, vol. 18, no 2, p. 330, 2018.
- [104] J. Yi, « A piezo-sensor-based “smart tire” system for mobile robots and vehicles », *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 13, no 1, p. 95-103, 2008.
- [105] J. F. Tressler, S. Alkoy, et R. E. Newnham, « Piezoelectric sensors and sensor materials », *Journal of electroceramics*, vol. 2, p. 257-272, 1998.
- [106] D. Jurków et al., « Overview on low temperature co-fired ceramic sensors », *Sensors and*

- Actuators A: Physical, vol. 233, p. 125-146, 2015.
- [107] S. Cichosz, A. Masek, et M. Zaborski, « Polymer-based sensors: A review », *Polymer testing*, vol. 67, p. 342-348, 2018.
- [108] R. Dallaev, T. Pisarenko, D. Sobola, F. Orudzhev, S. Ramazanov, et T. Trčka, « Brief review of PVDF properties and applications potential », *Polymers*, vol. 14, no 22, p. 4793, 2022.
- [109] P. Saxena et P. Shukla, « A comprehensive review on fundamental properties and applications of poly (vinylidene fluoride)(PVDF) », *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 4, p. 8-26, 2021.
- [110] C. C. Ruppel, A. A. Sachs, et F. J. Seifert, « A review of optimization algorithms for the design of the SAW transducers », in *IEEE 1991 Ultrasonics Symposium*, IEEE, 1991, p. 73-83.
- [111] R. M. White et F. W. Voltmer, « Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves », *Applied physics letters*, vol. 7, no 12, p. 314-316, 1965.
- [119] H. Wohltjen, « Mechanism of operation and design considerations for surface acoustic wave device vapour sensors », *Sensors and Actuators*, vol. 5, no 4, p. 307-325, 1984.
- [113] S. Ndao et al., « Développement de Capteurs d'Humidité Ultrasonores à ondes Acoustiques de Surface », 2020.
- [114] P. Nicolay, « Les capteurs à ondes élastiques de surface. Applications pour la mesure des basses pressions et des hautes températures », Ph. D. Thesis, 2007.
- [115] S. Ballandras, D. Gachon, J. Masson, et W. Daniau, « Development of absorbing conditions for the analysis of finite dimension elastic wave-guides », in *2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum*, IEEE, 2007, p. 729-732.
- [116] K. C. Wagner et G. Visintini, « Spurious bulk waves in SAW filters with apodized transducers », in *IEEE 1988 Ultrasonics Symposium Proceedings.*, IEEE, 1988, p. 35-38.
- [117] S. G. Tantawi, « Multimoded reflective delay lines and their application to resonant delay line rf pulse compression systems », *Physical review special topics-accelerators and beams*, vol. 7, no 3, p. 032001, 2004.
- [118] J. Filipiak, L. Solarz, et G. Steczko, « Surface acoustic wave (SAW) vibration sensors », *Sensors*, vol. 11, no 12, p. 11809-11832, 2011.
- [119] R. C. Jesus, E. A. Carvalho, O. Tamarin, R. C. Freire, et C. Dejous, « Equivalent circuit models for SAW delay line sensors », *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no 12, p. 11810-11818, 2022.
- [120] S. Scheibelhofer, S. Schuster, et A. Stelzer, « Modeling and performance analysis of SAW reader systems for delay-line sensors », *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 56, no 10, p. 2292-2303, 2009.
- [121] C. Xu, D. Mei, L. Zhu, et Y. Wang, « Flexible capacitive pressure sensor array using acoustic-assisted fabrication of microstructures as surface and dielectric layers », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 348, p. 114006, 2022.

- [122] M. Pohl et M. Rose, « Piezoelectric shunt damping of a circular saw blade with autonomous power supply for noise and vibration reduction », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 361, p. 20-31, 2016.
- [123] P. Caldero et D. Zoeke, « Multi-channel real-time condition monitoring system based on wideband vibration analysis of motor shafts using SAW RFID tags coupled with sensors », *Sensors*, vol. 19, no 24, p. 5398, 2019.
- [124] H. Oh, K. Lee, K. Eun, S.-H. Choa, et S. S. Yang, « Development of a high-sensitivity strain measurement system based on a SH SAW sensor », *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 22, no 2, p. 025002, 2012.
- [125] M. Bharati, L. Rana, M. Tomar, et V. Gupta, « Theoretical simulations of SAW based sensor on PVDF », *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, p. 1538-1541, 2021.
- [126] S. Sankaranarayanan, S. Cular, V. R. Bhethanabotla, et B. Joseph, « Finite Element Modeling of Acoustic Streaming in Surface Acoustic Wave (Saw) Devices », 2006.
- [127] M. M. El Gowini et W. A. Moussa, « A reduced three dimensional model for SAW sensors using finite element analysis », *Sensors*, vol. 9, no 12, p. 9945-9964, 2009.
- [128] M. Hofer, M. Jungwirth, R. Lerch, et R. Weigel, « Accurate and efficient modeling of SAW structures », *Frequenz*, vol. 55, no 1-2, p. 64-72, 2001.
- [129] T. Wang, R. Green, R. Guldiken, J. Wang, S. Mohapatra, et S. S. Mohapatra, « Finite element analysis for surface acoustic wave device characteristic properties and sensitivity », *Sensors*, vol. 19, no 8, p. 1749, 2019.
- [130] B. Lin et al., « A high Q value ScAlN/AlN-based SAW resonator for load sensing », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 68, no 10, p. 5192-5197, 2021.
- [131] K. Han et Y. J. Yuan, « Mass sensitivity evaluation and device design of a Love wave device for bond rupture biosensors using the finite element method », *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no 8, p. 2601-2608, 2014.
- [132] C. Wu, Z. Jiang, W. Fan, et L. Chen, « Finite element analysis of multi-wire saw silicon rods with consolidated abrasive diamonds », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, p. 241-248, 2017.
- [133] A. Abdollahi, Z. Jiang, et S. A. Arabshahi, « Evaluation on mass sensitivity of SAW sensors for different piezoelectric materials using finite-element analysis », *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 54, no 12, p. 2446-2455, 2007.
- [134] G. L. Dybwad et C. E. Mandeville, « Generation of light by the relative motion of contiguous surfaces of mercury and glass », *Physical Review*, vol. 161, no 3, p. 527, 1967.
- [135] H. Scherr, G. Scholl, F. Seifert, et R. Weigel, « Quartz pressure sensor based on SAW reflective delay line », in *1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*, IEEE, 1996, p. 347-350.
- [136] D. Zhang, D. Wang, P. Li, X. Zhou, X. Zong, et G. Dong, « Facile fabrication of high-performance QCM humidity sensor based on layer-by-layer self-assembled polyaniline/graphene

- oxide nanocomposite film », *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 255, p. 1869-1877, 2018.
- [137] A. Mujahid, A. Afzal, et F. L. Dickert, « An overview of high frequency acoustic sensors—QCMs, SAWs and FBARs—chemical and biochemical applications », *Sensors*, vol. 19, no 20, p. 4395, 2019.
- [138] M. Z. Aslam, V. Jeoti, S. Karuppanan, A. F. Malik, et A. Iqbal, « FEM analysis of Sezawa mode SAW sensor for VOC based on CMOS compatible AlN/SiO<sub>2</sub>/Si multilayer structure », *Sensors*, vol. 18, no 6, p. 1687, 2018.
- [139] N. Abraham, R. R. Krishnakumar, C. Unni, et D. Philip, « Simulation studies on the responses of ZnO-CuO/CNT nanocomposite based SAW sensor to various volatile organic chemicals », *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 4, no 1, p. 125-131, 2019.
- [140] B. Achour, « Capteurs à ondes acoustiques de surface fonctionnant à 104 et 208 MHz.: modélisation, développement et application à la détection d'ions lourds métalliques », Le Mans, 2020.
- [141] M. Price et D. W. Reed, « THE INFLUENCE OF MAINS LEAKAGE AND URBAN DRAINAGE ON GROUNDWATER LEVELS BENEATH CON URBATIONS IN THE UK. », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 86, no 1, p. 31-39, 1989.
- [142] A. F. Colombo et B. W. Karney, « Energy and costs of leaky pipes: Toward comprehensive picture », *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 128, no 6, p. 441-450, 2002.
- [143] A. Chevalier, « Influence of phospholipid polyunsaturated fatty acid composition on some metabolic disorders induced in rat cardiomyocytes by hypoxia and reoxygenation », *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, vol. 22, no 10, p. 1177-1186, oct. 1990, doi: 10.1016/0022-2828(90)90081-C.
- [144] M. Fantozzi et E. Fontana, « Acoustic emission techniques: the optimum solution for leakage detection and location in water pipelines », *Insight*, vol. 43, no 2, p. 105-107, 2001.
- [145] O. Hunaidi, W. Chu, A. Wang, et W. Guan, « Detecting leaks in plastic pipes », *Journal-American Water Works Association*, vol. 92, no 2, p. 82-94, 2000.
- [146] Z. M. Lahlou, « Leak detection and water loss control », *Tech Brief: National Drinking Water Clearinghouse Fact Sheet*, 2001.
- [147] J. P. Vítkovský, A. R. Simpson, et M. F. Lambert, « Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms », *Journal of water resources planning and management*, vol. 126, no 4, p. 262-265, 2000.
- [148] M. Bentoumi, « Développement de méthodes efficaces pour la localisation de fuites sur les canalisations d'eau potable », thèse de doctorat, Université de M'sila, 2017.
- [149] A. Lay-Ekuakille, G. Vendramin, A. Trotta, et P. Vanderbemden, « STFT-based spectral analysis of urban waterworks leakage detection », in *XIX IMEKO World Congress Proc.*, Lisbon, Portugal, 2009.

- [150] R. Fletcher et M. Chandrasekaran, « SmartBall™: a new approach in pipeline leak detection », in International Pipeline Conference, 2008, p. 117-133.
- [151] H. Zhang, X. Ding, X. Zhang, et F. Xu, « A smart ball sensor fabricated by laser kirigami of graphene for personalized long-term grip strength monitoring », *Npj Flexible Electronics*, vol. 6, no 1, p. 28, 2022.
- [152] H. Fan, S. Tariq, et T. Zayed, « Acoustic leak detection approaches for water pipelines », *Automation in Construction*, vol. 138, p. 104226, juin 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104226.
- [153] K. S. Ng, P.-Y. Chen, et Y.-C. Tseng, « A design of automatic water leak detection device », in 2017 IEEE 2nd International Conference on Opto-Electronic Information Processing (ICOIP), IEEE, 2017, p. 70-73.
- [154] A. Fares, I. A. Tijani, Z. Rui, et T. Zayed, « Leak detection in real water distribution networks based on acoustic emission and machine learning », *Environmental Technology*, vol. 44, no 25, p. 3850-3866, nov. 2023, doi: 10.1080/09593330.2022.2074320.
- [155] A. F. Colombo, P. Lee, et B. W. Karney, « A selective literature review of transient-based leak detection methods », *Journal of hydro-environment research*, vol. 2, no 4, p. 212-227, 2009.
- [156] B. Brunone et M. Ferrante, « Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients », *Journal of hydraulic research*, vol. 39, no 5, p. 539-547, 2001.
- [157] M. Ferrante et B. Brunone, « Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 1. Harmonic analysis », *Advances in Water Resources*, vol. 26, no 1, p. 95-105, janv. 2003, doi: 10.1016/S0309-1708(02)00101-X.
- [158] J. A. Liggett et L.-C. Chen, « Inverse transient analysis in pipe networks », *Journal of hydraulic engineering*, vol. 120, no 8, p. 934-955, 1994.
- [159] D. Covas, H. Ramos, et A. B. De Almeida, « Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems », *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 131, no 12, p. 1106-1116, 2005.
- [160] Z. S. Kapelan, D. A. Savic, et G. A. Walters, « A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks », *Journal of Hydraulic Research*, vol. 41, no 5, p. 481-492, 2003.
- [161] J. P. Vítkovský, A. R. Simpson, et M. F. Lambert, « Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms », *Journal of water resources planning and management*, vol. 126, no 4, p. 262-265, 2000.
- [162] M. Stephens, M. Lambert, A. Simpson, J. Vítkovský, et J. Nixon, « Field tests for leakage, air pocket, and discrete blockage detection using inverse transient analysis in water distribution pipes », in *Critical transitions in water and environmental resources management*, 2004, p. 1-10.
- [163] X.-J. Wang, M. F. Lambert, A. R. Simpson, J. A. Liggett, et J. P. Vítkovský, « Leak Detection in Pipelines using the Damping of Fluid Transients », *J. Hydraul. Eng.*, vol. 128, no 7, p. 697-711, juill. 2002, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(697).
- [164] E. J. Lee et K. J. Schwab, « Deficiencies in drinking water distribution systems in developing

- countries », *Journal of Water and Health*, vol. 3, no 2, p. 109-127, juin 2005, doi: 10.2166/wh.2005.0012.
- [165] M. Lucibella, « Robert Hooke (1635-1703) », *Reflets de la physique*, no 40, p. 24-25, 2014.
- [166] A. Marec, « Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire : discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante », thèse de doctorat, université du Mans, 2008.
- [167] R. T. Beyer, *Nonlinear acoustics*. Woodbury, NY: Acoustical Society of America, 1997.
- [168] T. G. Muir, « Nonlinear Acoustics and Its Role in the Sedimentary Geophysics of the Sea », in *Physics of Sound in Marine Sediments*, L. Hampton, Éd., Boston, MA: Springer US, 1974, p. 241-291.
- [169] Q. Wei, L. Zhu, J. Zhu, L. Zhuo, W. Hao, et W. Xie, « Characterization of impact fatigue damage in CFRP composites using nonlinear acoustic resonance method », *Composite Structures*, vol. 253, p. 112804, déc. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112804.
- [170] A. Novak, M. Bentahar, V. Tournat, R. El Guerjouma, et L. Simon, « Nonlinear acoustic characterization of micro-damaged materials through higher harmonic resonance analysis », *NDT & E International*, vol. 45, no 1, p. 1-8, janv. 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.09.006.
- [171] G. Renaud, J. Rivière, S. Hauptert, et P. Laugier, « Anisotropy of dynamic acoustoelasticity in limestone, influence of conditioning, and comparison with nonlinear resonance spectroscopy », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, no 6, p. 3706-3718, juin 2013
- [172] N. Lanson et J. P. Vila, « gÉtude des méthodes particulières renormalisées: applications aux problèmes de dynamique rapide », thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse 3- INSA, 2001.
- [173] F. Schneider, « Pollution sonore marine et réglementation », *Le bruit en mer: Développement des activités maritimes et protection de la faune marine*, p. 43, 2022.
- [174] C. K. Campbell, « Applications of surface acoustic and shallow bulk acoustic wave devices », *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no 10, p. 1453-1484, 1989.
- [175] K. Yamanouchi et M. Takeuchi, « Applications for piezoelectric leaky surface waves », in *IEEE Symposium on Ultrasonics*, IEEE, 1990, p. 11-18.
- [176] A. J. Slobodnik, « Surface acoustic waves and SAW materials », *Proceedings of the IEEE*, vol. 64, no 5, p. 581-595, 1976.
- [177] Y. Kondratenko, O. Gerasin, et A. Topalov, « A SIMULATION MODEL FOR ROBOT'S SLIP DISPLACEMENT SENSORS », *IJC*, p. 224-236, déc. 2016, doi: 10.47839/ijc.15.4.854.
- [178] A. Maskay et M. Pereira Da Cunha, « High-temperature static strain langasite SAWR sensor: Temperature compensation and numerical calibration for direct strain reading », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 259, p. 34-43, juin 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.03.023.
- [179] Xin Xu, « Numerical Analysis of Multi-Functional Surface Acoustic Wave Sensor », Thesis - Open Access, 2020.



- [180] J. Goulpeau, « Intégration de puce à ADN dans un microsystème fluide », thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2006.
- [181] A. Laborde, L. Mazenq, D. Bourrier, V. Conédéra, et R. Courson, « Procédés de photolithographie développés au sein de la plateforme de micro et nanotechnologie du LAAS-CNRS », 2023.
- [182] M. Khelifa, « Conception et fabrication de microbobine RMN planaire rectangulaire sur substrat de Kapton », in 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, 2016.
- [183] T. Nakamoto et T. Moriizumi, « A theory of a quartz crystal microbalance based upon a Mason equivalent circuit », *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 29, no 5R, p. 963, 1990.
- [184] R. Daniel, D. Eugène, G. P.-G. de, D. Royer, et G. P.-G. de, *Ondes élastiques dans les solides . Tome 1, Propagation libre et guidée / Daniel Royer, ..., Eugène Dieulesaint, ... ; préface de Pierre-Gilles de Gennes*. in Enseignement de la physique. Paris: Masson, 1996.
- [185] A. R. Chapman et K. Tararas, « The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization », *Human Rights in Global Health: Rights-Based Governance for a Globalizing World*, p. 221, 2018.
- [186] N. Bouzida, Validation par tomographie de la technique Aqua Diag pour l'inspection des conduites d'eau potable. thèse de doctorat, université de Québec, 2010.
- [187] S. Hantz, « Etude et réalisation d'un système de détection de plusieurs fuites d'eau dans un canal prototype », Université de Mohamed Boudiaf M'Sila.
- [188] N. T. Foltz, « Méthodes de détection et de localisation de défauts dans les géomembranes », *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, no 31, p. 17-25, 2002.
- [189] T. Goursolle, « Propriétés acoustiques non linéaires classiques et non classiques : applications au contrôle de santé des matériaux de l'industrie aéronautique », thèse de doctorat, Université François Rabelais - Tours, 2007.
- [190] Y. Baccouche, « Caractérisation non linéaire de l'endommagement des matériaux composites par ondes guidées », thèse de doctorat, Université du Mans, 2013.
- [191] N. Hamamed, N. Yaakoubi, R. El Guerjouma, H. Hentati, S. Bouaziz, et M. Haddar, « Détection des fuites dans les conduites de distribution d'eau en métal et en plastique », in 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, 2022.
- [192] N. Hamamed et al., « Comparative Study of Leak Detection in PVC Water Pipes Using Ceramic, Polymer, and Surface Acoustic Wave Sensors », *Sensors*, vol. 23, no 18, p. 7717, 2023.
- [193] A. Anastasopoulos, D. Kourousis, K. Bollas, E. Abee, et E. Venizelou, « Acoustic emission leak detection of liquid filled buried pipeline », vol. 27, janv. 2009.
- [194] A. J. Brunner et M. Barbezat, « Acoustic Emission Monitoring of Leaks in Pipes for Transport of Liquid and Gaseous Media: A Model Experiment », *AMR*, vol. 13-14, p. 351-356, févr. 2006.
- [195] N. Netshidavhini et R. B. Mabuza, « Effects of various couplants on carbon steel and aluminium materials using ultrasonic testing », in 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012,

p. 16-20.

- [196] C. R. Farrar et K. Worden, « An introduction to structural health monitoring », *Phil. Trans. R. Soc. A.*, vol. 365, no 1851, p. 303-315, févr. 2007.
- [197] Eclairage du réseau des routes nationales - Recommandations pour le contrôle de la stabilité des ouvrages d'éclairage public par un essai de charge statique - Révision décembre, 2011.
- [198] K. R. McCall et R. A. Guyer, « Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials », *J. Geophys. Res.*, vol. 99, no B12, p. 23887-23897, déc. 1994.
- [199] O. Achouham, C. Mechri, P. Mignot, C. Cluzeau, P. Philippi, « Non Destructive Evaluation of Public Lighting Masts Using Nonlinear Resonant Acoustic Spectroscopy », *Présentation technique uniquement*, QNDE2023-118643, juillet 2023.

**Titre :** Capteurs acoustiques pour la détection de fuites dans les réseaux de distribution d'eau et l'évaluation non destructive des structurels : Conception, optimisation et étude comparative.

**Mots clés :** Capteurs acoustiques, SAW (Surface Acoustic Wave), PZT (Plomb Zirconate Titanate), PVDF (Polyvinylidène Fluoré), Détection des fuites d'eau, SHM (Surveillance de l'Intégrité Structurelle).

**Résumé :** L'objectif de la présente thèse consiste à examiner, concevoir, mettre en œuvre et appliquer des capteurs acoustiques, pour détecter les fuites dans les réseaux de distribution d'eau. L'objectif principal est de comparer les performances des capteurs SAW, que nous les avons fabriqués, avec celles des capteurs plus courants en céramique PZT et en polymère PVDF pour la détection des fuites dans les canalisations d'eau. Le premier chapitre propose une revue exhaustive de la littérature sur les matériaux piézoélectriques, les capteurs acoustiques, ainsi que les différentes méthodes de détection des fuites d'eau dans les réseaux de distribution. L'objectif est de fournir une compréhension approfondie des principes de fonctionnement, des avantages et des inconvénients de chaque type de capteur, ainsi que des défis liés à la détection des fuites d'eau. Ensuite, nous présentons les capteurs acoustiques utilisés, en mettant l'accent sur les capteurs SAW qui sont étudiés de manière approfondie grâce à une modélisation analytique en utilisant MATLAB, une simulation numérique via COMSOL.

Les détails du processus de conception et de fabrication sur un substrat flexible en PVDF sont exposés, y compris les spécifications du substrat, la géométrie du capteur. Dans la suite du travail sont présentés les résultats expérimentaux dont les expériences sont réalisées en laboratoire dans des conditions contrôlées. Dans la première partie, des résultats préliminaires concernant les performances des capteurs PZT et PVDF pour la détection des fuites d'eau dans les conduites plastiques (PVC) et métalliques (cuivre) sont présentés. Dans la deuxième partie, nous présentons les résultats de l'application des capteurs SAW pour la détection de fuites sur des conduites en PVC. Ces résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus avec les capteurs classiques PZT et PVDF étudiés dans la première partie, mettant ainsi en lumière les avantages potentiels des capteurs SAW en termes de sensibilité et de précision pour la détection des fuites d'eau. Enfin, le dernier chapitre de la thèse se penche sur l'utilisation des capteurs PZT et PVDF précédemment mentionnés pour caractériser l'état de santé des structures notamment de type mât, à l'aide de la méthode de la résonance acoustique non linéaire. L'objectif principal de ce chapitre est d'explorer de nouvelles perspectives pour l'utilisation des capteurs PVDF et SAW dans cette application dans une perspective de Contrôle de Santé Intégré : Structural Health Monitoring (SHM).

**Title:** Acoustic sensors for leak detection in water distribution networks and non-destructive evaluation of structures: Design, optimization and comparative study.

**Keywords :** Acoustic sensors, SAW (Surface Acoustic Wave), PZT (Lead Zirconate Titanate), PVDF (Polyvinylidene Fluoride), Water Leak Detection, SHM (Structural Health Monitoring).

**Abstract :** The objective of this thesis is to examine, design, implement, and apply acoustic sensors, for the detection of water leaks in distribution networks. The primary aim is to compare the performance of SAW sensors, that we made them, with that of more common sensors made of PZT ceramics and PVDF polymers for water leak detection in pipelines.

The first chapter provides a comprehensive review of the literature on piezoelectric materials, acoustic sensors, as well as various methods for detecting water leaks in distribution networks. The goal is to provide a deep understanding of the operating principles, advantages, and disadvantages of each type of sensor, along with the challenges associated with water leak detection.

Subsequently, we introduce the acoustic sensors used, with a strong focus on SAW sensors, which are thoroughly studied through analytical modeling using MATLAB and numerical simulation via COMSOL. Details of the design and manufacturing process on a flexible PVDF substrate are presented, including substrate specifications and sensor geometry.

The following sections present experimental results, obtained through experiments conducted in a controlled laboratory environment. In the first part, preliminary results regarding the performance of PZT and PVDF sensors for detecting water leaks in plastic (PVC) and metallic (copper) pipelines are presented. In the second part, we showcase the results of applying SAW sensors for leak detection in PVC pipes. These results are then compared to those obtained with traditional PZT and PVDF sensors studied in the first part, highlighting the potential advantages of SAW sensors in terms of sensitivity and precision for water leak detection.

Finally, the last chapter of the thesis delves into the use of the previously mentioned PZT and PVDF sensors to characterize the health status of structures, particularly mast-type structures, using the non-linear acoustic resonance method. The main objective of this chapter is to explore new possibilities for the utilization of PVDF and SAW sensors in this application, within the context of a Structural Health Monitoring (SHM) approach.