

**CW RADAR-BASED PIPELINE LEAK DETECTION, LOCALIZATION,
AND QUANTIFICATION**

**DÉTECTION, LOCALISATION ET QUANTIFICATION DES FUITES DE
PIPELINES À L'AIDE D'UN RADAR CW**

Par

Taiseer Abuzed Misbah Aknan

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Master,
en Télécommunications

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

Shervin Vakili
Institut National de la Recherche Scien-
tifique

Examineur externe

Chaouki Hannachi
Aix-Marseille Université

Directeur de recherche

Tarek Djerafi
Institut National de la Recherche Scien-
tifique

REMERCIEMENTS

First, I am grateful to Allah, the Almighty, for giving me the health, strength, and patience to carry out my research.

I would like to express my deepest gratitude to everyone who supported and assisted me throughout this journey.

Foremost, I am profoundly grateful to my advisor, **Tarek Djerafi**, for his invaluable guidance, insightful feedback, and unwavering support. His expertise and encouragement have been instrumental in shaping this research.

I extend my heartfelt thanks to the faculty and staff of the **Énergie Matériaux Télécommunications Research Centre**, whose resources and facilities were essential to this study.

I am also grateful to my colleagues and friends at **INRS** for their camaraderie, advice, and moral support. The stimulating discussions and collaborative environment greatly enriched my research experience. In particular, I would like to thank **Omran Farhat, Abdulhamid Abdulhadi, Rabeia Alwahishi, and Mohamed Hawedi** for their invaluable support.

A special thanks to my **family—my wife and my children**—for their endless patience, love, and encouragement. Their belief in my abilities and constant support have been a source of strength throughout this journey.

Lastly, I acknowledge the **Ministry of Education in Libya** and my supervisor, **Tarek Djerafi**, for their financial support and funding.

Thank you all for your contributions to this work. This thesis would not have been possible without your support and encouragement.

RÉSUMÉ

La détection, la localisation et la quantification des fuites dans les pipelines restent des défis majeurs pour maintenir l'intégrité et l'efficacité opérationnelle des systèmes de transport de fluides, allant des réseaux de distribution d'eau aux pipelines de pétrole et de gaz. Si les fuites ne sont pas détectées, elles peuvent entraîner des pertes de ressources importantes, des coûts d'exploitation plus élevés et des risques pour l'environnement. Cette thèse présente une méthode pratique et efficace basée sur la technologie radar Continuous Wave (CW) pour détecter les fuites de manière non invasive, localiser et quantifier les fuites à partir de l'analyse des vibrations.

L'étude examine les motifs vibratoires induits par les fuites en utilisant un radar CW fonctionnant à 3,5 GHz pour capturer et traiter les signaux en vue d'une surveillance en temps réel, de la localisation des fuites et de l'estimation de leur gravité. Des méthodes de traitement du signal simples mais efficaces, comme la Transformée de Fourier Rapide (FFT) et l'analyse d'intégration, ont été utilisées pour détecter les anomalies causées par les fuites. L'expérimentation a été réalisée sur des scénarios de fuites contrôlées dans des tuyaux en cuivre de 1 pouce de diamètre, avec deux tailles de fuites (2 mm et 4 mm) et des distances de mesure (0,5 m, 1 m, 1,5 m et 2 m). Une attention particulière a été portée à l'évaluation de l'atténuation du signal et du comportement de la propagation sur différentes distances, permettant ainsi au système radar de localiser précisément les fuites et d'en quantifier la gravité en fonction des variations d'amplitude.

Les résultats ont prouvé que le système est sensible aux petites et grandes fuites, en soulignant sa capacité à localiser précisément les fuites et à évaluer leur gravité grâce à l'analyse des signaux intégrés. L'étude a révélé une corrélation forte entre la taille des fuites, la précision de la localisation et les valeurs du signal intégré, confirmant ainsi la capacité du radar à identifier les fuites avec une marge d'erreur minimale. Le système a été efficace pour distinguer avec précision les fuites de différentes tailles en analysant les variations des motifs de signal. D'autres évaluations ont confirmé que le radar pouvait maintenir une performance fiable sur différentes distances et conditions opérationnelles. On a étudié la force du signal et la résolution pour évaluer leur influence sur la précision de la localisation, ce qui a donné des résultats cohérents même lorsque la distance de mesure augmentait. Ces résultats prouvent que le radar est adapté aux applications réelles, notamment pour les pipelines souterrains, les réseaux industriels et les systèmes de surveillance à distance. Cette recherche met en évidence le potentiel des systèmes radar CW pour la surveillance des pipelines, offrant une solution pratique, évolutive et économique pour relever les défis persistants liés à la détection, la localisation et la quantification des fuites. Les conclusions de cette étude ouvrent la porte à des applications plus étendues dans les industries qui dépendent des infrastructures de transport de fluides.

ABSTRACT

The integrity and operational efficiency of fluid transport systems, including water distribution networks and oil and gas pipelines, are still facing significant challenges due to pipeline leak detection, localization, and quantification. Undetected leaks can result in significant resource losses, increased operational costs, and environmental hazards. This thesis introduces a practical and effective approach that utilizes Continuous Wave (CW) radar technology to detect leaks, localize them, and quantify them using vibration analysis.

The study investigates the vibrational patterns induced by leaks, using a CW radar operating at 3.5 GHz to capture and process signals for real-time monitoring, leak localization, and severity estimation. A combination of simple yet effective signal processing techniques, including Fast Fourier Transform (FFT) and integration analysis, was applied to characterize leak-induced anomalies. The experimental setup involved controlled leak scenarios in 1 inch diameter copper water pipes, featuring two leak sizes (2 mm and 4 mm) and measurement distances (0.5 m, 1 m, 1.5 m, and 2 m). Additional focus was given to evaluating signal attenuation and propagation behavior across varying distances, enabling the radar system to localize leaks accurately and quantify their severity based on amplitude variations.

Results demonstrated the system's sensitivity to both small and large leaks, highlighting its ability to accurately localize leaks and quantify their severity through (CSA) Cumulative Amplitude Spectrum comparisons. The analysis revealed a strong relationship between leak size, localization accuracy, and integrated signal values, affirming the radar's capability to pinpoint leak positions with minimal error margins. The system effectively identified variations in signal patterns associated with different leak sizes, enabling precise differentiation between smaller and larger leaks.

Further evaluations confirmed that the radar could maintain reliable performance across varying distances and operational conditions. Signal strength and resolution were analyzed to assess their impact on localization precision, revealing consistent results even as measurement distances increased. The findings demonstrate the radar's adaptability for use in real-world applications, including underground pipelines, industrial networks, and remote monitoring setups.

This research highlights the potential of CW radar-based systems for pipeline monitoring, offering a practical, scalable, and cost-effective solution to address long-standing challenges in leak detection, localization, and quantification. The findings pave the way for broader applications across industries reliant on fluid transport infrastructure.

SOMMAIRE RÉCAPITULATIF

1 Aperçu et Introduction

1.1 Introduction

Les systèmes de distribution par pipeline sont essentiels aux infrastructures modernes, facilitant le transport de l'eau, du pétrole, du gaz et d'autres fluides industriels sur de vastes distances. Le développement urbain, la croissance industrielle et les réseaux d'approvisionnement en énergie dépendent de ces systèmes. Cependant, il reste un défi majeur de maintenir leur intégrité, un problème aggravé par les fuites de pipelines qui entraînent des pertes persistantes et coûteuses. Dans la distribution d'eau, des milliards de litres sont perdus chaque année, exacerbant les pénuries dans les régions où l'eau est rare [1]. Dans le secteur du pétrole et du gaz, les fuites peuvent provoquer des catastrophes écologiques, notamment la contamination des sols et de l'eau, la pollution de l'air et même des pertes humaines. Les impacts économiques et environnementaux sont considérables, englobant la perte de ressources, les efforts de remédiation et les réparations du système. La réduction de l'efficacité opérationnelle, l'augmentation des besoins en maintenance et, dans les cas extrêmes, le déclenchement de catastrophes à grande échelle sont encore exacerbés par les fuites non détectées.

Pour relever ces défis, les chercheurs ont développé diverses méthodes de détection des fuites, notamment la surveillance acoustique, la détection de pression et les techniques de traçage. Bien que ces approches aient amélioré la surveillance des pipelines, elles présentent des limites notables. Par exemple, elles peinent souvent à détecter de petites fuites ou à en localiser précisément l'origine. De nombreuses méthodes sont également intrusives, nécessitant l'arrêt ou la modification des pipelines, ce qui perturbe les opérations et augmente les coûts. Le bruit environnemental, la diversité des matériaux des pipelines et les conditions d'installation complexes réduisent encore leur fiabilité.

Des avancées récentes ont permis le développement de techniques plus sophistiquées. Par exemple, M. Bimpas [2] a mis au point un système de capteurs utilisant la détection Doppler en onde continue (CW) à 2,45 GHz pour identifier les fuites d'eau dans les pipelines en PVC. Ce système détecte les fuites en analysant le décalage de fréquence Doppler dans les ondes électromagnétiques réfléchies par l'eau en fuite. Cependant, ce système n'est pas conçu pour les tuyaux aériens. L'étude ne se concentre pas sur la détection des fuites dans les canalisations exposées (par exemple, à l'intérieur des bâtiments ou des installations industrielles).

Abdulhamid [3] a proposé une technique de radar à micro-ondes sans contact pour la détection des fuites de pipelines. Son étude a démontré avec succès que le radar Doppler peut identifier les fuites en analysant les décalages de fréquence et les variations d'amplitude causés par les vibrations du pipeline. En utilisant un système expérimental en boucle fermée avec des pipelines en PVC et des débits de pompes variables, il a validé que le radar à micro-ondes est une technique prometteuse pour la détection des fuites de manière non invasive. Toutefois, son étude s'est uniquement concentrée sur la détection des fuites, sans aborder leur localisation ni leur quantification, laissant ainsi place à des avancées futures dans ces domaines.

Une autre contribution notable est celle de X. Tan [4], qui a introduit un système de surveillance distribué utilisant des câbles à fibre optique pour détecter et cartographier la corrosion des canalisations. Ce système utilise la **réflectométrie optique dans le domaine des fréquences (OFDR) pour mesurer les distributions de contraintes le long des pipelines, permettant ainsi une gestion en temps réel de la corrosion. De son côté, X. Fan [5] a proposé un cadre basé sur l'apprentissage automatique, appelé apprentissage semi-supervisé par regroupement et localisation (CtL-SSL), pour la détection des fuites dans les réseaux de distribution d'eau. Cette approche exploite la topologie du réseau et les caractéristiques des fuites afin d'optimiser le placement des capteurs et de détecter les fuites avec une grande précision, même avec un nombre limité de données étiquetées.

Malgré ces avancées, des défis subsistent en matière de scalabilité, d'adaptabilité et de surveillance en temps réel. De nombreuses méthodes existantes restent limitées par leur incapacité à détecter les fuites mineures ou à fonctionner efficacement dans des environnements bruyants. De plus, la plupart des approches, y compris celle d'Abdulhamid, ne permettent pas de quantifier la gravité des fuites ni de localiser leur position avec précision. Pour combler ces lacunes, cette recherche étend la détection des fuites basée sur le radar CW en intégrant des techniques de localisation et de quantification, offrant ainsi une **solution complète de surveillance pour l'évaluation de l'intégrité des pipelines.

1.2 Problématique

Les fuites dans les systèmes de distribution d'eau représentent un défi majeur, entraînant une perte d'eau considérable, une dégradation environnementale et des coûts de maintenance élevés. Malgré les avancées dans les technologies de détection des fuites, les méthodes existantes, telles que la surveillance acoustique, le radar à pénétration de sol (GPR) et la modélisation de pression, présentent plusieurs limitations qui entravent leur efficacité.

Bon nombre de ces techniques nécessitent un accès direct aux pipelines ou des capteurs spécialisés, rendant leur déploiement dans des systèmes souterrains ou dissimulés complexe et onéreux. De plus, des facteurs environnementaux tels que l'humidité du sol, le bruit ambiant et les propriétés des matériaux des pipelines influencent considérablement la précision de détection, réduisant ainsi la fiabilité dans diverses conditions.

Par ailleurs, bien que les technologies de détection avancées, telles que les capteurs acousto-optiques, offrent de meilleures performances, leur coût élevé et leur complexité technique limitent leur mise en œuvre à grande échelle. Un autre inconvénient majeur des méthodes conventionnelles est leur incapacité à détecter avec précision les petites fuites, ce qui retarde les interventions et aggrave les inefficacités du système à long terme.

Ces défis soulignent la nécessité d'une solution plus efficace, économique et évolutive pour détecter et localiser les fuites dans les pipelines, en particulier dans des conditions réelles d'exploitation.

1.3 Objectif

L'objectif de l'approche proposée est de développer une méthode efficace et évolutive pour détecter les fuites dans les pipelines d'eau en utilisant un radar à onde continue (CW) pour l'analyse

des vibrations. Cette méthode vise à surmonter les limitations des techniques conventionnelles, telles que la complexité du déploiement, la sensibilité aux conditions environnementales, la couverture restreinte, la complexité matérielle élevée et la difficulté à détecter les petites fuites. En exploitant les capacités du radar CW, cette approche offre une solution non invasive, économique et adaptable pour la surveillance en temps réel des pipelines.

Contrairement aux méthodes traditionnelles, qui reposent sur des capteurs distribués, des nœuds sans fil ou un accès physique direct, le radar CW permet de détecter les fuites sur une large zone grâce à une analyse vibratoire sans contact, éliminant ainsi le besoin d'installations intrusives et simplifiant le déploiement à grande échelle. Les principaux avantages de cette approche sont les suivants :

- **Déploiement simplifié et économique** : Le radar CW permet de détecter les fuites sans nécessiter d'accès physique direct aux pipelines, ce qui le rend adapté aux infrastructures souterraines ou dissimulées tout en réduisant les coûts d'installation et de maintenance.
- **Couverture large et évolutive** : Contrairement aux approches basées sur des capteurs nécessitant l'installation de multiples unités, le radar CW assure une surveillance étendue à l'aide d'un seul système, le rendant hautement évolutif pour les environnements urbains comme isolés.
- **Réduction de la complexité matérielle** : La méthode élimine le besoin de capteurs spécialisés ou de technologies de détection auxiliaires, simplifiant ainsi la mise en œuvre du système et réduisant les coûts opérationnels.
- **Polyvalence et adaptabilité** : Elle s'avère efficace pour des pipelines de tailles, de matériaux et de conditions opérationnelles variés, garantissant ainsi son applicabilité à des infrastructures diversifiées.

En répondant aux défis posés par les techniques existantes de détection des fuites, cette méthode d'analyse vibratoire basée sur le radar CW propose un cadre robuste, efficace et évolutif pour la détection et la localisation des fuites dans les pipelines. La solution proposée améliore les capacités de surveillance tout en réduisant la complexité opérationnelle et les coûts, en faisant une alternative prometteuse pour l'entretien des infrastructures et la conservation de l'eau.

1.4 Approche Proposée

Cette section présente une méthode de détection et de localisation des fuites dans les pipelines d'eau basée sur le radar à onde continue (CW) et l'analyse des vibrations. L'approche proposée exploite les capacités de détection sans contact du radar CW pour surmonter les défis des méthodes traditionnelles, tels que la couverture limitée, la sensibilité aux conditions environnementales et la complexité matérielle. En analysant les motifs vibratoires, cette méthode offre une solution évolutive et économique pour la surveillance en temps réel et la localisation précise des fuites dans divers environnements de pipelines.

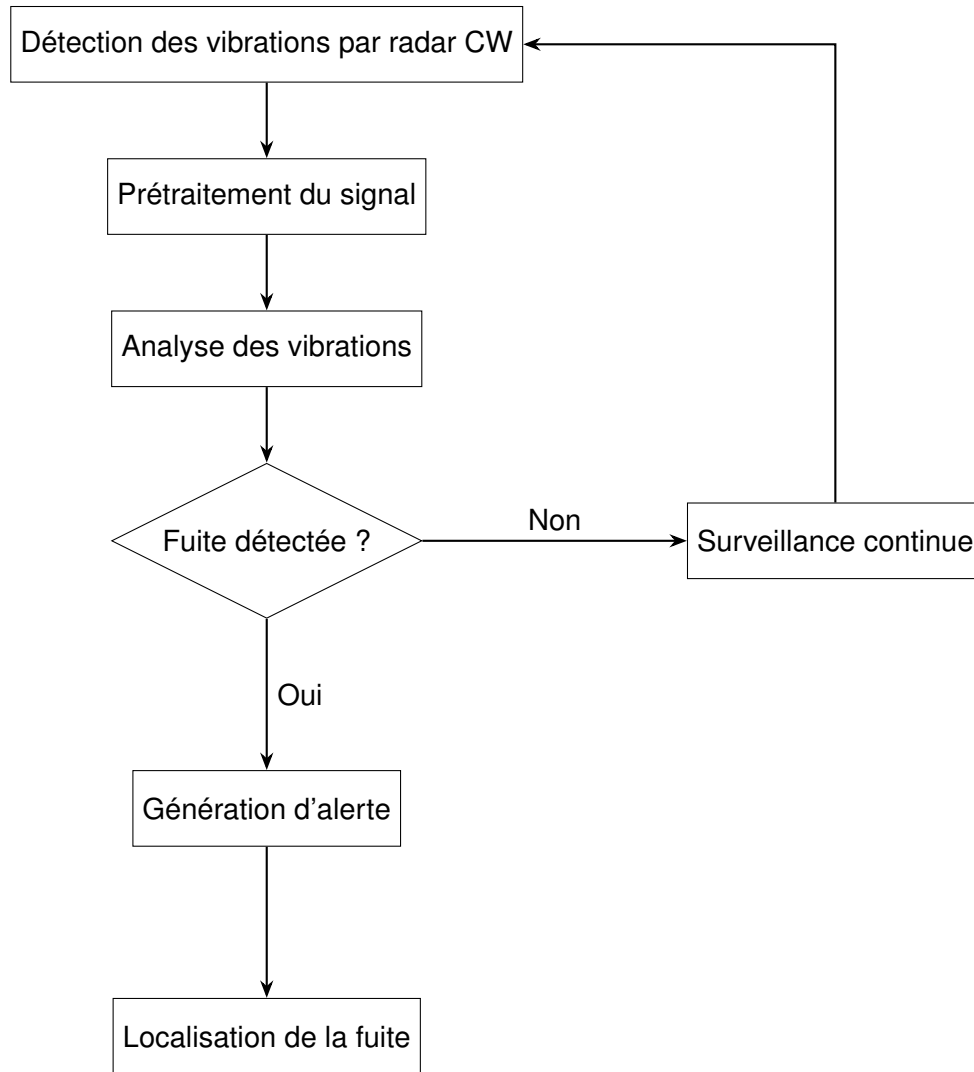


FIGURE 1.1 : Organigramme du processus de détection des vibrations par radar CW

1.5 Plan de la Thèse

Cette thèse est structurée en cinq chapitres, chacun apportant une contribution à la construction globale du cadre de recherche :

- **Chapitre 1 : Aperçu et Introduction** Ce chapitre introduit l'étude en mettant en avant son importance, la problématique de recherche et ses objectifs. Il discute des limites des méthodes existantes et présente l'approche proposée. Enfin, il décrit la structure de la thèse en résumant les principaux sujets abordés dans chaque chapitre.
- **Chapitre 2 : Contexte et Technologie Radar pour la Détection de Fuites et la Surveillance des Vibrations** Ce chapitre présente un aperçu des méthodes de détection de fuites ainsi que des bases de la technologie radar. Il explore d'abord les techniques existantes de détection des fuites, puis explique les principes fondamentaux du radar et leur application à la détection des fuites et à la surveillance des vibrations.
- **Chapitre 3 : Configuration Expérimentale, Défis et Limitations** Ce chapitre décrit la configuration expérimentale, y compris l'équipement, les procédures et les conditions utilisées

dans l'étude. Il discute également des défis rencontrés au cours des expériences et des limites de l'approche. Ces éléments permettent de définir le périmètre de l'étude et d'apporter un contexte à l'interprétation des résultats.

- **Chapitre 4 : Résultats et Discussion** Ce chapitre présente les résultats de l'étude avec une analyse détaillée et une interprétation des données. Il discute des principales observations, les compare aux recherches existantes et explore leurs implications. Les tendances, les limites et les résultats inattendus sont également examinés pour offrir une compréhension approfondie de l'importance de l'étude.
- **Chapitre 5 : Conclusion et Perspectives** Ce dernier chapitre résume les principaux résultats de l'étude et leur importance. Il discute de la manière dont les résultats répondent aux objectifs de recherche et met en avant leurs implications pratiques et théoriques. De plus, il expose les limites de l'étude et propose des perspectives pour les recherches futures afin d'approfondir le domaine.

2 Contexte et Technologie Radar pour la Détection des Fuites et la Surveillance des Vibrations

2.1 Contexte et Travaux Connexes sur la Détection des Fuites

La détection des fuites dans les pipelines a connu des avancées significatives, exploitant diverses technologies pour relever les défis liés à la surveillance des infrastructures. Cette section présente un aperçu des méthodes traditionnelles et de leurs principes. Les techniques de détection des fuites couvrent un large éventail d'approches qui exploitent des principes physiques et des technologies avancées pour surveiller l'intégrité des pipelines. Les principales méthodes incluent :

- **Émission Acoustique** : Les techniques acoustiques détectent les fuites en capturant le bruit ou les vibrations générés par une chute soudaine de pression. Ces ondes élastiques transitoires, souvent dans une plage de fréquences allant jusqu'à 1 MHz [6], sont analysées à l'aide de méthodes actives et passives pour localiser efficacement les fuites.
- **Capteurs à Fibre Optique** : La détection acoustique distribuée (DAS) permet la surveillance des pipelines sur de longues distances en utilisant des fibres optiques. Les systèmes DAS détectent les vibrations, les déformations ou les variations de température grâce à la lumière rétrodiffusée, offrant une sensibilité élevée pour la détection précoce des fuites [7, 8].
- **Radar à Pénétration de Sol (GPR)** : Le GPR utilise des ondes électromagnétiques pour identifier les anomalies souterraines causées par des fuites. Les signaux réfléchis mettent en évidence des variations des propriétés diélectriques du sol, ce qui est particulièrement efficace pour les pipelines enterrés ou isolés [9, 10].
- **Onde de Pression Négative (NPW)** : Les techniques NPW détectent les fuites en surveillant les transitoires de pression générés par des écoulements soudains de fluide, permettant une détection en temps réel basée sur la propagation des ondes [11].
- **Analyse des Points de Pression (PPA)** : La PPA repose sur la surveillance des baisses de pression localisées à l'aide de capteurs haute précision, permettant l'identification et la quantification des fuites [12].
- **Modélisation Dynamique** : Les simulations numériques prédisent le comportement des pipelines afin de détecter les écarts causés par des fuites. Ces modèles permettent de simuler des scénarios complexes mais nécessitent une calibration approfondie [13, 14].

- **Thermographie Infrarouge** : L'imagerie infrarouge identifie les anomalies de température résultant des fuites, ce qui la rend adaptée aux pipelines aériens transportant des fluides à des températures différentes de leur environnement [15].
- **Échantillonnage des Vapeurs** : Les capteurs de vapeurs détectent les émissions chimiques des fuites, particulièrement utiles pour les fluides volatils tels que le pétrole et le gaz [16].
- **Traitement Numérique du Signal et Équilibre Masse-Volume** : Les techniques de DSP et d'équilibre masse-volume analysent les données de flux pour détecter des écarts, offrant une solution économique de détection des fuites, mais nécessitant une calibration précise [17].

Plusieurs chercheurs ont proposé différentes méthodes pour la détection des fuites. Zohora et al. (2021) ont proposé une méthode basée sur l'émission acoustique, qui détecte les fuites en capturant le bruit ou les vibrations causés par des chutes soudaines de pression. Des ondes élastiques, généralement dans une plage de fréquences allant jusqu'à 1 MHz, sont générées lorsque un fluide sous haute pression s'échappe par une perforation. Leur étude démontre la sensibilité des techniques acoustiques mais souligne les défis posés par les interférences dues au bruit environnemental.

Wong et al. (2021) ont introduit une approche basée sur la détection par fibre optique, en particulier la **détection acoustique distribuée (DAS)**, pour une surveillance continue et en temps réel des fuites dans les pipelines. Les systèmes DAS analysent les perturbations causées par les fuites à l'aide de fibres optiques, détectant des variations acoustiques, de contrainte ou de température [7]. Malgré sa haute sensibilité, He et al. (2021) ont souligné que son coût élevé et les exigences complexes en matière de traitement du signal constituent des limites [8].

Cataldo et al. (2014) et Mori et al. (2009) ont proposé l'utilisation du **radar à pénétration de sol (GPR)** comme une technique non invasive pour la détection des fuites. Le GPR utilise des ondes électromagnétiques haute fréquence pour analyser les réflexions provenant des anomalies souterraines causées par des fuites [9, 10]. Cependant, Pathirana et al. (2023) ont souligné que la performance du GPR est affectée par les sols hautement conducteurs, nécessitant ainsi une interprétation experte [18].

Zaman et al. (2020) ont développé la technique de **l'onde de pression négative (NPW)**, qui détecte les fuites en surveillant les transitoires de pression [11]. Leur approche capture les ondes générées lorsque le fluide s'échappe et localise les fuites en fonction des temps d'arrivée aux capteurs. Bien que la NPW permette une détection en temps réel, elle souffre de faux positifs dus aux transitoires opérationnels.

Wan et al. (2022) ont proposé l'**analyse des points de pression (PPA)**, qui utilise des capteurs de pression haute précision pour détecter et localiser les fuites [12]. Cette méthode identifie les baisses de pression localisées, mais présente des difficultés en termes de précision sur de longs segments de pipeline et face à des débits inconsistants, comme l'ont noté Sekhavati et al. (2022) [19].

Ben et al. (2012) ont introduit des techniques de **modélisation dynamique** pour prédire le comportement des pipelines et détecter les anomalies [13]. Ces modèles comparent les données en temps réel avec des simulations pour identifier les écarts indicatifs de fuites. Tajalli et al. (2024) ont mis en évidence la nécessité d'une calibration approfondie et de ressources informatiques conséquentes comme obstacles à leur mise en œuvre [14].

De Oliveira et Leonel (2021) ont appliqué la **thermographie infrarouge** pour identifier les anomalies de température causées par des fluides en fuite [20]. Bien qu'adaptée aux pipelines

aériens, ils ont noté que des facteurs environnementaux limitent son efficacité pour les pipelines enterrés ou exposés en extérieur.

Le **radar à onde continue (CW)** a émergé comme une alternative prometteuse. Ce radar émet des ondes électromagnétiques et mesure les réflexions pour détecter les anomalies. Les études de Guo et al. (2021) ont démontré l'efficacité du radar CW pour la surveillance des vibrations structurelles [21], tandis que Zhang et al. (2021) l'ont appliqué aux pipelines enterrés, montrant sa capacité à détecter les fuites souterraines [22].

En s'appuyant sur ces bases, cette thèse explore l'application du radar CW pour la détection et la localisation des fuites, en mettant l'accent sur les canalisations en cuivre transportant de l'eau. L'objectif de cette recherche est de valider son efficacité dans des environnements contrôlés et d'examiner sa faisabilité pour une surveillance élargie des infrastructures de pipelines.

2.2 Technologie Radar et Surveillance des Vibrations

La technologie radar a connu une évolution significative, trouvant des applications dans divers secteurs industriels grâce à sa polyvalence et son efficacité en télédétection. Ce chapitre établit une base théorique pour cette thèse, en commençant par un aperçu de la technologie radar, avec un accent particulier sur le radar à onde continue (CW) utilisé dans cette étude. Ensuite, les technologies de surveillance des vibrations et leurs applications industrielles seront abordées, avant d'examiner les stratégies de gestion de la maintenance employées dans les industries modernes.

2.3 Principes et Contexte du Radar

Le radar, acronyme de *Radio Detection and Ranging*, est un système qui émet des ondes électromagnétiques et analyse leurs réflexions afin de déterminer certaines propriétés d'un objet, telles que sa distance, sa vitesse et sa taille. Le principe fondamental repose sur l'interaction entre les signaux transmis et les cibles présentes dans l'environnement.

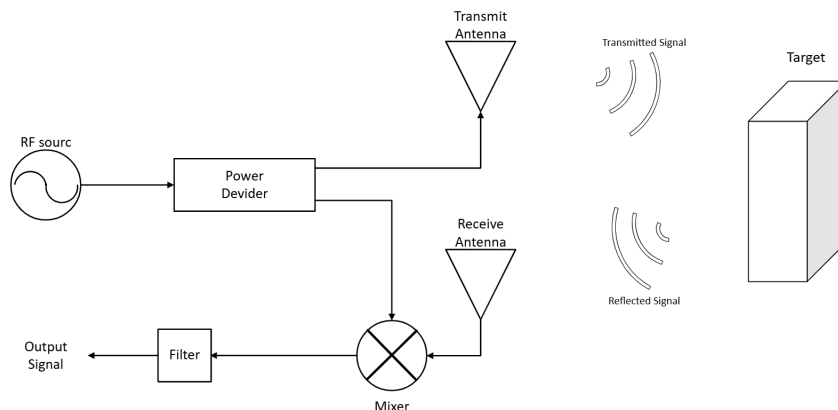


FIGURE 1.2 : Principe de fonctionnement du radar

2.4 Fondamentaux du Radar

Le principe fondamental du fonctionnement du radar repose sur l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques. Ces ondes, transmises à une fréquence spécifique, se propagent dans l'espace jusqu'à rencontrer un objet. Lorsqu'elles interagissent avec cet objet, une partie de l'énergie est diffusée dans toutes les directions. Le système radar capture la portion de cette énergie qui est réfléchi vers lui. En analysant le signal reçu, le radar peut extraire des paramètres clés sur l'objet, notamment sa distance et sa vitesse.

La distance de l'objet est déterminée par le temps de propagation (T) entre l'émission de l'onde et la réception de son écho. Ce retard est utilisé pour calculer la distance. La vitesse relative de l'objet est quant à elle déterminée en analysant le décalage Doppler, un changement de fréquence de l'onde réfléchi causé par le mouvement de l'objet. Ce décalage fréquentiel (f_d) est relié à la vitesse de l'objet (v) par l'équation de Doppler**.

2.4.1 Composants Principaux du Radar

Un système radar basique est constitué de plusieurs composants essentiels qui interagissent pour assurer son bon fonctionnement. Ces éléments incluent une source de signal, un amplificateur de puissance, des antennes et des unités de traitement. Chaque composant joue un rôle clé dans la génération du signal, la détection et l'analyse des cibles.

1. Générateur de signal (Source du signal)

Ce composant détermine la fréquence de fonctionnement et les caractéristiques de l'onde transmise, qui peut être une onde continue (CW), une onde continue à modulation de fréquence (FMCW) ou une onde pulsée. Il constitue ainsi le point de départ crucial du fonctionnement du radar.

2. Diviseur de puissance

Le diviseur de puissance répartit le signal du générateur en deux chemins :

- Un chemin dirige le signal vers l'antenne d'émission.
- L'autre chemin fournit un signal de référence au mélangeur.

Cette configuration permet au radar de comparer le signal transmis avec le signal reçu pour le traitement des données.

3. Amplificateur de puissance

Avant que le signal ne soit transmis, il est amplifié par l'amplificateur de puissance afin d'assurer qu'il dispose d'une intensité suffisante pour parcourir de longues distances et se réfléchir sur des cibles. Cet amplificateur joue un rôle crucial dans la portée effective du radar.

4. Antenne(s)

L'antenne rayonne le signal amplifié dans l'espace et recueille les signaux réfléchis par la cible.

- **Antenne unique** : Peut être utilisée à la fois pour l'émission et la réception, nécessitant alors un duplexeur ou un circulateur pour séparer ces fonctions.
- **Antennes séparées** : Une antenne dédiée à l'émission et une autre à la réception, simplifiant ainsi la gestion du signal mais nécessitant un matériel supplémentaire.

5. Amplificateur à faible bruit (LNA - Low Noise Amplifier)

Le signal réfléchi par la cible est souvent très faible et noyé dans le bruit ambiant. Le LNA

amplifie ce signal sans augmenter significativement le bruit, garantissant ainsi que le signal reçu est suffisamment fort pour un traitement ultérieur.

6. Mélangeur (Mixer)

Le mélangeur combine le signal reçu avec le signal de référence provenant du diviseur de puissance. Cette opération produit un signal à fréquence intermédiaire (IF) contenant les informations essentielles sur la cible, telles que le décalage Doppler (vitesse) ou la distance.

7. Filtre

Une fois le signal IF généré, le filtre élimine le bruit et les interférences indésirables, ne conservant que le signal utile à l'analyse. Cette étape est cruciale pour garantir une détection et une mesure précises des cibles.

2.4.2 Types de Radar

Les systèmes radar peuvent être classés en deux grandes catégories en fonction de leurs principes de fonctionnement : le radar pulsé et le radar à onde continue (CW). Chaque type possède des caractéristiques uniques et est adapté à des applications spécifiques.

- **Radar Pulsé** : Le radar pulsé fonctionne en émettant de courtes impulsions d'ondes électromagnétiques à haute fréquence à intervalles réguliers. Après l'émission, le système passe en mode réception pour capter les échos réfléchis par les cibles. Le délai entre l'émission de l'impulsion et la réception de son écho est mesuré pour calculer la distance de la cible. Ce type de radar est particulièrement efficace pour détecter des objets à longue distance et fournir des informations précises sur la position et la portée, ce qui le rend idéal pour les applications militaires et aéronautiques [23].

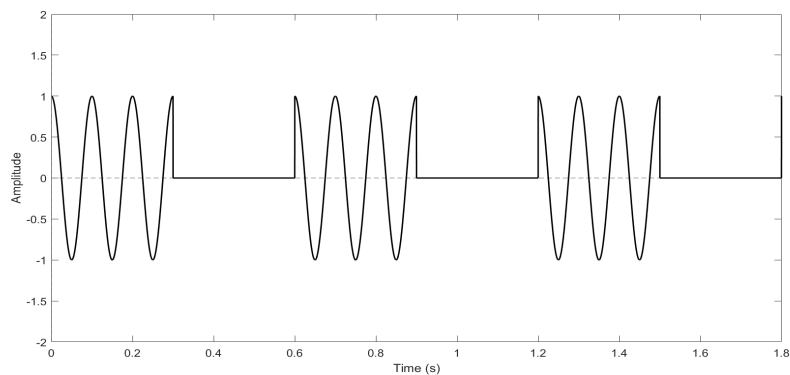


FIGURE 1.3 : Signal transmis par un radar pulsé

- **Radar à Onde Continue (CW)** : Le radar CW émet un signal électromagnétique continu plutôt que des impulsions. Il ne bascule pas entre l'émission et la réception mais mesure en permanence le décalage Doppler causé par le mouvement des cibles. Bien que le radar CW ne puisse pas mesurer directement la distance dans sa forme la plus simple, il excelle dans la détermination de la vitesse relative des cibles [23, 24].

Ses applications sont variées : surveillance du trafic pour la détection de vitesse, analyse vibratoire pour la surveillance de l'intégrité structurelle et la détection des fuites dans les pipelines, capteurs industriels pour la détection de proximité et le suivi des convoyeurs, ainsi

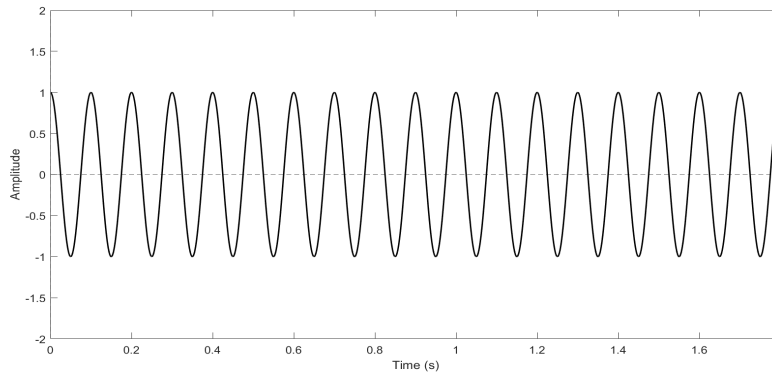


FIGURE 1.4 : Signal transmis par un radar CW

que des applications médicales telles que la surveillance du rythme cardiaque et de la respiration.

2.5 Radar à Onde Continue (CW)

Le radar à onde continue (CW) fonctionne en émettant un signal radiofréquence continu et en détectant le décalage Doppler dans le signal réfléchi, causé par un objet en mouvement. Ce décalage Doppler, qui est une variation de fréquence due au mouvement relatif entre le radar et la cible, fournit des informations sur la vitesse de l'objet. Les systèmes radar CW peuvent être classés en fonction de leur fonctionnalité—radar CW simple et radar à onde continue modulée en fréquence (FMCW)—et de leurs caractéristiques opérationnelles, en radar CW directionnel ou non directionnel.

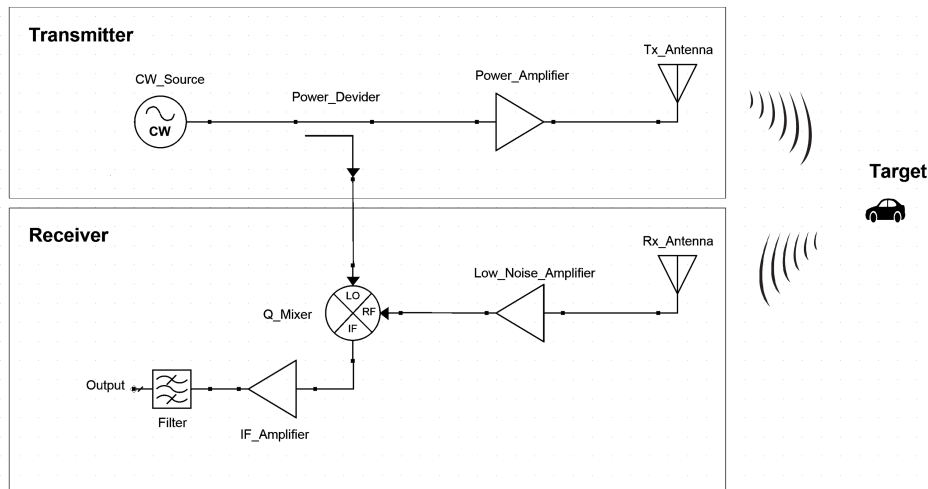


FIGURE 1.5 : Schéma d'un radar CW simple

2.5.1 Types Fonctionnels du Radar CW

Les systèmes radar CW sont d'abord classés en fonction de leur fonctionnalité principale : avec ou sans modulation de fréquence.

- **Radar CW Simple** : Ce type utilise une seule antenne pour l'émission et la réception ou parfois des antennes distinctes. Cependant, en raison de l'émission et de la réception simultanées, il ne peut pas mesurer directement la distance des cibles. Il est principalement utilisé pour mesurer le décalage Doppler, ce qui le rend idéal pour des applications telles que la détection de vitesse dans la surveillance du trafic ou l'identification d'objets en mouvement dans un environnement encombré [25].

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \quad (1.1)$$

où f_d est le décalage Doppler, v est la vitesse relative de l'objet, f_0 est la fréquence du signal transmis, et c est la vitesse de la lumière [23, 24].

Bien que le radar CW simple ne fournisse pas intrinsèquement de mesures de distance en raison de l'absence de mécanisme de modulation ou de synchronisation, il excelle dans la détection du mouvement et la mesure du décalage Doppler induit par les cibles mobiles. Cela en fait un outil particulièrement adapté aux applications nécessitant une analyse précise de la vitesse ou des vibrations. Avec des améliorations appropriées, telles que la modulation de fréquence ou le traitement avancé du signal, les systèmes radar CW peuvent également être adaptés à la mesure de distance, élargissant ainsi leurs applications potentielles.

- **Radar à Onde Continue Modulée en Fréquence (FMCW)** : Pour surmonter la limitation de portée du radar CW simple, le radar FMCW utilise une fréquence d'émission qui varie continuellement.

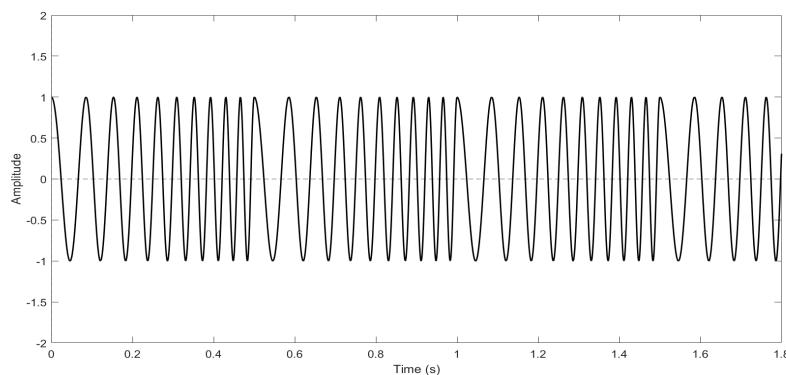


FIGURE 1.6 : Signal transmis par un radar FMCW

En comparant les fréquences du signal émis et reçu, il est possible de déterminer le délai temporel et, par conséquent, la distance de la cible. Cette technique permet une mesure simultanée de la portée et de la vitesse, rendant le radar FMCW particulièrement polyvalent pour des applications telles que le radar automobile, le contrôle des processus industriels et les altimètres radar [26].

$$R = \frac{cT}{2} \quad (1.2)$$

où R est la distance, c est la vitesse de la lumière, et T représente le temps de propagation aller-retour de l'onde électromagnétique. Le facteur $1/2$ prend en compte le trajet aller-retour du signal.

2.6 Traitement du Signal

Le traitement du signal est un élément essentiel des systèmes radar, permettant de transformer les signaux bruts en données exploitables pour la détection et l'analyse des cibles. Ce processus comprend plusieurs étapes, notamment la réduction du bruit, l'analyse fréquentielle et l'application de méthodes computationnelles avancées. Cette section se concentre sur les techniques fondamentales de filtrage et de transformation de Fourier rapide (FFT), qui constituent la base du traitement du signal radar, avant d'aborder des méthodologies avancées.

Le traitement du signal est crucial pour extraire des informations pertinentes à partir des signaux radar CW, en particulier dans des environnements bruyants ou pour détecter des motifs de mouvement subtils.

2.6.1 Filtrage

Le filtrage est l'étape fondamentale du traitement du signal radar, visant à améliorer le rapport signal-sur-bruit (SNR) en éliminant les composants indésirables du signal reçu. Différents types de filtres sont utilisés selon les exigences du système radar :

- **Filtres Passe-Bas** : Ces filtres laissent passer les composants de basse fréquence tout en atténuant les hautes fréquences, permettant ainsi de supprimer efficacement le bruit haute fréquence.
- **Filtres Passe-Haut** : Ces filtres effectuent la fonction inverse, en laissant passer les hautes fréquences tout en atténuant les basses fréquences. Ils sont particulièrement utiles dans les applications nécessitant l'élimination des interférences basse fréquence, comme le clutter du sol dans les systèmes radar.
- **Filtres Passe-Bande** : Ces filtres isolent une plage spécifique de fréquences autour de la fréquence de fonctionnement du radar, en rejetant les fréquences indésirables situées en dehors de cette plage.

Le filtrage joue un rôle crucial dans les systèmes radar en garantissant que seuls les composants pertinents du signal sont conservés pour une analyse ultérieure. Par exemple, dans un radar à onde continue (CW), un filtre passe-bande peut être utilisé pour se concentrer sur la détection des décalages fréquentiels causés par le mouvement des cibles, tout en supprimant le bruit et les interférences environnementales. Cette étape est essentielle pour améliorer la clarté et la fiabilité du signal radar.

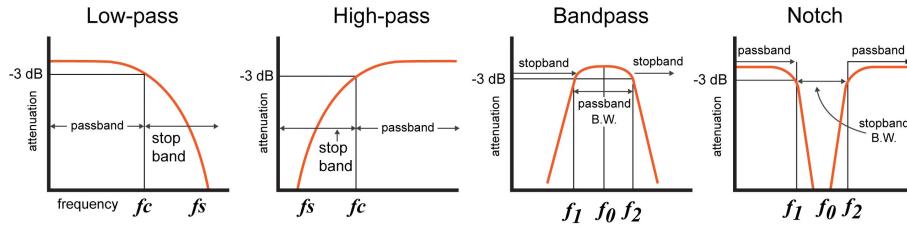


FIGURE 1.7 : Types de filtres de base [27]

Le signal radar brut contient souvent du bruit provenant de facteurs environnementaux. Un filtre passe-bande est appliqué pour isoler la plage de fréquences correspondant aux décalages Doppler attendus. Par exemple :

$$H(f) = \begin{cases} 1, & f_{low} \leq f \leq f_{high} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.3)$$

Cela garantit que le système radar se concentre sur les fréquences pertinentes, améliorant ainsi le rapport signal-sur-bruit (SNR) [28].

2.6.2 Transformation de Fourier Rapide (FFT)

La FFT est un élément central du traitement du signal radar, facilitant l'analyse du contenu fréquentiel du signal reçu. Elle est particulièrement importante pour la détection du décalage Doppler, qui est directement lié à la vitesse d'une cible en mouvement. La FFT convertit le signal radar du domaine temporel au domaine fréquentiel, permettant ainsi une mesure précise des variations de fréquence.

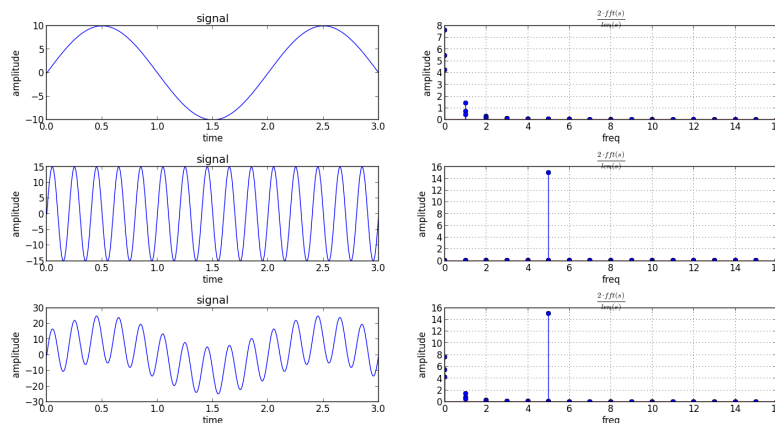


FIGURE 1.8 : Transformation du signal du domaine temporel au domaine fréquentiel avec la FFT [29]

Dans les systèmes radar, la FFT remplit plusieurs fonctions essentielles :

- **Mesure de la vitesse** : Le décalage Doppler, causé par le mouvement relatif de la cible, est détecté et analysé pour calculer sa vitesse. Par exemple, la FFT peut identifier le décalage fréquentiel d'un véhicule en mouvement à une vitesse donnée.
- **Différenciation des cibles** : La FFT permet de séparer les composants fréquentiels correspondant à plusieurs cibles, permettant ainsi au système radar de détecter et de classer plusieurs objets simultanément.

La capacité de la FFT à effectuer une analyse fréquentielle en temps réel la rend indispensable dans les systèmes radar modernes, en particulier pour les applications impliquant des objets à grande vitesse ou des environnements comportant plusieurs cibles.

2.7 Principes du Radar pour la Détection des Vibrations

La détection des vibrations basée sur le radar repose sur la capacité du **radar à onde continue (CW)** à détecter de faibles déplacements induits par les vibrations structurelles. Le radar CW fonctionne en émettant en continu des ondes électromagnétiques et en analysant leurs réflexions pour détecter les variations de fréquence causées par les surfaces en vibration. Cette capacité en fait un outil puissant pour la surveillance des vibrations à distance et sans contact, notamment dans les applications d'évaluation de l'intégrité des pipelines.

Parmi les technologies de détection sans contact, le radar Doppler à onde continue (CW) et le radar à onde continue modulée en fréquence (FMCW) ont démontré une grande précision dans la détection et l'analyse des vibrations [30]. En particulier, le radar Doppler CW présente plusieurs avantages, notamment une **sensibilité élevée**, lui permettant de détecter des vibrations de l'ordre du micromètre et d'analyser avec précision de faibles mouvements structurels. De plus, son fonctionnement à distance et sans contact élimine le besoin d'attacher directement des capteurs, ce qui le rend idéal pour surveiller des structures inaccessibles ou délicates. Sa **polyvalence** lui permet une large application dans la surveillance industrielle, le diagnostic structurel et la détection biomédicale, en particulier dans des situations où les méthodes de contact sont inapplicables [31, 32].

L'efficacité du radar CW pour la détection des vibrations repose sur deux principes fondamentaux :

- **Interaction des ondes électromagnétiques avec les surfaces vibrantes** : Le radar CW émet des signaux radiofréquences (RF) vers une structure vibrante. Lorsque la surface oscille, l'onde réfléchie subit une modulation de phase, générant un décalage fréquentiel proportionnel à l'amplitude et à la fréquence de la vibration. En analysant ces décalages, le radar peut extraire des caractéristiques vibratoires précises sans nécessiter de contact physique avec la structure [33].
- **Traitement du signal pour l'analyse des vibrations** : L'extraction d'informations vibratoires à partir des signaux radar nécessite des techniques avancées de traitement du signal. La **transformation de Fourier rapide (FFT)** est couramment utilisée pour convertir les signaux radar du domaine temporel au domaine fréquentiel, permettant ainsi l'identification des fréquences vibratoires dominantes. De plus, le **spectre d'amplitude cumulatif (CAS)** et la **densité spectrale de puissance (PSD)** améliorent la visibilité des anomalies vibratoires, facilitant ainsi la détection des oscillations subtiles [17].

Malgré ces avantages, la surveillance des vibrations par radar CW présente certains défis. Des problèmes tels que le **décalage DC** et la **détection nulle** nécessitent une calibration précise, tandis que les facteurs environnementaux, comme le bruit et les interférences, requièrent des techniques de traitement du signal robustes pour maintenir la précision [31, 32]. L'optimisation du système est essentielle pour garantir une détection des vibrations fiable et à haute résolution dans diverses applications.

En s'appuyant sur ces principes, le radar CW offre une **solution évolutive, non invasive et haute résolution** pour la détection des vibrations. Les chapitres suivants approfondissent ces concepts en détaillant **la validation expérimentale, les stratégies de mise en œuvre et l'évaluation des performances** du radar CW pour la détection des vibrations causées par des fuites dans les pipelines.

2.7.1 Surveillance des Vibrations Sans Contact

Les méthodes de surveillance des vibrations sans contact gagnent en popularité en raison de leur flexibilité et de leur capacité à mesurer les vibrations à distance. Des technologies telles que l'interférométrie laser Doppler et la détection radar éliminent le besoin de contact physique direct, ce qui les rend idéales pour les systèmes sensibles ou difficilement accessibles. Parmi ces technologies, les systèmes radar, en particulier le *radar Doppler à onde continue (CW)* et le *radar FMCW*, ont démontré un potentiel exceptionnel pour la détection des vibrations à haute précision et à distance [30].

Le radar Doppler CW offre plusieurs avantages qui le rendent particulièrement adapté à la surveillance des vibrations. Sa **haute sensibilité** permet la détection de vibrations de l'ordre du micromètre, assurant une analyse précise des mouvements minimes. De plus, son fonctionnement **sans contact** est idéal pour la surveillance de cibles inaccessibles ou sensibles, réduisant ainsi le besoin d'interactions physiques. Cette polyvalence fait du radar Doppler CW un outil précieux pour des applications telles que la surveillance de la santé structurelle et la détection biomédicale [32].

Malgré ces atouts, les systèmes radar CW présentent certaines limitations. Des défis tels que le **décalage DC** et la **détection nulle** nécessitent une calibration et une compensation minutieuses pour maintenir la précision. De plus, les facteurs environnementaux, comme le bruit et les interférences, peuvent affecter les performances et la fiabilité du système, rendant nécessaire l'utilisation de techniques de traitement du signal robustes [31]. Ces forces et limitations soulignent l'importance d'une mise en œuvre et d'une optimisation adaptées dans la surveillance des vibrations par radar CW.

3 EXPERIMENTAL SETUP, CHALLENGES AND LIMITATIONS

L'expérience simule des fuites en introduisant de petits et de grands trous dans un tuyau en cuivre transportant de l'eau et évalue les signaux radar collectés à différents points et distances. La méthodologie de test implique le traitement des données acquises afin d'extraire des caractéristiques dans le domaine fréquentiel, permettant de différencier efficacement les conditions de fuite et d'absence de fuite.

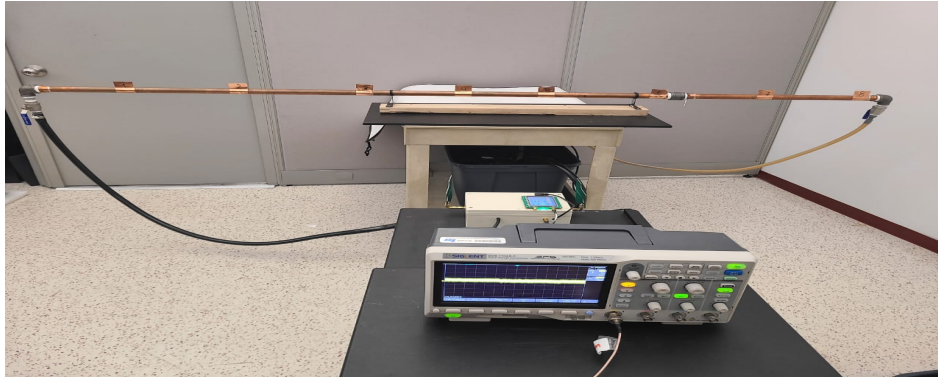


FIGURE 1.9 : Configuration expérimentale en laboratoire

3.1 Système Radar

Le système radar utilisé dans cette étude est un **radar à onde continue (CW)** fonctionnant à une fréquence de 3,5 GHz. Ce type de radar transmet en continu un signal à fréquence stable, lui permettant de détecter et d'analyser avec une grande précision les signaux réfléchis par les cibles. Le signal émis interagit avec des objets, tels que la surface d'un tuyau ou les perturbations fluidiques causées par des fuites, et les signaux réfléchis sont collectés pour un traitement ultérieur. En analysant les variations d'amplitude, de phase et les décalages fréquentiels des signaux réfléchis, le système est capable de détecter des anomalies, y compris des vibrations ou des modifications structurelles, pouvant indiquer la présence d'une fuite. La fréquence de fonctionnement élevée de 3,5 GHz garantit une sensibilité et une résolution accrues, le rendant particulièrement efficace pour capturer les détails fins et les variations subtiles associées aux perturbations de l'écoulement du fluide et aux déformations structurelles des pipelines.

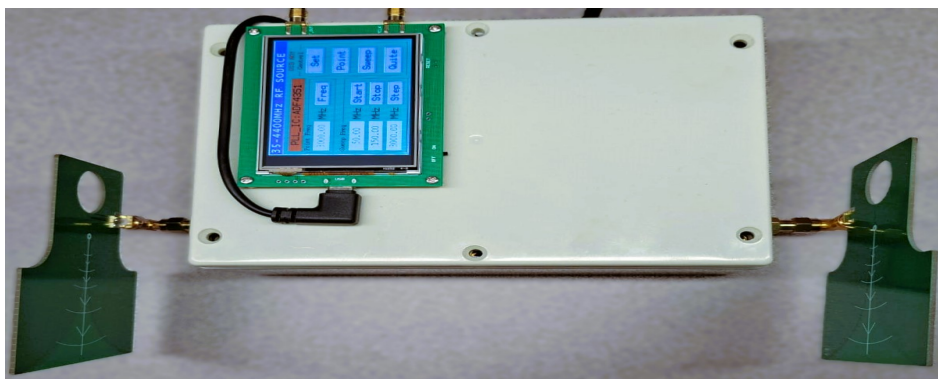


FIGURE 1.10 : Radar CW utilisé pour les mesures

3.2 Configuration du Tuyau et de la Pompe

L'installation expérimentale utilise un tuyau en cuivre comme principal matériau de test, en raison de son usage répandu dans la plomberie et les applications industrielles. Le cuivre a été choisi pour le pipeline en raison de sa disponibilité et de sa facilité de découpe et de soudure, ce qui le rend pratique pour les modifications et ajustements lors des expériences. Ses propriétés légères ont également contribué à son adéquation pour une utilisation en laboratoire, facilitant la manipulation et l'installation.

Un diamètre de 1 pouce a été sélectionné, car il s'agissait du plus grand tuyau en cuivre facilement disponible dans les magasins de bricolage locaux. Cela garantit sa compatibilité avec les raccords et composants standard tout en offrant une capacité d'écoulement suffisante pour l'installation expérimentale. Cette configuration permet de créer des conditions de test contrôlées tout en maintenant une pertinence pratique par rapport aux scénarios réels.

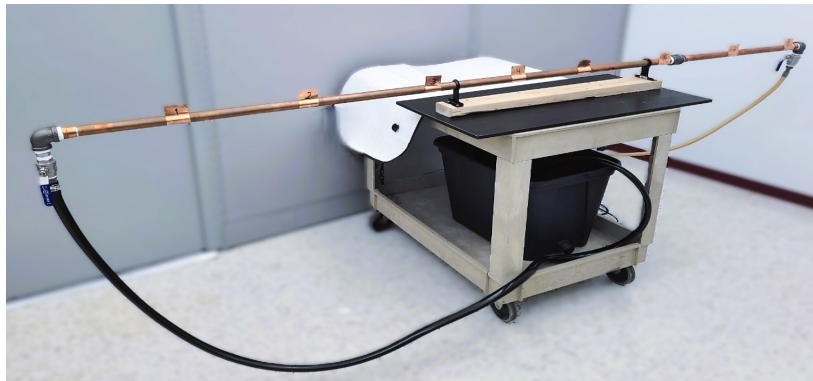


FIGURE 1.11 : Configuration du tuyau et de la pompe utilisée dans l'expérience

3.3 Simulation de Fuite

Pour simuler des scénarios de fuite et évaluer la capacité du système radar à détecter et différencier les fuites, deux tailles de trous différentes ont été introduites au point 7 le long du tuyau en cuivre. Ce point n'a pas été sélectionné stratégiquement, mais simplement marqué à des fins de référence afin de faciliter l'analyse des données et la localisation des fuites lors des tests. Plusieurs points ont été marqués le long du tuyau afin d'établir un cadre cohérent pour l'enregistrement des mesures en fonction de l'emplacement de la fuite.

Une petite fuite a été simulée en perçant un trou de 1.5 mm, correspondant au plus petit foret disponible pour l'expérience. Bien que cette taille ne soit pas nécessairement représentative des micro-fuites dans des applications réelles, elle a permis de tester la capacité du système à détecter de faibles perturbations du débit et les vibrations correspondantes.

Pour créer une fuite plus importante, un trou de 1.5 mm a été percé, offrant ainsi un scénario avec un débit d'eau plus élevé et des vibrations plus marquées. Cette configuration a permis de comparer les fuites mineures et plus sévères, en se concentrant sur la manière dont les signaux radar réagissent aux variations de taille de fuite.



FIGURE 1.12 : Fuite simulée

3.4 Points de Référence et Configuration des Mesures

L'installation expérimentale comprenait huit points de référence marqués le long du tuyau en cuivre afin de faciliter une collecte de données systématique et de permettre des comparaisons entre différents emplacements de mesure. Ces points de référence étaient espacés de manière uniforme et servaient de positions fixes pour l'enregistrement des signaux radar, garantissant ainsi la cohérence et la répétabilité des mesures. Les marquages fournissaient également un cadre structuré pour analyser les variations des signaux en fonction de la position de la fuite, contribuant à l'évaluation de la sensibilité de détection et de la précision de localisation.

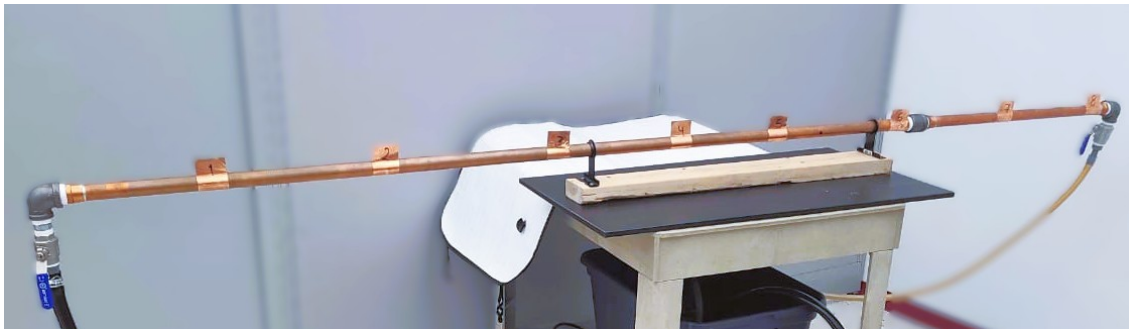


FIGURE 1.13 : Huit points de référence marqués le long du tuyau

Les signaux radar ont été enregistrés à chaque point de référence sous différentes conditions de test simulant divers scénarios opérationnels :

- **Cas 1 : Pompe éteinte**, absence d'écoulement d'eau dans le tuyau, servant de référence pour identifier le bruit de fond et le comportement du système en l'absence de flux.
- **Cas 2 : Pompe allumée**, écoulement d'eau à travers le tuyau sans fuite, simulant des conditions normales de fonctionnement et établissant une base de comparaison.
- **Cas 3 : Pompe allumée avec fuite**, écoulement d'eau à travers le tuyau avec une fuite introduite au point 7, permettant d'évaluer les variations des signaux radar causées par la présence d'une fuite.

Les mesures ont été effectuées à des distances de 0,5 m, 1 m, 1,5 m et 2 m par rapport à l'unité radar afin d'évaluer le comportement du signal en fonction de la distance par rapport à la fuite. Ces distances ont été choisies pour étudier l'évolution de la capacité de détection du radar

avec l'éloignement et pour analyser l'influence de l'atténuation et de la dispersion du signal au fil de la distance.

3.5 Défis et Limitations

La géométrie cylindrique des tuyaux en cuivre pose des obstacles significatifs à la détection des fuites par radar. En raison de la surface courbée de la section transversale, les ondes électromagnétiques se dispersent dans plusieurs directions au lieu d'être réfléchies directement vers le récepteur radar. Cette dispersion affaiblit le signal réfléchi et réduit sa cohérence, rendant difficile la détection de perturbations subtiles, telles que les vibrations causées par les fuites.

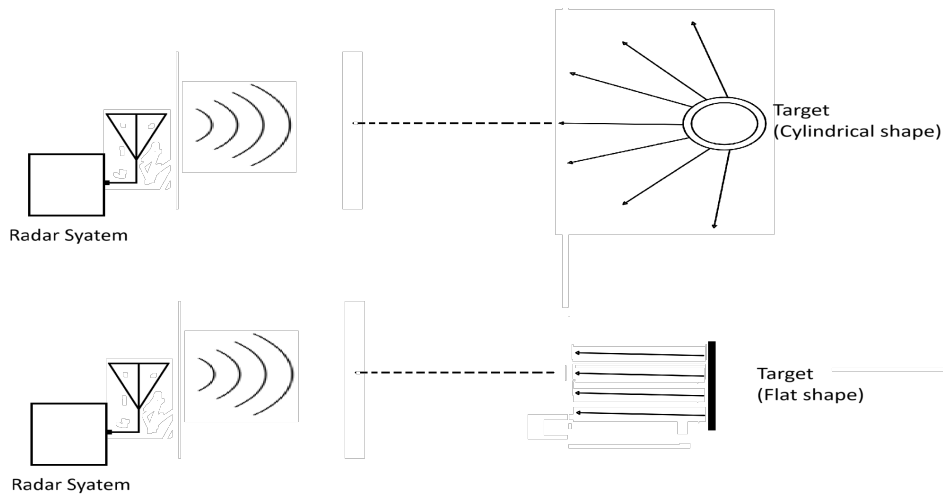


FIGURE 1.14 : Effet de la section transversale de la cible sur la réflexion du signal

3.5.1 Amélioration de la Détection du Signal avec des Surfaces Réfléchissantes en Cuivre Plat

Pour pallier les limitations posées par la géométrie du tuyau, des plaques de cuivre plates ont été fixées au tuyau à chacun des 8 points de référence. Ces surfaces planes ont amélioré l'interaction entre les ondes radar et le tuyau, garantissant une réflexion plus efficace vers le récepteur radar. En atténuant l'effet de dispersion, cette modification a permis d'améliorer la performance du radar. Cette approche a offert plusieurs avantages clés :

La surface naturellement courbée ou cylindrique du tuyau entraînait une dispersion des signaux radar dans plusieurs directions, ce qui affaiblissait considérablement le signal de retour vers le radar. En fixant des plaques de cuivre plates orientées vers le radar, les signaux réfléchis étaient dirigés plus efficacement en retour, garantissant des signaux plus forts et plus cohérents.

La taille de ces réflecteurs a été choisie de manière arbitraire ; cependant, toutes les plaques réfléchissantes ont été fabriquées de manière identique afin d'assurer la cohérence et la comparabilité des données collectées aux différents points. Cette approche a permis de garantir que les réflexions des signaux aux 8 points puissent être comparées avec précision sans introduire de variabilité due à la taille des réflecteurs.

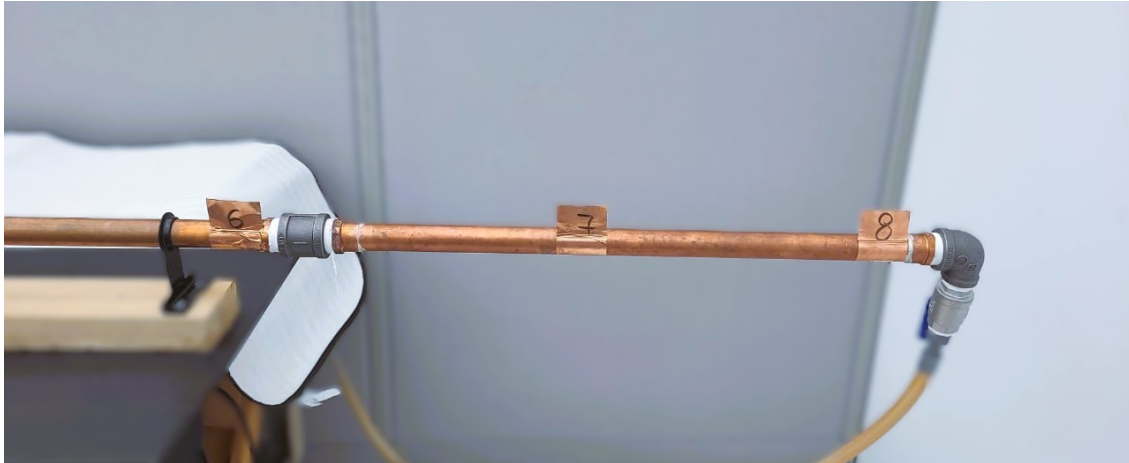


FIGURE 1.15 : Plaques de cuivre plates utilisées pour améliorer les signaux réfléchis du radar CW

3.6 Traitement du Signal

Le traitement du signal a été effectué à l'aide de MATLAB afin d'analyser les données radar et d'extraire des informations pertinentes pour la détection des fuites. Une série d'étapes de traitement a été mise en place pour améliorer la qualité des données, réduire le bruit et mettre en évidence les caractéristiques indicatives de fuites.

La première étape consistait à appliquer un filtre passe-bande aux signaux bruts. Ce filtre a été soigneusement conçu pour éliminer le bruit basse fréquence et les interférences haute fréquence, tout en conservant uniquement les composantes fréquentielles pertinentes pour la détection des vibrations et des perturbations causées par les fuites. Le processus de filtrage a permis de concentrer l'analyse sur les signaux les plus susceptibles d'être associés à l'écoulement du fluide et aux vibrations structurelles au sein du pipeline.

Ensuite, une transformation de Fourier rapide (FFT) a été calculée pour chaque signal afin de convertir les données du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette transformation a permis d'identifier les composantes fréquentielles et les caractéristiques spectrales liées aux vibrations induites par les fuites. Les variations du contenu fréquentiel ont été analysées pour distinguer les motifs caractéristiques des différentes conditions de test, y compris les scénarios avec et sans fuite.

Pour faciliter les comparaisons quantitatives, la puissance totale du spectre de puissance (PS) a été calculée pour chaque cas expérimental : Pompe éteinte, Pompe allumée et Pompe allumée avec fuite. Cette mesure a permis d'obtenir une valeur unique représentant la répartition globale de l'énergie dans le spectre de fréquence, simplifiant ainsi l'évaluation des différences entre les scénarios et mettant efficacement en évidence les anomalies associées aux fuites.

4 Résultats et Discussion

4.1 À 0,5 mètre

À une distance de 0,5 mètre, le radar a démontré une sensibilité exceptionnelle aux fuites, avec une atténuation minimale du signal et une forte intégrité du signal. L'analyse du ****Spectre d'Amplitude Cumulatif****, corroborée par les courbes de tendance, a révélé des caractéristiques de signal robustes, validant la grande efficacité du système pour la détection des fuites dans des scénarios à courte portée.

TABEAU 1.1 : Spectre de puissance à une distance de 0,5 mètre

| Label | Point 1 | Point 2 | Point 3 | Point 4 | Point 5 | Point 6 | Point 7 | Point 8 |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pompe ÉTEINTE | 2.93E-08 | 3.11E-08 | 3.44E-08 | 2.93E-08 | 2.80E-08 | 3.99E-08 | 4.65E-08 | 2.83E-08 |
| Pompe ALLUMÉE (Sans fuite) | 4.60E-08 | 5.05E-08 | 5.05E-08 | 4.55E-08 | 4.43E-08 | 4.83E-08 | 5.30E-08 | 6.76E-08 |
| Pompe ALLUMÉE (Avec fuite) | 3.82E-08 | 3.71E-08 | 3.62E-08 | 5.18E-08 | 6.06E-08 | 7.35E-08 | 1.26E-07 | 9.00E-08 |

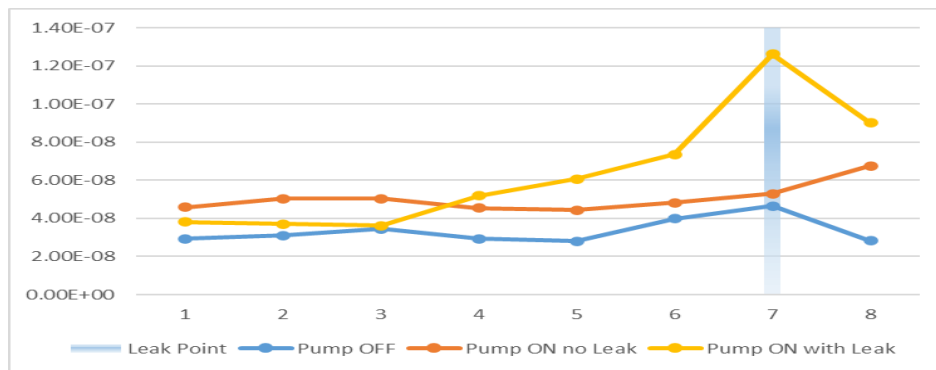


FIGURE 1.16 : Spectre de puissance à une distance de 0,5 mètre sur les 8 points de référence du tuyau

4.2 Résultats du Signal Radar Traité et Effets de la Distance

Le graphique compare le Spectre de Puissance (CAS) exclusivement dans le scénario Pompe ALLUMÉE avec fuite, afin d'évaluer comment la performance du radar varie en fonction des quatre distances de mesure.

À une distance de 0,5 mètre, le système radar a clairement identifié un pic net et prononcé au point 7, correspondant exactement à l'emplacement de la fuite. Cette mesure à courte portée démontre la capacité du radar à détecter avec précision les perturbations induites par la fuite avec une haute résolution spatiale, lorsque la couverture de l'antenne est étroite et localisée. Ces résultats confirment la forte aptitude du radar à détecter des anomalies avec précision dans des scénarios de surveillance de proximité.

À 1 mètre, les résultats du CAS montrent un décalage notable du pic du point 7 vers le point 6, situé juste à côté de la fuite. Malgré ce déplacement, le système radar continue à détecter les vibrations dans la zone proche de la fuite. Ce léger décalage peut être attribué à l'élargissement de la couverture de l'antenne radar à cette distance, captant non seulement les vibrations induites par la fuite mais aussi l'activité structurelle ou fluide environnante. Alternativement, cette modifica-

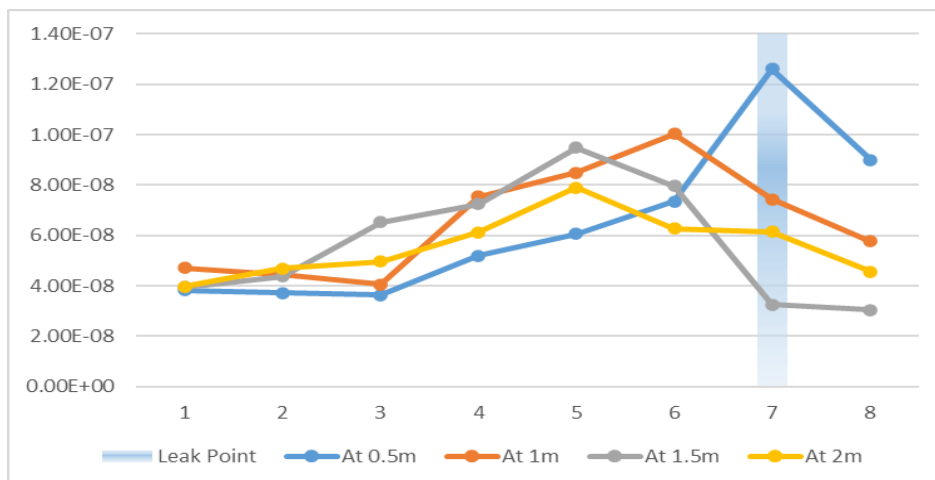


FIGURE 1.17 : Comparaison du spectre de puissance en cas de fuite selon la distance

tion pourrait être due à une propagation accrue des vibrations autour du site de la fuite, entraînant l'apparition de perturbations détectables légèrement décalées par rapport à la position réelle de la fuite.

À 1,5 mètre, le pic se déplace encore vers le point 5, et cette tendance est également observée à 2 mètres. Bien que les valeurs du CAS diminuent globalement avec l'augmentation de la distance, la détection cohérente d'un pic au point 5, proche du site de la fuite, met en évidence la sensibilité persistante du radar aux vibrations induites par la fuite. Le déplacement du pic à des distances plus grandes est probablement dû à l'augmentation de la couverture du faisceau radar, qui intègre alors les signaux provenant d'une zone plus étendue. De plus, la dynamique des fluides et les vibrations structurelles générées autour de la fuite peuvent contribuer à des perturbations plus marquées près du point 5, en faisant la principale source de signal détectée à ces distances.

Ces résultats soulignent l'importance d'une calibration précise de la distance lors de l'utilisation du radar CW pour la détection des fuites. La diminution de l'amplitude du signal à des distances plus grandes met en évidence la nécessité d'un ****amplificateur de signal**** ou de ****techniques avancées de traitement des données**** afin de maintenir une précision optimale sur des pipelines plus longs. Des études complémentaires porteront sur l'analyse en domaine fréquentiel et l'évaluation comparative des variations de signal afin de valider ces observations.

4.3 Validation de la Quantification

Les différences observées dans les amplitudes des signaux et les profils de pics entre les petites et grandes fuites suggèrent que le traitement des signaux radar pourrait être utilisé pour la quantification des fuites. Les variations d'amplitude sont corrélées à la taille de la fuite, indiquant que les fuites plus importantes génèrent des signaux plus forts. Cependant, l'impact de la distance doit être pris en compte avec précaution, car l'atténuation réduit la force du signal sur de longues portées.

Bien que les tendances observées confirment la faisabilité de la quantification, une validation supplémentaire est nécessaire pour établir une relation précise entre l'amplitude du signal et la taille de la fuite. Des expériences complémentaires portant sur des tailles de fuite intermédiaires,

TABLEAU 1.2 : Résultats du spectre de puissance pour une petite et une grande fuite à 1 mètre de distance

| Label | Point 1 | Point 2 | Point 3 | Point 4 | Point 5 | Point 6 | Point 7 | Point 8 |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Petite fuite à 0,5 m | 3.82E-08 | 3.71E-08 | 3.62E-08 | 5.18E-08 | 6.06E-08 | 7.35E-08 | 1.26E-07 | 9.00E-08 |
| Grande fuite à 0,5 m | 3.82E-08 | 3.71E-08 | 3.62E-08 | 5.18E-08 | 6.86E-07 | 1.67E-07 | 4.02E-07 | 2.36E-07 |

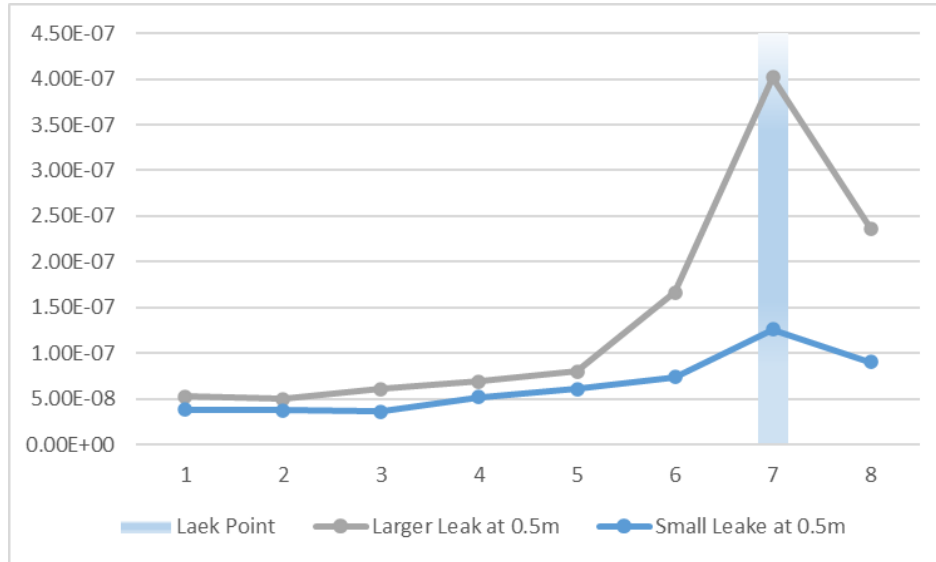


FIGURE 1.18 : Comparaison du spectre de puissance entre une petite et une grande fuite à 0,5 mètre pour la validation de la quantification

la normalisation du signal et l'utilisation de techniques avancées de traitement des données sont requises pour améliorer la précision et la fiabilité des applications pratiques.

Les résultats mettent en évidence le potentiel du ****radar CW pour la quantification des fuites**** sur la base de l'analyse de l'amplitude du signal. Les fuites plus importantes produisent des profils de signal distincts, ce qui facilite leur identification et leur éventuelle quantification. Les petites fuites, bien que détectables, pourraient nécessiter des ****algorithmes de traitement améliorés**** afin d'augmenter la sensibilité, notamment sur de longues distances. Les études futures affineront ces approches afin de valider la robustesse de cette méthode dans des conditions variables.

5 Conclusion et Perspectives

5.1 Conclusion

La détection, la localisation et la quantification des fuites dans les pipelines restent des défis majeurs pour garantir l'intégrité des systèmes de transport de fluides dans divers secteurs, notamment la distribution d'eau, les pipelines de pétrole et de gaz, ainsi que le transport industriel de liquides. Les fuites non détectées peuvent entraîner des pertes de ressources considérables, des risques environnementaux et une augmentation des coûts d'exploitation. Pour répondre à ces défis, cette recherche a introduit une approche innovante basée sur le **radar à onde continue (CW)** pour une détection non invasive des fuites à l'aide de l'analyse des vibrations. En exploitant la grande sensibilité du radar CW aux vibrations structurelles, cette étude visait à développer une

solution évolutive, économique et en temps réel, surmontant les limites des techniques conventionnelles de détection des fuites.

Les résultats expérimentaux ont montré que le radar CW captait efficacement les variations de signal associées à différentes tailles de fuite et à différentes distances de mesure. Le système a démontré une haute sensibilité en distinguant les petites fuites (1.5 mm) des grandes fuites (1.5 mm), confirmant ainsi son potentiel pour la quantification de la gravité des fuites. De plus, l'analyse de l'atténuation du signal en fonction de la distance a révélé une relation cohérente entre la localisation de la fuite et les variations d'amplitude du signal, soulignant ainsi le potentiel du radar pour une localisation précise des fuites. L'application de l'analyse du spectre de puissance total a renforcé la capacité du système à différencier les conditions avec et sans fuite, validant ainsi l'efficacité de la surveillance par radar.

L'un des principaux avantages de cette approche est son caractère non intrusif, permettant la détection des fuites sans accès direct aux pipelines ni modifications physiques. Contrairement aux méthodes traditionnelles telles que la surveillance acoustique, la mesure de pression ou la détection par fibre optique, le radar CW ne nécessite ni réseau de capteurs distribués, ni modifications structurelles des pipelines, ce qui en fait une solution viable pour les pipelines aériens et souterrains. Les résultats de cette étude indiquent que le radar CW peut fonctionner efficacement dans des conditions environnementales variées, en maintenant des performances fiables même lorsque la distance de mesure augmente. Cette adaptabilité renforce son potentiel d'application dans des infrastructures complexes, notamment en milieu urbain, dans les installations industrielles et pour la surveillance à distance.

Malgré ces résultats prometteurs, cette recherche a également mis en évidence plusieurs axes d'amélioration. L'atténuation des signaux radar à de plus grandes distances suggère la nécessité de stratégies d'amplification du signal ou de techniques avancées de filtrage pour améliorer la précision de détection dans des déploiements à grande échelle. De plus, bien que le système ait identifié avec succès les fuites dans un environnement expérimental contrôlé, des conditions réelles pourraient introduire des bruits environnementaux et des variations liées aux matériaux, nécessitant des optimisations supplémentaires.

En conclusion, cette étude a démontré la faisabilité et l'efficacité du radar CW comme solution évolutive, adaptable et non invasive pour la détection des fuites dans les pipelines. Ces résultats constituent une base solide pour de futures recherches et applications industrielles, notamment pour la mise en place d'une surveillance continue et en temps réel des systèmes de transport de fluides. À l'avenir, des améliorations en traitement du signal, intégration multi-capteurs et détection des anomalies par apprentissage automatique seront essentielles pour renforcer la précision, la robustesse et l'applicabilité à grande échelle de cette technologie.

5.2 Perspectives

Bien que cette recherche ait validé le potentiel du radar CW pour la détection des fuites, plusieurs aspects méritent d'être approfondis pour améliorer la fiabilité, l'évolutivité et l'adaptabilité du système à des applications réelles. Les travaux futurs devraient se concentrer sur les points suivants :

- **Tests en conditions réelles et adaptation environnementale** Il est essentiel de valider la méthode proposée à travers des essais sur des infrastructures réelles. Les recherches

futures devraient évaluer la performance du radar CW dans diverses conditions environnementales, y compris sur des pipelines souterrains, des tuyauteries isolées et différents types de sols. L'adaptabilité du radar aux systèmes de transport de fluides sous haute pression (réseaux d'eau municipaux, raffineries de pétrole) devra également être étudiée.

- **Amélioration du traitement du signal et intégration de l'apprentissage automatique** L'intégration d'algorithmes d'apprentissage automatique pourrait améliorer la détection et la classification des anomalies. Des modèles de deep learning, tels que les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) et les réseaux récurrents (RNN), devraient être explorés pour identifier automatiquement les variations de signal associées aux fuites.
- **Exploration du radar CW multi-fréquence et analyse spectrale** L'étude des effets de différentes fréquences radar permettrait d'optimiser la sensibilité de détection. L'utilisation du radar FMCW pourrait offrir une meilleure pénétration à travers divers matériaux et une résolution accrue pour les petites fuites.
- **Intégration avec les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et la surveillance IoT** Pour un déploiement à grande échelle, le radar CW pourrait être intégré aux réseaux de capteurs sans fil (WSN) et aux plateformes IoT. Cela permettrait une surveillance à distance en temps réel, avec des alertes automatiques et des analyses prédictives.
- **Optimisation énergétique et matériel à faible consommation** Le développement de modules radar basse consommation serait essentiel pour des applications dans des zones isolées. L'intégration avec des sources d'énergie renouvelables (panneaux solaires, récupération d'énergie vibratoire) pourrait soutenir un fonctionnement autonome à long terme.
- **Quantification de la gravité des fuites et modèles de maintenance prédictive** Des recherches complémentaires sont nécessaires pour établir une corrélation quantitative entre l'amplitude du signal et la gravité des fuites. Des modèles de maintenance prédictive, basés sur la dynamique des fluides et des simulations numériques, pourraient améliorer l'évaluation des risques en temps réel.
- **Intégration multi-capteurs pour une détection améliorée** L'association du radar CW avec d'autres technologies, comme la détection acoustique, la thermographie infrarouge et la fibre optique, pourrait renforcer la fiabilité du système et réduire les faux positifs.

Conclusion finale : Les résultats de cette étude ouvrent la voie à des avancées significatives dans la détection des fuites par radar CW. Les innovations futures en traitement du signal, en optimisation matérielle et en maintenance prédictive seront essentielles pour améliorer la résilience des infrastructures de transport de fluides à l'échelle mondiale.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------------|
| REMERCIEMENTS | iii |
| RÉSUMÉ | v |
| ABSTRACT..... | vii |
| 1 APERÇU ET INTRODUCTION | ix |
| 1.1 Introduction..... | ix |
| 1.2 Problématique..... | x |
| 1.3 Objectif..... | x |
| 1.4 Approche Proposée..... | xi |
| 1.5 Plan de la Thèse | xii |
| 2 CONTEXTE ET TECHNOLOGIE RADAR POUR LA DÉTECTION DES FUITES ET LA SURVEILLANCE DES VIBRATIONS | xiii |
| 2.1 Contexte et Travaux Connexes sur la Détection des Fuites..... | xiii |
| 2.2 Technologie Radar et Surveillance des Vibrations | xv |
| 2.3 Principes et Contexte du Radar..... | xv |
| 2.4 Fondamentaux du Radar | xvi |
| 2.5 Radar à Onde Continue (CW)..... | xviii |
| 2.6 Traitement du Signal | xx |
| 2.7 Principes du Radar pour la Détection des Vibrations..... | xxii |
| 3 EXPERIMENTAL SETUP, CHALLENGES AND LIMITATIONS | xxiv |
| 3.1 Système Radar..... | xxiv |
| 3.2 Configuration du Tuyau et de la Pompe..... | xxv |
| 3.3 Simulation de Fuite | xxv |
| 3.4 Points de Référence et Configuration des Mesures | xxvi |
| 3.5 Défis et Limitations..... | xxvii |
| 3.6 Traitement du Signal | xxviii |
| 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION..... | xxix |
| 4.1 À 0.5 mètre..... | xxix |
| 4.2 Résultats du Signal Radar Traité et Effets de la Distance | xxix |
| 4.3 Validation de la Quantification..... | xxx |
| 5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES | xxxI |
| 5.1 Conclusion..... | xxxI |

| | |
|---|---------------|
| 5.2 Perspectives..... | xxxii |
| TABLE DES MATIÈRES..... | xxxv |
| LISTE DES FIGURES..... | xxxvii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xlili |
| LISTE DES ABREVIATIONS..... | xliv |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS..... | xliv |
| 1 OVERVIEW AND INTRODUCTION..... | 1 |
| 1 INTRODUCTION..... | 1 |
| 2 PROBLEM STATEMENT..... | 2 |
| 3 OBJECTIVE..... | 2 |
| 4 PROPOSED APPROACH..... | 3 |
| 5 THESIS OUTLINE..... | 4 |
| 2 BACKGROUND AND RADAR TECHNOLOGY FOR LEAK DETECTION AND VIBRATION MONITORING..... | 7 |
| 1 LEAK DETECTION BACKGROUND AND RELATED WORK..... | 7 |
| 2 RADAR TECHNOLOGY AND VIBRATION MONITORING..... | 9 |
| 2.1 Radar Principles and Background..... | 9 |
| 2.2 Radar Fundamentals..... | 9 |
| 2.3 Continuous Wave (CW) Radar..... | 12 |
| 2.4 Signal Processing..... | 16 |
| 2.5 Radar Principles for Vibration Detection..... | 18 |
| 3 EXPERIMENTAL SETUP, CHALLENGES AND LIMITATIONS..... | 21 |
| 1 RADAR SYSTEM..... | 21 |
| 1.1 Radar Components..... | 22 |
| 2 PIPE AND PUMP SETUP..... | 25 |
| 3 LEAK SIMULATION..... | 26 |
| 4 REFERENCE POINTS AND MEASUREMENT SETUP..... | 27 |
| 5 CHALLENGES AND LIMITATIONS..... | 28 |
| 5.1 Enhancing Signal Detection with Flat Copper Reflective Surfaces..... | 28 |
| 6 DATA ACQUISITION WITH OSCILLOSCOPE..... | 29 |
| 7 SIGNAL PROCESSING..... | 30 |
| 4 RESULTS AND DISCUSSION..... | 33 |
| 1 DATA ANALYSIS APPROACH..... | 33 |

- 2 RESULTS AND DISCUSSION..... 34
 - 2.1 *Signals Comparisons at 1 meter distance* 34
- 3 TOTAL POWER ACROSS DISTANCES..... 42
 - 3.1 *0.5 meter*..... 43
 - 3.2 *1 meter*..... 43
 - 3.3 *1.5 meter*..... 44
 - 3.4 *2 meters*..... 44
- 4 PROCESSED RADAR SIGNAL RESULTS AND DISTANCE EFFECTS 45
- 5 COMPARISON OF RADAR SIGNAL RESULTS FOR SMALL AND LARGE LEAKS. 47
- 6 VALIDATION OF QUANTIFICATION..... 48
- 5 CONCLUSION AND FUTURE WORK 51**
 - 1 CONCLUSION 51
 - 2 FUTURE WORK..... 52
- BIBLIOGRAPHIE..... 55**

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|--------|
| FIGURE 1.1 ORGANIGRAMME DU PROCESSUS DE DÉTECTION DES VIBRATIONS PAR RADAR CW | xii |
| FIGURE 1.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU RADAR..... | xv |
| FIGURE 1.3 SIGNAL TRANSMIS PAR UN RADAR PULSÉ | xvii |
| FIGURE 1.4 SIGNAL TRANSMIS PAR UN RADAR CW | xviii |
| FIGURE 1.5 SCHÉMA D'UN RADAR CW SIMPLE | xviii |
| FIGURE 1.6 SIGNAL TRANSMIS PAR UN RADAR FMCW | xix |
| FIGURE 1.7 TYPES DE FILTRES DE BASE [27] | xxi |
| FIGURE 1.8 TRANSFORMATION DU SIGNAL DU DOMAINE TEMPOREL AU DOMAINE FRÉ- QUENTIEL AVEC LA FFT [29] | xxi |
| FIGURE 1.9 CONFIGURATION EXPÉRIMENTALE EN LABORATOIRE | xxiv |
| FIGURE 1.10 RADAR CW UTILISÉ POUR LES MESURES | xxiv |
| FIGURE 1.11 CONFIGURATION DU TUYAU ET DE LA POMPE UTILISÉE DANS L'EXPÉRIENCE..... | xxv |
| FIGURE 1.12 FUITE SIMULÉE..... | xxvi |
| FIGURE 1.13 HUIT POINTS DE RÉFÉRENCE MARQUÉS LE LONG DU TUYAU..... | xxvi |
| FIGURE 1.14 EFFET DE LA SECTION TRANSVERSALE DE LA CIBLE SUR LA RÉFLEXION DU SIGNAL | xxvii |
| FIGURE 1.15 PLAQUES DE CUIVRE PLATES UTILISÉES POUR AMÉLIORER LES SIGNAUX RÉ- FLÉCHIS DU RADAR CW | xxviii |
| FIGURE 1.16 SPECTRE DE PUISSANCE À UNE DISTANCE DE 0,5 MÈTRE SUR LES 8 POINTS DE RÉFÉRENCE DU TUYAU | xxix |
| FIGURE 1.17 COMPARAISON DU SPECTRE DE PUISSANCE EN CAS DE FUITE SELON LA DISTANCE | xxx |
| FIGURE 1.18 COMPARAISON DU SPECTRE DE PUISSANCE ENTRE UNE PETITE ET UNE GRANDE FUITE À 0,5 MÈTRE POUR LA VALIDATION DE LA QUANTIFICATION..... | xxxii |
| | |
| FIGURE 1.1 FLOWCHART OF THE CW RADAR VIBRATION DETECTION PROCESS | 4 |
| | |
| FIGURE 2.1 RADAR WORKING CONCEPT | 10 |
| FIGURE 2.2 PULS RADAR TRANSMITTED SIGNAL..... | 12 |
| FIGURE 2.3 CW RADAR TRANSMITTED SIGNAL | 12 |
| FIGURE 2.4 SIMPLE CW RADAR DIAGRAM..... | 13 |
| FIGURE 2.5 FMCW RADAR TRANSMITTED SIGNAL | 14 |

| | | |
|-------------|--|----|
| FIGURE 2.6 | CW RADAR WITH I/Q CHANNELS..... | 15 |
| FIGURE 2.7 | BASIC TYPES OF FILTERS [27]..... | 16 |
| FIGURE 2.8 | TRANSFORMING SIGNAL FROM TIME DOMAIN TO FREQUENCY DOMAIN USING FFT [29]..... | 17 |
| FIGURE 3.1 | EXPERIMENT LAB SETUP..... | 21 |
| FIGURE 3.2 | CW RADAR USED IN MEASUREMENTS | 22 |
| FIGURE 3.3 | PHASE-LOCKED LOOP (PLL)..... | 22 |
| FIGURE 3.4 | COUPLER (POWER DIVIDER) | 23 |
| FIGURE 3.5 | ANTENNA | 23 |
| FIGURE 3.6 | LOW NOISE AMPLIFIER (LNA)..... | 24 |
| FIGURE 3.7 | MIXER | 24 |
| FIGURE 3.8 | 5V DC POWER SUPPLY | 24 |
| FIGURE 3.9 | PIPE AND PUMP SETUP USED IN THE EXPERIMENT..... | 25 |
| FIGURE 3.10 | SIMULATED LAEK | 26 |
| FIGURE 3.11 | EIGHT REFERENCE POINTS MARKED ALONG THE PIPE..... | 27 |
| FIGURE 3.12 | TARGET CROSS SECTIONAL AREA EFFECT ON SIGNAL REFLECTION | 28 |
| FIGURE 3.13 | COPPER FLAT SHEETS USED TO ENHANCE CW RADAR REFLECTED SIGNALS . | 29 |
| FIGURE 3.14 | OSCILLOSCOPE USED FOR DATA ACQUISITION | 30 |
| FIGURE 4.1 | FILTERED RADAR SIGNALS OF POINT 1 AT 1 METER FOR THE THREE CASE (A) PUMP OFF, (B) PUMP ON NO LEAK, (C) PUMP ON WITH LEAK..... | 34 |
| FIGURE 4.2 | FFTS OF SIGNALS IN FIG.4.1..... | 35 |
| FIGURE 4.3 | FILTERED RADAR SIGNALS OF POINT 2 AT 1 METER FOR THE THREE CASE (A) PUMP OFF, (B) PUMP ON NO LEAK, (C) PUMP ON WITH LEAK..... | 35 |
| FIGURE 4.4 | FFTS OF SIGNALS IN FIG.4.3..... | 36 |
| FIGURE 4.5 | FILTERED RADAR SIGNALS OF POINT 3 AT 1 METER FOR THE THREE CASE (A) PUMP OFF, (B) PUMP ON NO LEAK, (C) PUMP ON WITH LEAK..... | 36 |
| FIGURE 4.6 | FFTS OF SIGNALS IN FIG.4.5..... | 37 |
| FIGURE 4.7 | FILTERED RADAR SIGNALS OF POINT 4 AT 1 METER FOR THE THREE CASE (A) PUMP OFF, (B) PUMP ON NO LEAK, (C) PUMP ON WITH LEAK..... | 37 |
| FIGURE 4.8 | FFTS OF SIGNALS IN FIG.4.7..... | 38 |
| FIGURE 4.9 | FILTERED RADAR SIGNALS OF POINT 5 AT 1 METER FOR THE THREE CASE (A) PUMP OFF, (B) PUMP ON NO LEAK, (C) PUMP ON WITH LEAK..... | 38 |
| FIGURE 4.10 | FFTS OF SIGNALS IN FIG.4.9 | 39 |

| | |
|---|----|
| FIGURE 4.11 FILTERED RADAR SIGNALS OF POINT 6 AT 1 METER FOR THE THREE CASE (A) PUMP OFF, (B) PUMP ON NO LEAK, (C) PUMP ON WITH LEAK | 39 |
| FIGURE 4.12 FFTs OF SIGNALS IN FIG.4.11 | 40 |
| FIGURE 4.13 FILTERED RADAR SIGNALS OF POINT 7 AT 1 METER FOR THE THREE CASE (A) PUMP OFF, (B) PUMP ON NO LEAK, (C) PUMP ON WITH LEAK | 40 |
| FIGURE 4.14 FFTs OF SIGNALS IN FIG.4.13..... | 41 |
| FIGURE 4.15 FILTERED RADAR SIGNALS OF POINT 8 AT 1 METER FOR THE THREE CASE (A) PUMP OFF, (B) PUMP ON NO LEAK, (C) PUMP ON WITH LEAK | 41 |
| FIGURE 4.16 FFTs OF SIGNALS IN FIG.4.15..... | 42 |
| FIGURE 4.17 TOTAL POWER AT 0.5M DISTANCE ACROSS THE PIPE 8 REFERENCE POINTS | 43 |
| FIGURE 4.18 TOTAL POWER AT 1M DISTANCE ACROSS THE PIPE 8 REFERENCE POINTS..... | 44 |
| FIGURE 4.19 TOTAL POWER AT 1.5M DISTANCE ACROSS THE PIPE 8 REFERENCE POINTS | 45 |
| FIGURE 4.20 TOTAL POWER RESULTS AT 2M DISTANCE ACROSS THE PIPE 8 REFERENCE POINTS..... | 45 |
| FIGURE 4.21 LEAK CASE TOTAL POWER AND DISTANCE COMPARISON..... | 46 |
| FIGURE 4.22 SAMLL VS LARGER LEAK TOTAL POWER AT DIFFERENT DISTANCES | 47 |
| FIGURE 4.23 SAMLL VS LARGER LEAK TOTAL POWER AT 0.5 METER FOR QUANTIFICATION VALIDATION..... | 48 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-------------|---|------|
| TABLEAU 1.1 | SPECTRE DE PUISSANCE À UNE DISTANCE DE 0,5 MÈTRE | xxix |
| TABLEAU 1.2 | RÉSULTATS DU SPECTRE DE PUISSANCE POUR UNE PETITE ET UNE GRANDE FUIITE À 1 MÈTRE DE DISTANCE | xxxi |
| TABLEAU 4.1 | TOTAL POWER AT 0.5 MATER DISTANCE | 43 |
| TABLEAU 4.2 | TOTAL POWER AT 1 MATER DISTANCE | 44 |
| TABLEAU 4.3 | TOTAL POWER AT 1.5M DISTANCE | 44 |
| TABLEAU 4.4 | TOTAL POWER AT 2 MATER DISTANCE | 45 |
| TABLEAU 4.5 | TOTAL POWER RESULTS FOR SMALL AND LARGER LEAK AT 1 METER DISTANCE 48 | |

LISTE DES ABREVIATIONS

- RADR** Radio Detection And Ranging.
- CW** Continuous Wave.
- FMCW** Frequency-Modulated Continuous Wave.
- PLL** Phase-Locked Loop.
- FFT** Fast Fourier Transform.
- PSD** Power Spectrum Density.
- PS** Power Spectrum.

1 OVERVIEW AND INTRODUCTION

1 Introduction

Pipeline distribution systems are vital to modern infrastructure, facilitating the transportation of water, oil, gas, and other industrial fluids over vast distances. Urban development, industrial growth, and energy supply networks depend on these systems. It is still a significant challenge to maintain their integrity, which is exacerbated by pipeline leaks that cause persistent and costly problems. In water distribution, trillions of liters are lost annually, exacerbating shortages in water-scarce regions [1]. In the oil and gas sector, leaks can lead to ecological disasters, including soil and water contamination, air pollution, and even loss of life. The economic and environmental impacts are substantial, encompassing resource loss, remediation efforts, and system repairs. The reduction of operational efficiency, increased maintenance demands, and in extreme cases, triggering large-scale disasters are further exacerbated by undetected leaks.

To address these challenges, researchers have developed various leak detection methods, including acoustic monitoring, pressure sensing, and tracer techniques. While these approaches have advanced pipeline monitoring, they face notable limitations. For instance, they often struggle to detect small leaks or pinpoint their exact locations. Many methods are also intrusive, requiring pipeline shutdowns or modifications that disrupt operations and increase costs. Environmental noise, diverse pipeline materials, and complex installation conditions further reduce their reliability.

Recent advancements have introduced more sophisticated techniques. For example, M. Bimpas [2] developed a novel sensor system using Continuous Wave (CW) Doppler sensing at 2.45 GHz to detect water leaks in PVC pipelines. This system identifies leaks by analyzing the Doppler frequency shift in reflected electromagnetic waves caused by leaking water. However, this system is not designed for Above-Ground Pipes. The study does not focus on detecting leaks in exposed pipes (e.g., inside buildings or industrial plants).

Abdulhamid [3] proposed a non-contact microwave radar technique for pipeline leak detection. His research successfully demonstrated that Doppler radar can identify leaks by analyzing frequency shifts and amplitude variations caused by pipeline vibrations. Using an experimental closed-loop setup with PVC pipelines and varying pump flow rates, he validated that microwave radar is a promising technique for non-invasive leak detection. However, his study focused solely on leak detection and did not address leak localization or quantification, leaving room for further advancements in these areas.

Another notable contribution by X. Tan [4] introduced a distributed monitoring system using fiber optic cables to detect and map pipe corrosion. This system employs optical frequency domain reflectometry (OFDR) to measure strain distributions along pipelines, enabling real-time corrosion

management. X. Fan [5] proposed a machine learning-based framework called clustering-then-localization semi-supervised learning (CtL-SSL) for leak detection in water distribution networks. This approach leverages network topology and leakage characteristics to optimize sensor placement and detect leaks with high accuracy, even with limited labeled data.

Despite these advancements, challenges remain in scalability, adaptability, and real-time monitoring. Many existing methods are still limited by their inability to detect minor leaks or operate effectively in noisy environments. Additionally, most approaches, including Abdulhamid's, do not **quantify leak severity or precisely localize its position**. To address these gaps, this research extends **CW radar-based leak detection by incorporating localization and quantification techniques**, providing a **comprehensive monitoring solution** for pipeline integrity assessment.

2 Problem Statement

Leaks in water distribution systems pose a significant challenge, leading to considerable water loss, environmental degradation, and high maintenance costs. Despite advancements in leak detection technologies, existing methods such as acoustic-based monitoring, ground-penetrating radar (GPR), and pressure modeling face several limitations that hinder their effectiveness. Many of these techniques require direct access to pipelines or specialized sensors, making deployment in underground or concealed systems complex and expensive. Additionally, environmental factors such as soil moisture, ambient noise, and pipeline material properties significantly impact detection accuracy, reducing reliability across different conditions. Furthermore, while advanced sensing technologies such as acousto-optic sensors offer improved performance, their high cost and technical complexity limit large-scale implementation. Another critical drawback is the inability of conventional methods to accurately detect small leaks, leading to delayed interventions and exacerbating long-term system inefficiencies. These challenges highlight the need for a more efficient, cost-effective, and scalable solution for detecting and localizing pipeline leaks, particularly in real-world operational conditions.

3 Objective

The objective of the proposed approach is to develop an efficient and scalable approach for water pipeline leak detection using Continuous Wave (CW) radar for vibration analysis. This method aims to overcome the limitations of conventional techniques, including complex deployment, environmental sensitivity, limited coverage, high hardware complexity, and difficulty in detecting small leaks. By leveraging the capabilities of CW radar, the proposed approach offers a non-invasive, cost-effective, and scalable solution for real-time pipeline monitoring. Unlike traditional methods that rely on distributed sensors, wireless nodes, or direct physical access, CW radar enables wide-

area leak detection through non-contact vibration sensing, eliminating the need for intrusive installations and simplifying large-scale deployment.

4 Proposed Approach

The key advantages of this approach include :

- **Simplified and Cost-Effective Deployment** :CW radar enables leak detection without direct physical access to the pipeline, making it suitable for underground and concealed infrastructure while reducing installation and maintenance costs.
- **Broad and Scalable Coverage** : Unlike sensor-based approaches that require multiple distributed units, CW radar provides wide-area monitoring using a single system, making it highly scalable for both urban and remote locations.
- **Reduced Hardware Complexity** :The approach eliminates the need for specialized sensors or auxiliary detection technologies, simplifying system implementation and lowering operational costs.
- **Versatility and Adaptability** : The method is effective for pipelines of varying sizes, materials, and operational conditions, ensuring its practicality across diverse infrastructure settings.

By addressing the challenges of existing leak detection techniques, this CW radar-based vibration analysis method presents a robust, efficient, and scalable framework for pipeline leak detection and localization. The proposed solution enhances monitoring capabilities while reducing operational complexity and costs, making it a promising alternative for infrastructure maintenance and water conservation.

This section presents a Continuous Wave (CW) radar-based method for detecting and localizing water pipeline leaks through vibration analysis. The proposed approach leverages CW radar's non-contact sensing capabilities to address the challenges of traditional methods, such as limited coverage, environmental sensitivity, and hardware complexity. By analyzing vibration patterns, the method provides a scalable and cost-effective solution for real-time monitoring and precise leak localization in diverse pipeline environments.

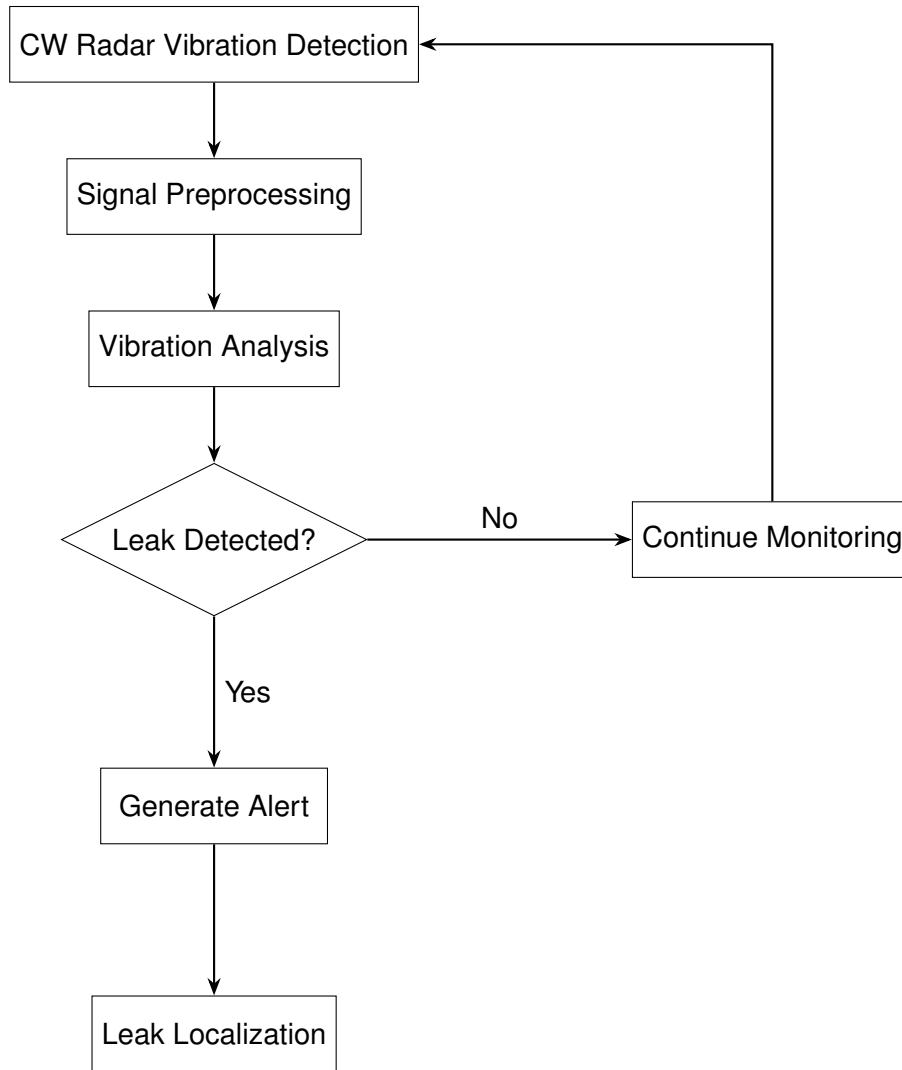


FIGURE 1.1 : Flowchart of the CW Radar Vibration Detection Process

5 Thesis Outline

This thesis is structured into five chapters, each contributing to the overall research narrative :

- **Chapter 1 : Over view and Introduction** This chapter introduces the study, highlighting its significance, research problem, and objectives. It discusses the limitations of existing methods and presents the proposed approach. Finally, it outlines the thesis structure, summarizing key topics in each chapter.
- **Chapter 2 : Background and Radar Technology for Leak Detection and Vibration Monitoring** This chapter provides an overview of leak detection methods and the basics of radar technology. It first explores existing leak detection techniques, then explains key radar principles and how they apply to leak detection and vibration monitoring.

-
- **Chapter 3 : Experimental Setup, Challenges and Limitations** This chapter describes the experimental setup, including the equipment, procedures, and conditions used in the study. It also discusses the challenges encountered during the experiments and the limitations of the approach. These insights help define the study's scope and provide context for interpreting the results.
 - **Chapter 4 : Results and Discussion** This chapter presents the findings of the study, providing a detailed analysis and interpretation of the results. It discusses key observations, compares them with existing research, and explores their implications. Any trends, limitations, or unexpected outcomes are also examined to provide a comprehensive understanding of the study's significance.
 - **Chapter 5 : Conclusion and Future Work** This final chapter summarizes the key findings of the study and their significance. It discusses how the results align with the research objectives and highlights their practical and theoretical implications. Additionally, it outlines the study's limitations and suggests directions for future research to further advance the field.

2 BACKGROUND AND RADAR TECHNOLOGY FOR LEAK DETECTION AND VIBRATION MONITORING

1 Leak Detection Background and Related Work

Pipeline leak detection has seen significant advancements, integrating diverse technologies to enhance infrastructure monitoring. Effective leak detection is critical for ensuring resource efficiency, environmental protection, and operational safety. This section provides an overview of key leak detection methods, their principles, strengths, and limitations, as well as a review of related work that informs the foundation of this research.

Pipeline leak detection methods encompass a variety of approaches that exploit physical principles and advanced technologies to monitor pipeline integrity. Key methods include :

- **Acoustic Emission** : Acoustic techniques detect leaks by capturing noise or vibrations caused by a sudden pressure drop. These transient elastic waves, often in the frequency range of up to 1 MHz [6], are analyzed using active and passive methods to localize leaks effectively.
- **Fibre Optic Sensors** : Distributed Acoustic Sensing (DAS) monitors pipelines over extensive distances using optical fibers. DAS systems detect vibrations, strain, or temperature variations through backscattered light, achieving high sensitivity for early leak detection [7, 8].
- **Ground Penetrating Radar (GPR)** : GPR employs electromagnetic waves to identify subsurface anomalies caused by leaks. Reflected signals highlight variations in soil dielectric properties, particularly effective for buried or insulated pipelines [9, 10].
- **Negative Pressure Wave (NPW)** : NPW techniques detect leaks by monitoring pressure transients created by sudden fluid escapes, allowing real-time detection based on wave propagation [11].
- **Pressure Point Analysis (PPA)** : PPA relies on monitoring localized pressure drops with high-precision sensors, enabling identification and quantification of leaks [12].
- **Dynamic Modeling** : Computational simulations predict pipeline behavior to detect deviations caused by leaks. These models help simulate complex scenarios but require extensive calibration [13, 14].
- **Infrared Thermography** : Infrared imaging identifies temperature anomalies resulting from leaks, making it suitable for aboveground pipelines carrying fluids at different temperatures than their surroundings [15].
- **Vapour Sampling** : Vapour sensors detect chemical emissions from leaks, especially useful for volatile fluids such as oil and gas [16].

-
- **Digital Signal Processing and Mass-Volume Balance** : DSP and mass-volume balance techniques analyze flow data for discrepancies, providing cost-effective leak detection but requiring precise calibration [17].

Several researchers have proposed different methods for leak detection. Zohora et al. (2021) proposed an acoustic emission method that detects leaks by capturing noise or vibrations caused by sudden pressure drops. Their study demonstrates the sensitivity of acoustic techniques but highlights challenges posed by environmental noise interference [6].

Wong et al. (2021) introduced a fibre optic sensing approach, particularly Distributed Acoustic Sensing (DAS), for continuous, real-time monitoring of pipeline leaks. DAS systems analyze disturbances caused by leaks using optical fibers, detecting acoustic, strain, or temperature variations [7]. Despite its high sensitivity, He et al. (2021) pointed out the high costs and complex signal processing requirements as limitations [8].

Cataldo et al. (2014) and Mori et al. (2009) proposed Ground Penetrating Radar (GPR) as a non-invasive technique for detecting leaks. GPR uses high-frequency electromagnetic waves to analyze reflections from subsurface anomalies [9, 10]. However, Pathirana et al. (2023) highlighted that GPR's performance is affected by highly conductive soils, requiring skilled interpretation [18].

Zaman et al. (2020) developed the Negative Pressure Wave (NPW) technique, which detects leaks by monitoring pressure transients [11]. Their approach captures waves generated when fluid escapes and localizes leaks based on arrival times at sensors. While NPW enables real-time detection, it suffers from false positives due to operational transients.

Wan et al. (2022) proposed Pressure Point Analysis (PPA) using high-precision pressure sensors to detect and locate leaks [12]. This method identifies localized pressure drops but struggles with accuracy over long pipeline segments and inconsistent flow rates, as noted by Sekhavati et al. (2022) [19].

Ben et al. (2012) introduced dynamic modeling techniques to predict pipeline behavior and detect anomalies [13]. These models compare real-time data with simulations to identify deviations indicative of leaks. Tajalli et al. (2024) highlighted the need for extensive calibration and computational resources as barriers to implementation [14].

De Oliveira and Leonel (2021) applied infrared thermography to identify temperature anomalies caused by escaping fluids [20]. While suitable for aboveground pipelines, they noted that environmental factors limit its effectiveness for buried or outdoor pipelines.

Continuous Wave (CW) radar has emerged as a promising alternative. CW radar transmits electromagnetic waves and measures reflections to detect anomalies. Studies by Guo et al. (2021) demonstrated CW radar's effectiveness in monitoring structural vibrations [21], while Zhang et al. (2021) applied it to buried pipelines, showing its ability to detect subsurface leaks [22].

Building upon this foundation, this research investigates the application of CW radar for leak detection and localization, focusing on copper water pipes. The study aims to validate its effectiveness in controlled environments and explore scalability for broader pipeline monitoring systems.

This review highlights the strengths and limitations of traditional leak detection methods. While techniques such as acoustic emission and fiber optic sensing offer high sensitivity, they are often expensive and complex. GPR and NPW methods provide non-invasive monitoring but require skilled interpretation and calibration. Infrared thermography is useful for aboveground monitoring but struggles in dynamic outdoor environments.

Emerging radar-based techniques, particularly Continuous Wave (CW) radar, offer significant potential due to their non-invasive nature, adaptability, and real-time monitoring capabilities. The following chapters build on this foundation, focusing on CW radar as a scalable and cost-effective solution for pipeline leak detection.

2 Radar Technology and Vibration Monitoring

Radar technology has evolved significantly, finding applications across diverse industries due to its versatility and effectiveness in remote sensing. This chapter establishes the theoretical framework underpinning the proposed research by beginning with an overview of radar technology, focusing on the CW radar used in this study. It then discusses vibration monitoring technologies and their industrial applications, and finally explores maintenance management strategies employed in modern industries.

2.1 Radar Principles and Background

Radar, an acronym for Radio Detection and Ranging, is a system that transmits electromagnetic waves and analyzes their reflections to determine an object's properties, such as range, velocity, and size. Its fundamental principle is based on the interaction between transmitted signals and targets in the environment.

2.2 Radar Fundamentals

The fundamental principle of radar operation lies in the transmission and reception of electromagnetic waves. These waves, transmitted at a specific frequency, travel through space until they encounter an object. Upon interaction with the object, a portion of the energy is scattered in all directions. The radar system captures the portion of this energy that is reflected back toward it, and by analyzing the received signal, key parameters about the object—such as range and velocity—can be determined.

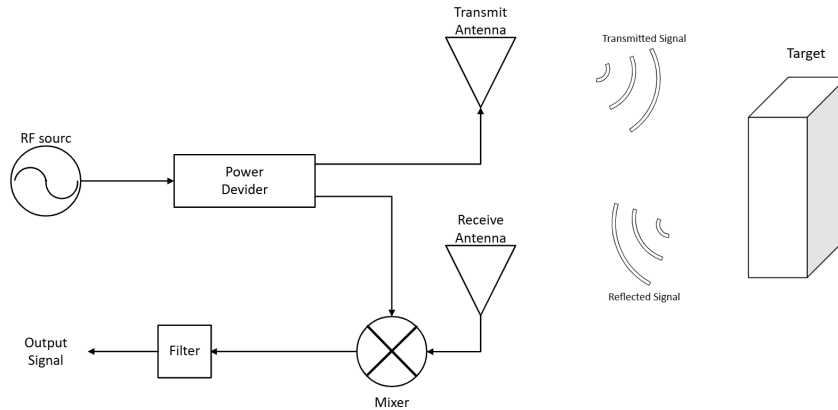


FIGURE 2.1 : Radar working Concept

The range of the object is determined by the time delay T between the transmission of the wave and the reception of its echo. This delay is used to calculate the distance. Meanwhile, the relative velocity of the object is determined by analyzing the Doppler shift, which is the change in frequency of the reflected wave caused by the object's motion. This frequency shift f_d is related to the object's velocity v by the Doppler equation.

2.2.1 Radar Main Components

A simple radar system comprises essential components that work together to achieve this functionality. These components include a signal source, power amplifier, antennas, and processing elements. Each part plays a critical role in the radar's operation, from signal generation to target detection and analysis.

1. Signal Generator (Signal Source)

This component determines the operating frequency and waveform characteristics, which can be a continuous wave (CW), frequency modulated continuous wave (FMCW), or a pulsed waveform, making it a crucial starting point for radar operation.

2. Power Divider

The power divider splits the signal from the generator into two paths :

- One path directs the signal toward the transmitting antenna.
- The other path provides a reference signal to the mixer.

This ensures the radar can compare the transmitted signal with the received signal for processing.

3. Power Amplifier

Before the signal is transmitted, it is boosted by the power amplifier to ensure it has sufficient strength to travel long distances and reflect off targets. The power amplifier plays a vital role in determining the radar's effective range.

4. **Antenna(s)**

The antenna radiates the amplified signal into space and collects the reflected signals from the target.

- **Single Antenna** : Can be used for both transmission and reception, requiring a duplexer or circulator to separate these functions.
- **Separate Antennas** : One dedicated to transmission and another for reception, simplifying signal flow but requiring additional hardware.

5. **Low Noise Amplifier (LNA)**

The weak signal reflected from the target is often buried in noise. The LNA amplifies this signal without significantly increasing noise, ensuring that the received signal is strong enough for further processing.

6. **Mixer**

The mixer combines the received signal with the reference signal from the power divider. This produces an intermediate frequency (IF) signal, which contains the key information about the target, such as the Doppler shift (velocity) or range.

7. **Filter**

Once the IF signal is generated, the filter removes unwanted noise and interference, leaving only the useful signal for analysis. This step is essential for ensuring accurate target detection and measurement.

2.2.2 **Types of Radar**

Radar systems can be broadly classified into two primary types based on their operational principles : Pulsed Radar and Continuous Wave (CW) Radar. Each type has unique characteristics and is suited for specific applications.

- **Pulsed Radar** : Pulsed radar operates by transmitting short bursts of high-frequency electromagnetic signals at regular intervals. After transmission, the system switches to a listening mode, receiving echoes reflected from targets. The time delay between the transmission of a pulse and the reception of its echo is measured to calculate the range of the target. This type of radar is highly effective for detecting objects over long distances and is capable of providing accurate range and position information, making it ideal for military and aviation [23].
- **Continuous Wave (CW) Radar** : CW radar transmits a continuous electromagnetic signal rather than pulses. It does not switch between transmission and reception, as it continuously measures the Doppler shift caused by a target's motion. While CW radar cannot measure range in its simplest form, it excels at determining the relative velocity of targets [23, 24].

Its applications are diverse, including traffic monitoring for speed detection and enforcement, vibration analysis for structural health monitoring and pipeline leak detection, industrial sen-

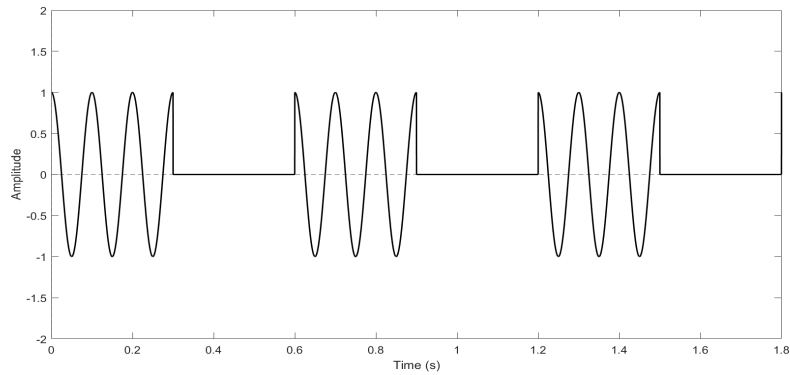


FIGURE 2.2 : Puls Radar Transmitted Signal

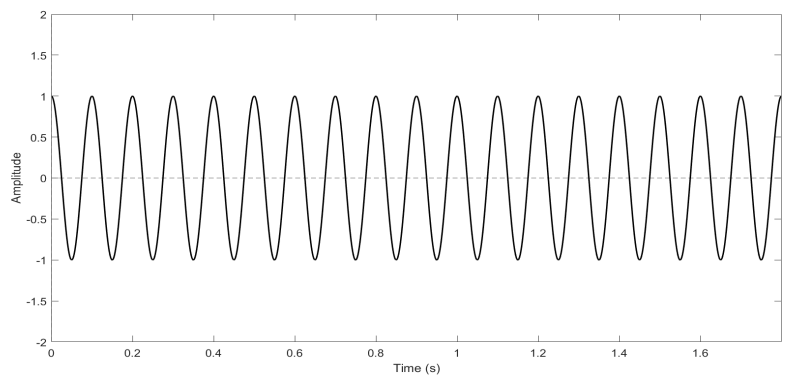


FIGURE 2.3 : CW Radar Transmitted Signal

sors for proximity detection and conveyor belt monitoring, and medical uses such as heart rate and respiratory monitoring.

2.3 Continuous Wave (CW) Radar

Continuous Wave (CW) radar operates by transmitting a continuous radio frequency signal and detecting the Doppler shift in the reflected signal caused by a moving object. This Doppler shift, a change in frequency due to the relative motion between the radar and the target, provides information about the target's velocity. CW radar systems can be classified based on their functionality—Simple CW Radar and Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Radar—and their operational characteristics, as Non-Directional or Directional CW Radar.

2.3.1 Functional Types of CW Radar

CW radar systems are first classified based on their primary functionality : whether they operate with or without frequency modulation.

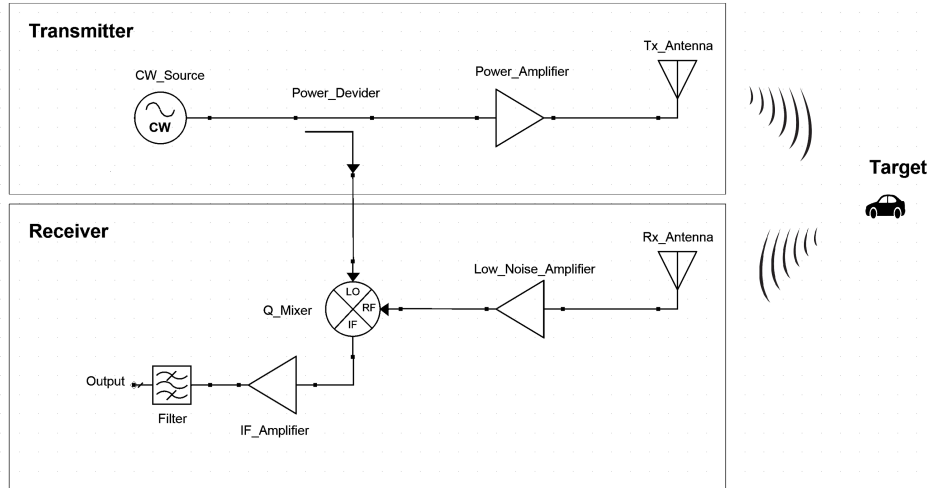


FIGURE 2.4 : Simple CW Radar diagram

- **CW Radar** : This type employs a single antenna for both transmission and reception or sometimes separate antennas. However, due to the simultaneous transmission and reception, it cannot directly measure the target's range. It primarily focuses on measuring the Doppler shift, making it suitable for applications such as speed detection in traffic monitoring or detecting moving targets in a cluttered environment [25].

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \quad (2.1)$$

Here, f_d is the Doppler frequency shift, v is the relative velocity of the object, f_0 is the transmitted frequency, and c is the speed of light [23, 24].

While a simple continuous wave (CW) radar does not inherently provide range measurements due to its lack of timing or modulation mechanisms, it excels in detecting motion and measuring the Doppler shift caused by target movement. This makes it ideal for applications where precise velocity or vibration analysis is required. With appropriate enhancements, such as frequency modulation or advanced signal processing, CW radar systems can also be adapted for range measurement, broadening their potential applications.

- **Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Radar** : To overcome the range limitation of simple CW radar, FMCW radar utilizes a continuously changing transmit frequency. By comparing the transmitted and received frequencies, the time delay, and consequently the target's range, can be determined. This technique enables simultaneous measurement of both range and velocity, making FMCW radar versatile for applications such as automotive radar, industrial process control, and radar altimeters [26]

$$R = \frac{cT}{2} \quad (2.2)$$

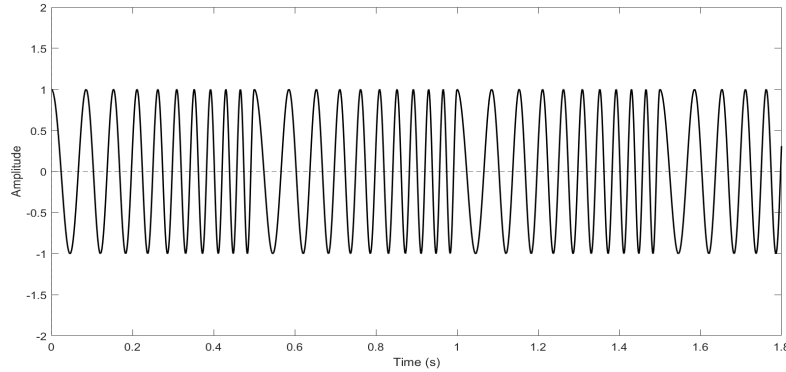


FIGURE 2.5 : FMCW Radar Transmitted Signal

where R is the range, and c is the speed of light. The factor of $1/2$ accounts for the round trip of the electromagnetic wave (to the object and back).

2.3.2 Operational Variants of CW Radar

CW radar systems can also be classified based on their ability to determine the direction of the detected target :

- **Simple CW Radar** : Simple CW radar uses simplified setups that detect motion or presence without identifying the direction of the target. This type is typically used in applications where the target's location is not critical, and only detection of motion or velocity is needed.

Simple CW radar measures velocity using the Doppler effect. The transmitted signal, $s(t)$, and the reflected signal, $s_r(t)$, are described as :

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \phi) \quad (2.3)$$

$$s_r(t) = \alpha A \cos[2\pi(f_0 + f_d)t + \phi] \quad (2.4)$$

where A is the amplitude, α is the attenuation factor, f_d is the Doppler shift, and ϕ is the phase.

By mixing the transmitted and received signals, a low-pass filter isolates the Doppler component :

$$s_{\text{mixed}}(t) = \cos(2\pi f_d t) \quad (2.5)$$

This output provides the magnitude of velocity but not the direction. The lack of directional information is a significant limitation of simple CW radar [23, 24].

- **CW Radar with I/Q (In-phase & Quadrature)** : CW radar with I/Q employs focused antennas or advanced signal processing techniques to determine the direction of a moving target.

By using directional antennas or phased array systems, the radar can localize a target and provide more detailed spatial information.

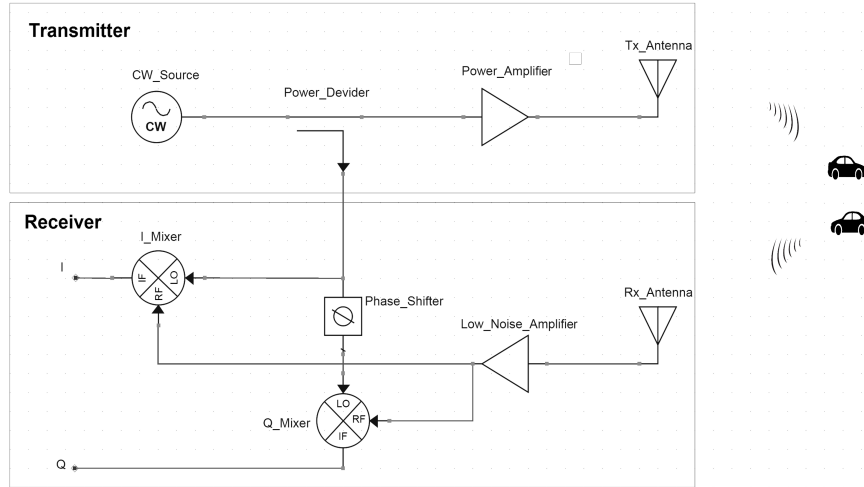


FIGURE 2.6 : CW Radar with I/Q Channels

CW radar with I/Q resolves the directionality issue by employing two receiver channels :

- **In-Phase (I) Channel :**

$$s_I(t) = A \cos(2\pi f_d t) \quad (2.6)$$

- **Quadrature (Q) Channel :**

$$s_Q(t) = A \sin(2\pi f_d t) \quad (2.7)$$

The phase angle ϕ is calculated as :

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{s_Q}{s_I} \right) \quad (2.8)$$

This phase information allows the radar to determine whether the object is moving toward or away from the radar. CW radar with I/Q is widely used in traffic monitoring and other applications requiring directional velocity measurements [23].

CW radar systems are versatile and adaptable, offering unique advantages for motion detection, velocity measurement, and range determination. Simple CW radar is ideal for applications requiring straightforward motion detection, while FMCW radar provides enhanced functionality with range measurement capabilities. Simple and I/Q-based variants further refine the system's applicability, depending on the need for spatial resolution. Together, these classifications form the foundation for advanced applications such as pipeline leak detection and vibration monitoring, as demonstrated in this study.

2.4 Signal Processing

Signal processing is an essential component of radar systems, enabling the transformation of raw signals into meaningful data for target detection and analysis. The process encompasses several stages, including noise reduction, frequency analysis, and advanced computational methods. This section focuses on the fundamental techniques of filtering and Fast Fourier Transform (FFT), which form the basis of radar signal processing, followed by a discussion of advanced methodologies.

Signal processing is critical for extracting meaningful information from CW radar signals, particularly in noisy environments or for detecting subtle motion patterns.

2.4.1 Filtering

Filtering is the foundational step in radar signal processing, aimed at improving the signal-to-noise ratio (SNR) by eliminating unwanted components from the received signal. Various types of filters are employed depending on the requirements of the radar system :

- **Low-Pass Filters** : These filters allow the passage of low-frequency components while attenuating higher frequencies, effectively suppressing high-frequency noise.
- **High-Pass Filters** : High-pass filters perform the opposite function by allowing high-frequency components to pass while attenuating lower frequencies. These filters are useful in applications where low-frequency noise or interference needs to be removed, such as ground clutter in radar systems.
- **Band-Pass Filters** : These filters isolate a specific range of frequencies around the radar's operating frequency, rejecting unwanted frequencies outside this range.

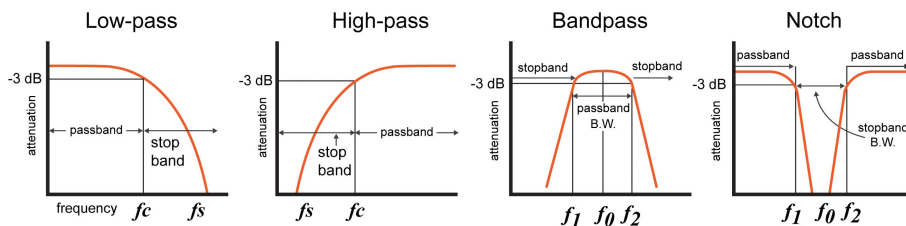


FIGURE 2.7 : Basic Types of Filters [27]

Filtering plays a crucial role in radar systems by ensuring that only the relevant components of the signal are retained for further analysis. For instance, in continuous wave (CW) radar, a band-pass filter can focus on detecting frequency shifts caused by target motion while suppressing noise

and interference from the environment. This step is critical to enhancing the clarity and reliability of the radar signal.

The raw radar signal often contains noise from environmental factors. A band-pass filter isolates the frequency range corresponding to expected Doppler shifts. For instance :

$$H(f) = \begin{cases} 1, & f_{low} \leq f \leq f_{high} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.9)$$

This ensures the radar system focuses on relevant frequencies, improving the signal-to-noise ratio (SNR) [28].

2.4.2 Fast Fourier Transform (FFT)

FFT is a cornerstone of radar signal processing, facilitating the analysis of the frequency content of the received signal. It is particularly significant in determining the Doppler shift, which is directly related to the velocity of a moving target. The FFT converts the radar signal from the time domain to the frequency domain, enabling precise measurement of frequency changes

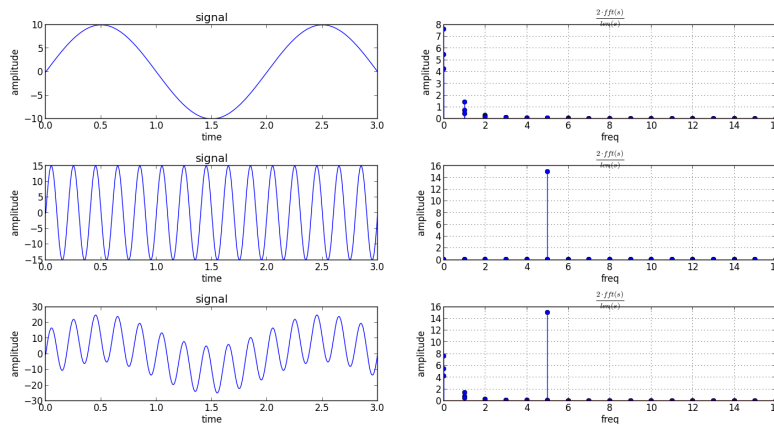


FIGURE 2.8 : Transforming Signal from Time domain to Frequency domain using FFT [29]

In radar systems, FFT serves multiple purposes :

- **Velocity Measurement** : The Doppler shift, caused by the relative motion of the target, is detected and analyzed to calculate its velocity. For example, FFT can identify the frequency shift of a car moving at a specific speed,
- **Target Differentiation** : FFT separates frequency components corresponding to multiple targets, allowing the radar system to detect and classify multiple objects simultaneously.

The ability of FFT to perform real-time frequency analysis makes it indispensable in modern radar systems, especially for applications involving high-speed objects or multiple target environments.

FFT is used to convert the time-domain signal into the frequency domain, revealing the spectral components corresponding to object motion. The FFT is computed as :

$$\text{FFT}(x[n]) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.10)$$

where N is the number of samples, and $x[n]$ is the radar signal. Peaks in the frequency spectrum correspond to velocities, providing a clear representation of motion [23, 28].

2.5 Radar Principles for Vibration Detection

Radar-based vibration detection relies on the ability of **Continuous Wave (CW) radar** to sense minute displacements caused by structural vibrations. CW radar operates by continuously transmitting electromagnetic waves and analyzing their reflections to detect frequency shifts induced by vibrating surfaces. This capability makes it a powerful tool for remote, non-contact vibration monitoring, particularly in applications involving pipeline integrity assessment.

Among non-contact sensing technologies, Continuous-Wave (CW) Doppler radar and Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) radar have demonstrated high precision in detecting and analyzing vibrations [30]. In particular, CW Doppler radar offers several advantages, including high sensitivity, as it can detect micrometer-scale vibrations, enabling precise analysis of subtle structural movements. Additionally, its remote and non-invasive operation eliminates the need for direct sensor attachment, making it ideal for monitoring inaccessible or delicate structures. Moreover, its versatility allows for widespread application in industrial monitoring, structural diagnostics, and biomedical sensing, especially in scenarios where contact-based methods are impractical [31, 32].

The effectiveness of CW radar in vibration detection is governed by two key principles :

- **Electromagnetic Wave Interaction with Vibrating Surfaces** : CW radar emits radio frequency (RF) signals toward a vibrating structure. As the surface oscillates, the reflected wave undergoes phase modulation, creating a frequency shift proportional to the vibration amplitude and frequency. By analyzing these shifts, radar can extract precise vibration characteristics without requiring physical contact with the structure [33].
- **Signal Processing for Vibration Analysis** : Extracting vibration information from radar signals requires advanced signal processing techniques. Fast Fourier Transform (FFT) is commonly used to convert time-domain radar signals into the frequency domain, allowing the identification of dominant vibration frequencies. Additionally, **Cumulative Amplitude Spec-**

trum (CAS) or Power Spectral Density (PSD) enhances the visibility of vibration-induced anomalies, improving the detection of subtle oscillations [17].

Despite these advantages, CW radar-based vibration monitoring faces certain challenges. Issues such as DC offset and null detection require precise calibration, while environmental factors like noise and interference necessitate robust signal processing techniques to maintain accuracy [31, 32]. Addressing these challenges through system optimization is crucial for ensuring reliable and high-resolution vibration detection across various applications.

By leveraging these principles, CW radar provides a **scalable, non-invasive, and high-resolution method** for vibration detection. The following chapters expand on these concepts by detailing the **experimental validation, implementation strategies, and performance evaluation** of CW radar in detecting vibrations caused by pipeline leaks.

2.5.1 Non-Contact-Based vibration Monitoring

Non-contact vibration monitoring methods have gained popularity for their flexibility and ability to measure vibrations from a distance. Technologies such as laser Doppler vibrometry and radar-based sensing eliminate the need for direct physical contact, making them ideal for sensitive or inaccessible systems. Among these, radar systems, particularly *continuous-wave (CW) Doppler radar* and *frequency-modulated continuous-wave (FMCW) radar*, have shown exceptional promise in high-precision, remote vibration detection [30].

Continuous Wave (CW) Doppler radar offers several advantages that make it particularly suited for vibration monitoring. Its high sensitivity allows the detection of micrometer-scale vibrations, enabling precise analysis of minute movements. Additionally, its non-contact operation is ideal for monitoring inaccessible or sensitive targets, reducing the need for physical interaction. This versatility makes CW Doppler radar a valuable tool in applications such as structural health monitoring and biomedical sensing [32].

Despite these benefits, CW radar systems have certain limitations. Challenges such as DC offset and null detection require careful calibration and compensation to maintain accuracy. Furthermore, environmental factors, such as noise and interference, can affect the system's performance and reliability, necessitating robust signal processing techniques [31]. These strengths and limitations highlight the importance of proper implementation and optimization in CW radar-based vibration monitoring.

3 EXPERIMENTAL SETUP, CHALLENGES AND LIMITATIONS

This chapter outlines the experimental setup, as shown in figure 3.1, designed to investigate the feasibility of using continuous-wave radar (CW) for detecting and localizing leaks in water pipes. The primary objective is to analyze the variations of the radar signal in different operational scenarios and to detect changes associated with the presence of leaks.

The experiment simulates leaks by introducing small and large holes in a copper water pipe and evaluates the radar signals collected at various points and distances. The testing methodology involves processing the acquired data to extract frequency-domain features that can effectively distinguish between leak and non-leak conditions.

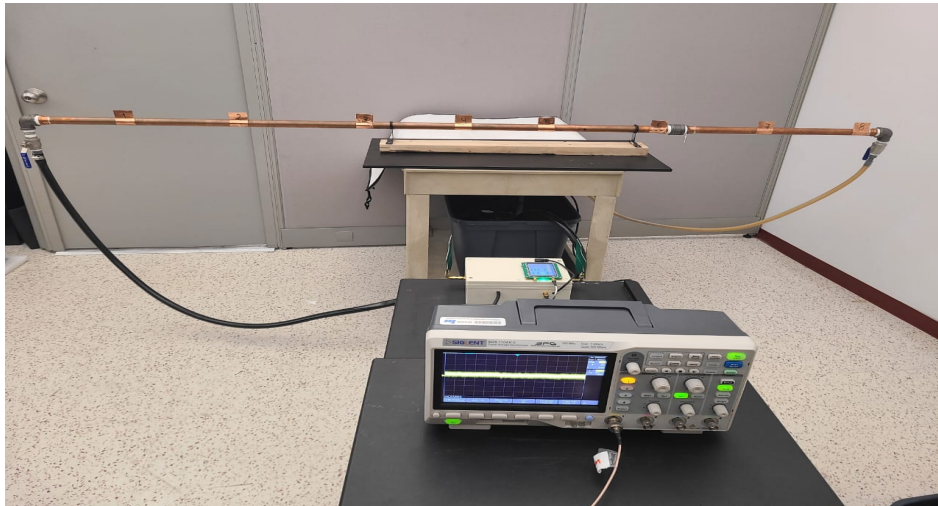


FIGURE 3.1 : Experiment Lab Setup

1 Radar System

The radar system utilized in this study, as shown in figure 3.2, is a continuous wave radar (CW) operating at a frequency of 3.5 GHz. This frequency was selected due to its balance between penetration depth and resolution. At 3.5 GHz, the radar offers sufficient sensitivity to detect subtle structural and vibrational anomalies caused by leaks in the pipeline while maintaining a manageable system size and component availability. Higher frequencies would result in increased attenuation, while lower frequencies would reduce spatial resolution making 3.5 GHz an optimal choice for this application.

This type of radar continuously transmits a stable frequency signal, allowing it to detect and analyze reflected signals from targets with high precision. The transmitted signal interacts with objects, such as the surface of a pipe or fluid disturbances caused by leaks, and the reflected

signals are collected for further processing. By analyzing variations in amplitude, phase, and frequency shifts in the reflected signals, the system can detect anomalies, including vibrations or structural changes, that may indicate the presence of a leak. The high operating frequency of 3.5 GHz ensures enhanced sensitivity and resolution, making it particularly effective for capturing fine details and subtle changes associated with fluid flow disturbances and structural deformations in pipelines.

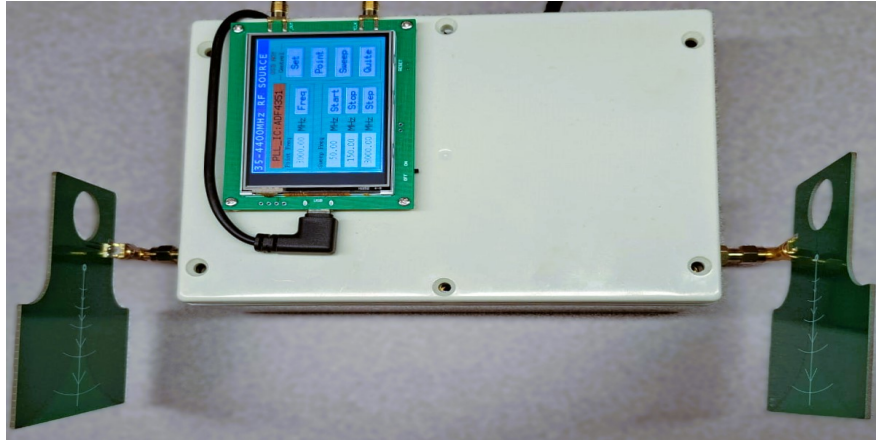


FIGURE 3.2 : CW Radar Used in Measurements

1.1 Radar Components

1. **Phase-Locked Loop (PLL)** : Figure 3.3 shows the PLL is a signal generator used in the CW radar system to provide a stable and precise frequency signal for operation. The ADF4351 RF signal generator operates at 3.5 GHz with a frequency range of 35 MHz to 4.4 GHz. It features a touch-screen interface, and supports frequency sweep and hopping. The output is delivered via an SMA female connector, generating a sine wave (2.2–4.4 GHz) and a square wave (35 MHz–2.2 GHz). A ± 50 ppm 25M active crystal oscillator ensures precision, while the DC 4–9V (typical 5V) power supply provides reliable performance.

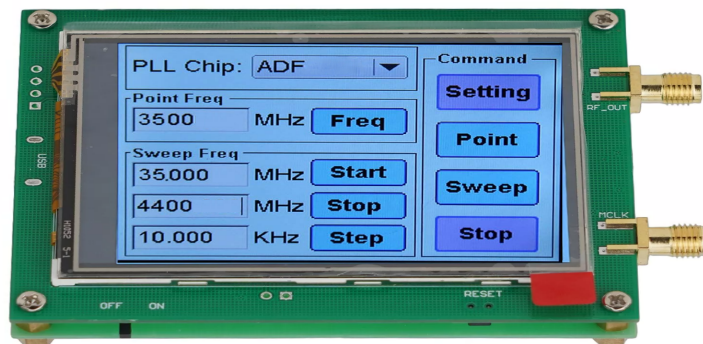


FIGURE 3.3 : Phase-Locked Loop (PLL)

-
2. **Power Divider** : The power divider, as shown in figure 3.4, splits the generated signal into two separate paths. One path is directed to the transmitting antenna, while the other serves as a reference signal for the mixer. This ensures proper signal comparison during processing. The power divider used in this system features low insertion loss, broadband operation, and an equal power split, optimizing efficiency and maintaining signal integrity.

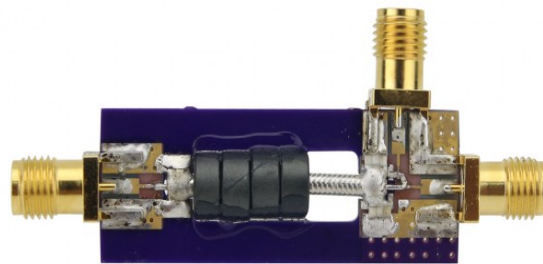


FIGURE 3.4 : Coupler (Power Divider)

3. **Power Amplifier (PA)** : The power amplifier boosts the strength of the radar signal before transmission. This amplification is necessary to ensure the signal can travel longer distances and return with sufficient strength after reflection from a target. The PA in this setup is designed for high gain and high efficiency, operating at 3.5 GHz to match the radar's frequency requirements. It enhances the system's range and detection capability.
4. **Antennas (Transmit and Receive)** : The radar system utilizes directional antennas for both transmitting and receiving signals, specifically designed to operate efficiently at a frequency of 3.5 GHz. These antennas ensure focused signal transmission and reception, enhancing the system's ability to detect and analyze reflections with high accuracy and reliability.

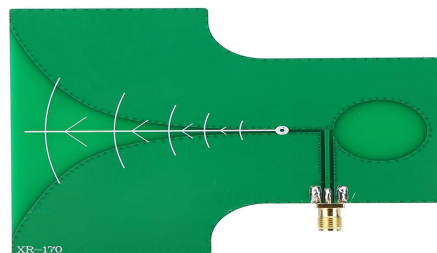


FIGURE 3.5 : Antenna

5. **Low Noise Amplifier (LNA)** : The received radar signal is often weak and must be amplified before further processing. The low noise amplifier (LNA) boosts the received signal while minimizing additional noise that could interfere with accurate detection. This LNA, as shown in figure 3.6, has a low noise figure and high gain, ensuring a clean and strong signal for subsequent processing at 3.5 GHz.

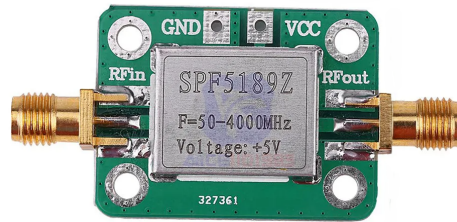


FIGURE 3.6 : Low Noise Amplifier (LNA)

6. **Mixer** : The mixer is a critical component that combines the received signal with the reference signal from the power divider. This process allows for the extraction of valuable information, such as Doppler shift, which is essential for velocity and movement analysis. Figure 3.7 shows the the mixer used in this setup. It is characterized by high linearity and low conversion loss, ensuring minimal signal distortion and reliable operation at 3.5 GHz.

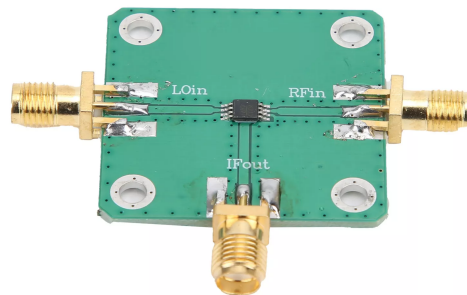


FIGURE 3.7 : Mixer

7. **Power Supply** : The radar system is powered by a 5V DC source, which supplies the necessary energy to operate the active components, ensuring stable and reliable performance throughout the experiments. Figure 3.8.



FIGURE 3.8 : 5V DC Power Supply

2 Pipe and Pump Setup

The experimental setup utilizes a copper pipe as the primary test material due to its widespread use in plumbing and industrial applications. Copper was chosen as the material for the pipeline due to its availability and ease of cutting and welding, making it convenient for modifications and adjustments during experiments. Its lightweight properties further contributed to its suitability for laboratory use, allowing for easier handling and setup. The 1-inch diameter was selected because it was the largest copper pipe readily available in local hardware stores, ensuring compatibility with standard fittings and components while providing sufficient flow capacity for the experimental setup. This configuration, figure 3.9, allows for controlled testing conditions while maintaining practical relevance to real-life scenarios.

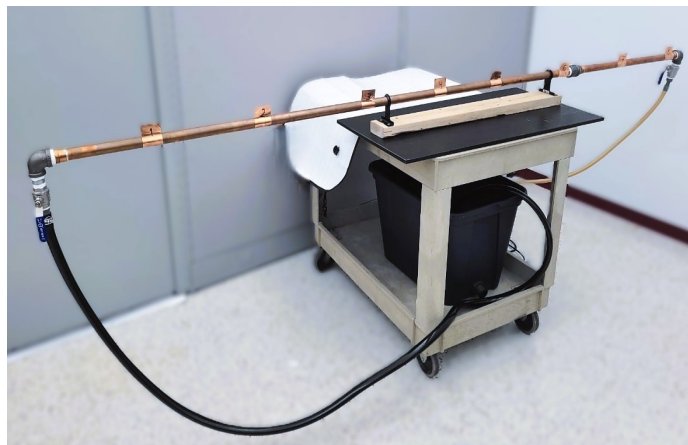


FIGURE 3.9 : Pipe and Pump Setup Used in the Experiment

The pipeline primarily consists of a straight copper section but includes 90-degree elbow fittings at both ends. These fittings are connected to rubber hoses that link the copper pipe to the water pump and water tank, forming a closed-loop water flow system. This configuration is designed to replicate typical fluid flow conditions while accommodating flexible connections for ease of assembly and operation. The closed-loop setup ensures a continuous and consistent flow of water through the pipe, enabling repeated measurements without interruptions caused by water depletion or pressure fluctuations. Additionally, the design allows for easy adjustments to flow rates and pressure levels, supporting comprehensive testing under varying operating conditions.

At the core of the system is a water pump installed inside a water tank, which functions solely as a reservoir for the circulating water. The pump is responsible for drawing water from the tank and maintaining a steady and consistent flow rate through the copper pipe, ensuring stable and repeatable testing conditions. Its ability to sustain continuous circulation is critical for simulating normal flow dynamics, providing a controlled environment for evaluating the effects of leaks and vibrations under realistic operating scenarios.

The water tank, serving as a storage reservoir, ensures a constant supply of water to the pump, preventing interruptions during experiments and eliminating fluctuations in water availability. This closed-loop design minimizes water loss and allows for extended testing periods without the need for frequent refilling. The simple configuration focuses on maintaining steady flow conditions, making it ideal for studying the propagation of vibrations and the effects of leaks in the pipeline without requiring adjustments to flow rate or pressure levels.

Together, these components form a well-integrated and versatile test platform for studying leak detection and vibration monitoring in pipeline systems.

3 Leak Simulation

To simulate leak scenarios and evaluate the radar system's ability to detect and differentiate leaks, two different hole sizes were introduced at point 7 along the copper pipe. This point was not strategically selected but was simply marked for reference purposes to assist with data analysis and leak localization during testing. Multiple points along the pipe were marked to provide a consistent framework for recording measurements relative to the leak location.



FIGURE 3.10 : Simulated Leak

As shown in figure 3.10 a small leak was simulated by drilling a 1.5 mm hole, which was the smallest drill bit available for the experiment. While not necessarily representative of micro-leaks in real-world applications, this size allowed for testing the system's ability to detect smaller disturbances in the flow and corresponding vibrations.

To create a larger leak, a 2 mm hole was drilled, providing a scenario with greater water flow and stronger vibrations. This setup enabled comparisons between minor and more severe leaks, focusing on how the radar signals responded to differences in leak size.

Both leak sizes were tested under consistent conditions to evaluate their effects on the vibration patterns and radar signal reflections. Data collected from measurements taken before, at, and after the leak was analyzed to assess the system's sensitivity and localization capability. This approach ensured a practical evaluation of the radar system's performance in detecting and distinguishing leaks based on size.

4 Reference Points and Measurement Setup

The experimental setup included eight reference points marked along the length of the copper pipe to facilitate systematic data collection and enable comparisons across different measurement locations. These reference points were spaced evenly and served as fixed positions for recording radar signals, ensuring consistency and repeatability in the measurements. The markings also provided a structured framework for analyzing signal variations relative to the leak location, supporting efforts to evaluate detection sensitivity and localization accuracy. Figure 3.11.

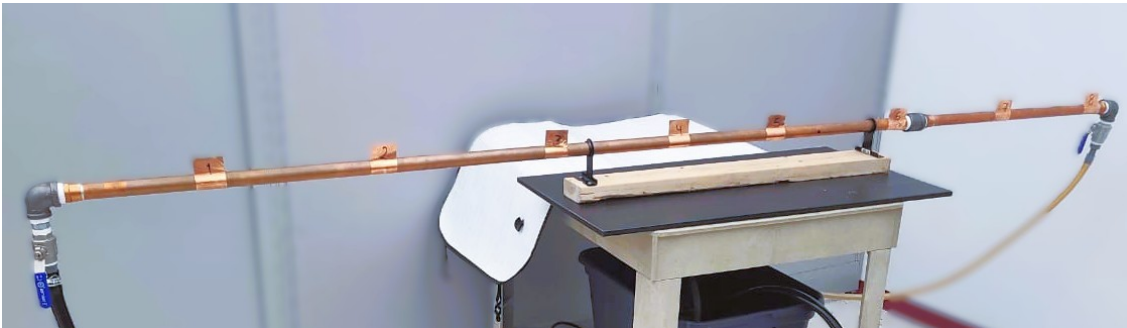


FIGURE 3.11 : Eight Reference Points marked along the Pipe

Radar signals were recorded at each reference point under a range of testing scenarios designed to simulate different operating conditions :

- **Case 1 : Pump OFF**, No water flow through the pipe, serving as a baseline for identifying background noise and system behavior in the absence of flow.
- **Case 2 : Pump ON**, Water flowing through the pipe without any leaks, simulating normal operating conditions and establishing a reference for comparison.
- **Case 3 : Pump ON with Leak**, Water flowing through the pipe with a leak introduced at point 7, allowing the assessment of radar signal variations caused by the presence of a leak.

Measurements were taken at distances of 0.5m, 1 m, 1.5 m, and 2 m from the radar unit to evaluate signal behavior at varying proximities to the leak. These distances were chosen to study

how the radar's detection capability changes with range and to determine the influence of signal attenuation and dispersion over distance.

The structured approach, combining multiple reference points, scenarios, and measurement distances, ensured a comprehensive evaluation of the radar system's performance. It provided a consistent methodology for analyzing differences in signal patterns, enabling a thorough investigation into the system's sensitivity to leaks of different sizes and its potential for localizing leak positions within the pipeline.

5 Challenges and Limitations

The cylindrical geometry of copper pipes creates significant obstacles for radar-based leak detection. Due to the curved cross-sectional surface area, electromagnetic waves are scattered in multiple directions rather than reflecting back to the radar receiver. This scattering weakens the reflected signal and reduces its coherence, making it difficult to detect subtle disturbances, such as vibrations caused by leaks. Figure 3.12

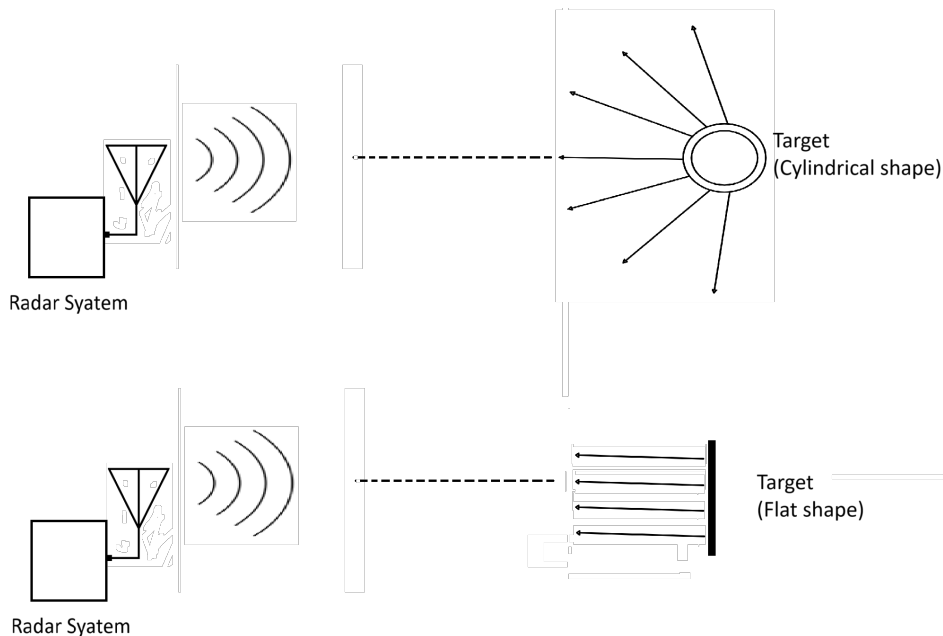


FIGURE 3.12 : Target Cross sectional Area effect on Signal Reflection

5.1 Enhancing Signal Detection with Flat Copper Reflective Surfaces

To counteract the limitations posed by the pipe's geometry, flat copper sheets were affixed to the pipe at each of the 8 reference points, Figure 3.13. These flat surfaces improved the interaction between the radar waves and the pipe, ensuring more effective reflection back toward the radar

receiver. By mitigating the scattering effect, this adjustment enhanced the radar's performance. The approach offered several key benefits :

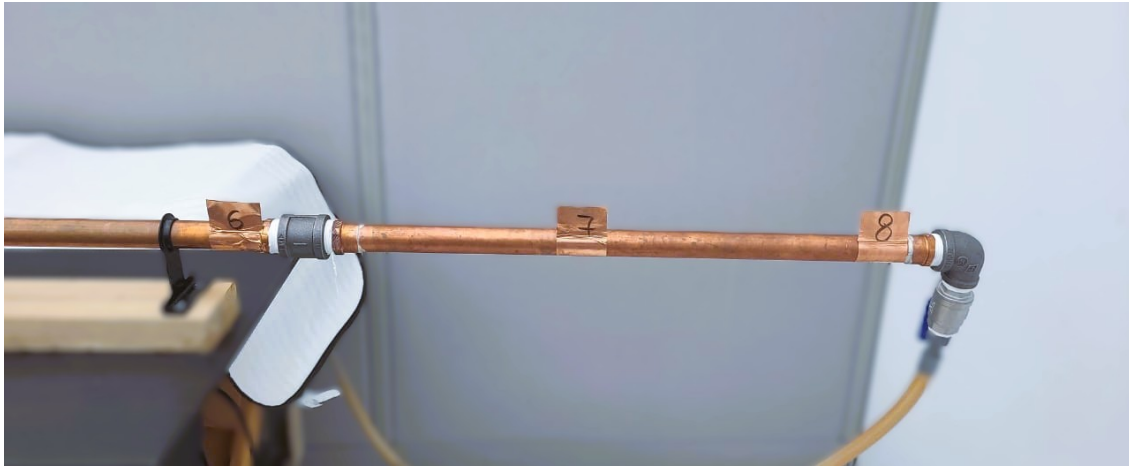


FIGURE 3.13 : Copper Flat Sheets used to enhance CW Radar Reflected Signals

The pipe's natural curved or spherical surface caused radar signals to scatter in multiple directions, resulting in a significantly weakened return signal to the radar. By attaching flat copper plates facing the radar, the reflected signals were directed back more effectively, ensuring stronger and more consistent signal returns.

The size of these reflectors was chosen arbitrarily; however, all reflectors were made identical to ensure consistency and comparability of the data collected at different points. This approach ensured that the signal reflections across the 8 points could be accurately compared without introducing variability due to the reflector size.

6 Data Acquisition with Oscilloscope

The radar signals were collected using a digital oscilloscope to ensure high-resolution and accurate data acquisition. This instrument was configured with a sampling rate of 100 kSamples/sec, capturing the radar's output at eight reference points along the pipe under three experimental conditions : Pump OFF, Pump ON (no leak), and Pump ON with Leak. A single channel was used for recording, and trigger settings were optimized for stable and repeatable measurements. The collected data was saved in a digital format compatible with MATLAB for subsequent filtering, FFT computation, and integration analysis.

During data collection, the oscilloscope was connected directly to the radar system's output as shown in figure 3.14. Signals for all three experimental cases were sequentially recorded at each reference point and repeated at four different distances from the pipe—0.5 m, 1 m, 1.5 m, and 2 m. These varying distances allowed for studying how signal strength and leak detection sensitivity changed with range.

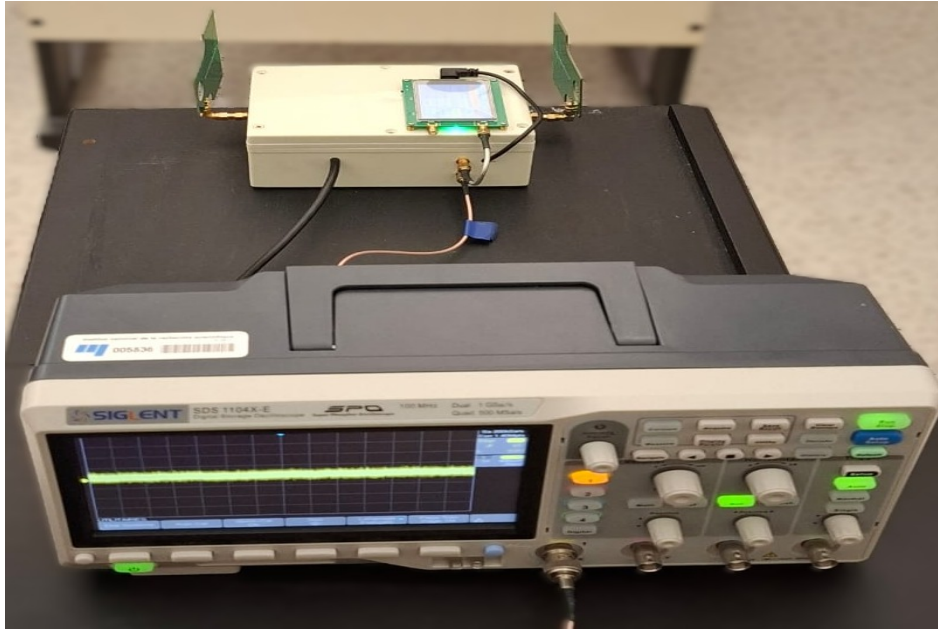


FIGURE 3.14 : Oscilloscope used for Data Acquisition

The oscilloscope's ability to handle high-frequency signals and output data in a format suitable for advanced analysis was critical for preserving the integrity of the radar data. This ensured that the collected signals could be reliably processed to evaluate variations and detect leaks, contributing significantly to the success and reliability of the experiment.

7 Signal Processing

Signal processing was performed using MATLAB to analyze the radar data and extract meaningful information related to leak detection. A series of processing steps were implemented to enhance data quality, reduce noise, and highlight features indicative of leaks.

The first step involved applying a band-pass filter to the raw signals. This filter was carefully designed to eliminate low-frequency noise and high-frequency interference, retaining only the frequency components relevant to the detection of vibrations and disturbances caused by leaks. The filtering process ensured that the analysis focused on signals most likely associated with fluid flow and structural vibrations within the pipeline.

Next, a Fast Fourier Transform (FFT) was computed for each signal to convert the time-domain data into the frequency domain. This transformation enabled the identification of frequency components and spectral features linked to leak-induced vibrations. Variations in frequency content were analyzed to distinguish patterns between different test conditions, including scenarios with and without leaks.

To facilitate quantitative comparisons, the total power from the Power Spectrum (PS) was calculated for each experimental case : Pump OFF, Pump ON, and Pump ON with Leak. This provi-

ded a single numerical measure representing the overall energy distribution within the frequency spectrum, simplifying the evaluation of differences between scenarios and effectively highlighting anomalies associated with leaks.

These signal processing techniques collectively allowed for the clear identification of patterns and anomalies in the radar data, enabling the detection of both minor and larger leaks based on changes in the signal characteristics. The approach ensured that results were consistent and repeatable, providing a reliable foundation for analyzing the radar system's performance in detecting and localizing pipeline leaks.

4 RESULTS AND DISCUSSION

This chapter presents the results obtained from the radar-based leak detection experiment and discusses the findings. The primary focus is to analyze variations in radar signals across different cases and measurement distances, providing insights into the system's ability to detect and localize leaks effectively. Results are visualized and interpreted based on FFT and integration values.

1 Data Analysis Approach

Given the extensive dataset comprising over 100 signals, our analysis was structured to ensure clarity and focus by emphasizing key comparisons and evaluations. The approach was designed to highlight variations across experimental conditions, enabling a detailed investigation of signal behavior and leak detection performance.

The first aspect of the analysis involved comparing the three cases—Pump OFF, Pump ON No Leak, and Pump ON with Leak—at each of the eight reference points. Data was collected at four distances : 0.5 m, 1 m, 1.5 m, and 2 m. However, for simplicity and brevity, the results presented focus on the 1-meter distance. For each case, filtered signals were plotted to observe direct variations and highlight key features. Frequency-domain characteristics were then examined using FFT plots, which enabled clearer comparisons across the cases.

The second aspect focused on integration analysis across distances. Integration values were calculated and plotted for all cases at 0.5 m, 1 m, 1.5 m, and 2 m. This systematic comparison provided insights into how signal strength and clarity changed with increasing distance. Observations were presented through tables and graphs, allowing for a quantitative assessment of distance effects. The results highlighted stronger integration values near leak points, emphasizing the radar's ability to capture variations associated with leaks despite attenuation over longer ranges.

Lastly, the analysis included a comparison of leak sizes to evaluate the radar system's sensitivity to different leak conditions. Integration results for a small leak (1.5 mm) and a larger leak (2 mm) were visualized and compared using tables and graphs. The findings demonstrated that larger leaks produced stronger and more distinguishable signal responses. This confirmed the radar's sensitivity to variations in leak size and its potential for identifying more severe leaks with higher accuracy.

2 Results and Discussion

This section presents the detailed results obtained from the radar signal analysis. It highlights the differences between cases and evaluates the effects of distance and leak size on signal variations. Visualizations, including **filtered signals, FFT plots, and integration (PS) graphs**, are used to support the findings and illustrate the radar’s performance in detecting and localizing leaks.

2.1 Signals Comparisons at 1 meter distance

In this subsection, we present the results obtained from analyzing the radar signals at each of the 8 points along the pipe. For each point, we compare the **three cases—Pump OFF, Pump ON, and Pump ON with Leak**—using visualizations of filtered signals, and FFT results. The results are organized point-wise as follows :

2.1.1 Point 1 :

At point 1, which is farthest from the leak, the signal in the Pump OFF case (a) is nearly flat with minimal noise, indicating no significant vibrations due to the absence of water flow. In the Pump ON No Leak case (b), oscillatory patterns appear, reflecting flow-induced vibrations caused by water entering the pipe. The amplitude is relatively high at this point due to turbulence near the inlet. In the Pump ON With Leak case (c), the oscillatory patterns remain but exhibit slight irregularities, suggesting minor pressure disturbances propagating upstream from the leak at Point 7. Figure 4.1.

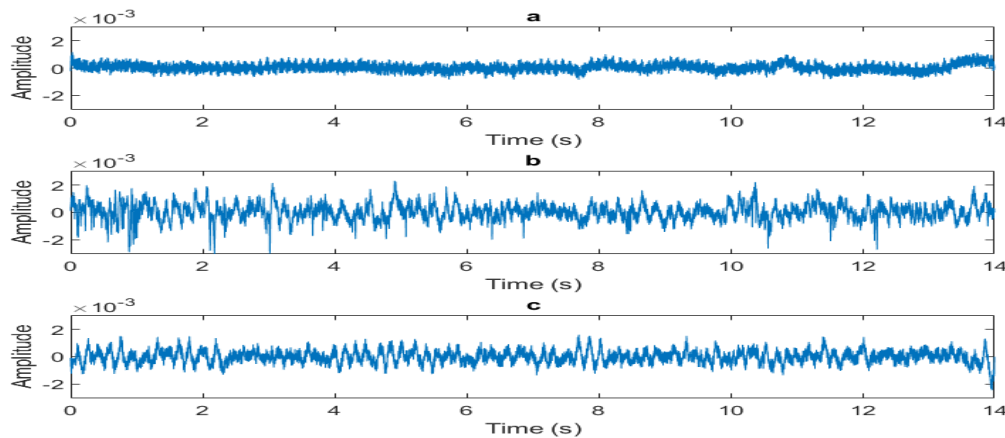


FIGURE 4.1 : Filtered radar Signals of Point 1 at 1 meter for the three case (a) Pump OFF, (b) Pump ON no Leak, (c) Pump On with Leak

Fig.4.2 The FFT for Point 1 in the Pump OFF case (a) shows very low energy across all frequencies, with no significant peaks. In the Pump ON No Leak case (b), clear frequency peaks

emerge, corresponding to the vibrations caused by water flow. The amplitude of these peaks is relatively high due to the turbulent nature of the flow near the inlet. For the Pump ON With Leak case (c), the FFT spectrum shows increased low-frequency energy and slightly broadened frequency components, indicating the influence of leak-induced pressure disturbances reaching this point.

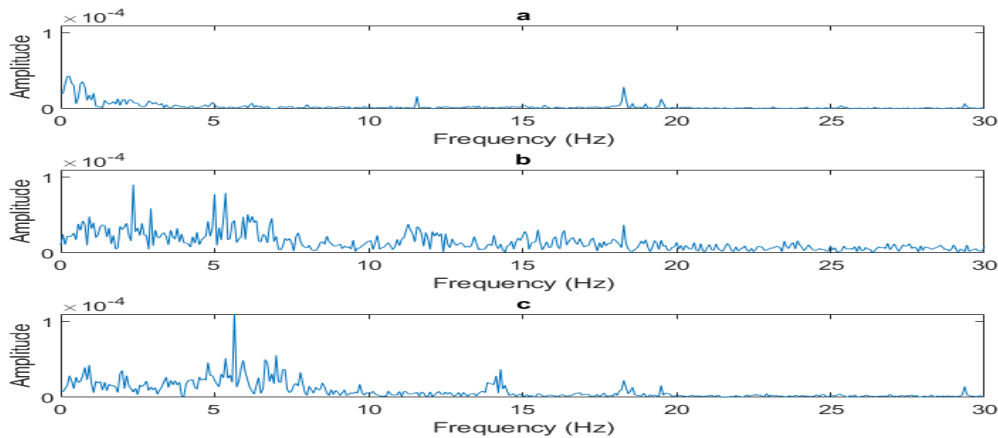


FIGURE 4.2 : FFTs of Signals in Fig.4.1

2.1.2 Point 2

At Point 2, the filtered signal for the Pump OFF case (a) remains flat with minimal noise. When the pump is ON with no leak (b), periodic oscillations are observed, but the amplitude is slightly lower compared to Point 1, as the turbulence reduces farther from the inlet. In the Pump ON With Leak case (c), the oscillatory patterns are less uniform, with small irregularities appearing due to the propagation of leak-induced pressure disturbances upstream. Figure 4.3.

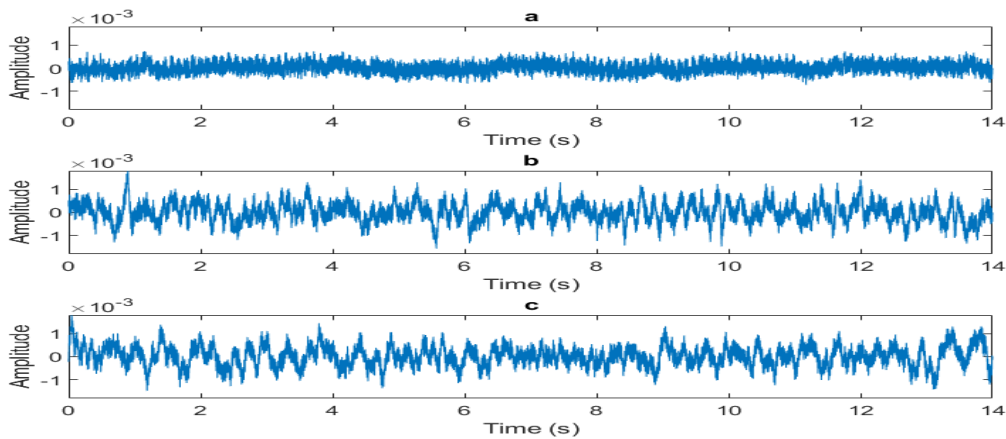


FIGURE 4.3 : Filtered radar Signals of Point 2 at 1 meter for the three case (a) Pump OFF, (b) Pump ON no Leak, (c) Pump On with Leak

Fig.4.4 The FFT for Point 2 in the Pump OFF case (a) shows minimal noise with no significant peaks. In the Pump ON No Leak case (b), frequency peaks are visible, representing flow-induced vibrations, but their amplitudes are slightly lower compared to Point 1. For the Pump ON With Leak case (c), the FFT spectrum shows broader frequency components and increased low-frequency energy, indicating the growing influence of leak-induced pressure waves propagating upstream.

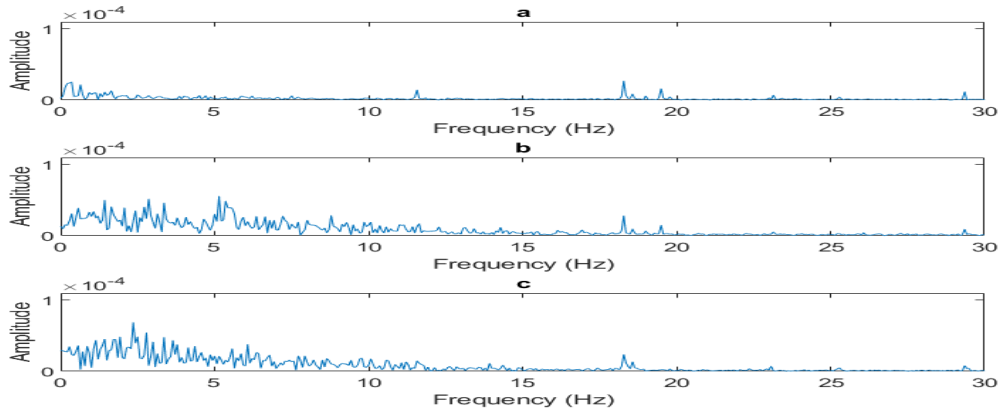


FIGURE 4.4 : FFTs of Signals in Fig.4.3

2.1.3 Point 3

For Point 3, the filtered signal in the Pump OFF case (a) is flat, indicating no significant activity. In the Pump ON No Leak case (b), oscillatory patterns are present, but the amplitude is further reduced compared to Points 1 and 2, consistent with reduced flow turbulence downstream. In the Pump ON With Leak case (c), the oscillations become less regular, with minor disruptions caused by leak-induced pressure disturbances. Figure 4.5.

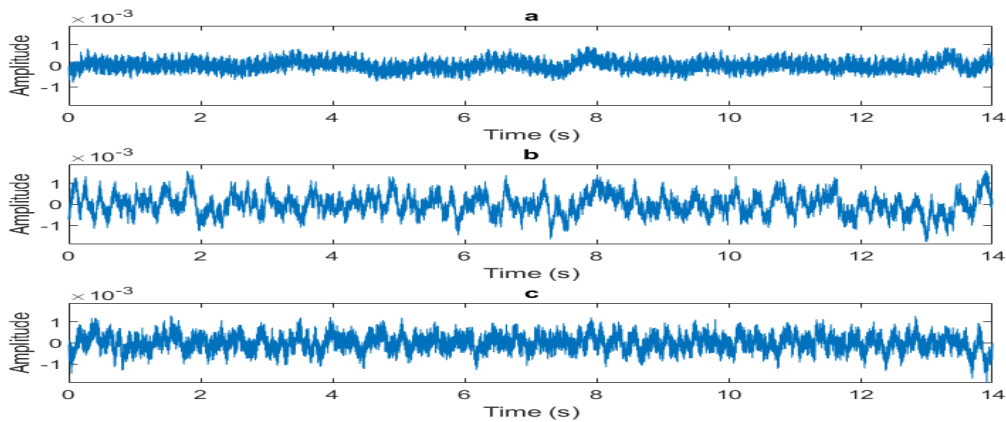


FIGURE 4.5 : Filtered radar Signals of Point 3 at 1 meter for the three case
(a) Pump OFF, (b) Pump ON no Leak, (c) Pump On with Leak

Fig.4.6 The FFT spectrum for Point 3 in the Pump OFF case (a) remains flat, with no dominant frequencies observed. In the Pump ON No Leak case (b), clear frequency peaks corresponding to flow vibrations are still visible but are lower in amplitude compared to upstream points. In the Pump ON With Leak case (c), broader frequency components and increased low-frequency energy appear, reflecting disturbances caused by the leak farther downstream.

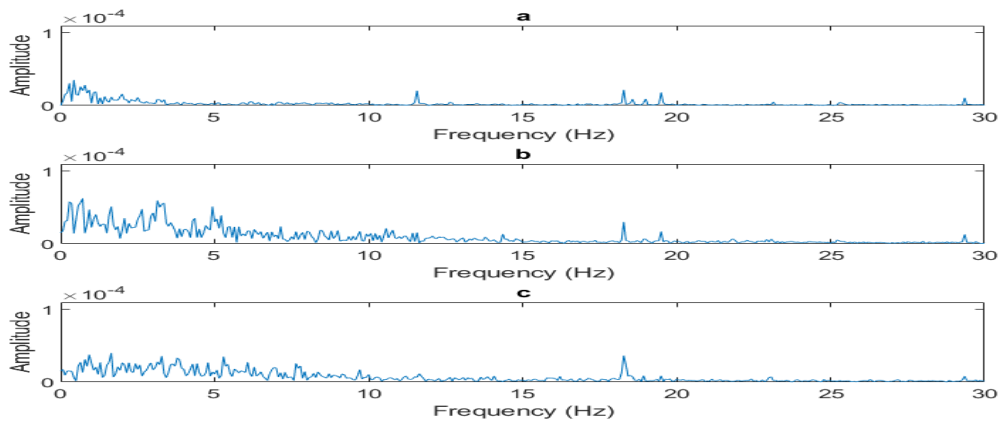


FIGURE 4.6 : FFTs of Signals in Fig.4.5

2.1.4 Point 4

At Point 4, the filtered signal in the Pump OFF case (a) is consistent with earlier points, showing minimal activity. When the pump is ON with no leak (b), oscillatory patterns are present, but the amplitude is further reduced compared to upstream points. In the Pump ON With Leak case (c), noticeable irregularities begin to emerge in the signal as leak-induced disturbances propagate closer to this point. Figure 4.7.

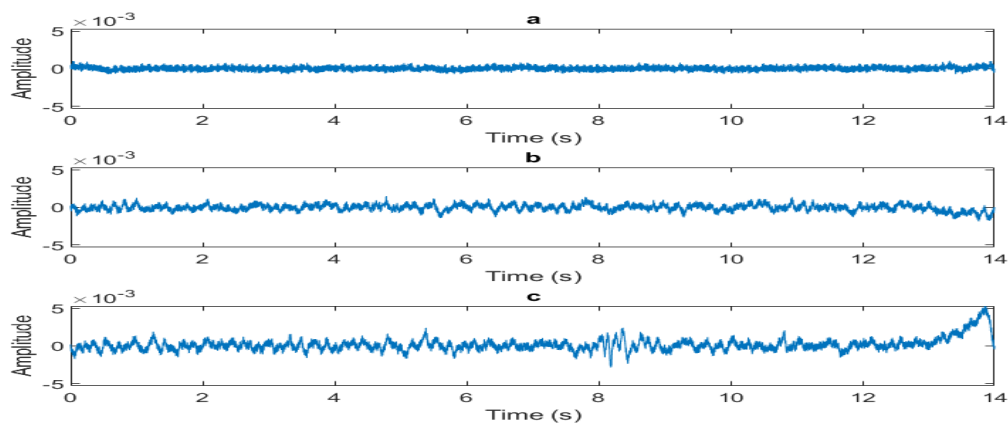


FIGURE 4.7 : Filtered radar Signals of Point 4 at 1 meter for the three case (a) Pump OFF, (b) Pump ON no Leak, (c) Pump On with Leak

Fig.4.8, the FFT spectrum for Point 4 in the Pump OFF case (a) shows minimal energy with no significant peaks. For the Pump ON No Leak case (b), flow-induced vibration frequencies remain visible but with lower amplitude compared to earlier points. In the Pump ON With Leak case (c), the spectrum shows increased low-frequency energy and broader frequency components as leak effects become more pronounced closer to this point.

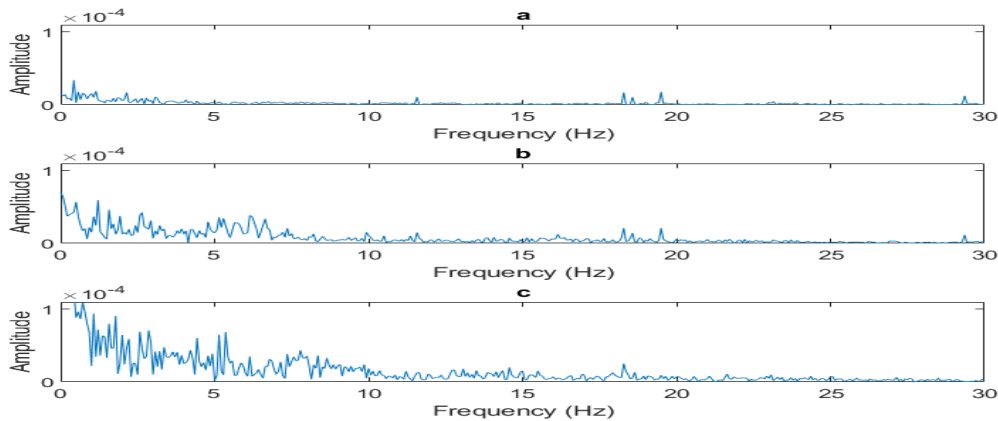


FIGURE 4.8 : FFTs of Signals in Fig.4.7

2.1.5 Point 5

For Point 5, the filtered signal in the Pump OFF case (a) is flat with minimal noise. In the Pump ON No Leak case (b), oscillatory patterns are still present but are small in amplitude, reflecting diminished turbulence farther downstream. In the Pump ON With Leak case (c), the signal begins to show significant irregularities, as this point is closer to the leak and affected by its disturbances. Figure 4.9.

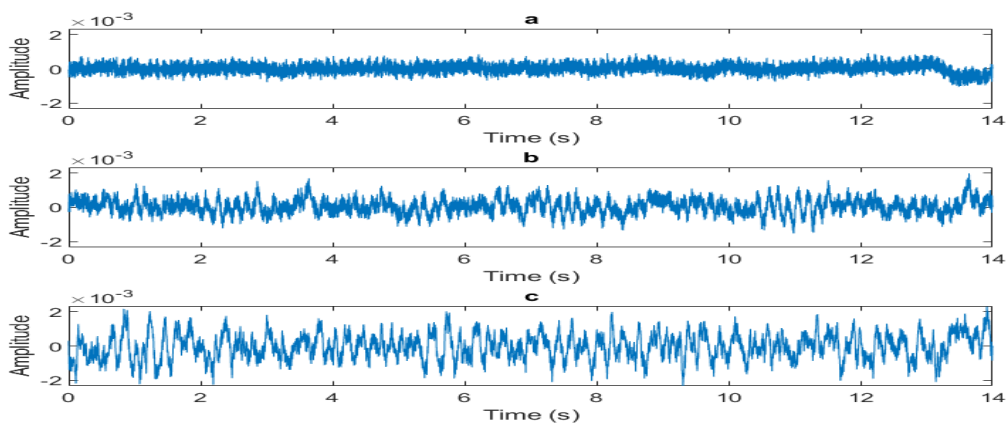


FIGURE 4.9 : Filtered radar Signals of Point 5 at 1 meter for the three case (a) Pump OFF, (b) Pump ON no Leak, (c) Pump On with Leak

Fig.4.10, The FFT spectrum for Point 5 in the Pump OFF case (a) remains flat with no dominant frequency components. In the Pump ON No Leak case (b), flow-induced vibration frequencies persist but with further reduced amplitudes compared to upstream points. For the Pump ON With Leak case (c), the spectrum shows a clear increase in low-frequency energy and broader frequency components due to disturbances from the nearby leak.

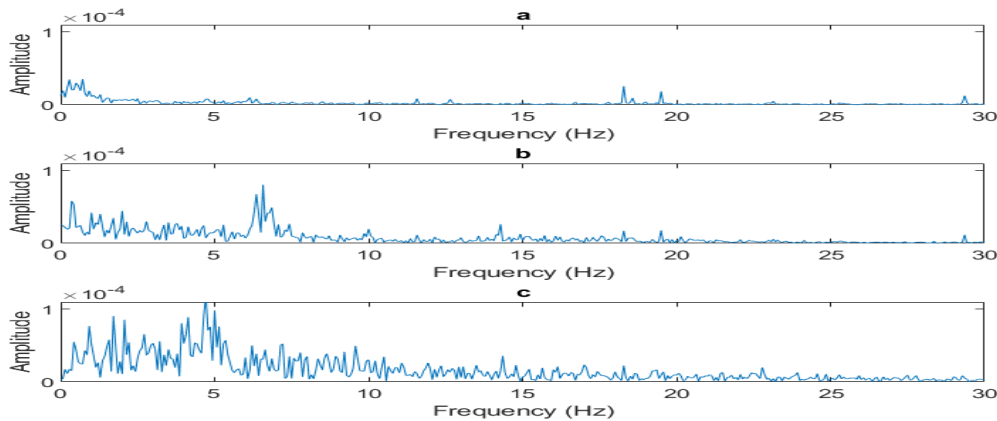


FIGURE 4.10 : FFTs of Signals in Fig.4.9

2.1.6 Point 6

At Point 6, the filtered signal in the Pump OFF case (a) remains nearly flat with no significant activity. When the pump is ON with no leak (b), small, regular oscillations are observed, reflecting flow-induced vibrations. In the Pump ON With Leak case (c), the signal shows noticeable irregularities and increased amplitude, as this point is close enough to the leak to be strongly influenced by leak-induced turbulence. Figure 4.11.

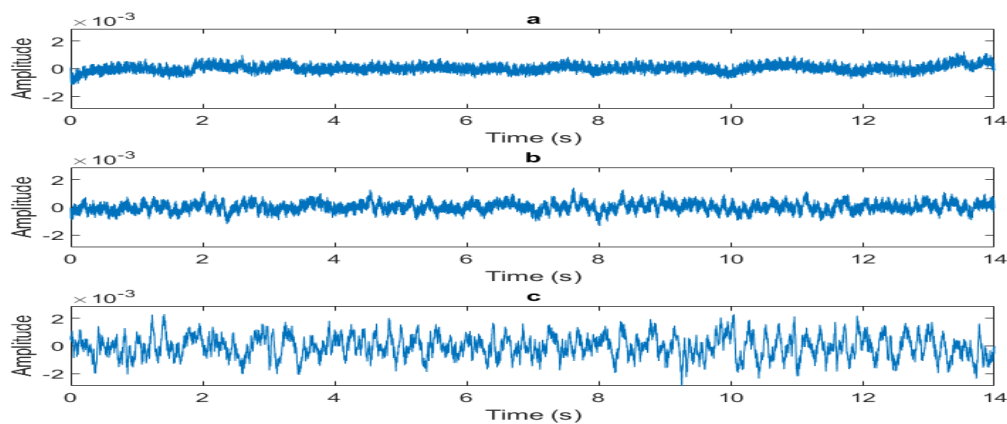


FIGURE 4.11 : Filtered radar Signals of Point 6 at 1 meter for the three case (a) Pump OFF, (b) Pump ON no Leak, (c) Pump On with Leak

Fig.4.12, the FFT spectrum for Point 6 in the Pump OFF case (a) shows minimal noise, with no dominant peaks. In the Pump ON No Leak case (b), flow-induced frequency peaks are still visible but with smaller amplitudes compared to upstream points. In the Pump ON With Leak case (c), significant broadening of the frequency components and increased low-frequency energy are observed, reflecting the direct influence of the nearby leak.

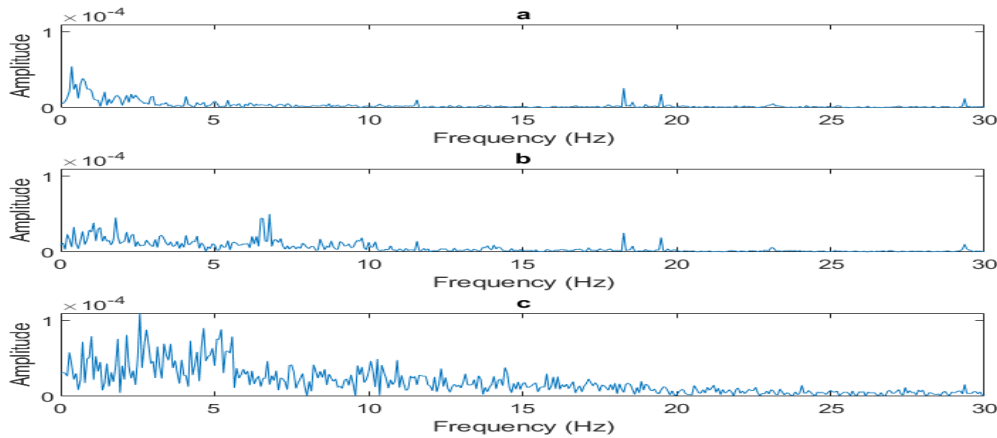


FIGURE 4.12 : FFTs of Signals in Fig.4.11

2.1.7 Point 7

For Point 7, the filtered signal in the Pump OFF case (a) is flat, as expected in the absence of flow. In the Pump ON No Leak case (b), regular oscillatory patterns are observed, reflecting steady water flow. In the Pump ON With Leak case (c), the signal becomes highly irregular, with significant increases in amplitude due to the local turbulence and vibrations caused by the leak. Figure 4.13.

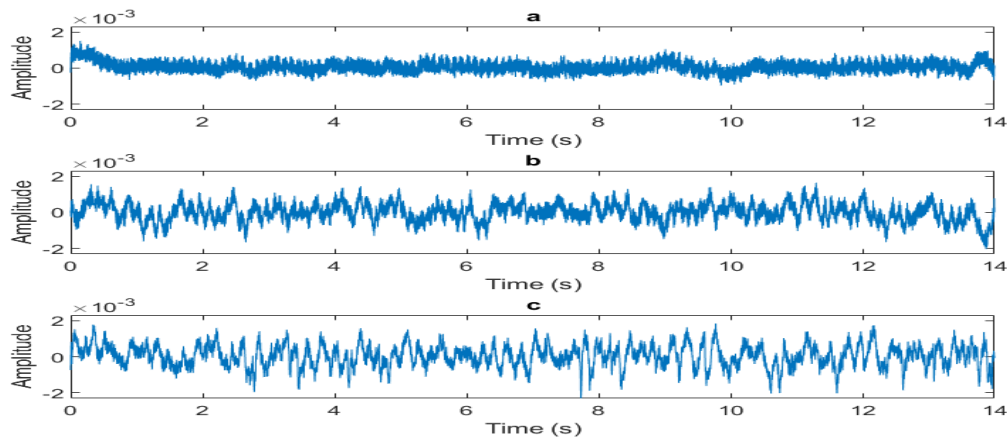


FIGURE 4.13 : Filtered radar Signals of Point 7 at 1 meter for the three case (a) Pump OFF, (b) Pump ON no Leak, (c) Pump On with Leak

Fig.4.14 The The FFT spectrum for Point 7 in the Pump OFF case (a) shows minimal noise with no significant peaks. In the Pump ON No Leak case (b), flow-induced frequency peaks are still visible but are less prominent compared to upstream points. In the Pump ON With Leak case (c), the spectrum shows significant broadening and strong low-frequency components, reflecting the direct effects of the leak at this location.

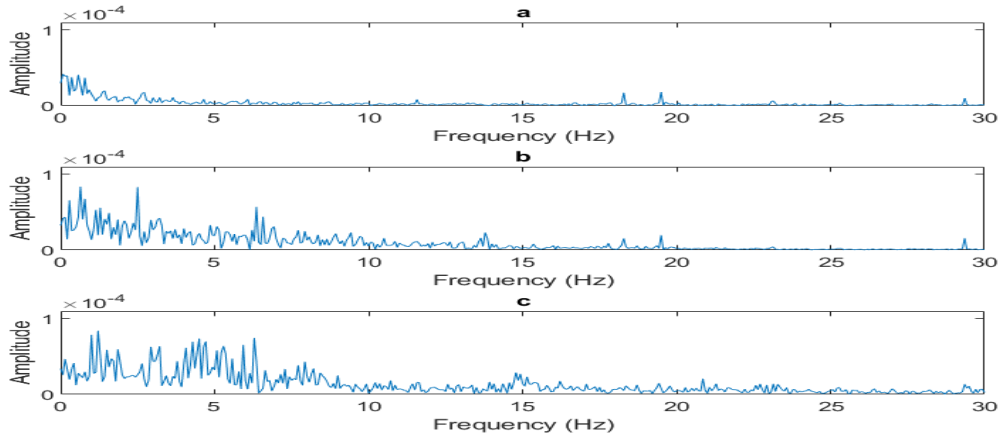


FIGURE 4.14 : FFTs of Signals in Fig.4.13

2.1.8 Point 8

At Point 8, the filtered signal in the Pump OFF case (a) remains flat with no activity. When the pump is ON with no leak (b), small oscillatory patterns persist, reflecting steady flow vibrations. In the Pump ON With Leak case (c), the signal exhibits irregularities, but the disturbances are less intense compared to Point 7, as the leak's effects begin to dissipate downstream. Figure 4.15.

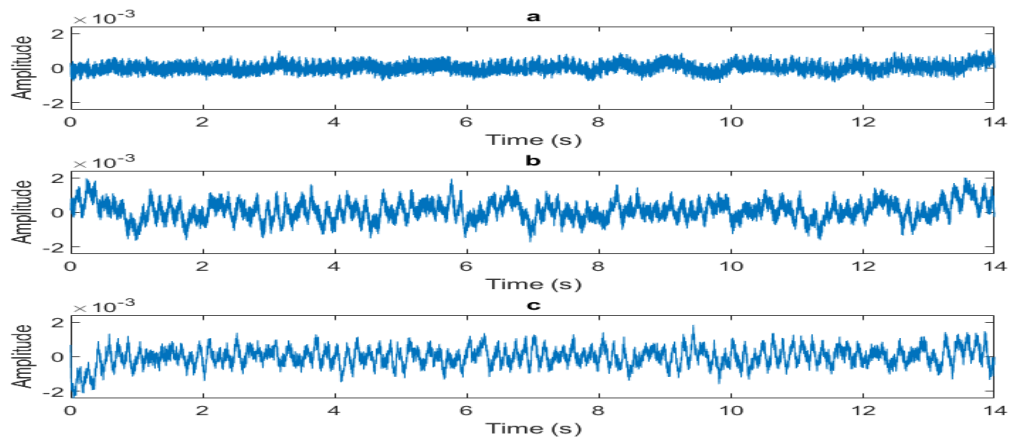


FIGURE 4.15 : Filtered radar Signals of Point 8 at 1 meter for the three case (a) Pump OFF, (b) Pump ON no Leak, (c) Pump On with Leak

Fig.4.16, the FFT spectrum for Point 8 in the Pump OFF case (a) shows minimal noise with no significant peaks. In the Pump ON No Leak case (b), flow-induced frequency peaks are still visible but with reduced amplitudes compared to upstream points. In the Pump ON With Leak case (c), increased low-frequency energy and broader frequency components are still observed, but the amplitude is lower than at Point 7, reflecting the dissipation of leak effects downstream.

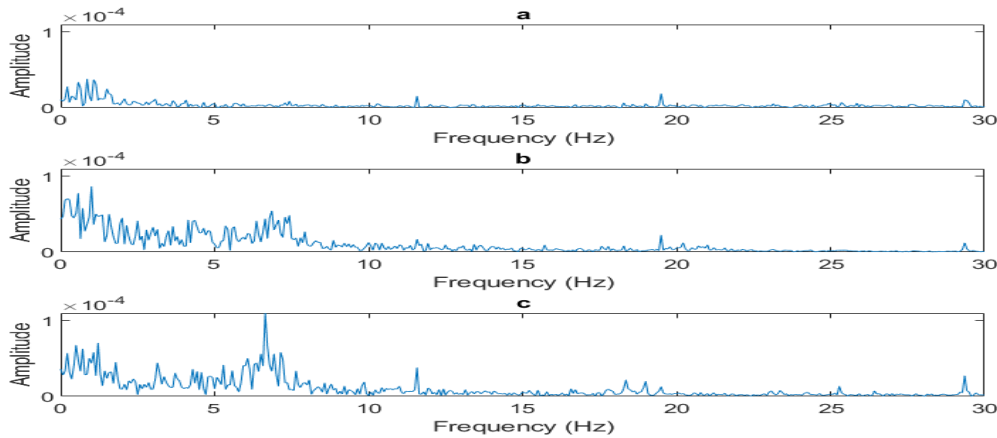


FIGURE 4.16 : FFTs of Signals in Fig.4.15

These plots highlight variations in signal characteristics, allowing for a detailed evaluation of differences caused by the leak condition. The radar signals exhibited complex vibration components, making it challenging to isolate specific frequency features directly. To address this, the **Power Spectrum (PS)** was applied, and **Total Power** was calculated offering a simplified yet effective approach to quantify signal variations. By emphasizing dominant signal features and reducing noise effects, Total Power facilitated clearer comparisons between cases. However, to further enhance the interpretation of these results across different measurement distances, the next section examines how the Total Power evolves over varying distances, providing a more comprehensive view of signal behavior in response to the leak.

3 Total Power Across Distances

The **Power Spectrum (PS)** or **Power Spectrum Density (PSD)** is a method used to analyze a signal in the frequency domain to understand how its energy is distributed across different frequencies [34]. It is derived from the **Fourier Transform (FFT)**, which decomposes a signal into its frequency components. Instead of examining individual frequencies separately, **(PS) quantifies the power contained within each frequency component**, providing insight into how the total signal energy is distributed.

The comparison of **the Total Power** values derived from FFT analysis aimed to evaluate signal variations across four measurement distances : 0.5 m, 1 m, 1.5 m, and 2 m, to assess how

signal strength and clarity changed with distance. Results were obtained for three experimental cases—Pump OFF, Pump ON (no leak), and Pump ON with a leak, and are presented through tables and graphs for each distance, enabling an organized interpretation of trends and patterns. As expected, a gradual reduction in signal strength was observed with increasing distance, likely due to attenuation effects and environmental noise. Despite this reduction, the power values remained higher near leak points, suggesting that the radar effectively captured variations associated with leaks.

To further illustrate these observations, the following subsections present the tables and trend plots for each measured distance, providing detailed insights into the signal variations and trends observed at different ranges.

3.1 0.5 meter

At a distance of 0.5 meters, the radar demonstrated exceptional sensitivity to leaks, exhibiting minimal signal attenuation and strong signal integrity. Analysis of the Cumulative Amplitude Spectrum, corroborated by trend plots, revealed robust signal characteristics, validating the system's high effectiveness for leak detection within short-range scenarios. These results are

TABLEAU 4.1 : Total Power At 0.5 meter distance

| Label | Point 1 | Point 2 | Point 3 | Point 4 | Point 5 | Point 6 | Point 7 | Point 8 |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pump OFF | 2.93E-08 | 3.11E-08 | 3.44E-08 | 2.93E-08 | 2.80E-08 | 3.99E-08 | 4.65E-08 | 2.83E-08 |
| Pump ON No Leak | 4.60E-08 | 5.05E-08 | 5.05E-08 | 4.55E-08 | 4.43E-08 | 4.83E-08 | 5.30E-08 | 6.76E-08 |
| Pump ON With Leak | 3.82E-08 | 3.71E-08 | 3.62E-08 | 5.18E-08 | 6.06E-08 | 7.35E-08 | 1.26E-07 | 9.00E-08 |

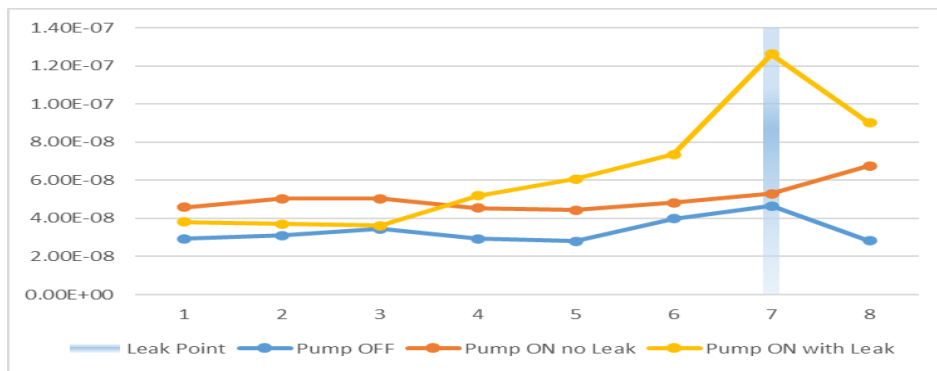


FIGURE 4.17 : Total Power at 0.5m distance across the Pipe 8 reference Points

3.2 1 meter

Operating at 1 meter, the radar maintained robust sensitivity to leaks, although a slight reduction in signal amplitude was observed compared to the 0.5-meter range. Despite this attenuation,

Total Power analysis and trend plots consistently indicated reliable leak detection performance at moderate distances.

TABLEAU 4.2 : Total Power At 1 meter distance

| Label | Point 1 | Point 2 | Point 3 | Point 4 | Point 5 | Point 6 | Point 7 | Point 8 |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pump OFF | 2.40E-08 | 1.98E-08 | 2.34E-08 | 1.88E-08 | 2.21E-08 | 2.53E-08 | 2.56E-08 | 2.86E-08 |
| Pump ON No Leak | 5.24E-08 | 4.74E-08 | 5.21E-08 | 4.41E-08 | 4.67E-08 | 3.54E-08 | 5.09E-08 | 5.50E-08 |
| Pump ON With Leak | 4.72E-08 | 4.46E-08 | 4.05E-08 | 7.53E-08 | 8.50E-08 | 1.00E-07 | 7.44E-08 | 5.76E-08 |

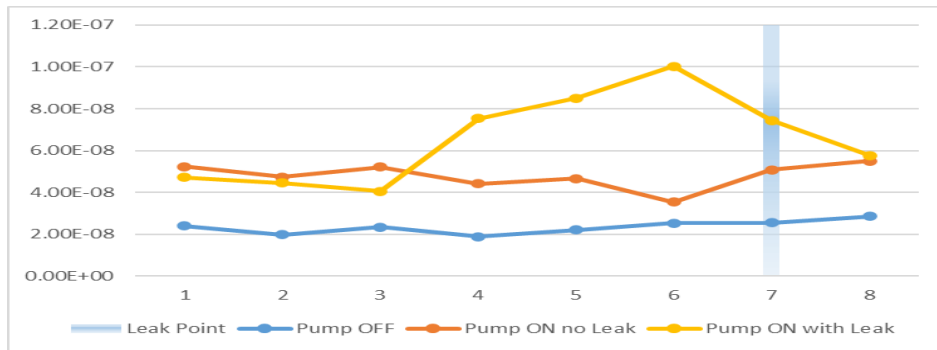


FIGURE 4.18 : Total Power at 1m distance across the Pipe 8 reference Points

3.3 1.5 meter

At 1.5 meters, the radar continued to exhibit consistent performance, effectively detecting leak-induced anomalies despite a gradual decline in signal strength. Analysis of the Total Power and trend plots captured the attenuation dynamics, confirming the system’s capability to reliably detect leaks at intermediate distances.

TABLEAU 4.3 : Total Power At 1.5m distance

| Label | Point 1 | Point 2 | Point 3 | Point 4 | Point 5 | Point 6 | Point 7 | Point 8 |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pump OFF | 2.51E-08 | 2.51E-08 | 2.31E-08 | 2.58E-08 | 2.71E-08 | 2.79E-08 | 1.37E-08 | 9.35E-09 |
| Pump ON No Leak | 3.42E-08 | 3.48E-08 | 4.24E-08 | 3.41E-08 | 3.71E-08 | 4.34E-08 | 2.93E-08 | 2.66E-08 |
| Pump ON With Leak | 3.96E-08 | 4.37E-08 | 6.53E-08 | 7.24E-08 | 9.49E-08 | 7.97E-08 | 7.44E-08 | 3.03E-08 |

3.4 2 meters

At 2 meters, while experiencing more pronounced signal attenuation and elevated noise levels, the radar demonstrated a notable ability to detect leak-induced disturbances. Analysis of the Total Power and trend plots revealed distinct signal variations, providing valuable insights into the system’s performance and limitations at longer ranges.

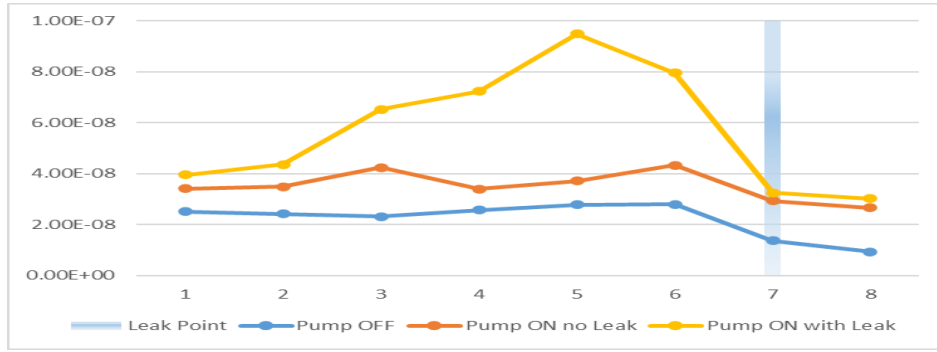


FIGURE 4.19 : Total Power at 1.5m distance across the Pipe 8 reference Points

TABLEAU 4.4 : Total Power At 2 meter distance

| Label | Point 1 | Point 2 | Point 3 | Point 4 | Point 5 | Point 6 | Point 7 | Point 8 |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pump OFF | 2.90E-08 | 2.35E-08 | 2.61E-08 | 2.30E-08 | 2.75E-08 | 2.53E-08 | 3.19E-08 | 2.54E-08 |
| Pump ON No Leak | 3.83E-08 | 3.42E-08 | 3.84E-08 | 3.79E-08 | 4.48E-08 | 5.13E-08 | 3.35E-08 | 3.70E-08 |
| Pump ON With Leak | 3.97E-08 | 4.68E-08 | 4.96E-08 | 6.13E-08 | 7.91E-08 | 6.26E-08 | 6.14E-08 | 4.55E-08 |

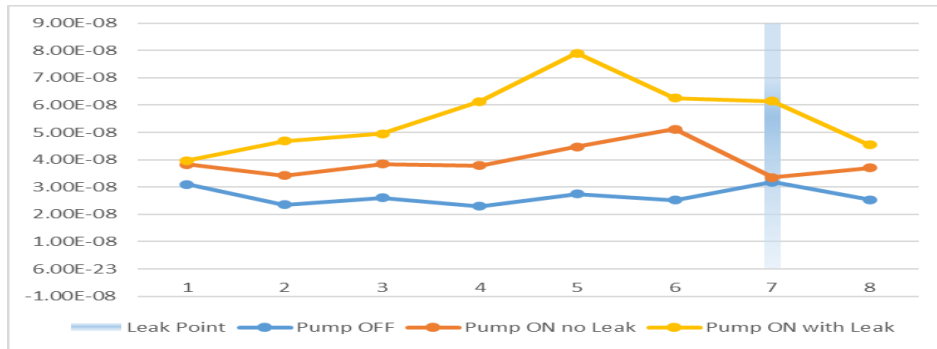


FIGURE 4.20 : Total Power results at 2m distance across the Pipe 8 reference Points

These visualizations support the analysis by providing quantitative and graphical insights into the radar’s performance at each distance, reinforcing its ability to detect leaks effectively.

These observations reinforce the radar’s ability to detect leak-induced disturbances, even at farther distances, although the signal clarity decreased. The trends also highlighted that closer distances, particularly 1 m, provided clearer results, demonstrating better sensitivity to leak detection under controlled conditions. This emphasizes the practical applicability of radar-based leak detection systems in scenarios where sensors can be deployed at relatively short distances from pipelines.

4 Processed Radar Signal Results and Distance Effects

The graph compares the **Total Power** exclusively on the **Pump ON with leak** scenario to evaluate how the radar’s performance varies across the four distances.

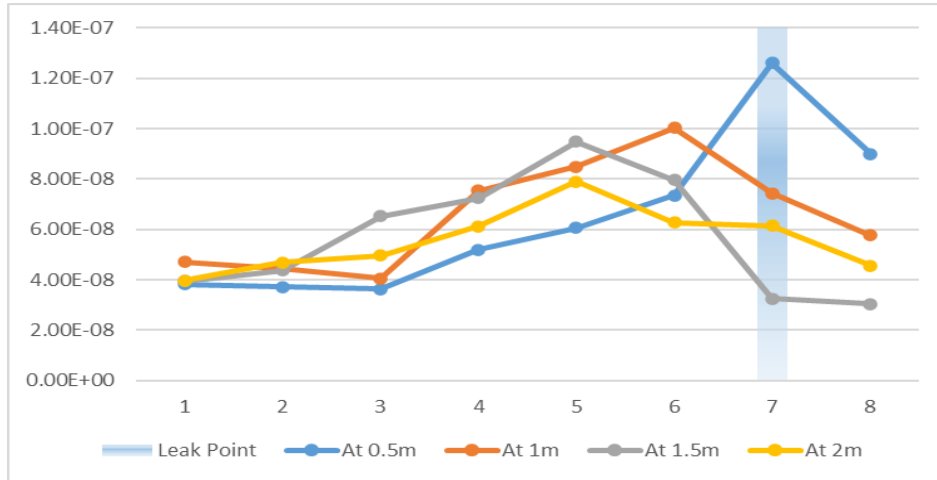


FIGURE 4.21 : Leak Case Total Power and Distance Comparison

At a distance of 0.5 meters, the radar system clearly identified a sharp and prominent peak at point 7, corresponding to the exact location of the leak. This close-range measurement demonstrates the radar’s ability to precisely detect leak-induced disturbances with high spatial accuracy when the antenna coverage is narrow and localized. The results at this range validate the radar’s strong capability for precise anomaly detection in close-proximity monitoring scenarios.

At 1 meter, the CAS results show a notable shift in the peak from point 7 to point 6, which is adjacent to the leak location. Despite this shift, the radar system continues to detect vibrations in the vicinity of the leak. The slight displacement of the peak may be attributed to the broader coverage area of the radar antenna at this distance, which captures not only the leak-induced vibrations but also structural or fluid activity in the surrounding region. Alternatively, this shift might be due to enhanced vibration propagation near the leak site, causing detectable disturbances to appear slightly offset from the true leak position.

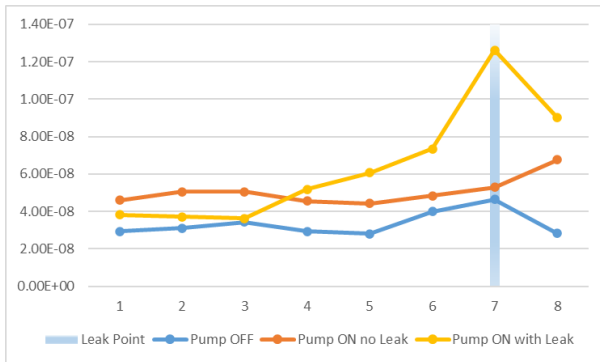
At 1.5 meters, the peak shifts further to point 5, and this trend is also observed at 2 meters. Although CAS values decrease overall as distance increases, the consistent detection of a peak at point 5, close to the leak site, highlights the continued sensitivity of the radar to vibrations induced by the leak. The shift in peak position at greater distances is probably due to increased radar beam coverage, which causes the system to integrate signals from a wider area. Furthermore, the fluid dynamics and structural vibrations generated around the leak can contribute to stronger disturbances near point 5, making it the dominant signal source at these distances.

These results highlight the importance of distance calibration when using CW radar for leak detection and the antenna beamwidth effect. The decreasing signal amplitude at larger distances emphasizes the need for signal amplification or enhanced data processing algorithms to maintain accuracy over longer pipelines. Further studies will focus on frequency-domain analysis and comparative assessments of signal variations to validate these observations.

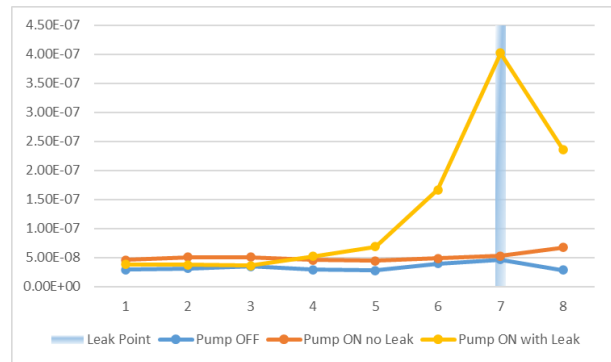
5 Comparison of Radar Signal Results for Small and Large Leaks

This section discusses the radar-processed signal results for small and large leaks at three distances, 0.5 m, 1 m, and 1.5 m. The six charts illustrate variations in signal amplitudes along the eight measurement points, highlighting the differences between leak sizes and distances.

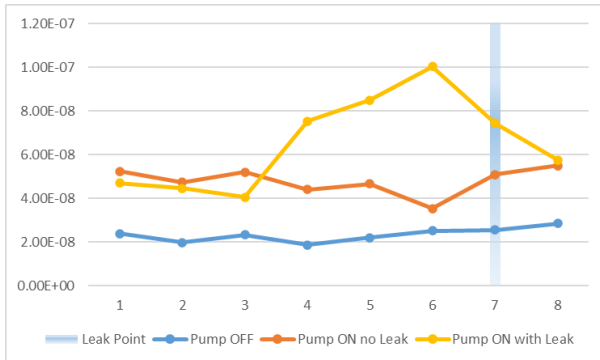
The results reveal clear differences between the radar signal responses for small and large leaks. Larger leaks consistently produce higher signal amplitudes compared to smaller leaks across all distances. This is likely due to the stronger reflections caused by the larger disruption in the pipe structure, leading to more pronounced variations in the radar signal.



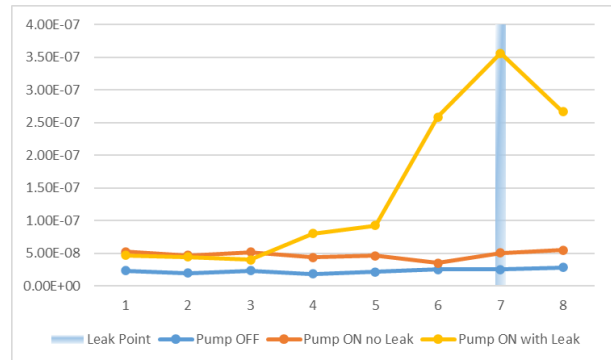
(a) Total Power for Small Leak at 0.5 meter



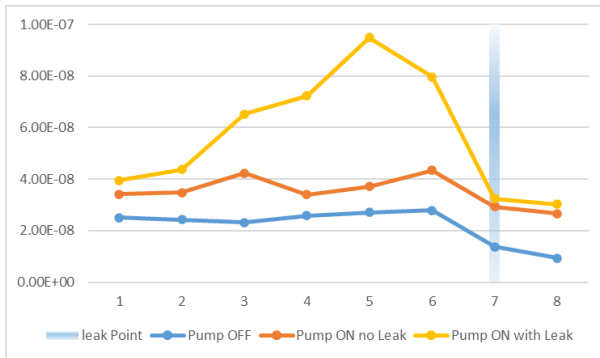
(b) Total Power for Larger Leak at 0.5 meter



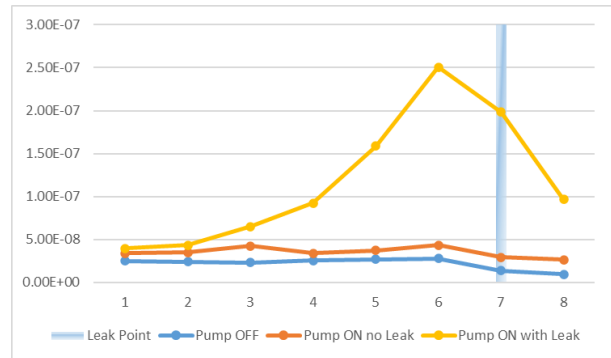
(c) Total Power for Small Leak at 1 meter



(d) Total Power for Larger Leak at 1 meter



(e) Total Power for Small Leak at 1.5 meter



(f) Total Power for Larger Leak at 1.5 meter

FIGURE 4.22 : Small vs Larger Leak Total Power at different distances

Small leaks, while detectable, exhibit lower signal amplitudes and more gradual changes across measurement points. As the distance increases, attenuation becomes more noticeable, reducing the amplitude for both leak sizes. However, larger leaks maintain higher values even at greater distances, doubled or more the amplitude compared to small leak, suggesting greater detection reliability.

6 Validation of Quantification

The differences in signal amplitudes and peak patterns observed between small and large leaks suggest that radar signal processing can potentially be used for leak quantification. The amplitude variations correlate with the leak size, indicating that larger leaks generate stronger signals. However, the impact of distance must be carefully accounted for, as attenuation reduces signal strength over longer ranges.

TABLEAU 4.5 : Total Power Results for Small and Larger Leak At 1 meter Distance

| Label | Point 1 | Point 2 | Point 3 | Point 4 | Point 5 | Point 6 | Point 7 | Point 8 |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Small Leak At 0.5 m | 3.82E-08 | 3.71E-08 | 3.62E-08 | 5.18E-08 | 6.06E-08 | 7.35E-08 | 1.26E-07 | 9.00E-08 |
| Larger Leak At 0.5 m | 3.82E-08 | 3.71E-08 | 3.62E-08 | 5.18E-08 | 6.86E-07 | 1.67E-07 | 4.02E-07 | 2.36E-07 |

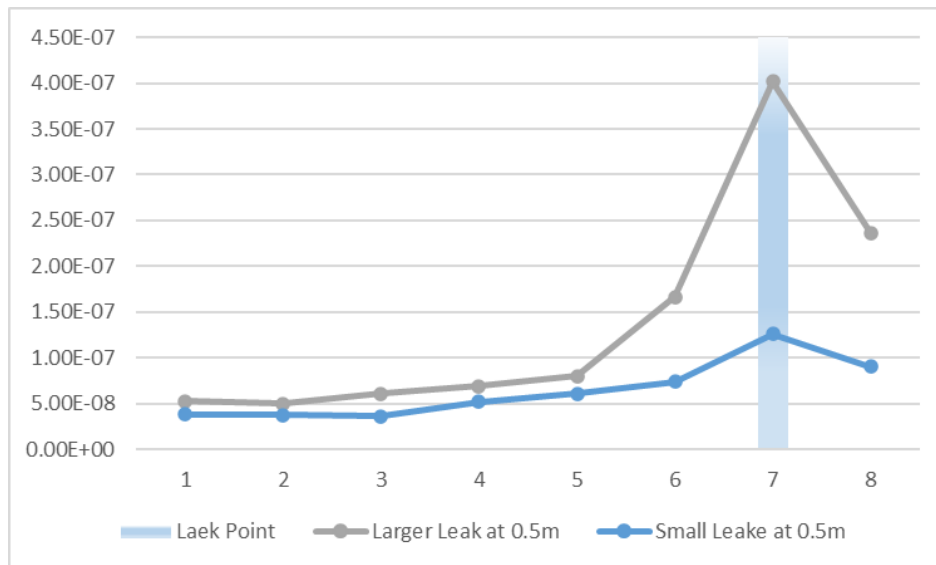


FIGURE 4.23 : Samll vs Larger leak Total Power at 0.5 meter for Quantification Validation

While the trends support the feasibility of quantification, further validation is required to establish a precise relationship between signal amplitude and leak size. Additional experiments focusing on intermediate leak sizes, signal normalization, and advanced processing techniques are necessary to improve accuracy and reliability for practical applications.

The findings highlight the potential of CW radar for leak quantification based on signal amplitude analysis. Larger leaks produce distinct signal patterns, making them easier to identify and potentially quantify. Small leaks, though detectable, may require enhanced processing algorithms to improve sensitivity, particularly at longer distances. Future studies will refine these approaches to validate the method's robustness under varying conditions.

5 CONCLUSION AND FUTURE WORK

1 Conclusion

The detection, localization, and quantification of pipeline leaks remain critical challenges in maintaining the integrity of fluid transport systems across various industries, including water distribution, oil and gas pipelines, and industrial fluid transportation. Undetected leaks can lead to significant resource losses, environmental hazards, and increased operational costs. In response to these challenges, this research introduced a **Continuous Wave (CW) radar-based approach** for non-invasive leak detection using vibration analysis. By leveraging the high sensitivity of CW radar to structural vibrations, this study aimed to develop a scalable, cost-effective, and real-time monitoring solution that addresses the limitations of conventional leak detection techniques.

The experimental findings demonstrated that CW radar effectively captured distinct signal variations associated with different leak sizes and measurement distances. The system exhibited high sensitivity in distinguishing between small (1.5 mm) and large (2 mm) leaks, confirming its capability for leak severity quantification. Additionally, the analysis of signal attenuation across varying distances revealed a consistent relationship between leak location and signal amplitude variations, underscoring the radar's potential for accurate leak localization. The application of Total Power Spectrum analysis further enhanced the ability to differentiate between leak and non-leak conditions, reinforcing the efficacy of radar-based monitoring.

One of the primary advantages of this approach is its non-intrusive nature, allowing for leak detection without direct pipeline access or modifications. Unlike traditional methods such as acoustic sensing, pressure monitoring, or fiber optic detection, CW radar does not require distributed sensor networks or physical pipeline modifications, making it a viable solution for both above-ground and underground pipelines. The results of this study indicate that CW radar can operate effectively in diverse environmental conditions, maintaining reliable performance even as measurement distances increased. This adaptability enhances its potential application in complex pipeline networks, particularly in urban infrastructure, industrial facilities, and remote monitoring scenarios.

Despite the promising results, this research also highlighted several areas for improvement. The attenuation of radar signals at greater distances suggests the need for signal amplification strategies or advanced filtering techniques to enhance detection accuracy in large-scale implementations. Furthermore, while the system successfully identified leak locations within a controlled experimental setup, real-world conditions may introduce additional environmental noise and material-dependent variations that require further optimization.

In conclusion, this study has demonstrated the feasibility and effectiveness of CW radar technology as a scalable, adaptable, and non-invasive solution for pipeline leak detection. The findings

provide a strong foundation for future research and practical deployment, particularly in applications requiring continuous, real-time monitoring of fluid transport systems. Moving forward, further refinements in signal processing, multi-sensor integration, and machine learning-driven anomaly detection will be essential in enhancing the accuracy, robustness, and large-scale applicability of this technology.

2 Future Work

While this research has successfully validated the potential of **CW radar-based pipeline leak detection**, several areas remain open for further investigation and enhancement. To improve the reliability, scalability, and adaptability of this system for real-world applications, future research should focus on the following key aspects :

— Real-World Testing and Environmental Adaptability

A critical next step in validating the proposed method is conducting extensive field trials in real-world pipeline infrastructures. Future studies should assess the performance of CW radar under different environmental conditions, including underground pipelines, insulated piping systems, and varying soil types. These tests will help evaluate the system's resilience to external interference, environmental noise, and material-dependent variations. Additionally, research should investigate the radar's adaptability in high-pressure fluid transport systems, such as those found in municipal water supply networks and oil refineries, where fluid dynamics may differ significantly from controlled laboratory conditions.

— Advanced Signal Processing and Machine Learning Integration

Enhancing signal processing techniques will be crucial in further improving the accuracy of leak detection. The integration of machine learning (ML) and artificial intelligence (AI) algorithms can significantly enhance anomaly detection and classification. Future work should explore the use of deep learning models, such as convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs), for automatically identifying leak-induced signal variations. Additionally, adaptive filtering and noise reduction algorithms should be developed to improve signal clarity in complex environments, ensuring the system remains robust against external disturbances.

— Multi-Frequency CW Radar and Spectral Analysis

Investigating the effect of different CW radar operating frequencies could provide deeper insights into optimizing detection sensitivity. Future research should explore multi-frequency or frequency-modulated continuous wave (FMCW) radar configurations, which may offer improved penetration through different pipeline materials and enhanced resolution for small leaks. Spectral analysis techniques, such as wavelet transforms and time-frequency decomposition

methods, could also be employed to refine signal interpretation, allowing for a more detailed characterization of leak-induced vibrations.

— **Integration with Wireless Sensor Networks (WSNs) and IoT-Based Monitoring**

To enable large-scale deployment, future studies should explore the integration of CW radar technology with wireless sensor networks (WSNs) and Internet of Things (IoT)-based platforms. A distributed multi-node radar sensor architecture could facilitate real-time remote monitoring across extensive pipeline networks. By incorporating cloud-based data processing and edge computing techniques, such systems could provide automated leak alerts, predictive maintenance insights, and enhanced data visualization for infrastructure managers.

— **Energy-Efficient and Low-Power Hardware Optimization**

Another crucial area for future improvement is the development of energy-efficient radar systems. Current radar setups require continuous power input, which may limit their applicability in remote or hard-to-reach locations. Future work should focus on designing low-power CW radar modules and investigating renewable energy solutions, such as solar power integration or vibration-based energy harvesting, to support long-term autonomous monitoring.

— **Leak Severity Quantification and Predictive Maintenance Models**

While this study successfully distinguished between different leak sizes, further research is required to establish a quantitative correlation between signal amplitude variations and leak severity levels. Future studies should develop mathematical models, and predictive maintenance frameworks that allow pipeline operators to estimate leak progression over time. Computational fluid dynamics (CFD) simulations could complement experimental findings to refine these models and improve real-time risk assessment capabilities.

— **Multi-Modal Sensing for Enhanced Leak Detection**

To improve detection reliability, future research should explore the integration of CW radar with complementary sensing technologies, such as acoustic emission sensors, infrared thermography, and fiber optic sensing. A multi-modal approach could provide redundant validation mechanisms, reducing false positives and enhancing leak detection in complex or noisy environments.

Final Remarks : The findings of this study provide a strong foundation for advancing CW radar-based leak detection technologies. Continued innovations in radar signal processing, energy-efficient hardware, and IoT-enabled predictive maintenance will be instrumental in enhancing global pipeline infrastructure resilience.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] U. N. E. Programme, "As shortages mount, countries hunt for novel sources of water," October 12 2023, [Online]. Available : <https://www.unep.org/news-and-stories/story/shortages-mount-countries-hunt-novel-sources-water>. [Online]. Available : <https://www.unep.org/news-and-stories/story/shortages-mount-countries-hunt-novel-sources-water>
- [2] M. Bimpas, A. Amditis, and N. Uzunoglu, "Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 ghz," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 70, no. 3, pp. 226–236, 2010.
- [3] A. Abdulhadi, "Microwave pipeline monitoring and oil leakage detection," M.S. thesis, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 2024.
- [4] X. Tan, L. Fan, Y. Huang, and Y. Bao, "Detection, visualization, quantification, and warning of pipe corrosion using distributed fiber optic sensors," *Automation in construction*, vol. 132, p. 103953, 2021.
- [5] X. Fan and X. Yu, "An innovative machine learning based framework for water distribution network leakage detection and localization," *Structural Health Monitoring*, vol. 21, no. 4, pp. 1626–1644, 2022.
- [6] F. Zohora, "Study of pipe leak fluid dynamic characteristics and their influences on acoustic emission generation," Ph.D. dissertation, Queensland University of Technology, 2021.
- [7] B. Wong and J. A. McCann, "Failure detection methods for pipeline networks : From acoustic sensing to cyber-physical systems," *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 4959, 2021.
- [8] Z. He and Q. Liu, "Optical fiber distributed acoustic sensors : A review," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 12, pp. 3671–3686, 2021.
- [9] A. Cataldo, R. Persico, G. Leucci, E. De Benedetto, G. Cannazza, L. Matera, and L. De Giorgi, "Time domain reflectometry, ground penetrating radar and electrical resistivity tomography : a comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes," *Ndt & E International*, vol. 62, pp. 14–28, 2014.
- [10] G. Mori, "The use of ground penetrating radar and alternative geophysical techniques for assessing embankments and dykes safety," 2009.
- [11] D. Zaman, M. K. Tiwari, A. K. Gupta, and D. Sen, "A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state," *Engineering Failure Analysis*, vol. 109, p. 104264, 2020.
- [12] X. Wan, P. K. Kuhanestani, R. Farmani, and E. Keedwell, "Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks : A focus on pressure and flow smart sensors," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 148, no. 10, p. 03122002, 2022.
- [13] R. Ben-Mansour, M. Habib, A. Khalifa, K. Youcef-Toumi, and D. Chatzigeorgiou, "Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction," *Computers & Fluids*, vol. 57, pp. 110–123, 2012.
- [14] S. A. M. Tajalli, M. Moattari, S. V. Naghavi, and M. R. Salehizadeh, "A novel hybrid internal pipeline leak detection and location system based on modified real-time transient modelling," *Modelling*, vol. 5, no. 3, pp. 1135–1157, 2024.
- [15] P. M. Bach and J. K. Kodikara, "Reliability of infrared thermography in detecting leaks in buried water reticulation pipes," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 9, pp. 4210–4224, 2017.

-
- [16] L. Wang, Y. Cheng, C. Wu, F. Luo, Z. Lin, and R. Naidu, "Rapid on-site detection of underground petroleum pipeline leaks and risk assessment using portable gas chromatography-mass spectrometry and solid phase microextraction," *Journal of Chromatography A*, vol. 1696, p. 463980, 2023.
- [17] P.-S. Murvay and I. Silea, "A survey on gas leak detection and localization techniques," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 25, no. 6, pp. 966–973, 2012.
- [18] S. Pathirana, S. Lambot, M. Krishnapillai, M. Cheema, C. Smeaton, and L. Galagedara, "Ground-penetrating radar and electromagnetic induction : Challenges and opportunities in agriculture," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 11, p. 2932, 2023.
- [19] J. Sekhavati, S. H. Hashemabadi, and M. Soroush, "Computational methods for pipeline leakage detection and localization : A review and comparative study," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 77, p. 104771, 2022.
- [20] B. L. Mello, A. M. Fernandes, T. S. de Oliveira, F. P. Leonel, L. S. Glória, and R. S. Silva, "Feed intake, digestibility, and energy contents in growing bull fed pineapple crop waste silage in different planes of nutrition," *tropical animal health and production*, vol. 53, pp. 1–10, 2021.
- [21] J. Guo, Y. He, C. Jiang, M. Jin, S. Li, J. Zhang, R. Xi, and Y. Liu, "Measuring micrometer-level vibrations with mmwave radar," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 22, no. 4, pp. 2248–2261, 2021.
- [22] Z. Zhang, L. Zhang, M. Fu, D. Ozevin, and H. Yuan, "Study on leak localization for buried gas pipelines based on an acoustic method," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 120, p. 104247, 2022.
- [23] W. Yang, "Traffic surveillance using low cost continuous wave (cw) doppler radars," Ph.D. dissertation, Wright State University, 2012, available : https://corescholar.libraries.wright.edu/etd_all/620.
- [24] E. L. Chuma and Y. Iano, "A movement detection system using continuous-wave doppler radar sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 3, 2021.
- [25] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*. McGraw-Hill, 2001.
- [26] P. Basili, A. Graziano, and R. Mecca, *FMCW Radar : Design Principles, Techniques and Applications*. John Wiley & Sons, 2014.
- [27] N. Davis, "An introduction to filters," Online article, Sept. 30 2023, available at : <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-filters/> [Accessed : Day Month Year].
- [28] E. L. Chuma and Y. Iano, "A movement detection system using continuous-wave doppler radar sensor and convolutional neural network to detect cough and other gestures," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 2921–2928, Feb. 2021.
- [29] Bogus, "Fourier transform of sine waves with unexpected results," Online post, Mar. 29 2016, available at : <https://stackoverflow.com/questions/36293721/fourier-transform-of-sine-waves-with-unexpected-results> [Accessed : Day Month Year].
- [30] S. Li, Y. Xiong, Z. Ren, and Z. Peng, "Ultra-micro vibration measurement method using cw doppler radar," in *IEEE International Conference on Microwave Technology*, 2020, pp. 235–237.
- [31] C.-M. Nieh, C. Wei, and J. Lin, "Concurrent detection of vibration and distance using unmodulated cw doppler vibration radar with an adaptive beam-steering antenna," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 6, pp. 2069–2078, Jun. 2015.
- [32] L. Ding, M. Ali, S. Patole, and A. Dabak, "Vibration parameter estimation using fmcw radar," in *IEEE Radar Conference*, 2025.

-
- [33] M. Ho, S. El-Borgi, D. Patil, and G. Song, "Inspection and monitoring systems subsea pipelines : A review paper," *Structural Health Monitoring*, vol. 19, no. 2, pp. 606–645, 2020.
- [34] A. Steinwolf, "Random vibration testing beyond psd limitations," *Sound and Vibration*, vol. 40, no. 9, pp. 12–21, 2006.