

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

MEMOIRE DE MASTER

SPECIALITE: MAINTENANCE INDUSTRIELLE

THEME

**Détection des fuites dans des canalisations métalliques par
ondes acoustiques**

Présenté par: - BOUCHEFRA Nacer

-YACINE Ramdane

Soutenu publiquement, le 23/06/2024, devant le jury composé de:

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Affiliation</i>	<i>Qualité</i>
<i>Mr. BOURAHLA Boualem</i>	<i>professeur</i>	<i>UMMTO</i>	<i>président</i>
<i>Mme. ARAR Ouiza</i>	<i>M/CB</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Examinatrice</i>
<i>Mr. SAIT Smail</i>	<i>M/CA</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Encadreur</i>

Remerciements

-

- ❖ Nous tenons avant tout à exprimer notre gratitude envers Dieu le tout-puissant, pour nous avoir donné la vie, la volonté et la lumière nécessaire à la réalisation de ce mémoire.
- ❖ Nous souhaitons exprimer notre plus profonde gratitude et reconnaissance à notre directeur de mémoire, Mr. SAIT Ismail. Son soutien indéfectible, ses remarques constructives, ses encouragements et sa passion pour la recherche ont été essentiels tout au long de ce travail. Nous sommes particulièrement reconnaissants pour tous les conseils précieux et le savoir qu'il a partagé avec nous.
- ❖ Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail : le président du jury Pr. BOURAHLAL Boulem et Mme. ARAR Ouiza, en tant qu'examinatrice.
- ❖ Nous tenons également à remercier nos familles, en particulier nos mères et pères, pour leur soutien inconditionnel et leur amour constant. Leur présence et leur encouragement nous ont été d'un grand réconfort tout au long de ce parcours. Nos frères et sœurs méritent également une mention spéciale pour leur soutien moral et leurs encouragements.
- ❖ nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ce travail. Leur aide, qu'elle soit scientifique ou humaine, a été précieuse et appréciée.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À nos parents bien-aimés, dont l'amour et le soutien inconditionnels nous ont guidés tout au long de ce parcours académique. Leur encouragement constant et leurs innombrables sacrifices ont été notre source d'inspiration et de force.

À nos frères et sœurs, pour leur soutien moral et leurs encouragements. Leur présence chaleureuse et leur compréhension nous ont été d'un grand réconfort.

Que ce travail soit un hommage à tous ceux qui ont cru en nous et nous ont soutenus de toutes les manières possibles.

Introduction générale 1

Chapitre I :

Différentes techniques de détection des fuites dans les canalisations

I.1. Inspections visuelles et manuelles.....	3
I.1.1. Limitations.....	3
I.2. Méthode d'écoute manuelle à l'aide d'une perche d'écoute.....	4
I.3. Méthode d'injection de gaz.....	4
I.3.1. Mode de fonctionnement	5
I.3.2. Avantage.....	6
I.3.3. Limitations et facteurs influents.....	6
I.3.4. Utilisations combinées avec d'autres techniques.....	6
I.4. Méthode de corrélation des bruits de fuite.....	6
I.4.1. Principe de fonctionnement.....	6
I.4.2. Calcul de la distance de la fuite.....	7
I.4.3. Mise en œuvre et considérations pratiques.....	8
I.4.4. Avantages.....	8
I.4.5. Limitations.....	8
I.5. Méthode de détection par ondes acoustiques.....	8
I.5.1. Principe de fonctionnement.....	8
I.5.2. Mise en œuvre.....	9
I.5.3. Les capteurs utilisés pour la détection des fuites par la méthode acoustique.....	9
I.5.4. Avantages.....	10
I.5.5. Limitations.....	10
I.5.6. Utilisations combinées avec d'autres techniques.....	11

Chapitre II

Les ondes acoustiques

II.1. Les ondes élastique.....	12
II.1.1 Généralités sur les ondes élastiques.....	12
II.1.2. Aperçu sur l'élasticité dynamique linéaire.....	12
II.2. Les ondes longitudinales et transversales.....	15
II.3. Les ondes guidées.....	16
II.3.1. Ondes de Lamb.....	16
II.3.1.1. Les inconvénients des ondes de Lamb pour la détection des fuites.....	17
II.3.2. Ondes de Rayleigh.....	17
II.3.2.1. Les inconvénients des ondes de Rayleigh pour la détection des fuites.....	17
II.3.3. Ondes de Love.....	18
II.3.3.1. Les inconvénients des ondes de Love pour la détection des fuites.....	19

Chapitre III

Détections des fuites par ondes acoustiques

III.3.Simulations.....	21
III.3.1.Discussions.....	25
Conclusion générale.....	27
Références bibliographiques.....	28

Introduction

Dans la plupart des réseaux de distribution des fluides (eau, gaz, carburant), une forte proportion se perd, pendant le transport entre les usines de traitement et les points de consommation [1]. Dans certains réseaux et réservoirs de stockage, en particulier les plus anciens, les pertes peuvent atteindre un pourcentage énorme (les pertes dans les réseaux de distribution comme les conduites de transmission, conduites de distribution, branchements, raccords, vannes réservoirs...etc). Les pertes peuvent avoir plusieurs causes, telles que la corrosion ou l'oxydation; vieillissement des matériaux ; mouvements de terrain; les vibrations et les charges excessives dues à la circulation ; la pression excessive utilisée surtout dans les réseaux en plastique (PVC) et au mauvaise installation [2].

Cependant, ces fuites sont responsables de pertes, elles constituent une perte économique importante (le coût de production, de son traitement et de son transport).

En outre, les risques majeurs pour la santé publique, les contaminants peuvent s'infiltrer dans les conduites, dans les endroits où les fluides s'échappent, lorsque la pression baisse dans le réseau et des fondations des routes ou des bâtiments [3].

Dans l'intention d'éviter tous ces risques, de nombreuses techniques ont été développées pour détecter et localiser les fuites. On cite à titre d'exemple, les mesures de nuit pour éviter l'interférence entre les sources de bruits et les bruits environnementaux (routier); la technique du gaz traceur qui se base sur l'injection d'un gaz non toxique, plus léger que l'air et insoluble dans l'eau dans une partie isolée de la conduite, (le gaz s'échappe par l'ouverture de la fuite, puis atteint la surface en s'infiltrant à travers le sol et la chaussée); la thermographie dont le principe se base sur des caméras infrarouges portatives ou embarquées dans un véhicule ou un avion; inspection visuelle qui est une méthode ancestrale, pour la détection en particulier les fuites d'eau. Cette inspection visuelle soignée, de tous les éléments du système de distribution des fluides, porte aussi sur la recherche des fissures, des défauts d'association, des résidus d'humidité ou tout autre signe visible de fuite dans les conduites. [4, 5].

Dans les endroits difficilement accessibles, tels que les canalisations souterraines ou les espaces confinés, des caméras d'inspection sont introduites dans les conduites pour observer en temps réel les fuites [3-5].

Néanmoins, les instruments acoustiques s'avèrent un outil intéressant pour la détection des fuites ; cependant les fuites des fluides peuvent produire des bruits particuliers, tels que des vibrations et des bruits de coulée. Les détections servent à identifier les fuites en écoutant les variations du son à l'aide de capteurs, microphones ou de géophones, d'autre part les ondes acoustiques guidées de surface de Lamb et de Rayleigh, qui sont très utilisés pour la détection des fuites dans certaines conditions [4-6].

En revanche, toutes ces méthodes sont conditionnées, elles exigent de matériels plus

sophistiqués, donc plus coûteux, ainsi parfois sont pas fiables dans les conduites longues. Les ondes acoustiques guidées sont exigeantes. Elles ne sont pas exploitables dans les réseaux enterrés et leurs forte atténuation et faible propagation dans les réseaux de PVC.

Toutefois, l'émission acoustique est aujourd'hui reconnue pour sa maturité dans les applications de vérifications de l'intégrité des équipements. Cette méthode est basée sur le jet du gaz dans la conduite et une excitation par une onde de pression qui se propage le long de la conduite ; donc l'écoulement de gaz par une ouverture percée dans la paroi du tube génère un champ acoustique dans le tube. La présence d'une fuite dans le chemin de propagation de l'onde induit une énergie rayonnée, qui sera détectée par un ensemble de capteurs qui diagnostiquera la présence d'une fuite. Leur potentiel réside dans leur propagation sur des réseaux de centaine de mètre[7].

Dans le cadre de cette idée, nous proposons des simulations des fuites dans un tuyau que soit en métal ou en plastique. Notre objectif vise l'importance capitale de la propagation des ondes élastiques de pression (ondes longitudinales) dans les tubes pour montrer la faisabilité de détection des fuites dans les tuyaux y compris les réservoirs de stockage.

Ce manuscrit est subdivisé en trois chapitres, le premier est consacré aux différentes techniques de détections et leurs limites. L'étude théorique de la propagation des ondes élastiques (élasticité dynamique linéaire), fait l'objet de second chapitre et des simulations numérique qui montrent la faisabilité d'utiliser les ondes acoustique pour la détection des fuites dans les réseaux de distribution seront abordées dans le chapitre 3. nous terminons le manuscrite par une conclusion général

Chapitre I

Différentes techniques de détection des fuites dans les canalisations

La gestion efficace des réseaux de tuyauterie est cruciale pour la sécurité, la maintenance de l'infrastructure, et la conservation des ressources en eau et en gaz. Les fuites dans les réseaux de distribution peuvent entraîner des pertes économiques significatives, des risques environnementaux et des dangers pour la sécurité publique. Par conséquent, la détection rapide et précise des fuites est une priorité pour les opérateurs de réseau.

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des techniques utilisées pour détecter les fuites dans les systèmes de tuyauterie. Nous explorons une gamme de méthodes, des inspections visuelles simples aux technologies avancées telles que l'injection de gaz et l'utilisation des ondes acoustiques. Chaque technique est décrite en détail, mettant en évidence ses principes de fonctionnement, ses avantages, ses limitations et ses applications optimales.

I. Différentes techniques de détection des fuites

I.1. Inspections visuelles et manuelles

C'est une technique fondamentale qui repose sur l'inspection directe des canalisations pour identifier des indices visuels de fuite, tels que la rouille, la corrosion, ou l'humidité. Les inspecteurs utilisent divers outils comme des lampes de poche, des miroirs et des caméras d'inspection pour examiner les zones inaccessibles [9, 10].

I.1.1. Limitations

Alors que, cette méthode est limitée par sa dépendance aux signes extérieurs, visibles de défaillance et ne peut pas détecter les fuites internes ou cachées. Ce qui nécessite l'utilisation de techniques complémentaires pour une analyse approfondie.

I.2. Méthode d'écoute manuelle à l'aide d'une perche d'écoute

La perche d'écoute, ou bâton d'écoute (soit en métal, en bois ou en plastique) figure. I.1, est muni d'un embout auriculaire, Il est utilisé pour écouter les fuites au niveau des raccords et pour localiser précisément l'emplacement d'une fuite. C'est un équipement largement utilisé par de nombreuses entreprises de distribution d'eau. Cette technique dépend de la capacité de l'ingénieur à entendre la fuite et n'utilise aucun équipement électronique pour amplifier le son.

Cette méthode est particulièrement adaptée à une utilisation sur des canalisations métalliques d'un diamètre compris entre 75 mm et 250 mm et avec des pressions supérieures à 1.03 bar. Le matériau ou la taille du tuyau n'empêche pas la perche d'écoute de localiser la fuite depuis la surface terrestre, mais ce qui affecte cette capacité, c'est le type de fuite, le matériau de remblayage du sol, la pression de l'eau qui quitte le tuyau, le bruit de fond et la capacité de l'opérateur [8-11-12].



Figure.1. Schéma de détection avec une perche.

I.3. Méthode d'injection de gaz

La méthode d'injection de gaz est une technique avancée et efficace utilisée pour détecter les fuites dans les réseaux de distribution et de transport de gaz figure (I.2).

I.3. 1. Mode de fonctionnement

- **Injection de gaz traceur** : un gaz traceur, généralement un gaz inerte tel que l'hélium ou un mélange de gaz spécialement conçu pour la détection des fuites, est injecté dans le réseau de gaz dans un point d'entrée spécifique.
- **Propagation dans le réseau** : le gaz traceur se propage à travers le réseau de distribution ou de transport de gaz, suivant le même chemin que le gaz de service. En raison de ses propriétés distinctes et de sa capacité à pénétrer dans les plus petites fissures (le gaz traceur accompagne le gaz qui fuit).
- **Détection du gaz traceur** : des capteurs sensibles au gaz traceur sont placés à différents points du réseau pour détecter sa présence. Ces capteurs peuvent être portatifs ou fixes et ils sont souvent équipés de technologies de détection avancées, telles que les capteurs infrarouges ou les spectromètres de masse. Si le gaz traceur est détecté à un endroit où il ne devrait pas être présent, cela indique la présence d'une fuite.
- **Localisation de la fuite** : en analysant les données recueillies par les capteurs et en utilisant des techniques de triangulation ou de cartographie, la source de la fuite peut être localisée avec une certaine précision. Des logiciels de traitement de données peuvent aider à interpréter les signaux et à cartographier la concentration du gaz traceur, facilitant ainsi l'identification de la fuite [13-14].

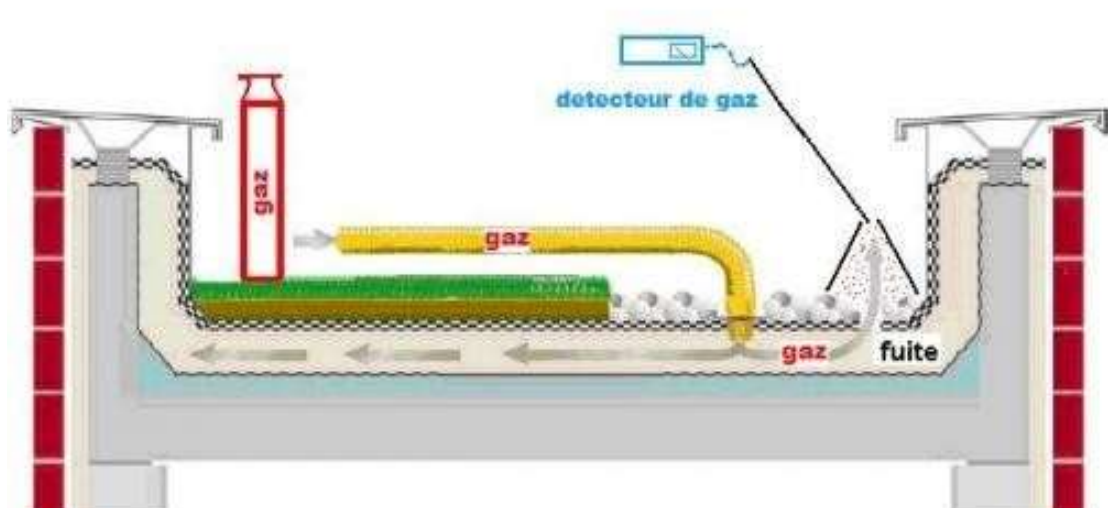


Figure I.2. Détection de fuite de gaz dans un réseau de canalisation.

I.3.2. Avantage

- **Sensibilité et précision :** la méthode d'injection de gaz est extrêmement sensible et peut détecter même les petites fuites. La précision de localisation est également élevée, surtout lorsque des techniques avancées de cartographie et de triangulation sont utilisées.
- **Sécurité :** les gaz traceurs utilisés sont inertes et non toxiques, ce qui garantit la sécurité des techniciens et des équipements.
- **Compatibilité :** cette méthode est compatible avec divers types de distribution, y compris les réseaux complexes et étendus.

I.3.3. Limitations et facteurs influents

- **Taille de la fuite :** la taille de la fuite peut affecter la détection. Les fuites très petites ou très grandes peuvent nécessiter des ajustements dans les techniques de détection et l'équipement utilisé.
- **Pression du gaz :** la pression du gaz dans le réseau influence la propagation du gaz traceur. Une pression insuffisante peut limiter la propagation du gaz traceur, tandis qu'une pression trop élevée peut diluer le signal détectable.
- **Capacité des capteurs :** la sensibilité et la précision des capteurs sont cruciales. Des capteurs de haute qualité et bien calibrés sont essentiels pour une détection fiable.

I.3.4. Utilisation combinée avec d'autres techniques

Pour améliorer la précision et la fiabilité, la méthode d'injection de gaz est souvent utilisée en combinaison avec d'autres techniques de détection de fuites, telles que :

- **Méthodes acoustiques :** détection des bruits de fuite à l'aide de capteurs acoustiques.
- **Détection par imagerie thermique :** utilisation de caméras thermiques pour visualiser les différences de température causées par les fuites de gaz.
- **Inspection visuelle :** utilisation de drones ou d'inspections manuelles pour vérifier visuellement les zones suspectes.

Méthode de corrélation des bruits de fuite

La corrélation des bruits de fuite est une technique sophistiquée utilisée pour localiser les fuites dans les pipelines en comparant les bruits détectés à deux points distincts du système.

Principe de fonctionnement :

La méthode de corrélation des bruits de fuite repose sur les principes suivants :

- **Propagation du bruit** : lorsqu'une fuite se produit dans une conduite, le bruit généré se propage dans les deux directions à une vitesse constante, en supposant que le matériau et le diamètre du tuyau sont constants.
- **Détection du Bruit** : des capteurs sont placés à des points stratégiques du pipeline, par exemple aux vannes A et B. Si la fuite est équidistante de ces capteurs, le bruit de la fuite sera détecté simultanément. Cependant, si la fuite est plus proche de l'un des capteurs, le bruit sera détecté en premier par ce capteur, puis avec un certain retard par l'autre.
- **Mesure du retard temporel** : le processus de corrélation mesure le retard entre l'arrivée du bruit à chaque capteur. Cette différence de temps est cruciale pour localiser la fuite [8-15-16].

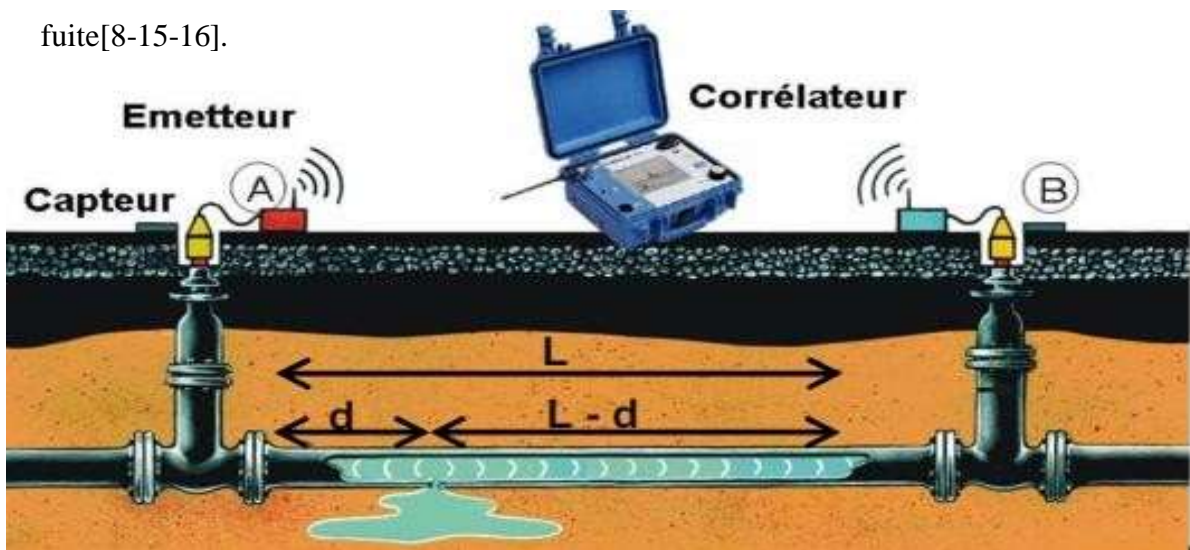


Figure I.3. Détection de fuite dans une conduite à l'aide d'un corrélateur acoustique.

I.4.2. Calcul de la distance de la fuite :

Ladistance L de la fuite par rapport au capteur le plus proche peut être recalculée à l'aide de l'équation :

$$D = (2 \times L) + (V \times t) \quad (I.1)$$

En réarrangeant cette équation, nous pouvons exprimer L comme suit

$$x = \frac{D - (v \times t)}{2} \quad (I.2)$$

Où:

- D : distance entre les capteurs.
- V : vitesse du son dans le matériau du tuyau.
- t : retard temporel mesuré entre les détections aux capteurs A et B.

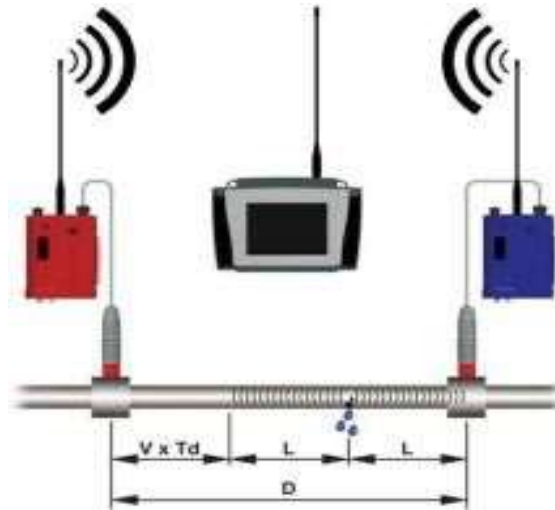


Figure I.4. Principe de corrélation

I.4.3. Mise en œuvre et considérations pratiques

- **Distance entre les capteurs :** la précision de la méthode dépend de la mesure précise de la distance D entre les capteurs.
- **Vitesse du son :** la vitesse du son V varie en fonction du matériau du tuyau, du diamètre du tuyau et des conditions environnementales. Des mesures précises ou plusieurs corrélations sont nécessaires pour tenir compte de ces variations.

I.4.4. Avantages

- Sensibilité élevée pour détecter les fuites, même à de grandes distances.
- Méthode non destructive qui n'implique pas de modifications de la canalisation.
- Rapidité d'exécution, réduisant les temps d'arrêt du système.

I.4.5. Limitations

- Sensibilité aux conditions environnementales et au bruit ambiant.
- Coût initial potentiellement élevé en raison de l'installation d'équipements spécialisés.

I.5. Méthode des ondes acoustiques

La méthode des ondes acoustiques est une technique avancée utilisée pour détecter les fuites dans les canalisations en utilisant des ondes sonores. Cette approche repose sur la propagation des ondes acoustiques à travers les matériaux

I.5.1. Principe de fonctionnement

Les ondes acoustiques sont émises dans la canalisation et se propagent à travers le matériau de la paroi lorsqu'il y a une fuite, les ondes acoustiques rencontrent une discontinuité dans le matériau, ce qui crée une réflexion ou une dispersion de l'onde. Ces réflexions peuvent être détectées par des capteurs appropriés.

Mise en œuvre

I.5.2.a. Émission des ondes acoustiques : des transducteurs ou des capteurs acoustiques sont utilisés pour émettre des ondes sonores dans la canalisation. Ces ondes sonores se propagent à travers la paroi de la canalisation, leur équation de propagation décrit comment les ondes sonores se propagent à travers un milieu donné. Elle peut être représentée par l'équation de l'onde acoustique de pression

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 P \quad (\text{I.3})$$

Où P est la pression acoustique, t est le temps, v^2 est la vitesse du son dans le matériau, ∇^2 est l'opérateur Laplacien.

La méthode de détection est basée sur des capteurs placés le long de la canalisation pour détecter les variations de l'onde acoustique causées par des fuites ou d'autres anomalies dans la paroi. Ces capteurs peuvent détecter des changements subtils dans le signal acoustique, indiquant la présence d'une fuite.

I.5.2.b. Analyse des résultats : les données recueillies par les capteurs sont analysées pour identifier les signaux caractéristiques des fuites. Des techniques de traitement du signal, telles que la transformée de Fourier ou les algorithmes de filtrage, peuvent être utilisées pour améliorer la sensibilité et la précision de la détection [8-17-18].

I.5.3. Avantages

- **Sensibilité élevée :** la méthode des ondes acoustiques peut détecter des fuites même à distance de la source, permettant une détection précoce et efficace.
- **Nom destructif :** elle ne nécessite pas de démanteler ou de modifier la canalisation pour détecter les fuites, préservant ainsi l'intégrité structurelle du système.
- **Rapidité :** elle permet une détection rapide des fuites, ce qui réduit les temps d'arrêt du système et minimise les perturbations pour les utilisateurs.

I.5.4 Les capteurs utilisés pour la détection des fuites par la méthode acoustiques

Typedecapteur	Descriptionetapplication
Hydrophones	-Microphonesconçuspourdétecterlesondessonoresousl'eau. -Utiliséspourladétectiondefuitesdanslesconduitesd'eau et les Systèmessubmergés.
Capteurdepression	-Mesurentlesvariationsdepressioncauséesparlesondes sonores générées par une fuite. -Utiliséspourlasurveillance.
Microphones	-Capteursstandardspourdétecterlesondessonoresaériennes. -Utiliséspourladétectiondefuitesdanslesconduitesaérienneset les environnements industriels.
Capteursultrasonores	-Détectentle son ultra sonore produitparlesfuitessous haute pression. -Utilisésdanslesindustriespétrolières, gazièreset chimiques.
Accéléromètres	-Mesurentlesvibrationsmécaniquesinduitesparlesfuites. -Utilisésdanslessystèmesdepipelinesmétalliqueset les infrastructures industrielles.
Capteursafibre optique	-Utilisentdesfibresoptiquespourdétecterlesvariations acoustiques. -Couvrentdelonguesdistancespourlasurveillance des pipelines.
Capteurs piézoélectriques	-Convertissentlesvibrationsmécaniquesensignaux électriques. -Utiliséspourdétecterlesultrasonsgénérésparles fuites.

Table I.1: Types de capteurs utilisés pour la détection de fuites par méthodes acoustiques [19]

I.5.4.Limitations

- **Conditions environnementales :** les performances de la méthode peuvent être affectées par le bruit ambiant ou d'autres conditions environnementales, réduisant ainsi la sensibilité ou la précision.
- **Coût initial :** l'installation d'équipements spécialisés peut représenter un investissement initial élevé, bien que cela puisse être compensé par les économies réalisées grâce à une détection précoce des fuites.

I.5.6. Utilisation combinée avec d'autres techniques

Pour améliorer la précision et la fiabilité, la méthode des ondes acoustiques est souvent utilisée en combinaison avec d'autres techniques de détection de fuites, telles que :

- **Méthodes de corrélation:** utilisation de corrélateurs pour analyser les signaux acoustiques détectés à différents points et déterminer l'emplacement exacte de la fuite.
- **Imagerie thermique:** utilisation de caméras thermiques pour visualiser les différences de température causées par les fuites de gaz ou de liquide.
- **Inspection visuelle:** utilisation de drones ou d'inspections manuelles pour vérifier visuellement les zones suspectes.

Chapitre II

Les ondes acoustiques

II.1. Les ondes élastiques

II.1.1. Généralité sur les ondes élastiques

L'étude expérimentale des ondes élastiques dans les milieux présente de nombreux avantages. Leur propagation libre dans un milieu est régie par les équations du mouvement. En pratique, le milieu de propagation est souvent limité par une ou plusieurs frontières. Les ondes y réfléchissent et donnent naissance à d'autres ondes dans certaines conditions, changeant souvent de direction et parfois de nature.

Dans ce contexte, les ondes sont gouvernées à la fois par les équations du mouvement et par les conditions aux limites imposées sur les frontières. Dans certaines conditions particulières, le milieu peut devenir un guide d'ondes.

La compréhension du phénomène de propagation des ondes dans une structure nécessite des modélisations numériques prenant en compte de nombreuses données physiques (contraintes imposées sur la structure, conditions aux limites, etc.). Ces modélisations mathématiques s'intéressent à la résolution des équations, la recherche de valeurs et vecteurs propres, etc. Il est parfois plus précis de passer aux éléments finis et à l'analyse modale pour une compréhension plus approfondie [20-22].

II.1.2. Aperçu sur l'élasticité dynamique linéaire

Supposons qu'un milieu est traversé par un ébranlement, qui le met localement en vibration. Le déplacement u_i de chaque point, qui dépendait des coordonnées initiales x_i (cas d'élasticité statique), dépend maintenant du temps $u_i = u_i(x_k, t)$. Il est obéit aux relations fondamentales.

L'équation du mouvement, qui résulte du principe fondamental de la dynamique

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (\text{II.1})$$

Où T_{ij} Désigne les composantes du tenseur des contraintes T (figure II.1), f_i sont les composantes des forces volumiques, ρ la masse volumique du matériau et u_i les composantes du champ de déplacement (\mathbf{u})

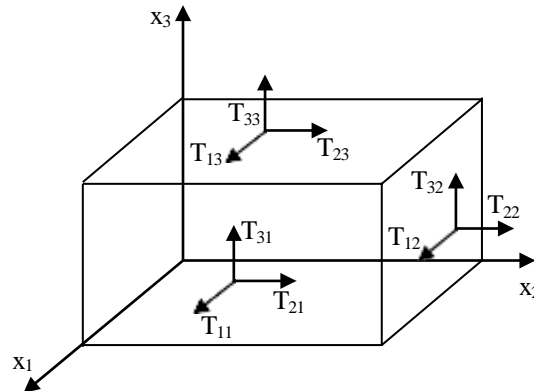


Figure II.1. Représentations des contraintes normales et tangentielles.

Les déformations subies par un milieu matériel sont reliées aux contraintes résultant des efforts extérieurs appliqués sur ce milieu par une loi caractéristique de ce milieu appelée loi de comportement élastique. Cette loi décrit la relation entre l'allongement subi par le matériau et la contrainte normale exercée sur une extrémité, connue sous le nom de loi de Hooke généralisée.

Sous l'hypothèse des faibles déformations, il existe une relation de proportionnalité entre les composantes respectives du tenseur des contraintes et des déformations. Sous cette hypothèse, on peut écrire,

$$T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} \quad (\text{II.2})$$

Où S_{ij} est le tenseur des déformations élastiques, il est donné par la relation de Cauchy (déplacement/déformation), en fonction du vecteur déplacement, selon la relation suivante :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{II.3})$$

Le tenseur C_{ijkl} d'ordre 4 est appelé tenseur d'élasticité et comporte $3^4 = 81$ composantes. Il résulte des propriétés de symétrie de T_{ij} et S_{ij} le tenseur C_{ijkl} possède respectivement les symétries $C_{ijkl} = C_{jikl}$ et $C_{ijkl} = C_{ijlk}$ ce qui réduit le nombre de composantes indépendantes de C_{ijkl} de 81 à 36. Cependant, des considérations thermodynamiques imposent la symétrie

$$C_{klij} = C_{ijkl}$$

Ces deux premières symétries permettent une notation contractée des indices, par

l'introduction de la transformation indiciaire de Voigt $ijkl \Rightarrow \alpha\beta$. Les indices grecs (α, β)

varient de 1 à 6 et les indices latins (i, j, k, l) de 1 à 3. La transformation indiciaire est donnée selon la convention suivante : l'indice grec vaut la demi somme des indices latins si $i = j$ et vaut $9 - (i + j)$ si $i \neq j$.

Le but de cette transformation est de simplifier l'expression de la contrainte T_{ij} , qu'on peut

réécrire sous la forme matricielle : $T_\alpha = C_{\alpha\beta} S_\beta$

Où $C_{\alpha\beta}$ est une matrice 6×6 , symétrique en raison de la symétrie $C_{klij} = C_{ijlk}$ mentionnée plus haut.

Dans le cas le plus général, c'est-à-dire en cas d'anisotropie maximale, la connaissance de 21 composantes est nécessaire pour caractériser ce milieu.

Dans le cas simple d'isotropie, la loi de Hooke séduit : $T_{ij} = \lambda S_{ij} \delta_{ij} + 2\mu S_{ij}$, λ et μ sont les constantes de Lamé, δ_{ij} est le symbole de Kronecker (qui vaut 1 pour $i = j$, 0 sinon)

On conclut des relations précédentes la formulation de Navier en déplacement comme suit :

$$(\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) + \rho f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (\text{II.4})$$

En l'absence de forces volumiques, l'équation de Navier peut se mettre sous la forme vectorielle

$$(\lambda + \mu) \nabla \cdot \vec{u} + \mu \nabla^2 \vec{u} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}, \text{ où } \nabla \text{ désigne l'opérateur Laplacien}$$

Dans cette équation, les trois composantes du déplacement (u_x, u_y, u_z) sont couplées. Il est

possible d'obtenir des équations découplées en faisant usage de la décomposition de

Helmholtz

$$\vec{u} = \vec{u}_L + \vec{u}_T = \text{grad } \phi + \text{rot } \psi.$$

Cette décomposition nous permet d'écrire le champ de déplacement u comme la somme d'un

potentiel scalaire irrotationnel ϕ et d'un potentiel vectoriel incompressible ψ , définissant respectivement les composantes longitudinales et transversales du déplacement mécanique.

En conséquence, les composantes vectorielles des déplacements peuvent être écrites en fonction des potentiels sous la forme

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi_z}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial z} \\ u_y &= \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_z}{\partial z} \\ u_z &= \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{\partial \psi_x}{\partial z} \end{aligned} \right\}. \quad (\text{II.6})$$

II.2. Les ondes longitudinales et transversales

En substituant l'expression du déplacement (II.5) dans l'équation de Navier (II.4), on obtient deux équations d'Alembert découplées pour les deux potentiels, le potentiel scalaire ϕ et le potentiel vecteur ψ .

$$\Delta \phi - \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0, \text{ cette équation correspond à la propagation d'une onde longitudinale (L) ou}$$

de compression (P), pour laquelle la matière subit une succession alternative de compressions et de dilatations parallèles à la direction de propagation. Sa vitesse est définie par la relation

$$C_L = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$$

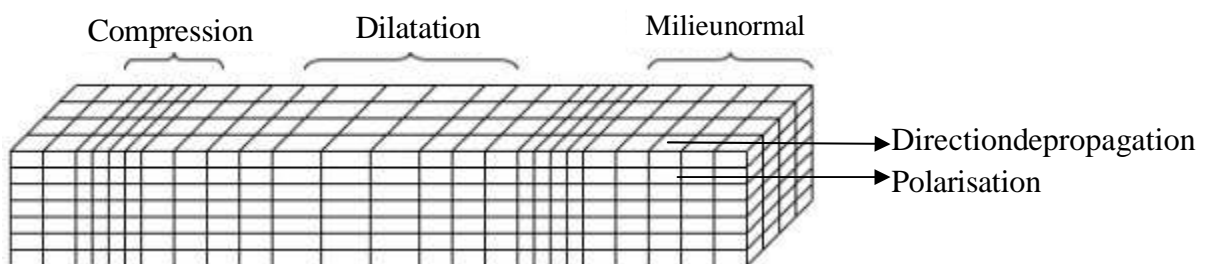


Figure II.2: Schéma de propagation d'onde longitudinale et sa polarisation.

$$\Delta \psi - \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0,$$

Concerne l'onde transversale (T) ou de cisaillement (S) pour laquelle le déplacement des particules s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation. La vitesse de ces ondes est définie

comme suit : $C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$, [21-22].

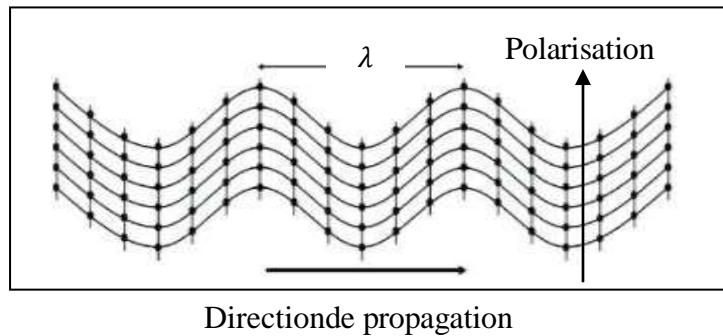


Figure II.3: Schéma de propagation d'une onde transversale.

II.3. Les ondes guidées

II.3.1. Ondes de Lamb

Lors de la propagation des ondes longitudinales (L) et transversales (T) dans une plaque, elles subissent des réflexions multiples sur leurs surfaces libres. Pour chacune de ces réflexions, l'onde incidente subit également une conversion vers l'autre type d'onde. En effet, une onde longitudinale incidente résulte en une combinaison d'onde longitudinale réfléchie et transversale obtenue par conversion de mode et vice-versa. Sous l'unique condition qui impose que, la longueur d'onde d'excitation, soit supérieure ou égale à l'épaisseur de la plaque, il se produit donc un couplage entre ces ondes, d'où la naissance d'une onde guidée de Lamb, qui peut générer un ou plusieurs modes guidés Lamb [22-23-24].

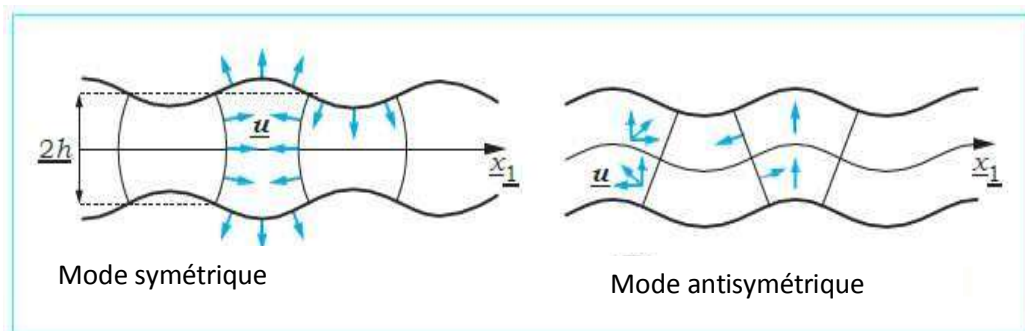


Figure II.4: Les modes de vibrations des ondes de Lamb.

Les ondes de Lamb ont une polarisation quasi-elliptique, qui résulte de la superposition de deux composantes de déplacement, l'une longitudinale et l'autre transverse verticale, elle se propage à des fréquences discrètes dans des plaques fines, appelées membranes (d'épaisseur de l'ordre de λ) selon le type de déplacement acoustique, on distingue les deux modes de Lamb, symétriques et antisymétriques figure (II.4).

II.3.1.1. Les inconvénients des ondes de Lamb pour la détection des fuites

- **Dispersion des signaux** : les ondes Lamb se dispersent en fonction de la fréquence et de l'épaisseur du matériau. Cette dispersion peut compliquer l'interprétation des signaux, surtout sur de longues distances.
- **Modes multiples** : les ondes Lamb peuvent exister sous plusieurs modes (symétriques et antisymétriques), ce qui peut entraîner des interférences et rendre difficile l'identification de la source exacte des fuites.
- **Sensibilité aux variations d'épaisseur** : les variations d'épaisseur des parois des tuyaux peuvent affecter la propagation des ondes Lamb, entraînant des variations dans les signaux qui peuvent être confondues avec des fuites.

II.3.2. Onde de Rayleigh

L'onde de Rayleigh est une onde guidée. Elle se propage à la surface libre d'un milieu semi infini dont l'interface (solide / vide) est libre de toute contrainte. Le passage de l'onde provoque un mouvement elliptique des particules, la polarisation elliptique peut s'expliquer par la faible impédance de l'air par rapport à celle du solide, favorisant ainsi le déplacement normal par rapport au déplacement tangentiel.

L'amplitude des ondes de Rayleigh décroît exponentiellement avec l'épaisseur figure (II.5), de sorte que, leur énergie reste confinée sur à peu près une longueur d'onde, elle s'annule à environ deux fois la longueur d'onde 2λ en profondeur, et les composantes longitudinales et transversales sont déphasées de $\pi/2$. La vitesse de ces ondes (toujours inférieure à celle des ondes de volume elle est indépendante de la fréquence d'excitation) [25].

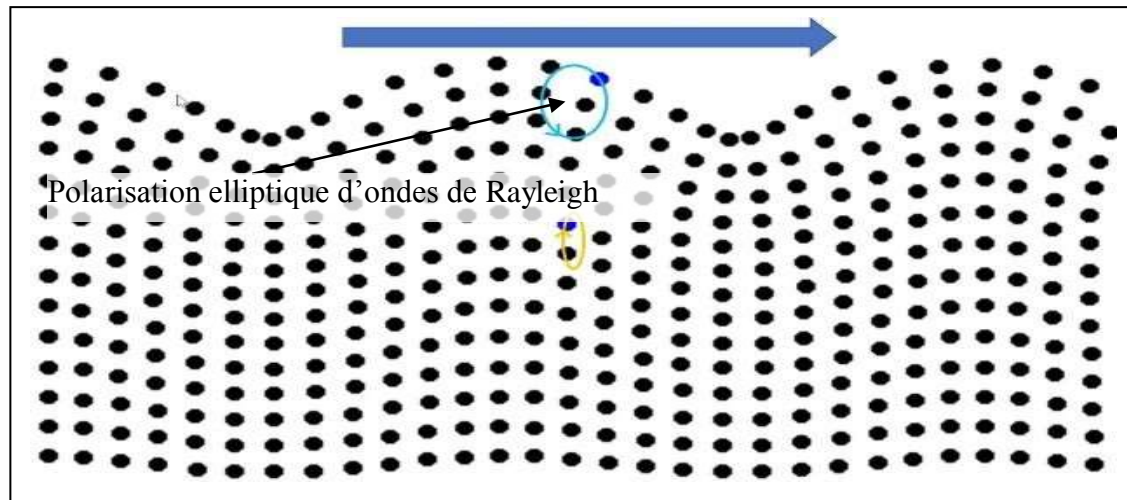


Figure II.5: Onde de Rayleigh dans un solide isotrope et l'amplitude des déplacements Longitudinal et transversal en fonction de la profondeur.

Pour de nombreux matériaux isotropes la composante transversale vaut à la surface environ une fois et demie la composante longitudinale, celle-ci change de signe à une profondeur de l'ordre de $0,2 \lambda$. La figure (II.5) met en évidence la polarisation elliptique en surface et en profondeur jusqu'à environ 2λ .

II.3.2.1. Les inconvénients d'onde de Rayleigh pour la détection des fuites

- **Influence des conditions de surface** : les ondes Rayleigh, qui se propagent à la surface du matériau, sont fortement influencées par les conditions de surface. La présence de saletés, de rouille ou d'autres contaminants peut perturber la propagation des ondes et affecte la précision de la détection.
- **Faible pénétration** : les ondes Rayleigh ont une faible pénétration dans le matériau, ce qui peut limiter leur efficacité pour détecter des fuites profondes ou internes dans les tuyaux.

II.3.3. Onde de Love

C'est une onde transversale perpendiculaire à la direction de propagation, qui se propage dans un milieu constitué d'une couche solidaire d'un substrat, sous certaines conditions de symétrie et des vitesses transversales des matériaux (couche/substrat), Love a montré que la propagation de cette onde n'est possible que si la vitesse de la composante transversale de l'onde de volume dans le substrat est supérieure à celle dans la couche. La présence de la couche joue le rôle d'un guide acoustique (couche guidant), leur énergie est principalement répartie dans celle-ci comme le montre la figure (II.6). La diminution du déplacement en

profondeur, de plus, les ondes de Love sont dispersives, elles se propagent à des fréquences discrètes qui dépendent de l'épaisseur de la couche guidante et de la longueur d'onde [23-26].

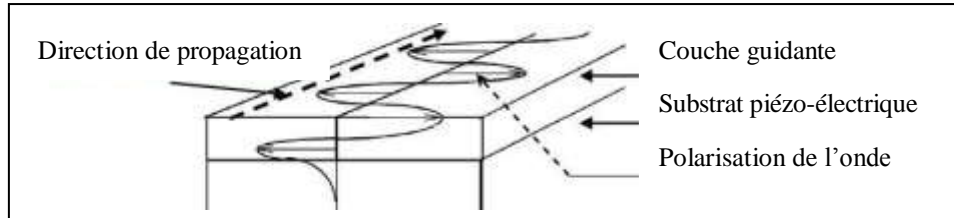


Figure II.6: Déplacement acoustique d'une onde de Love.

II.3.3.1. Les inconvénients d'onde de Love pour la détection des fuites

- **Sensibilité aux défauts de surface** : les ondes Love, étant confinées à la surface du matériau, sont particulièrement sensibles aux défauts de surface, tels que la corrosion, les égratignures et les dépôts.
- **Nécessité de couches spécifiques** : les ondes Love nécessitent une couche de matériau spécifique pour se propager (typiquement une couche superficielle élastique sur un substrat rigide), ce qui est indisponible ou applicable pour tous les types de tuyaux.

Chapitre III

Détections de fuites par onde acoustiques

L'apparition d'une pression dynamique est due à la perturbation du gaz au repos ce qui engendre une variation localisée au niveau de la fuite. À cet effet, l'excitation du gaz par une onde de pression engendre un champ acoustique à travers la fuite. L'impact de cette variation de pression sur un capteur situé le long de la conduite produit un signal électrique, qui est une fonction de la vitesse de propagation de la vibration (énergie cinétique d'excitation de gaz) ainsi la fréquence d'excitation du gaz, le signal reçu au capteur dépend des fluctuations de la pression dynamique provenant du jet de gaz.

Remarque: les capteurs sont sensibles à la pression totale le long de la conduite (figure (III.1-2)

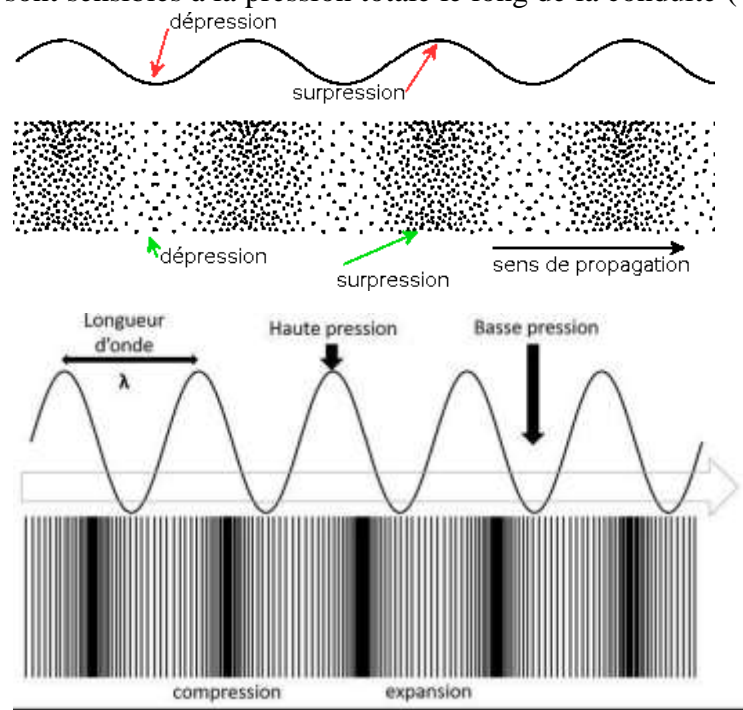


Figure III.1. Schéma simplifié d'une onde de pression (onde de compression ou onde longitudinale).

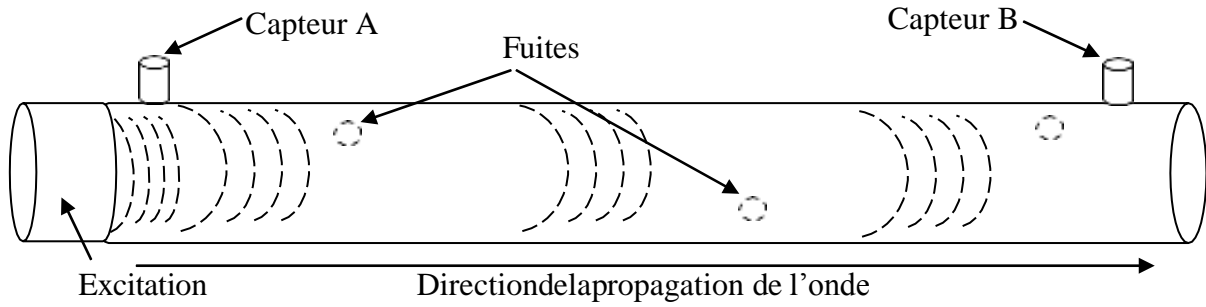


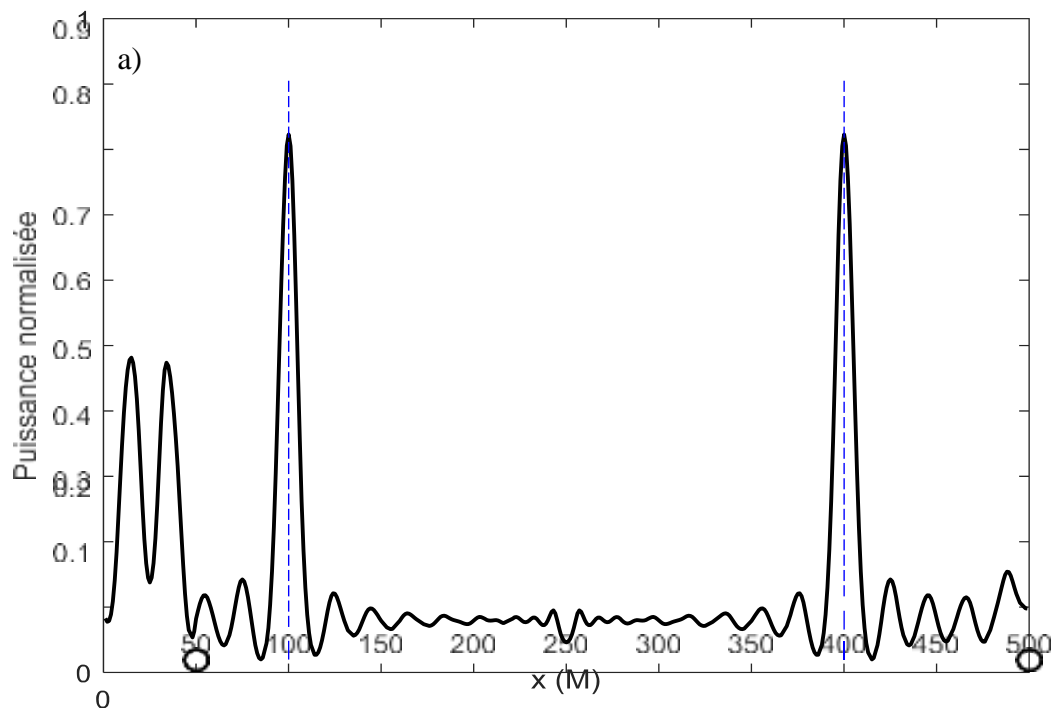
Figure.III.2.Schéma représentatif du principe de détection.

III.I.Simulations

Nous avons réalisé des simulations numériques par le logiciel Matlab, pour montrer la faisabilité de la détection des fuites circulaires dans une conduite de diamètre $D = 0.5$ m et de longueur de 500 m. On injecte du gaz de l'hélium et on l'excite par une onde longitudinale (onde de pression) dont la vitesse de propagation est de 980 m/s à des fréquences variables de 50, 70 et 100 Hz, et les capteurs sont situés à une distance fixée à 50 m après l'ouverture (excitation) et le deuxième à l'extrémité fermée de la conduite (à 500 m).

La première simulation décrit le cas de deux fuites circulaires de diamètre 1 mm, distantes de 300 m et 100 m entre elles, et les capteurs sont situés à une distance fixée de part et d'autre des extrémités à 50 m et 500 m figure (III.3).

Dans la deuxième simulation, nous sommes intéressés à la fiabilité de cette méthode, telle que les cas de quatre fuites circulaires identiques de diamètre $D = 1$ mm et les quatre fuites distantes de 100 m entre elles, et dans la deuxième étape deux paires de fuites séparées de 10 et 100 m à des fréquences d'excitations variables 50, 70 et 100 Hz. Figure (III.4).



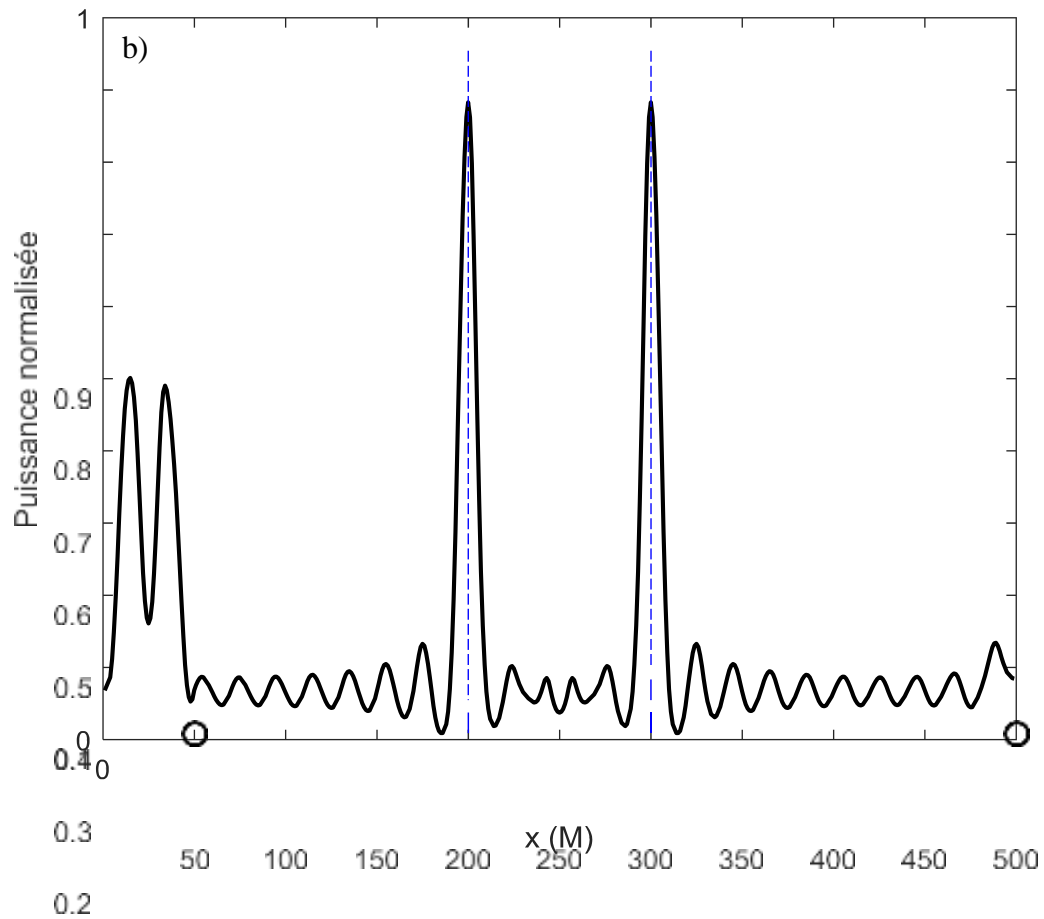


Figure III.3. Localisation de deux fuites circulaires situées à: a) 100 m et 400 m; b) 200 m et 300 m, de même taille ($D = 1$ mm) représentées en lignes pointillées, par deux capteurs disposés à 50 m et 500 m représentés avec des cercles le long de la conduite, avec une fréquence de 50Hz et une vitesse de propagation de 980 m/s.

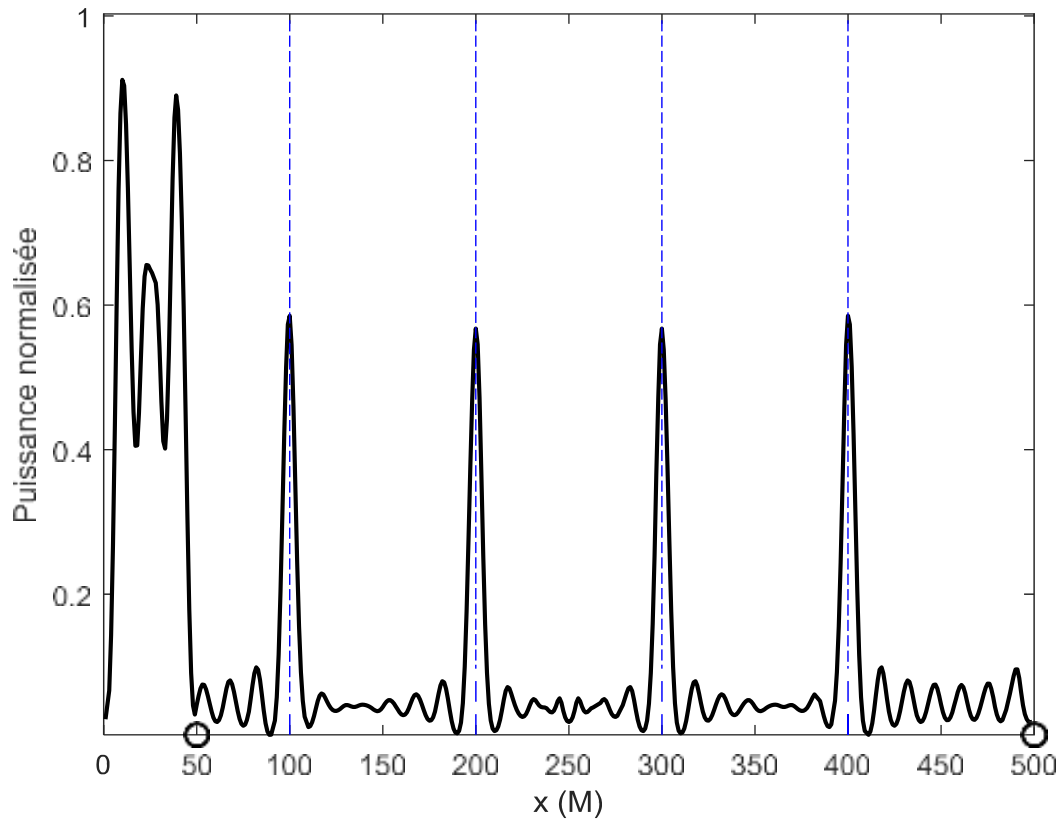
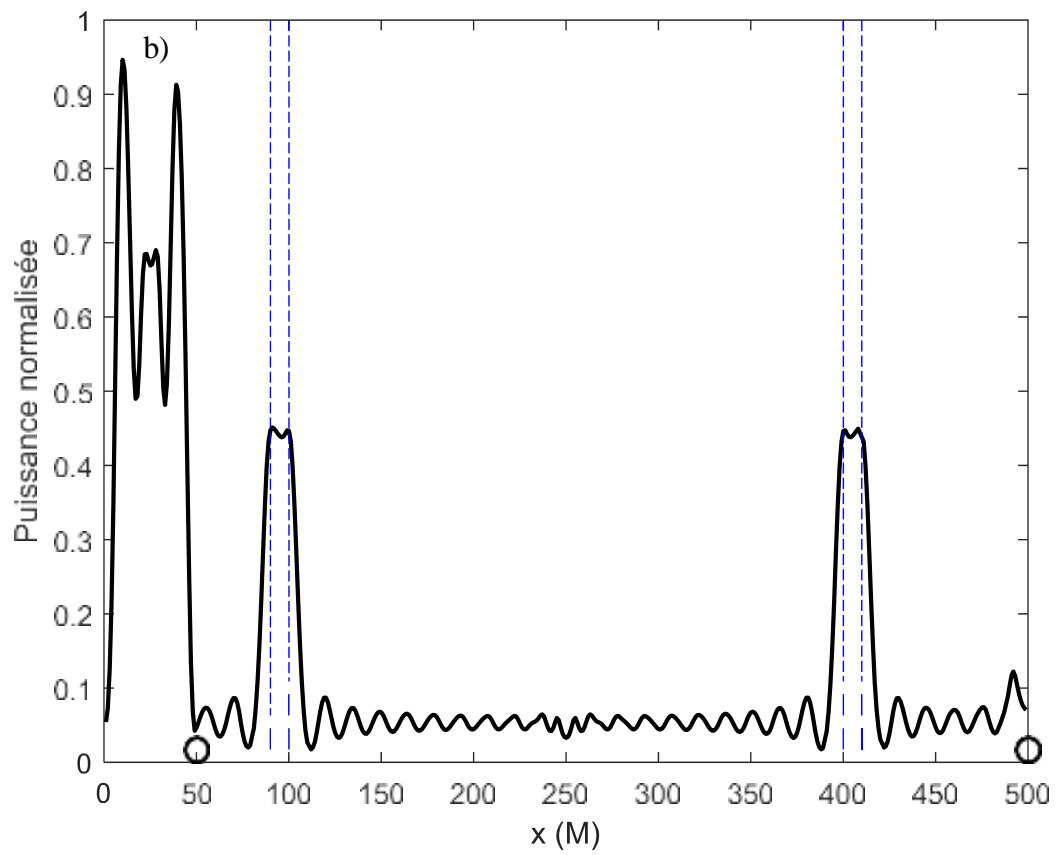
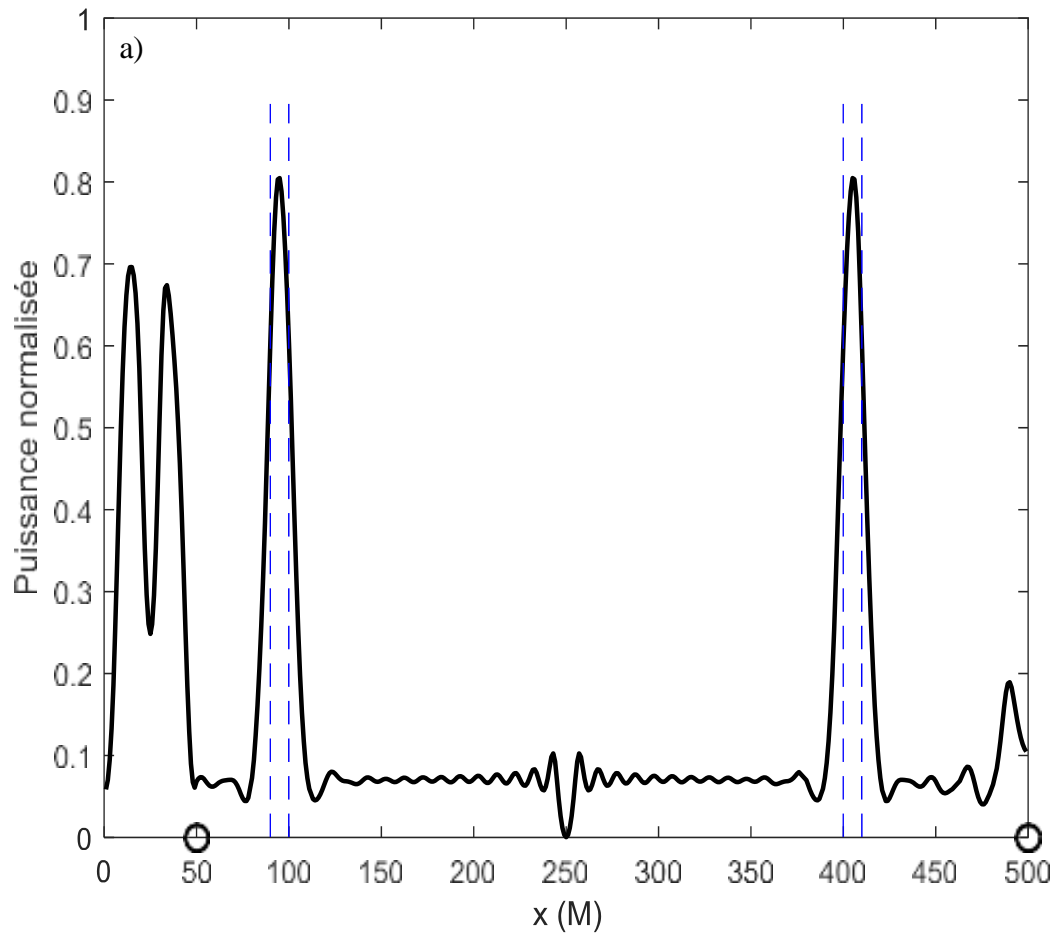


Figure III.4. Localisation de quatre fuites circulaires situées à 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, de même taille ($D = 1$ mm) représentées en lignes pointillées, par deux capteurs disposés à 50 m et 500 m représentés avec des cercles le long de la conduite, avec une fréquence de 50 Hz et une vitesse de propagation de 980 m/s.



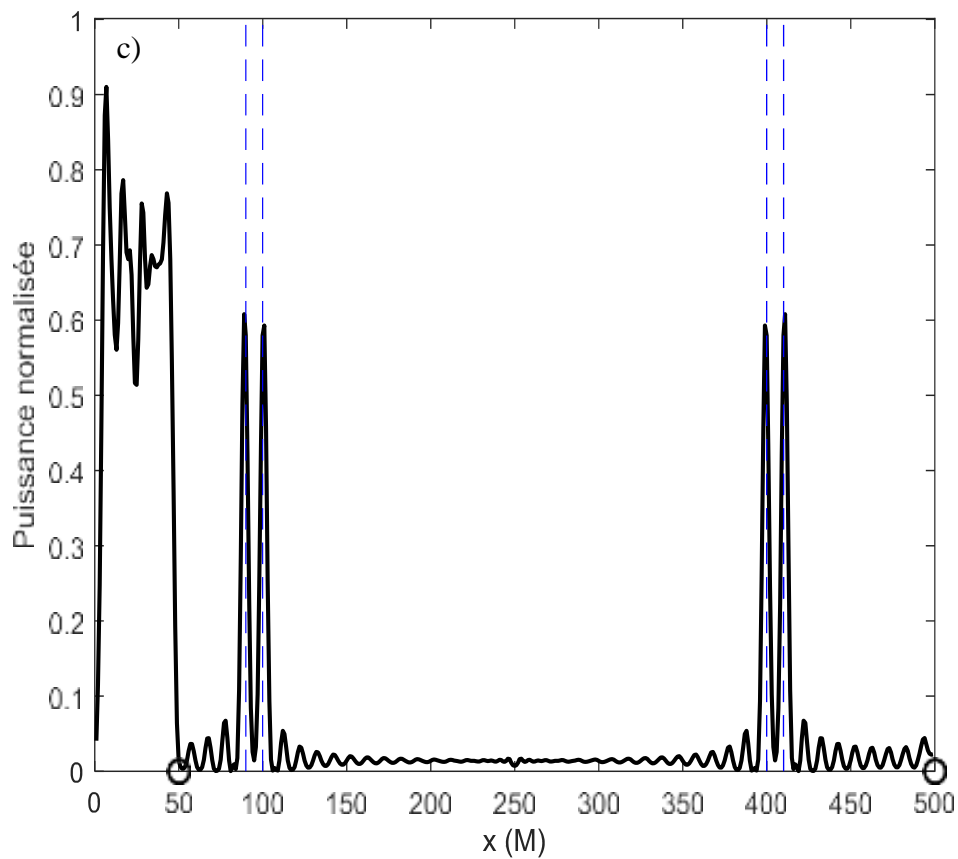


Figure III.5. Localisation de quatre fuites circulaires situées à 90 m, 100 m, 400 m, 410 m, de même taille ($D = 1$ mm) représentées avec des lignes pointillées, par deux capteurs disposés à 50 m et 500 m, représentés avec des cercles le long de la conduite, avec des fréquences : a) 50 Hz, b) 70 Hz et c) 100 Hz, et d'une vitesse de propagation de 980 m/s.

III.2. Discussions

Dans la première simulation numérique pour deux fuites qui sont localisées à des distances de 100 m et 400 m figure (III.3 a) par rapport au point d'excitation et la seconde étape nous avons rapprochés les fuites l'une de l'autre aux positions 200 et 300 m (figure (III.3 b)).

Cependant, l'excitation avec une onde de pression à une vitesse de 980 m/s et une fréquence de 50 Hz montre les fluctuations de niveau de pression, les figures (III.3) montre le niveau de pression normalisé avec des pics au niveau des fuites qui sont localisées avec les capteurs.

La seconde simulation montre la fiabilité de cette méthode telle qu'on a simulé les quatre fuites à des distances différentes et on a fait varier la fréquence d'excitation, en gardant la même dimension des fuites. La figure (III.4) montre la détection des quatre fuites par les

capteurs et ceux par l'apparition des quatre pics de niveau de pression le long de la conduite, par ailleurs la fréquence d'excitation d'onde de pression joue un grand potentiel pour la localisation et la détection, cependant, la figure (III.5. a) montre une bande de niveau de pression élargie pour deux paires de fuites rapprochées l'une de l'autre (90,100) et (400, 410) lors de l'excitation à 50 Hz. Dans ce cas, il est impossible de distinguer le lieu exacte des fuite (figure (III.5.a)), et lors de l'excitation à 70 Hz le signal reçu commence à ce fluctuer (figure (III.5.b)), par contre lors de l'excitation à 100 Hz le signal reçu exploitable pour la localisation exacte des fuite (figure (III.5.c)), et ceci est dû en fait à la longueur d'onde de propagation de l'onde de pression qui est inférieure à la distance entre les paires de fuite

Conclusion

Dans plusieurs domaines énergétiques (eau, gaz, pétroliers, chimiques et autres procédés industriels) le phénomène de perte (fuites) dans les canalisations de transmission (que soit en métal ou en plastique) de fluides est un phénomène courant. Au moment où les fuites dépendent fortement de la pression, la propagation des ondes acoustiques de pression dans des conduites longues remplies de fluides, est devenu un potentiel majeur pour le contrôle de l'intégrité de santé des conduites vis-à-vis des fuites, l'avantage de réaliser des inspections in-situ.

La détection des fuites, dans les conduites de distribution par ondes acoustiques de pression se fait par des capteurs disposés sur la conduite, donc un choix judicieux dans le lieu des points de contrôle permet d'obtenir un contrôle plus performant.

Les résultats de simulation obtenus illustrent la capacité d'utiliser l'onde acoustique de pression pour détecter des fuites dans les canalisations métalliques ou plastiques (PVC).

Les tests de simulation ont été réalisés pour les deux fuites éloignées et pour quatre fuites disposées entre elles par des distances égales et à la fin le cas des deux paires de fuites qui sont rapprochées entre elles, les figures montrent clairement les pics de pression sur chaque fuite, bien que les fréquences d'excitation de l'onde ont une importance capitale pour la détection des fuites qui sont rapprochées entre elles, par ailleurs pour améliorer la précision de localisation des fuites, la longueur d'ondes de pression doit être inférieure ou égale à la distance entre les fuites.

Références bibliographies

- [1] Xu Diaoa,b, & all, Leak detection and location in liquid pipelines by analyzing the first transient pressure wave with unsteady friction. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 60, 303–310, (2019).
- [2] Slobodan Dudic & all, Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography. *Measurement*. 45, 1689–1694, (2012)
- [3] Kingsley E. Abhulimen, Alfred A. Susu. Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation. *Chemical Engineering Journal*. 97, 47–67, (2004).
- [4] Yu Zhang, Shili Chen, Jian Li, Shijiu Jin. Leak detection monitoring system of long distance oil pipeline based on dynamic pressure transmitter. *Measurement*. 49, 382–389, (2014).
- [5] B Brunone & M Ferrante, Pressure waves as a tool for leak detection in closed conduits, *Urban Water Journal* 1, 2, 145-155,(2004).
- [6] J. M. Muggleton, M. J. Brennan And R. J. Pinnington. Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection. *Journal of Sound and vibration*. 5, 939-954, (2002).
- [7] Renaldo A. & All. Pressure Wave Behaviour And Leak Detection In Pipelines. *Computers Chem. Engng* ,20,491-496,(1996).
- [8] Hamilton, Stuart, and Bambos Charalambous. *Leak Detection: Technology and Implementation*. WA Publishing, (2013).
- [9] Smith, J. *Pipeline Inspection and Maintenance*. McGraw-Hill, New York, (2010).
- [10] Brown, A. *Manual Pipeline Inspection Techniques*. Technical Publishers, London, (2015).
- [11] Wilson, P. Acoustic Leak Detection Methods'. *Water Industry Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 45-50, (2008)
- [12] Johnson, R. Use of Listening Sticks for Leak Detection. *Utilities Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 67-73, (2012).
- [13] Gonzalez, M. Tracer Gas Leak Detection in Pipelines. *Journal of Gas Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 99-105, (2011).
- [14] Harris, T. Advanced Leak Detection with Gas Tracers. *Gas Technology Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 33-40, (2014).

- [15] Martin,D.LeakNoiseCorrelationinWaterDistributionSystems.WaterScience and Technology, vol. 59, no. 6, pp. 1123-1129, (2009).
- [16] Clark, S.Acoustic Leak Detection Using Correlation Methods. Pipeline Safety, vol. 30, no. 3, pp. 57-65, (2013).
- [17] Thompson,L.AcousticWavePropagationinPipelineLeakDetection.Journalof Acoustic Engineering, vol. 35, no. 2, pp. 78-85, (2016).
- [18] Anderson,K.AdvancedAcousticLeakDetectionTechniques.IndustrialPipeline Review, vol. 28, no. 4, pp. 122-130, (20
- [19] JerroldE.Marsden,Mathematicalfoundationsofelasticity,NewYork, (1983).
- [20] D.Royer,E.Dieulesaint,ElasticwavesinsolidsI,Freeandguidedpropagation, Springer, (1996).
- [21] J.Rose,Ultrasonicguidedwavesinsolidmedia, NewYork,(2014).
- [22] D.Royer,E.Dieulesaint,Elasticwavesinsolids II,Generation,acousto-optic
- [23] interaction,applications,Springer,(2000).
- [24] H.Lamb,F.E.S,Onwavesinanelasticplate, conf. oftheroyalsociety,114,(1916).
- [25] L.Rayleigh,D.O.L,F.R.S,onwavespropagatedalongtheplanesurfaceofan elastic
- [26] Solid,proc. London.Math.Soc,17,411(1885).
- [27] B.A.Auld, Acousticfields and waves in solids, v. I, John Wiley&Sons: NewYork, (1973).