

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**

THESE

Présentée par : **BENTOUMI Miloud**

En vue de l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité : Electronique

Intitulé : Développement de méthodes efficaces pour la localisation de fuites sur les canalisations d'eau potable

Soutenue le : **01/07/2017** devant le jury composé de :

SAIGAA Djamel	Professeur - Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
CHIKOUCHE Djamel	Professeur - Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
MEZACHE Amar	Professeur - Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co- Rapporteur
KHEMLICHE Mabrouk	Professeur - Université Ferhat Abbas Sétif-1-	Examineur
ROUABEH Khaled	MCA- Université Mohamed El bachir EL Ibrahimi de BBA	Examineur
DAACHI Mohamed Elhocine	MCA- Université Mohamed El bachir EL Ibrahimi de BBA	Examineur

Promotion : 2016/2017

Remerciements

Je tiens à remercier très vivement mon directeur de thèse monsieur Djamel CHIKOUCHE, Professeur à l'université Mohamed BOUDIAF de M'sila, je le remercie de m'avoir toujours aidé, pour toute la confiance qu'il m'a portée, pour sa grande disponibilité inconditionnelle, de ses conseils pertinents et ses encouragements. Ses nombreuses idées furent un soutien très précieux donnant le fruit de ce travail.

J'adresse également mes remerciements à mon co-encadreur monsieur Amar MEZACHE, professeur à l'université Mohamed BOUDIAF de M'sila qui m'a poussé nuit et jour pour concrétiser ce travail, je le remercie pour son soutien, sa grande disponibilité, sa patience et sa rigueur.

J'exprime ma grande gratitude à monsieur Djamel SAIGAA, Professeur à l'université Mohamed BOUDIAF de M'sila, pour l'honneur qu'il m'a fait d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Je le remercie vivement pour sa lecture attentive de mon manuscrit et pour l'intérêt à l'égard de mon travail.

Je remercie également les membres du jury pour la caution qu'ils ont bien voulu apporter à ce travail. J'adresse mes remerciements et m'a gratitude aux examinateurs :

- Monsieur KHEMLICHE Mabrouk, Professeur à l'université Farhat ABBAS Sétif-1 de m'avoir honoré en acceptant d'être examinateur de ce travail.
- Monsieur ROUABEH Khaled, et Monsieur DAACHI Mohamed Elhocine maitres de conférences A à l'université El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj d'être membres de jury de cette thèse.

Enfin, je remercie énormément mon collègue monsieur BAKHTI Haddi qui n'a cessé de m'encourager jusqu'à la finalisation de ce travail.

Sans oublier, de remercier chaleureusement tous mes collègues de l'université Mohamed BOUDIAF de M'sila, mon ami LADGHAM CHIKOUCHE Djamel de son soutien moral, les membres de ma famille grand et petit commençant par ma chère mère et mon cher père que dieu les protège, mes frères et sœurs, ma femme et mes filles et fils, tous mes amis qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I

Détection des fuites d'eau dans les canalisations

INTRODUCTION	7
I.1 Présentation générale d'un système d'alimentation en eau potable	7
I.1.1 Captage d'eau.....	8
I.1.2 Installations de pompage.....	9
I.1.2.1 Prélèvement d'une source.....	10
I.1.2.2 Prélèvement d'un puit	10
I.1.2.3 Prélèvement d'eau de surface	10
I.1.3 Conduites d'adduction d'eau	10
I.1.4 Usine de traitement	10
I.1.5 Réservoirs	10
I.1.6 Réseau de distribution d'eau potable	11
I.1.6.1 Artères.....	11
I.1.6.2 Conduites de service	11
I.1.6.3 Branchements.....	12
I.2 Principe actuel utilisé par les AEPs en Algérie	15
I.2.1 Méthode d'auto-corrélation pour la détection des fuites	16
I.2.2 Estimation du temps de retard par auto-corrélation.....	19
I.2.2 .1 Corrélation des signaux de fuite continue dans le domaine temporel.....	20
I.2.2 .2 Corrélation des signaux continus de fuite dans le domaine fréquentiel.....	22
I.2.3 Paramètres affectant la corrélation des signaux de fuite.....	24
I.3 Etat de l'art des méthodes utilisées dans d'autres pays	26
I.3.1 Méthodes utilisées en USA	26
I.3.2 Méthode utilisée au Canada	28
I.3.2.1 Gaz traceur	28
I.3.2.2 Thermographie	28

I.3.2.3 Méthode GPR.....	29
I.3.3 Méthode utilisée en Angleterre	29
I.3.3.1 Principe de fonctionnement	29
1.3.3.2 Avantages	30
1.3.3.3 Caractéristiques techniques	31
I.4 Etat de l'art des techniques de détection de fuite	31
a) Appareils acoustiques à l'intérieur de la conduite	32
b) Appareils acoustiques à l'extérieur de la conduite	33
I.4.1 Bâton d'écoute.....	34
I.4.1.1 Bâton d'écoute mécanique.....	34
I.4.1.2 Bâton d'écoute électronique	34
I.4.2. Microphone au sol.....	35
I.4.3. Enregistreurs de bruit de fuite.....	36
1.4.4 Méthodes non acoustiques	36
1.4.5 Méthodes transitoires	37
1.4.5.1 Méthode de réflexion de fuite	37
1.4.5.2 Analyse transitoire inverse	37
1.4.5.3 Méthode d'amortissement transitoire	38
1.4.5.4. Analyse dans le domaine fréquentiel	38
1.4.5.5. Analyse des réponses impulsionnelles	39
1.4.6 Méthodes basées sur les techniques de surveillance continue des fuites	39
1.4.6.1 Surveillance acoustique continue	39
1.4.6.2 Test de zone de compteurs (DMA)	40

CHAPITRE II

Détection des fuites des liquides à base de la FFT via un signal vibratoire segmenté

INTRODUCTION.....	42
II.1 Détection de fuite via un signal vibratoire	43
II.2 Réalisation d'un banc d'essai et techniques d'acquisition du signal vibratoire.....	53
II.3 Architecture du système de détection de fuite.....	53
II.3.1 Partie hydraulique.....	54
II.3.2. Partie électrique	58
II.3.2.1 Capteur.....	59

a-1 Caractéristiques des capteurs	60
a-2 Piézoélectricité	60
a-3 Mise en œuvre des capteurs piézoélectriques	60
a-4 Capteur de vibrations KB12	62
a-5 Structure interne du capteur KB12	62
a-6 Principe de détection	63
II.3.2.2. Etage de Pré-amplification (montage Darlington).....	63
II.3.2.3. Conditionnement du signal	64
II.3.2.4. Adaptation	65
II.3.2.5. Conversion analogique/numérique à base du PIC 16F876.....	66
II.3.2.6. Schéma électrique global de la carte d'acquisition.....	67
II.3.2.7 Affichage des résultats expérimentaux	69
II.4. Méthode de traitement du signal par la FFT	71
II.5. Caractéristiques du signal vibratoire	76
II.5.1. Linéarité.....	77
II.5.2. Stationnarité.....	77
II.5.2.1. Effet de la segmentation du signal vibratoire non stationnaire.....	77
II.6. Détection et localisation de fuites d'eau par un signal segmenté.....	78
a - Rappel théorique	78
b- Détecteur de fuites basé sur la méthode FFT	80
CONCLUSION.....	82

CHAPITRE III

Détection des fuites des liquides par la transformée en ondelettes continues

INTRODUCTION.....	83
III.1. Transformée de Fourier discrète (TFD).....	83
III.2 Transformée de Fourier Rapide (FFT)	84
III.2.1 Analyse des signaux dans le domaine temps-fréquence (STFT)	85
III.3. Ondelettes (WAVELETS).....	91
III.3.1 Transformée en ondelettes.....	91
III.3.2. Transformée en ondelettes continue.....	92
III.4. Ondelette de ‘‘Haar’’	94
III.5. Résultats expérimentaux.....	95

III.5.1. Application de la FFT pour le signal avec et sans fuites.....	95
III.5.2. Organigramme de la méthode de détection de fuites proposée utilisant la CWT	97
III.5.3. Choix du critère discriminant.....	99
III.5.4. Binarisation d'image	101
CONCLUSION.....	103

CHAPITRE IV

Détection des fuites d'eau par la CWT a double seuils et avec une intégration binaire

INTRODUCTION.....	104
VI.1 Détection des fuites à base de la CWT	104
VI.2 Algorithme de la méthode de détection par la CWT	104
VI.3 Méthode de détection de fuite à base de la CWTDT	108
VI.3.1 Circuit hydraulique du système élaboré.....	108
VI.3.2 Organigramme de la méthode de détection de fuite CWTDT	110
VI.4 Description du détecteur de fuite d'eau CWTDT	112
VI.5 Algorithme de la méthode de détection proposée	114
VI.6 Analyse des résultats de fuite expérimentaux	116
CONCLUSION.....	130
CONCLUSION GENERALE	131

Liste des figures

Figure (I.1).Schéma général d'alimentation en eau potable.....	8
Figure (I.2) Prises d'eau.....	8
Figure (I.3). Captage des eaux souterraines.....	9
Figure (I.4) Types de réservoirs	11
Figure (I.5) Réseau ramifié <i>b</i> - Réseau maillé.....	12
Figure (I.6). Réseaux étagés.....	13
Figure (I.7). Apparence historique des différentes méthodes de détection des fuites.....	15
Figure (I.8). Diagramme schématique d'implémentation de la méthode auto-corrélation pour la détection des fuites.....	16
Figure (I.9). Estimation du temps de retard entre deux signaux utilisant la fonction d'auto-corrélation.....	22
Figure (I.10) Diagramme schématique d'implémentation de la méthode d'auto-corrélation pour la détection des fuites dans le domaine fréquentiel.....	23
Figure (I.11) (a, b) Détecteur SeCorr 300 Avec son corrélateur portable.....	26
Figure (I.12). Détecteur Sahara.....	27
Figure (I.13) Tête du détecteur avec la représentation visuelle.....	27
Figure (I.14). Méthode du gaz traceur.....	28
Figure (I.15). Méthode de la thermographie.....	29
Figure (I.16). Le détecteur PERMALOG.....	30
Figure (I.17) (a, b) La balle intelligente.....	32
Figure (I.18). Microphone au sol en mode contact.....	35
Figure (II.1) Signaux réfléchis par une fuite.....	44
Figure (II.2) Profils des signaux transitoires prélevés avec quatre tests.....	45
Figure(II.3) Signal transitoire typique.....	45
Figure (II.4) Les IMFs plus le résidu après application de l'EMD sur le signal.....	46
Figure (II.5) Mode opératoire de la méthode proposée.....	46
Figure (II.6) Résultats obtenus après application des différentes techniques.....	47

Figure (II.7) Diagramme des dispositifs utilisés dans l'expérience.....	48
Figure (II.8) Schéma bloc de la technique cepstrale.....	49
Figure (II.9) Signal temporel après fermeture / ouverture de l'électrovanne de la conduite...50	
Figure (II.10) Analyse cepstrale du réseau sans fuite.....	51
Figure (II.11) Analyse cepstrale du réseau avec une fuite de taille de 2mm localisée à une distance de 9.5m.....	51
Figure (II.12) Analyse cepstrale du réseau avec fuite de taille de 4mm localisée à une distance de 9.5m.....	52
Figure (II.13) Analyse cepstrale du réseau avec fuite de taille de 4mm située à une distance de 14m.....	52
Figure (II.14) Eléments de l'architecture du système de détection de fuite réalisé.....	53
Figure (II.15) Réservoir d'eau.....	54
Figure (II.16) Pompe à eau de type PENTAX.....	54
Figure (II.17) Robinet d'arrêt avec son raccordement.....	56
Figure (II.18) Collier.....	56
Figure (II.19) Support.....	57
Figure (II.20) Simulation d'une fuite d'eau sur la conduite.....	57
Figure (II.21) Prototype du circuit hydraulique global réalisé.....	57
Figure (II.22) Circuit hydraulique avec ses principaux périphériques.....	58
Figure (II.23) Schéma synoptique du circuit électrique.....	58
Figure (II.24) Principe d'un capteur.....	59
Figure (II.25) Analogie grandeur électrique et grandeur physique (mesurande).....	59
Figure (II.26) Schéma équivalent d'un capteur piézoélectrique.....	61
Figure (II.27) Convertisseur charge-tension.....	61
Figure (II.28) Capteur piézoélectrique KB12.....	62
Figure (II.29) Structure interne du capteur KB12.....	62
Figure (II.30) Système de détection de fuite de base.....	63
Figure (II.31) Etage de pré amplification.....	63

Figure (II.32) Signal issu après une pré-amplification.....	64
Figure (II.33) Schéma électrique de l'amplificateur inverseur.....	64
Figure (II.34) Signal vibratoire amplifié.....	65
Figure(II.35) Circuit de conditionnement.....	65
Figure (II.36) Etage d'adaptation (conditionnement).....	66
Figure (II.37) Schéma du CAN à base du microcontrôleur PIC16F876.....	66
Figure (II.38) Schéma électrique global de la carte d'acquisition.....	67
Figure (II.39) Programme de conversion.....	68
Figure (II.40) Organigramme de lecture et stockage des données dans le PC.....	69
Figure (II.41) Signal sans fuite.....	70
Figure (II.42) Signal avec fuite.....	70
Figure (II.43) Photo de la partie électrique de la deuxième variante.....	71
Figure (II.44) Signal temporel sans fuite et son FFT.....	72
Figure (II.45) Signal temporel avec fuite et son FFT.....	73
Figure (II.46) Schéma du montage expérimental.....	74
Figure (II.47) Signaux sans et avec fuite avec leurs spectres.....	74
Figure (II.48) Spectres d'amplitude des signaux vibratoires.....	75
Figure (II.49) Représentation d'un signal stationnaire.....	76
Figure (II.50) Représentation d'un signal stationnaire.....	76
Figure (II.51) Spectre d'amplitude $ \square(S) $ et spectre de phase $\theta(f)$	79
Figure (II.52) Organigramme de la méthode de détection de fuite proposée à base de la FFT.....	81
Figure (III.1) Relations de réciprocity temps-fréquence.....	84
Figure (III.3) Perte de localisation temporelle.....	85
Figure (III.11) Résultats de l'application de la FFT sur les segments $n=3$ et $n=13$	95
Figure (III.14) Organigramme de la méthode de détection par la CWT.....	98
Figure (III.17) Résultats obtenus après application de la CWT sur les segments $n = 37$, et $n=47$	100

Figure (III.18) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 3$	101
Figure (III.19) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 13$	101
Figure (III.20) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 20$	101
Figure (III.21) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 3$	102
Figure (III.22) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 13$	102
Figure (III.23) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 20$	102
Figure (VI.1) Organigramme de détection par la CWT.....	106
Figure (VI.2) La FFT des deux signaux.....	106
Figure (VI.3) Le spectrogramme de la CWT du signal avec fuite pour des différents diamètres de la fuite.....	107
Figure (VI.4) Régions du spectrogramme pour la prise de décision.....	107
Figure (VI.5) Circuit hydraulique du système de détection des fuites d'eau avec un seul capteur de vibration.....	109
Figure (VI.6) Organigramme de la méthode de détection CWTDT de fuite d'eau avec $k = 32$	111
Figure (VI.7) Représentation des signaux de vibration a une distance de 1.6m.....	118
Figure (VI.8) Représentation des signaux de vibration a la distance 1.6m.....	119
Figure (VI.9) Représentation temps/échelle du premier segment.....	120
Figure (VI.10) Résultats de binarisation du 1er segment.....	121
Figure (VI.11) Nombre des '1' de chaque segment.....	122
Figure (VI.12) Décisions partielles à chaque segment.....	123
Figure (VI.13) Performances de détection de fuites obtenues par l'algorithme CWTDT pour la pompe n°1.....	125
Figure (VI.14) Performances de détection de fuite obtenues par l'algorithme CWTDT pour la pompe n°2 pour $N = 4000$, $n = 250$, $L = 16$ et $k = 32$	127
Figure (VI.15) Performances de détection de fuite obtenues par la méthode basée sur la FFT pour les distances sans apprentissage.....	129

Liste des acronymes

Abréviation	Anglais	Français
FFT	Fast Fourier transform	Transformée de Fourier rapide
STFT	Short Time Fourier Transform	Transformée de Fourier à court terme
WT	Wavelet Transform	Transformée en ondelette
TDE	Time delay Estimation	Estimation du temps de retard
CWT	Continuous Wavelet Transform	Transformée en ondelette continue
CWTDT	Continuous Wavelet Transform and a Double Thresholding	Transformée en ondelette continue et double seuils
AEP	Drinking water supply	Alimentation En eau Potable
MDPE	Medium Density PolyEthylene	Moyenne Densité PolyEthylène
GPR	Ground Penetrating Radar	Géoradar
ITA	Reverse Transitional Analysis	Analyse Transitoire Inverse
DMA	District Meter Area	
SKADA		
EMD	Empirical Mode Decomposition	Décomposition empirique modale
IMF	Intrinseque Mode Function	Fonction intrinsèque modale
LPT	Line Printing Terminal	Terminal d'impression de ligne
MMF	Metra Mess-und Frequenztechnik Radebeul	Metra Mess-und Frequenztechnik Radebeul
CAN	Analog to digital converter ADC	Convertisseur analogique numérique
RMS	Root Mean Square	Valeur efficace
AE	Acoustic Emission	Emission acoustique
TFD	Discrete Fourier Transform	Transformée de FOURIER Discret

LEN	Length of segment	Longueur de Segment
SUM	sum White pixel	Somme de pixel blanche
SR	Succes rate	Taux de succes
FR	False alarm	Fausse alarme

INTRODUCTION GENERALE

L'eau potable est une ressource précieuse limitée et parfois rare. C'est l'une des éléments les plus vitaux pour l'industrie et pour toutes les formes de vie. Au cours des deux dernières décennies, la demande en eau potable a dépassé l'approvisionnement dans de nombreuses parties du monde [1, 2]. Selon une étude internationale 20-50% des quantités produites sont perdues en raison de fuites [3-5]. Ces fuites peuvent causer des pertes économiques importantes et de multiples contaminations d'eau [6,7]. Par conséquent, les gestionnaires de réseau cherchent toujours des systèmes de détection de fuites inoffensifs rapides et peu coûteux. Dans tous les domaines de sciences, à l'exception peut-être de certaines branches des mathématiques, la connaissance progresse par la conjonction d'une approche théorique ou de modélisation et d'une approche d'observation du sujet d'étude [8]. Dans le cadre de la seconde, un souci constant est de s'assurer que ce qui est observé est bien relatif à l'objet étudié. Plus généralement, dans toutes les situations d'observation se pose le problème d'extraction d'informations qui nous intéressent, c'est-à-dire celles qui sont pertinentes en vue d'une modélisation ou d'une application donnée. Dans la plupart des cas, les données expérimentales sont suffisamment simples pour que l'observateur puisse les extraire. Pour interpréter les informations recueillis d'un phénomène donné, on a besoin d'outils d'analyse de données.

Récemment, la détection de fuites d'eau est devenue une tâche cruciale dans le domaine du traitement du signal. La recherche rapide d'une fuite dans une conduite est largement prise en compte dans l'évaluation des performances des systèmes d'approvisionnement en eau. De nos jours, les détecteurs de fuites utilisent différents dispositifs et techniques. A titre d'exemple, nous pouvons utiliser des anciens détecteurs se basant sur une technique ancienne celle de l'auto-corrélation, ou de nouveaux détecteurs fonctionnant à base de caméras infrarouges qui nécessitent des logiciels modernes. Pour détecter et localiser les fuites avec une précision raisonnable, diverses méthodes d'analyse des signaux mesurés sont proposées dans la littérature ouverte [5,11]. Les méthodes conventionnelles basées sur la FFT (Fast Fourier Transform) et la STFT (Short Time Fourier Transform) sont largement utilisées dans la littérature de détection de fuites dans les réseaux de distribution d'eau [9-11]. Dans ce contexte, l'approche FFT est assez limitée, c'est-à-dire que sa sensibilité n'est pas seulement aléatoire mais dépend également de nombreux facteurs tels que la nature du fluide, la géométrie de défaut du pipeline et le bruit entaché [9]. L'algorithme STFT est relativement rapide et facile à implémenter.

Néanmoins en raison de l'utilisation d'une fenêtre fixe, sa performance de détection est assez limitée [10,11]. Alternativement, la méthode d'auto-corrélation est l'une des techniques les plus populaires utilisés dans la détection de fuites [12]. Ses principaux avantages sa simplicité de calcul, la facilité d'implémentation et l'utilisation efficace dans un environnement bruité. Cependant, cette technique présente certains inconvénients tels que l'utilisation de deux capteurs et sa sensibilité élevée aux signaux non stationnaires [12, 13]. L'algorithme d'auto-corrélation surpasse plusieurs méthodes telles que la technique du gaz traceur, la thermographie infrarouge et l'ultrason [20KHz-10MHz] [13]. Les chercheurs accordent une attention particulière aux systèmes de détection de fuites qui sont rapides, précis et moins chers. En outre, ces méthodes ne devraient pas interférer avec le fonctionnement normal du transport d'eau. Il est bien connu qu'une fuite dans une conduite sous pression produit des ondes vibratoires qui se propagent le long de celle-ci. Ces ondes vibratoires sont également produites par des fluctuations locales associées à d'autres phénomènes [14-16]. Les propriétés géométriques du système telles que la configuration du réseau, les composants hydrauliques et les caractéristiques des écoulements dans les conduites sont responsables de la propagation des ondes [17]. La performance de l'algorithme de détection et de localisation de fuites dépend de l'ensemble des mesures c'est-à-dire, des signaux de fuites souhaités avec leurs bruits qui sont disponibles dans le réseau [18]. Taghvaei et al [15] ont utilisé un seul capteur de pression pour obtenir le signal de fuite, puis ils ont appliqué, la transformée d'ondelettes orthogonale (WT) pour réduire l'effet du bruit présent dans le signal original. Pour obtenir les meilleures performances de détection et de localisation, la technique cepstrale est appliquée pour analyser cette fuite ôtée de bruit. Usuellement, les fuites peuvent être simplement localisées par l'estimation du temps de retard obtenu par la méthode de corrélation appliquée sur les signaux des deux capteurs. Récemment, selon la méthode de corrélation, Chuanhu et al. [18] ont proposé une autre méthode de WT pour obtenir une meilleure estimation du temps de retard (TDE). L'efficacité de la méthode WT a été bien étudiée en utilisant les signaux expérimentaux en particulier pour les longues distances avec un calcul rapide du TDE. Ahadi et al [14] ont proposé une méthode pour détecter les fuites dans un tuyau en plastique rempli d'eau. Dans cette approche, le signal de fuite dans le domaine temporel est d'abord capté par la surveillance des signaux émanant d'une émission acoustique. La STFT est appliquée sur un intervalle de temps relativement long afin de connaître le moment où la fuite c'est produite. Ensuite, la confirmation de la présence de la fuite est déterminée en comparant le signal résultant avec un seuil fixe calculé via la méthode WT. En raison de l'hyper sensibilité des capteurs acoustiques, les signaux reçus sont noyés dans un bruit de puissance élevée. Dans ce cas, la méthode WT diminuerait de

manière significative les performances de détection de fuite. Pour atténuer cette limitation, les capteurs de vibrations se révèlent plus utiles que les capteurs acoustiques. En outre, par rapport à la technique CWT, la méthode FFT ne donne pas un critère de discrimination efficace.

Les méthodes qui ont été présentées auparavant dans la littérature se basent généralement sur l'émission acoustique, qui signifie que lors de la création de la fuite un bruit se génère. Ce dernier représente notre signal utile. Autrement dit, la fuite génère une onde qui se propage à de longues distances de part et d'autre de l'orifice de la fuite. Cette onde est transmise par la paroi de la conduite. Ce bruit est dû aux fluctuations de l'écoulement turbulent obéissant à l'équation de Navier-Stokes. Ils appliquent l'auto-corrélation entre deux signaux décalés dans le temps issu des capteurs placés généralement sur les bouches d'incendies pour localiser l'endroit de la fuite. Malheureusement, dans la majorité des cas, on récupère non seulement le bruit de la fuite mais aussi le bruit du milieu dû au trafic routier et d'autres bruits associés aux activités quotidiennes. Par conséquent, dans la plupart des cas l'information pertinente est absente et qui mène toujours aux fausses détections, si on n'est pas des experts. Cela a poussé les chercheurs à penser à d'autres solutions plus efficaces. Parmi ses méthodes celles qui se basent sur l'analyse vibratoire. Le phénomène transitoire que provoque la fuite dès qu'il apparaît, va être analysé pour confirmer la présence de la fuite. Ensuite, plusieurs techniques ont été appliquées soit pour le débruitage (denoising) du signal ou pour la localisation de cette dernière. De ces deux idées citées, et dans d'autres aspects de recherches telles que la détection prématurée des défauts dans les engrenages des machines dont est inspiré notre système de détection expérimental comme première contribution.

Un très grand nombre de tests ont été effectués sur la conduite prototype en acier. Deux différents capteurs vibratoires sont utilisés à cet égard afin de confirmer l'efficacité de la méthode proposée. La distance entre la position de la fuite et le capteur est réglable en faisant déplacer le capteur par rapport à l'endroit de la fuite permettant ainsi d'analyser l'effet de la distance sur les signaux acquis.

On a pensé à détecter les vibrations mécaniques que provoquent la fuite dès qu'elle apparaît au lieu d'utiliser la méthode interne relative aux vibrations du liquide dans la conduite, déjà existante. L'idée nous a motivée à étudier l'influence de la pression de l'écoulement sur les vibrations générées, autrement dit sur la détection.

On a constaté durant nos recherches que dans la plupart des articles les composantes spectrales sont prises sur toute la fenêtre temporelle d'acquisition. Ce qui signifie malheureusement qu'ils supposent que ces signaux sont stationnaires. En plus, ils prennent l'amplitude maximale comme critère décisif de la présence de la fuite qui n'est pas toujours le cas. Cela nous a donné

une autre idée comme deuxième contribution afin d'améliorer les performances de la méthode de détection des fuites des réseaux de distribution basée sur la FFT déjà existante. La stationnarité est vérifiée expérimentalement sur des intervalles de temps bien définis. Sur ses fenêtres temporelles la FFT est appliquée et au lieu de prendre la valeur maximale du spectre on a opté à appliquer un seuillage trouvé expérimentalement sur tous ces segments. Une binarisation locale des segments est opérée avec ce seuil, nous conduisant à une décision finale de la présence ou l'absence de la fuite.

Compte tenu de ces performances pour le débruitage des signaux non stationnaires et non linéaires, les ondelettes sont très répandues dans le domaine de traitement de signal. Leur problème réside principalement au choix de l'ondelette mère.

En faisant un très grand nombre de test sur les types ondelettes existantes, et en ayant l'idée que l'ondelette de 'Haar' est la plus apte à ce genre de signaux [44], on s'est fixé sur l'utilisation de cette ondelette. On a pensé également à utiliser un seuillage simple (Hard threshold) basé sur la loi de Donoho [46] afin de filtrer notre signal.

En consultant des articles [47, 48] qui combinent entre la compression des images par ondelette et les types de codage, une nouvelle idée a jailli que nous l'avons appelée la binarisation. Cette dernière consiste à remplacer par des 'uns' et des 'zéros' les coefficients de la matrice obtenue après application de l'ondelette de 'Haar' et par utilisation d'un seuil (threshold) obtenu empiriquement durant la phase d'apprentissage. D'ailleurs, le caractère transitoire et la non-stationnarité des signaux vibratoires engendrent des fausses détections lorsqu'on utilise tous les échantillons du signal reçu. Une solution, classiquement adoptée pour remédier à ce problème, sert à effectuer localement des décisions binaires au niveau des segments du signal et puis la décision globale sera prise après application d'une règle de fusion. Cette idée est inspirée à partir des travaux effectués dans le domaine de la détection des cibles radar avec un centre de fusion de données [21, 42, 49, 50]. Dans ce contexte, selon [42] ont développé pour la première fois la théorie de la détection distribuée où les décisions partielles sont transmises à partir de chaque détecteur vers un centre de traitement de données. La décision globale est effectuée par la règle de fusion 'k' parmi 'n'. Les seuils de détection sont obtenus après calcul des expressions analytiques des probabilités de fausse alarme et de détection. Prenant le même système de détection, selon [21] ont appliqué les algorithmes génétiques pour résoudre le problème de détection des cibles noyées dans un environnement de clutter Weibull. En modifiant les milieux de détection, plusieurs formes de détection décentralisée ont été proposées [49, 50]. Pour des performances de détection de fuites améliorées, cet aspect de détection décentralisée est considéré dans la troisième contribution de notre travail en sommant

les uns "1" des segments utilisés et en appliquant la règle de fusion "K parmi L" pour prendre une décision finale si la fuite existe ou non. Pour cela, nous proposons un nouvel algorithme de détection de fuites basé sur la CWT de 'Haar'. L'algorithme analyse le signal de vibration non stationnaire émis à partir d'une conduite d'eau à travers lequel on décide s'il y a ou non une fuite dans l'adduction d'eau. Pour ce faire, le signal est d'abord divisé en L segments. Les décisions binaires partielles dans chaque segment sont alors obtenues par l'utilisation de deux seuils présélectionnés. La décision finale binaire est obtenue au moyen de la règle de fusion 'K parmi L'. Pour ce faire, le circuit prototype de la fuite est conçu et un certain nombre de positions de fuite souhaitables sur le pipeline d'eau sont d'abord créées pour atteindre les deux meilleurs seuils et la règle de fusion 'K parmi L'. Ensuite, à des fins de comparaison, les performances de la méthode CWTDT (Continuous Wavelet Transform (CWT) and a Double Thresholding) proposée sont évaluées expérimentalement par rapport aux méthodes existantes basées sur la FFT et la CWT dans des conditions de fonctionnements réels.

La thèse est axée autour de quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente la détection des fuites d'eau dans les canalisations. Nous montrons le principe actuel utilisé par l'AEP en Algérie et nous éclairci les avantages et les inconvénients de la méthode utilisée. L'état de l'art des méthodes utilisées dans d'autres pays tel que la France, le Canada et l'USA est abordé. Sans oublier l'état de l'art des autres méthodes publiées dans la littérature.

Dans le deuxième chapitre, nous traitons la détection des fuites d'eau à l'aide d'un seul signal vibratoire. L'idée d'utiliser un seul capteur vibratoire est divulguée ainsi que les chercheurs impliqués. La proposition d'un banc d'essai et la technique d'acquisition du signal vibratoire est traitée. La méthode de traitement du signal vibratoire à l'aide de la FFT est détaillée.

Le troisième chapitre est réservé à la détection des fuites d'eau par les ondelettes continues. Nous passerons brièvement sur les travaux des chercheurs qui ont abordés ce problème. Nous donnons une partie à l'ondelette de 'Haar' sans oublier d'expliquer la cause qui nous à pousser à utiliser ce type d'ondelette.

Le quatrième chapitre est dédié à la détection des fuites à base d'une nouvelle méthode proposée CWTDT. Nous présentons les tests qui ont été réalisés avec le système prototype réaliser. Pour la validation de la méthode proposée, une comparaison a été effectuée avec d'autres méthodes de détection telles que la FFT et la CWT.

Nous terminerons par une conclusion générale retraçant les apports du travail présenté, sans oublier de souligner les perspectives envisagées.

INTRODUCTION

De nos jours, l'industrie de l'eau a une pression croissante pour produire une eau d'une plus grande qualité à un coût plus faible. L'eau produite doit arriver aux consommateurs à travers des canalisations. Ces dernières s'endommagent par plusieurs causes provoquant des pertes indésirables réduisant le rendement des réseaux de distribution. Pendant longtemps, la détection des fuites constitue un problème crucial en raison de la diversité des applications. Les conséquences induites par l'apparition de fuites sont multiples et dangereuses car ils peuvent générer un dysfonctionnement local, ce qui peut conduire à la ruine de tout le système. Il est impératif de les détecter dès qu'elles apparaissent. Ainsi, la nécessité de détecter les fuites dans un premier temps est liée aux contraintes de sécurité et à la fiabilité de la protection de l'environnement. Le besoin est également de nature financière, car il est plus facile et moins coûteux de sécuriser une petite fissure que de commencer une procédure d'urgence pour arrêter une grande fuite. Les pertes sont évaluées en termes de coût d'entretien et de coût hors production. Il est judicieux dans ce chapitre de donner une idée sur les canalisations de façon générale et donner un panorama des différentes méthodes courantes fréquemment appliquées pour détecter une fuite. Il est dédié également à présenter quelques types de détecteurs qui sont utilisés actuellement en Algérie et dans d'autres pays tels que l'Angleterre, le Canada et les USA. En fin, nous éclaircissons les méthodes de détection publiées dans la littérature.

I.1 Présentation générale d'un système d'alimentation en eau potable

Un système d'alimentation en eau potable (AEP) est composé d'un ensemble d'infrastructures et d'installations nécessaires à satisfaire tous les besoins en eau potable d'une zone urbaine et industrielle [22].

Le système d'AEP comporte différents composants dont les constructions et les installations affectées au captage (1,3), au traitement (5), au transport (2, 6, 8), au stockage (7) et à la distribution de l'eau potable (9) chez les différents consommateurs (10) Figure (I.1).

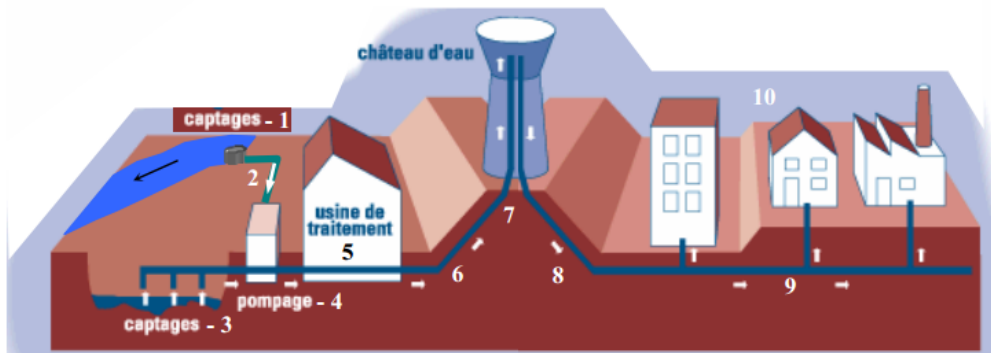


Figure (I.1). Schéma général d'alimentation en eau potable [22]

I.1.1 Captage d'eau

L'eau destinée à être traitée puis distribuée dans les réseaux publics peut être prélevée, soit par captage de sources, soit par des puits ou des forages dans de vastes nappes d'eau souterraine (3), soit par prise d'eau dans les rivières (1), dans des retenues, ou dans des lacs (eaux superficielles). Lorsque la source d'eau est une rivière, la prise d'eau ne doit être installée qu'après avoir pris connaissance du maximum d'informations relatives aux régimes d'écoulements des eaux et aux débits, y compris les débits de crue et les débits d'étiage.

Une prise d'eau de surface Figure (I.2) représente une structure permettant de capter l'eau naturelle (l'eau dite brute) du lac ou de la rivière dans lesquelles on a immergé, un dispositif de captage (pompe). On doit l'installer là où l'eau brute est de meilleure qualité possible [22].

La prise d'eau peut être effectuée :

- a* - Soit dans le fond du lit Figure (I.2)(a)
- b* - Soit sur la berge, à une profondeur convenable Figure (I.2) (b).

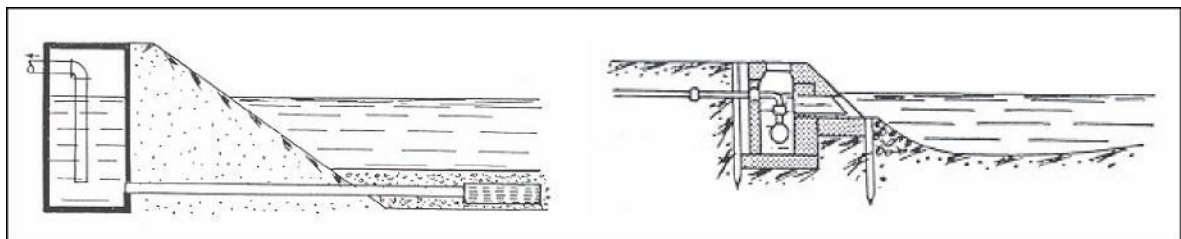


Figure (I.2) Prises d'eau [22]

(a) Dans le fond du lit, *(b)* Sur la berge

Les débits des cours d'eau permettent d'évaluer si la quantité d'eau dont on dispose est suffisante et de calculer le volume de l'éventuel bassin de régularisation des débits nécessaires après les études hydrologiques.

Une bonne connaissance des caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux brutes au cours des diverses périodes de l'année, permet alors de déterminer les traitements à prévoir à la station de purification ; il faut en outre connaître les niveaux de l'eau correspondant aux divers débits d'un cours d'eau afin de déterminer à quel niveau installer la prise d'eau.

En l'absence d'eau de surface en quantité suffisante et de qualité acceptable, on doit tenter d'utiliser les eaux souterraines Figure (I.3).

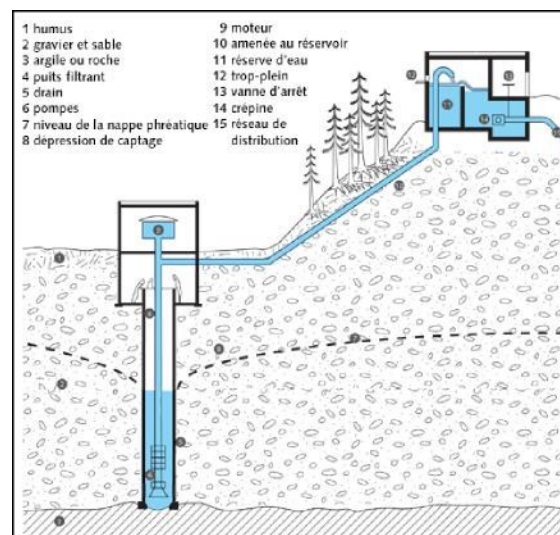


Figure (I.3). Captage des eaux souterraines [22]

Ces eaux sont captées soit :

- ✓ À leurs sources ;
- ✓ Au cœur même de la nappe ;
- ✓ Dans le gisement pour les eaux circulant en terrains fissurés. Parfois, on sera amené, à capter les eaux circulant à grande profondeur. Les procédés de captage varient selon la configuration du site.

I.1.2 Installations de pompage

L'emplacement de l'usine élévatoire dépend du type de prélèvement :

I.1.2.1 Prélèvement d'une source

Si le point de prélèvement d'eau est proche du réservoir, la station du pompage est implantée à proximité du point d'eau.

Si le point de prélèvement d'eau est éloigné du réservoir, une étude spécifique doit être menée, tenant compte de la topographie des lieux.

I.1.2.2 Prélèvement d'un puit

Dans le cas d'un puits unique, l'usine élévatoire est édifiée au-dessus de l'ouvrage.

I.1.2.3 Prélèvement d'eau de surface

L'usine élévatoire fait alors partie des installations générales de prélèvement et de traitement.

I.1.3 Conduites d'adduction d'eau

En fonction de la position de la source d'eau on distingue deux types d'adduction :

a- Adduction gravitaire

Dans une adduction gravitaire, le point de captage se situe à une altitude supérieure à celle du réservoir de desserte de l'agglomération.

b- Adduction par refoulement

Dans une adduction par refoulement, le captage se situe à un niveau inférieur de celui du réservoir d'accumulation. Les eaux du captage sont relevées par une station de pompage dans cette conduite de refoulement.

I.1.4 Usine de traitement

Selon la qualité de la source d'approvisionnement en eau, on doit soumettre l'eau à un traitement plus ou moins élaboré. Ainsi, par exemple, dans le cas d'une eau souterraine de bonne qualité, une désinfection seule peut produire une eau de consommation qui satisfait aux normes en vigueur ; en revanche, une eau de lac ou de rivière exige un traitement plus complet.

I.1.5 Réservoirs

Pour pouvoir satisfaire à tout moment, la demande en eau potable des abonnés, on crée des réservoirs qui permettent de gérer les points de consommation.

Lors de la conception des réservoirs, on est amené à faire plusieurs choix concernant le type de réservoir, son emplacement, sa capacité, son altitude et son équipement.

On peut classer les types de réservoirs selon :

- La technique de construction (métal, maçonnerie, béton armé ou précontraint) ;

- L'intégration au site, Figure (I.4), (a) surélevés, (b) enterrés ou semi-enterré, etc.) ;
- Les considérations esthétiques.

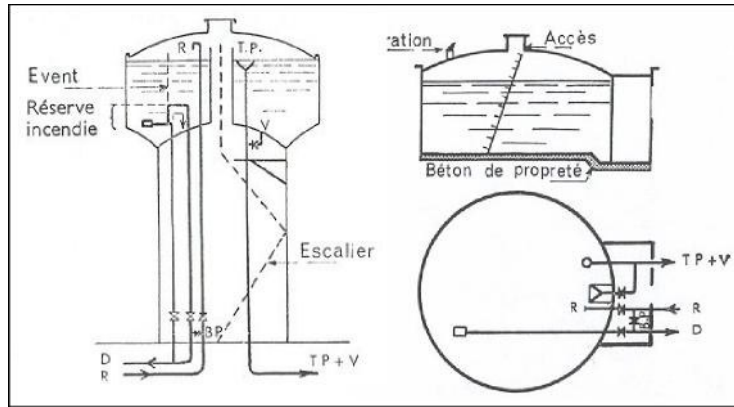


Figure (I.4) Types de réservoir [22] a) surélevé, b) enterré ou semi-enterré

I.1.6 Réseau de distribution d'eau potable

A partir du ou des réservoirs, l'eau est distribuée dans un réseau de canalisation sur lesquelles les branchements seront piqués en vue de l'alimentation des abonnés.

Pour que les performances d'un réseau de distribution soient satisfaisantes, ces réseaux doivent être en mesure de fournir, à des pressions compatibles avec les hauteurs des immeubles, les débits et les volumes d'eau requis, et ce en tout temps lors de la durée de sa vie utile. C'est pourquoi lors de la conception d'un réseau, il est important d'identifier et prendre en compte les situations les plus critiques afin que le réseau dans de telles situations se comporte de façon satisfaisante.

En fonction de la situation urbaine et la densité de population dans le quartier, on distingue trois types de conduite :

I.1.6.1 Artères

Ils représentent les conduites qui partent soit du réservoir soit de la station de pompage (SP) afin de distribuer l'eau dans tous les points du réseau par le plus court chemin. Les artères doivent être posées de telle façon qu'elles puissent alimenter le secteur et disposer si possible des diamètres économiques et d'obtenir des pressions uniformément distribuées.

I.1.6.2 Conduites de service

Ces types de conduites ont des diamètres variants entre 150-250 mm. Ils sont alimentés par des artères et distribuent l'eau vers les branchements.

I.1.6.3 Branchements

C'est la partie de l'installation située entre les conduites de service et le compteur ou robinet vanne d'arrêt lorsque le branchement ne comporte pas de compteur (service incendie notamment). Le diamètre du branchement est déterminé en fonction des débits de pointe et des consommations journalières prévisibles.

Une canalisation se compose d'éléments droits (tuyaux), d'éléments de raccords (raccords) et de pièces spéciales (coudes, cônes, tés etc...).

La construction d'un réseau de distribution d'eau n'est pas uniforme d'une agglomération à une autre et dépend des particularités de celle-ci.

Les réseaux peuvent être classés comme suit :

- ✓ Les réseaux ramifiés
- ✓ Les réseaux maillés
- ✓ Les réseaux étagés
- ✓ Les réseaux à alimentations distinctes

Le réseau ramifié, dans lequel les conduites ne comportent aucune alimentation en retour, présente l'avantage d'être économique, mais il manque de sécurité et de souplesse en cas de rupture : Un accident sur la conduite principale prive d'eau tous les abonnés en aval, Figure (I.5) (position a).

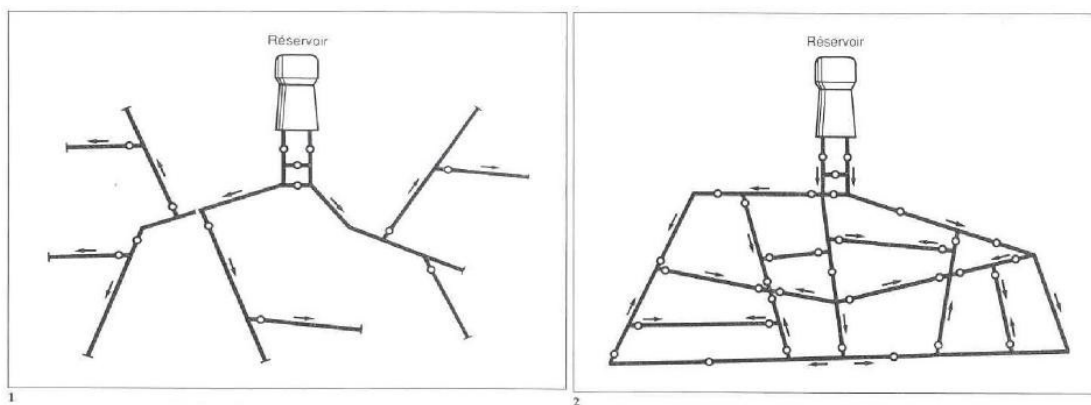


Figure (I.5) : a - Réseau ramifié b - Réseau maillé

Le réseau maillé permet, au contraire, une alimentation en retour figure (I.5) (position b), pour pallier à l'inconvénient signalé. Une simple manœuvre de robinets permet d'isoler le tronçon accidenté et de poursuivre néanmoins l'alimentation des abonnés en aval. Il est, bien entendu, plus coûteux à l'installation, mais, en raison de la sécurité qu'il procure, il est toujours préféré par rapport au réseau ramifié.

Le plus souvent, un réseau est composé d'une partie maillée et une partie ramifiée : les centres des villes et les quartiers à forte densité de population sont ainsi desservis par les parties maillées, alors que les quartiers périphériques sont alimentés par les parties ramifiées.

Avec le réseau étagé Figure (I.6), il est possible, de constituer des réseaux indépendants avec une pression limitée autour de 40 m d'eau.

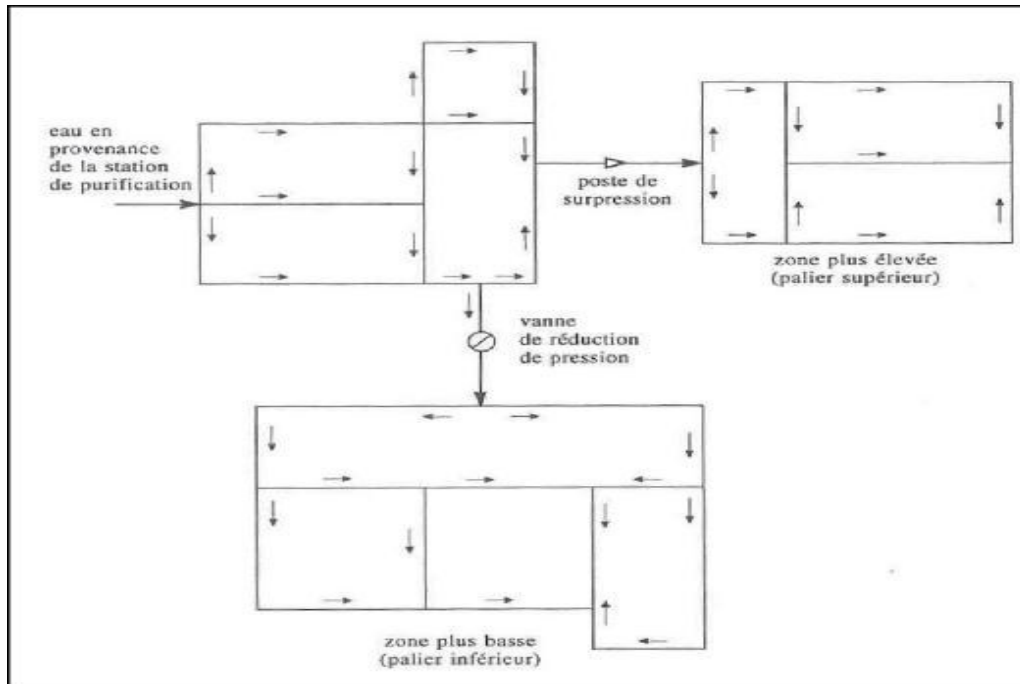
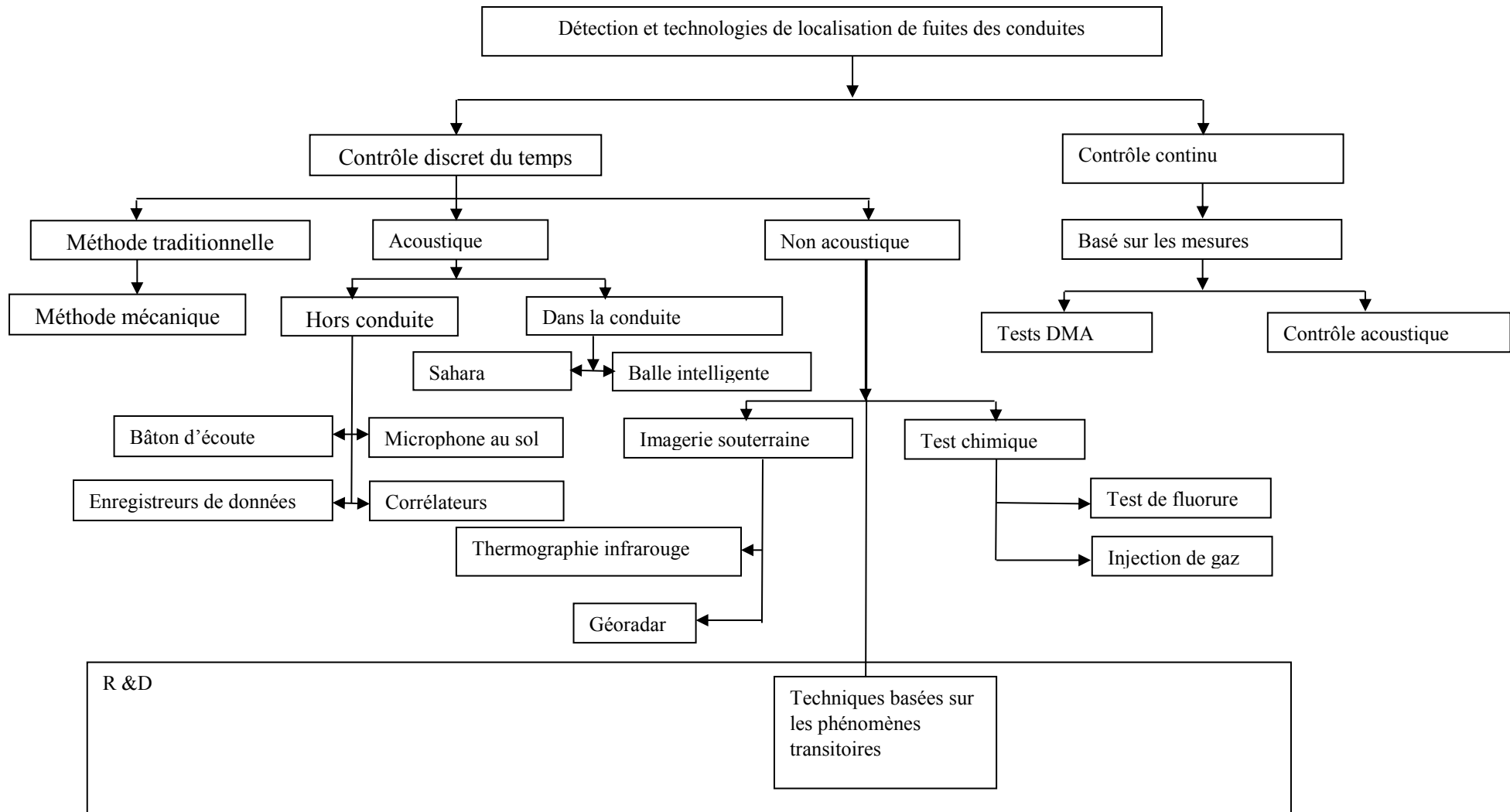


Figure (I.6). Réseaux étagés

Les réseaux à alimentations distinctes distribuent, d'une part, l'eau potable destinée à tous les besoins domestiques, et d'autre part, l'eau non potable est réservée aux usages industriels et aux lavage et arrosage des rues et plantations. Ces réseaux ne se justifient que dans les installations extrêmement importantes. Pour que l'eau soit distribuée en quantité suffisante et à une pression appropriée conformément aux exigences locales, on peut l'acheminer soit par gravité, à l'aide d'un ou plusieurs postes de surpression couplés à un ou plusieurs réservoirs soit à l'aide de postes de surpression seulement.

Avant d'approfondir nos connaissances dans la détection et les types de détecteurs qui sont utilisés à travers le monde, il est judicieux de regrouper toutes les méthodes de détection et de localisation dans le tableau (I.1).

Tableau I.1 : Classification des techniques de détection et de localisation des fuites [23].



L'apparence historique des méthodologies de fuites adaptées de [24] est donnée dans la Figure (I.7).



Figure (I.7). Apparence historique des différentes méthodes de détection des fuites [24].

Historiquement, la détection des fuites était basée sur l'écoute qui a été utilisée depuis les années 1850. Cette méthode impliquait l'utilisation d'une tige d'écoute en bois qui a été placée sur tous les points de contact accessibles avec le système de distribution et les raccords tels que les vannes principales ou les bouches d'incendie. De telles tiges d'écoute sont des émetteurs de sons simples, qui détectent le bruit induit par la fuite d'eau des conduites pressurisées, semblable à un médecin écoutant un battement de cœur à travers un stéthoscope. Lors de la détection d'un bruit, les fuites soupçonnées sont repérées par l'écoute sur la surface du sol directement au-dessus de la conduite à des petits intervalles le long de celle-ci. L'utilisation de méthodes traditionnelles telles que le dispositif d'écoute est généralement simple et peu coûteux. Toutefois, le processus prend beaucoup de temps et son efficacité est discutable, car les inspecteurs de fuite perdent souvent du temps à chercher des fuites au mauvais endroit. En outre, il est également inapproprié pour les conduites non métalliques tels que l'amiante-ciment, car le son ne se propage pas le long d'eux.

I.2 Principe actuel utilisé par les AEPs en Algérie

Avant de donner une idée sur les types de détecteurs utilisés en Algérie, il est préférable d'expliquer le principe de fonctionnement sur lequel se basent ces détecteurs pour leurs fonctionnements.

Il a été trouvé que la corrélation est la technique la plus efficace pour détecter et localiser les fuites dans les conduites de distribution d'eau. Il s'avère très efficace pour les conduites métalliques. Cependant, le même n'est pas vrai pour les conduites **MDPE** (conduite de **Moyenne Densité PolyEthylène**) où l'atténuation des signaux de fuite avec la distance est très élevée en raison de la rigidité élevée des conduites MDPE par rapport aux conduites métalliques telles que le fer ductile.

Une fuite dans une conduite d'eau produit du bruit qui dépend principalement de la pression de l'eau, les caractéristiques des conduites et la taille et la forme des fuites. Ce bruit, communément appelé signaux de fuite, se compose à la fois de bruit acoustique et de vibrations mécaniques. Ces signaux de fuite se déplacent à la fois à travers la paroi de la conduite et dans la colonne d'eau à l'intérieur de la conduite. Les signaux de fuite acoustique peuvent être mesurés à l'aide des capteurs invasifs hydrophones, tandis que les accéléromètres (vibrations) non invasifs peuvent être utilisés pour mesurer les signaux de fuite vibratoires.

Pour localiser une ou plusieurs fuites dans les conduites de distribution d'eau, le processus de corrélation est appliqué. Il repose sur l'estimation de la vitesse de propagation des signaux de fuite dans l'eau ou dans la conduite et le temps de retard entre les deux signaux mesurés d'une fuite. La vitesse de propagation est normalement estimée soit en utilisant des méthodes théoriques basées sur la connaissance des caractéristiques des conduites, telle que le diamètre interne et externe de la conduite, soit de la mesurer directement sur site en utilisant une fuite simulée. Le temps de retard est estimé à l'aide de fonctions de corrélation. Différents types de fonctions de corrélation peuvent être utilisées pour l'estimation du temps de retard entre les signaux de fuite mesurés. Nous traitons également les paramètres sur lesquels les fonctions de corrélation dépendent et les problèmes associés à leur utilisation efficace dans les conduites.

I.2.1 Méthode d'auto-corrélation pour la détection des fuites

Le principe de base de la détection et de localisation des fuites dans les réseaux de distribution d'eau à l'aide de la méthode d'auto corrélation est représenté par la Figure (I.8).

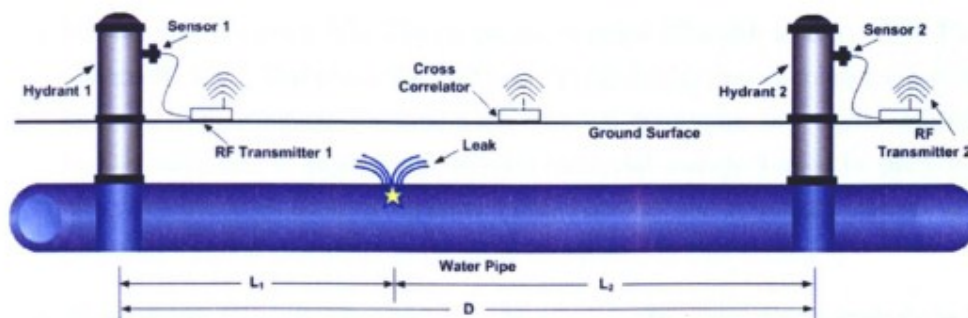


Figure (I.8). Diagramme schématisé d'implémentation de la méthode auto-corrélation pour la détection des fuites [48].

Il est basé sur l'estimation du temps de retard entre les signaux de fuite mesurés sur deux points d'accès connus (tels que les vannes et les bouches d'incendie) de part et d'autre d'une fuite. Les capteurs accélérométriques non invasifs sont utilisés pour mesurer les signaux vibratoires de fuite tandis que les capteurs hydrophones invasifs sont utilisés pour mesurer les signaux acoustiques de fuite à l'intérieur des conduites. Les signaux obtenus à partir de ces capteurs sont transmis sans fil à une unité de traitement (corrélateur ou PC). L'unité de traitement calcule ensuite la fonction d'auto-corrélation entre ces signaux afin de déterminer le temps de retard entre eux.

En pratique, les fuites peuvent ne pas toujours être présentes entre deux points d'accès. Si une fuite apparaît entre les deux points de mesure, alors la fonction d'auto-corrélation aura un pic distinct [23], [25], [26], [27]. Le décalage temporel (τ_{shift}) correspondant à ce pic donnera une différence de temps d'arrivée entre les deux signaux mesurés. Pour calculer l'endroit de la fuite en utilisant le processus de corrélation, on suppose que les signaux mesurés aux positions des capteurs 1 et 2 sont $x_1(t)$ et $x_2(t)$ respectivement, à partir des signaux de source de fuite $l_s(t)$. Si le temps pris par ces signaux de fuite pour se déplacer de la position de fuite aux positions de capteur 1 et 2 est t_1 et t_2 , le retard entre les signaux mesurés $x_1(t)$ et $x_2(t)$ est lié à la position de fuite par

$$Temps = \frac{Distance}{Vitesse} \quad \text{Où} \quad \tau_{shift} = t_2 - t_1 = \frac{L_2 - L_1}{V} \quad (1.1)$$

Où V est la vitesse de propagation des signaux de fuite dans la conduite, et L_1 et L_2 sont les positions respectives des capteurs 1 et 2 par rapport à la fuite. Si la distance totale ($L_1 + L_2$) entre les deux positions des capteurs est D , la position de fuite par rapport à la position de l'un des capteurs (capteur 1 comme exemple) est donnée par :

$$L_1 = \frac{D - V \cdot \tau_{shift}}{2} \quad (1.2)$$

A partir de l'équation (I.2), la précision avec laquelle la position (L_1) de la fuite peut être calculée en utilisant la méthode d'auto-corrélation, dépend de trois facteurs :

✓ **Distance (D) entre la position des capteurs**

Cela peut être mesuré sur place en utilisant divers instruments tels que la mesure par une roulette ou par le mètre à ruban. Cependant, il peut être difficile de mesurer avec précision dans certaines situations, comme en présence de boucles inattendues ou de coudes dans des conduites enfouies. Ces circonstances peuvent affecter de façon significative la précision avec

laquelle le corrélateur localise les fuites. Par conséquent, une longueur plus courte de tuyau avec moins de probabilité de boucles est toujours préférée pour effectuer la corrélation.

✓ Vitesse de propagation (V)

La vitesse de propagation [28] ; des signaux de fuite dans la conduite est un facteur déterminant pour le calcul de la position de la fuite en utilisant le processus de corrélation. Elle est fortement influencée par les variations des caractéristiques des conduites (matériau et taille) et la présence de discontinuités telles que les joints réparés entre les deux positions de mesure du signal.

Théoriquement, la vitesse de propagation de l'onde due à une perturbation peut être obtenue de l'équation ci-dessous :

$$V = \sqrt{\frac{1}{\rho \left[\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} \phi \right]}} \quad (1.3)$$

Où

V : La vitesse de propagation en [m/s]

ρ : Densité du fluide en [kg/m³] (par exemple, l'eau à 20 °C est $\rho = 998,2$ kg/m³)

K : Module d'élasticité du liquide en [N/m²] (l'eau à 20 °C, $K = 2,2 \cdot 10^9$ Pa)

E : Module de Young du matériau de la conduite [N/m²]

D : Diamètre intérieur de la conduite [m]

e : Epaisseur de la conduite [m]

ϕ : Facteur de retenue dépendant du rapport Poisson

Le module d'élasticité K d'une substance est une mesure de l'incompressibilité / résistance à la compressibilité de cette substance. Il est défini comme le rapport de l'augmentation de la pression infinitésimale à la diminution relative résultante du volume. Il peut être définie également comme étant la constante qui relie la contrainte au taux de déformation d'un matériau isotrope soumis à une compression isostatique.

$$K = -V \frac{dP}{dV} \quad K > 0 \quad (1.4)$$

Selon la formule de Newton-Laplace, la vitesse de propagation est déterminée par le module d'élasticité K dans un fluide et sa densité ρ

$$V = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1.5)$$

La propagation d'onde dans une conduite d'eau se produit en raison d'une perturbation dans le flux à l'intérieur de la canalisation. La perturbation peut généralement être définie comme tout

ce qui influence, empêche, maintient ou inhibe l'onde à l'intérieur du fluide. Cette perturbation est transférée d'une molécule à la molécule suivante et provoque une onde dans le milieu. Par conséquent, la densité du fluide change instantanément, ce qui produit alors des ondes qui se propagent à travers le système.

Tableau I.2. La valeur de E pour différents types de matériaux [30]

Matériaux	E (Pa)
Acier	$(1,87 \div 2,16).10^{11}$
Fonte	$(0,88 \div 1,47).10^{11}$
Plomb	$(0,69 \div 0,71).10^{11}$
Béton armé	$(2,31 \div 3,2).10^{10}$
Béton précontraint	$2,08.10^{10}$
Amiante – ciment	$1,89.10^{10}$
PVC	$(2,6 \div 4,16).10^9$
Polyéthylène	$(1,39 \div 2,08).10^9$

Dans les réseaux de distribution d'eau réels, la vitesse réelle de l'onde peut différer de la valeur théorique en raison de plusieurs facteurs tels que l'incertitude dans l'information sur les actifs des conduites enterrés depuis plusieurs années.

Temps de retard (τ_{schift}) :

Le temps de retard est estimé par corrélation des signaux mesurés par les deux capteurs. La qualité de cette estimation dépend de la netteté, de la clarté et de la variance du temps de retard, qui dépend en outre de plusieurs facteurs tels que le rapport signal sur bruit (SNR) et le traitement des signaux obtenus.

I.2.2 Estimation du temps de retard par auto-corrélation

Les signaux de fuite produits en position de fuite se déplacent de part et d'autre le long du pipeline Figure (I.8). Ces signaux s'atténuent le long du pipeline dans les deux sens. Pendant la mesure des signaux de fuite, les capteurs captent aussi le bruit. Ainsi, les signaux mesurés peuvent être représentés par :

$$x_1(t) = s_1(t) + n_1(t) \quad (1.6)$$

$$x_2(t) = s_2(t) + n_2(t) \quad (1.7)$$

Où $s_1(t)$ et $s_2(t)$ sont les signaux de fuite atténués, et $n_1(t)$ et $n_2(t)$ représentent les bruits aux positions des capteurs 1 et 2 respectivement. Ce bruit peut être dû à plusieurs sources telles que le trafic routier, machines en marche, pompes à eau, l'utilisation des clients et les mouvements humains. Le bruit ne peut pas être complètement supprimé ; Par conséquent, pour corrélérer les signaux mesurés $x_1(t)$ et $x_2(t)$, certaines des hypothèses sont retenues :

- ✓ Les signaux $s_1(t)$, $s_2(t)$, $n_1(t)$ et $n_2(t)$ sont stationnaires (ergodiques), bande limitée et de moyenne nulle.
- ✓ Les signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ sont non corrélés (indépendants) avec les signaux de bruit $n_1(t)$ et $n_2(t)$.
- ✓ Les signaux de bruit $n_1(t)$ et $n_2(t)$ sont non corrélés l'un de l'autre.
- ✓ La durée de la corrélation des signaux $s_1(t)$, $s_2(t)$, $n_1(t)$ et $n_2(t)$ est très faible par rapport au temps d'observation (T) autrement dit T représente la fenêtre temporelle d'acquisition.

En outre, les signaux mesurés $x_1(t)$ et $x_2(t)$, peuvent être des signaux analogiques continus ou des signaux numériques discrets en fonction du choix des capteurs et du système d'acquisition de données utilisé. Par conséquent, l'auto-corrélation peut être effectuée dans deux domaines :

- Auto-corrélation pour des signaux continus
- Auto-corrélation pour des signaux discrets

I.2.2 .1 Corrélation des signaux de fuite continue dans le domaine temporel

Dans ce cas, outre les hypothèses précédentes, on suppose que les signaux de fuite mesurés $x_1(t)$ et $x_2(t)$, sont des signaux aléatoires continus. La fonction d'auto-corrélation pour ces signaux est donnée par

$$R_{x_1x_2} = E[x_1(t)x_2(t + \tau)] \quad (1.8)$$

Où τ est le décalage temporel, qui, lorsqu'il maximise la fonction d'auto-corrélation fournit une estimation de la valeur du décalage temporel (τ_{shift}) entre les deux signaux mesurés, et $E[*]$ désigne l'opérateur espérance. En pratique, les deux signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$, sont mesurés pour un intervalle de temps fini, $0 \leq t \leq T$, Ainsi, l'estimateur d'auto-corrélation biaisé est donné par

$$\hat{R}_{x_1x_2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T-\tau} x_1(t)x_2(t + \tau) dt \quad \tau > 0 \quad (1.9)$$

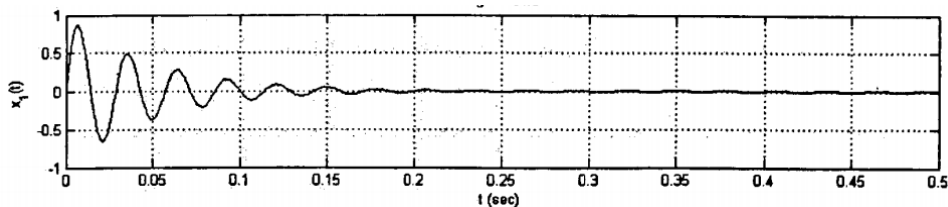
$$\hat{R}x_1x_2(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\tau}^T x_1(t)x_2(t + \tau) dt \quad \tau < 0 \quad (1.10)$$

Où $\frac{1}{T}$ désigne le facteur d'échelle de normalisation. A partir de (1.6) et (1.7), il est clair que l'estimateur de corrélation $\hat{R}x_1x_2(\tau)$ dépend du produit des deux amplitudes des deux signaux mesurés. En pratique, en raison du bruit (équations 1.3 et 1.4) et de l'atténuation, les signaux mesurés peuvent varier significativement avec le temps, ce qui entraîne des fluctuations de la valeur des estimateurs de corrélation. Ces fluctuations peuvent parfois être très importantes, ce qui rend difficile l'identification du pic de corrélation responsable pour l'identification de la fuite. Par conséquent, il est avantageux d'exprimer la fonction d'auto-corrélation par des fonctions normalisées (sans dimension) c.-à-d. à l'échelle de -1 à 1. Le coefficient de corrélation $\rho_{x_1x_2}(\tau)$ sous sa forme normalisée va être donné par

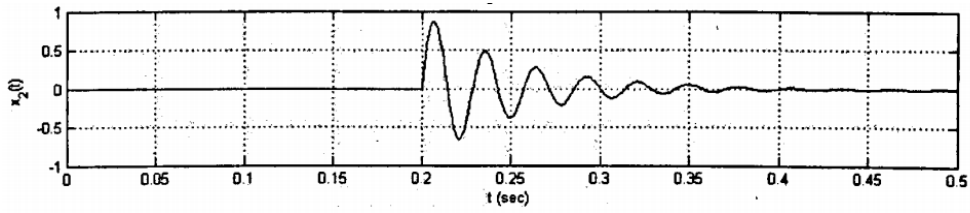
$$\rho_{x_1x_2}(\tau) = \frac{\hat{R}x_1x_2(\tau)}{\sqrt{\hat{R}x_1x_1(0) \hat{R}x_2x_2(0)}} \quad (1.11)$$

Où $\hat{R}x_1x_1(0)$ et $\hat{R}x_2x_2(0)$ sont les valeurs des fonctions d'auto-corrélation $\hat{R}x_1x_1(\tau)$ et $\hat{R}x_2x_2(\tau)$ pour $\tau=0$.

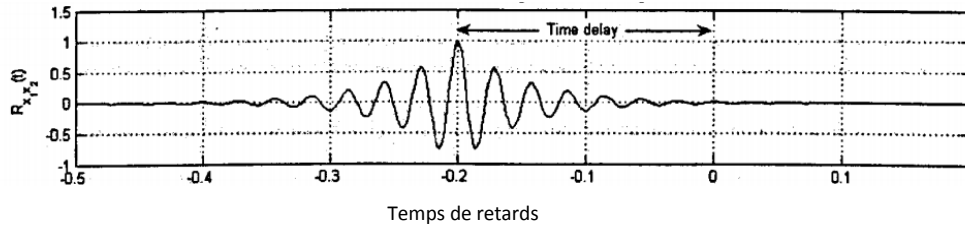
Un exemple d'estimateur de corrélation biaisé est présenté à la Figure (I.9). La Figure (I.9) (a) montre un signal simulé, tandis que la Figure (I.9) (b) montre le même signal retardé de 0.2 seconde. La corrélation des deux signaux est illustrée par la Figure (I.9) (c). Un pic de corrélation net est obtenu et le décalage de 0.2 seconde de ce pic à partir de l'axe zéro représente le retard.



(a)



(b)



(c)

Figure (I.9). Estimation du temps de retard entre deux signaux utilisant la fonction d'auto-corrélation [23]

I.2.2.2 Corrélation des signaux continus de fuite dans le domaine fréquentiel

La fonction de corrélation croisée peut également être calculée dans le domaine fréquentiel en utilisant la Transformée de Fourier (TF). Une procédure de corrélation des signaux dans le domaine fréquentiel est illustrée à la Figure (I.10) [12].

Les TFs $X_1(f)$ et $X_2(f)$ des signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$ sont données par

$$X_b(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_b(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (1.12)$$

Où $b = 1, 2$ et la transformée inverse de Fourier est donnée par

$$x_b(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X_b(f) e^{-j2\pi f t} df \quad (1.13)$$

En remplaçant la valeur de $x_2(t)$, en utilisant $b = 2$, dans la fonction de corrélation (1.6) on obtient

$$\hat{R}x_1x_2(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T-\tau} x_1(t) \int_{-\infty}^{+\infty} X_2(f) e^{j2\pi f(t+\tau)} df dt \quad (1.14)$$

Cela peut être arrangé pour donner

$$\hat{R}x_1x_2(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} X_2(f) \int_0^{T-\tau} x_1(t) e^{-j2\pi(-f)t} e^{j2\pi f \tau} dt df \quad (1.15)$$

Or

$$\hat{R}x_1x_2(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} X_2(f) X_1(-f) e^{j2\pi f \tau} df \quad (1.16)$$

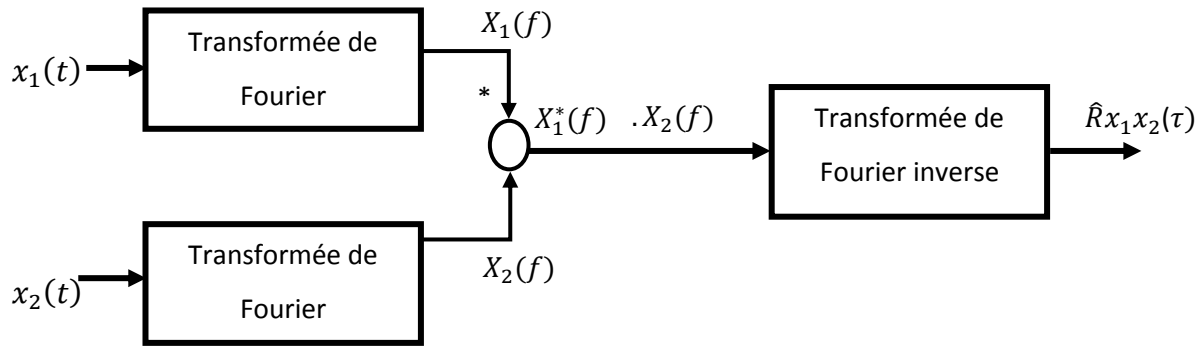


Figure (I.10) Diagramme schématique d'implémentation de la méthode d'auto-corrélation pour la détection des fuites dans le domaine fréquentiel [12], [23].

Il est à noter que

$$X_1(-f) = |X_1(f)|e^{-j2\pi ft} = X_1^*(f) \quad (1.17)$$

En substituant (1.14) dans (1.13) l'équation devient

$$\hat{R}x_1x_2(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} X_1^*(f) X_2(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (1.18)$$

Où * désigne le conjugué complexe de l'équation (1.15). La corrélation de deux signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$ dans le domaine fréquentiel est la TF inverse du produit du conjugué de la TF du signal $x_1(t)$ et la TF du signal $x_2(t)$ comme représenté sur la Figure (I.10). L'avantage d'effectuer la corrélation dans le domaine fréquentiel est double :

- ❖ Premièrement, il implique moins de calculs car il ne nécessite pas le décalage horaire habituel et les multiplications normalement requises pour calculer la corrélation dans le domaine temporel.
- ❖ Deuxièmement, il ne nécessite pas de filtrage des signaux de fuite $x_1(t)$ et $x_2(t)$ avant la corrélation. Cependant, l'inconvénient est que pour une fréquence d'échantillonnage fixe (f_s), le temps de retard maximum qui peut être mesuré dépend de la longueur (N) de la TF, i.e. τ_{max} est proportionnelle à $\frac{N}{f_s}$

En pratique, la TF est calculée en utilisant la (FFT) pour une longueur de 1024 ou 2048 valeurs discrètes. Si elle est calculée pour des longueurs plus longues, alors sa complexité et le nombre de calculs augmente de façon spectaculaire. Ainsi, il n'est pas adapté pour mesurer de grandes valeurs de temps de retard ou lorsque la différence entre L_1 et L_2 est grande.

I.2.2.3 Fonction d'inter-corrélation pour les signaux discrets de fuite

Dans certains corrélateurs (par exemple ceux basés sur un PC), les signaux de fuite obtenus à partir des capteurs sont numérisés et la corrélation est effectuée directement sur ces signaux numériques discrets. Une procédure de calcul de la fonction d'inter-corrélation de signaux numériques discrets est illustrée ci-dessous. Si les deux signaux discrets de fuite de durée finie N sont $x_1(b)$ et $x_2(b)$ avec $b = 0, 1, \dots, N-1$, alors, la fonction d'inter-corrélation biaisée est donnée par :

$$\hat{R}x_1x_2(m) = \frac{1}{N} \sum_{b=0}^{N-1-m} x_1(b) \cdot x_2(b+m) \quad (1.19)$$

$$\hat{R}x_1x_2(-m) = \frac{1}{N} \sum_{b=0}^{N-1-m} x_2(b) \cdot x_1(b+m), \quad (m > 0; b = 0, 1 \dots N-1) \quad (1.20)$$

Les équations 1.16 et 1.17 sont très fastidieuses à résoudre en raison de nombreux décalages temporels m , de multiplications et d'additions. Cependant, ceci peut être facile en effectuant une corrélation dans le domaine de fréquence en utilisant la FFT et la convolution au détriment d'une certaine perte de précision. Le procédé pour estimer des fonctions de corrélation croisée pour des signaux numériques dans le domaine fréquentiel est similaire à celui représenté sur la Figure (1.10) pour les signaux de fuite continue. Dans ce cas, $x_1(t)$ et $x_2(t)$ sont remplacés par $x_1(b)$ et $x_2(b)$ et leurs FFTs sont notées par $X_1(f)$ et $X_2(f)$ respectivement. La fonction d'inter-corrélation $\hat{R}x_1x_2(m)$ est calculée en prenant la FFT inverse de $X_1^*(f) \cdot X_2(f)$ et mise à l'échelle de manière appropriée, où $X_1^*(f)$ désigne le conjugué complexe de la FFT de $x_1(b)$ et $X_2(f)$ est la FFT de $x_2(b)$. Cependant, il a également le même problème que sa complexité et le nombre de calculs augmente si N est élevée pour mesurer des temps de retards importants entre des signaux de fuite.

I.2.3 Paramètres affectant la corrélation des signaux de fuite

La méthode de corrélation pour la détection des fuites dépend de trois paramètres : la distance entre les deux capteurs, l'estimation du temps de retard entre les signaux de fuite et la vitesse de propagation des signaux de fuite dans la conduite. En pratique, la distance entre les positions des capteurs peut être facilement mesurée pour les longueurs droites de la conduite. Les boucles ou les coudes inattendus peuvent entraîner une diminution de la précision avec laquelle la longueur peut être mesurée. Cependant, comme l'atténuation des signaux de fuite dans la conduite MDPE est très élevée, par conséquent, la corrélation est habituellement effectuée sur des longueurs plus courtes $< 50\text{m}$ et dans ces circonstances, les longueurs supplémentaires de coudes et de boucles inattendus peuvent ne pas être significatives. Cependant, la précision avec

laquelle les deux autres paramètres (temps de propagation et vitesse de propagation) sont déterminés dépend de plusieurs autres paramètres.

✓ **Paramètres affectant l'estimation du temps de retard**

Les paramètres affectant le temps de retard sont regroupés dans le Tableau (I.3)

Tableau I.3 Paramètres affectant la corrélation des signaux de fuite

Amplitude	Domaine fréquentiel	Bruit (dB)	Atténuation (dB/m)	Facteur de pondération	Temps d'observation
$x_1(t), x_2(t)$	$X_1(f), X_2(f)$	n_1, n_2	α	$\Psi_G(w)$	T

✓ **Les Paramètres affectant la vitesse de propagation des signaux de fuite**

Généralement, elle est calculée en utilisant une formule théorique ce qui nécessite une connaissance des caractéristiques de la conduite. Il peut également être calculé sur place en utilisant une fuite simulée connue.

Ils ya d'autres paramètres qui affectent indirectement le pic de corrélation tels que la sensibilité, la gamme de fréquence des capteurs et la pression du fluide. Il est préférable d'avoir un pic de corrélation net avec une faible variance.

Remarque : En raison du bruit et de la durée de mesure finie, il est difficile d'obtenir un pic de corrélation net dans la pratique.

Les détecteurs utilisés en Algérie reposent sur la corrélation pour la détection des fuites. Leurs avantages c'est qu'ils ne sont pas trop chers, et ils peuvent être portés à la main. Leurs inconvénients c'est leur sensibilité aux bruits extérieurs ce qui rend difficile la confirmation de la fuite. En plus, de cela il faut se déplacer au lieu suspect. Parmi les détecteurs utilisés, on trouve le SeCorr 300 donné par la Figure (I.11) comportant les capteurs et les amplificateurs Figure (I.11) (a) et le corrélateur Figure (I.11) (b).



Figure (I.11) Détecteur SeCorr 300 Avec son corrélateur portable (a) Capteurs, (b) Corrélateur [29]

I.3 Etat de l'art des méthodes utilisées dans d'autres pays

I.3.1 Méthodes utilisées en USA

Le système de détection de fuites acoustique en ligne, également connu sous le nom de système 'Sahara' (In-Line Acoustic Based Leak Detection System), a été développé premièrement en grande Bretagne est l'une des nouvelles technologies non destructives développées dans le but de détecter les fuites dans les réseaux de distribution d'eau. Sahara est un système non seulement qui identifie la position de la fuite, mais il estime également son amplitude. Le système Sahara utilise un détecteur acoustique très sensible (connu sous le nom de drogue), qui est inséré dans le réseau à tout point de prise, de deux pouces ou plus de diamètre alors que le pipeline reste sous pression (entre 3 et 200 psi ou 0.3 et 13.8 bar). Outre l'unité de détection acoustique, l'unité de commande est également constituée d'un câble comportant un guide rétractable qui protège le câble contre les dommages lors de son passage dans la conduite, un treuil qui force l'ombilical dans la conduite contre la pression d'eau et retire l'ombilical de la conduite à la fin de l'inspection et le tambour de câble qui contrôlent le déploiement et la récupération de l'ombilical. Pendant le fonctionnement (comme illustré à la Figure (I.12), le système est transporté le long de la conduite par l'écoulement d'eau. Le débit du réseau doit être supérieur à 0,3m / s pour pouvoir le transporter.

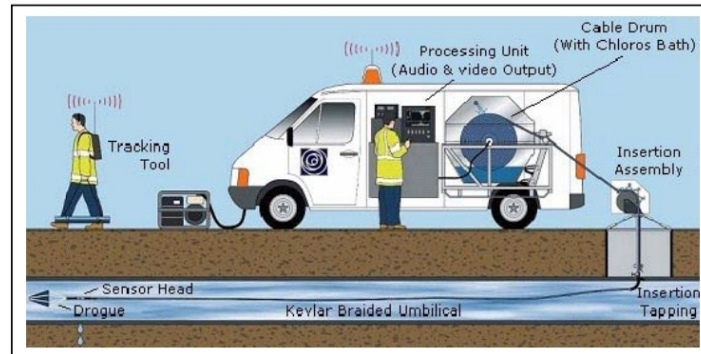
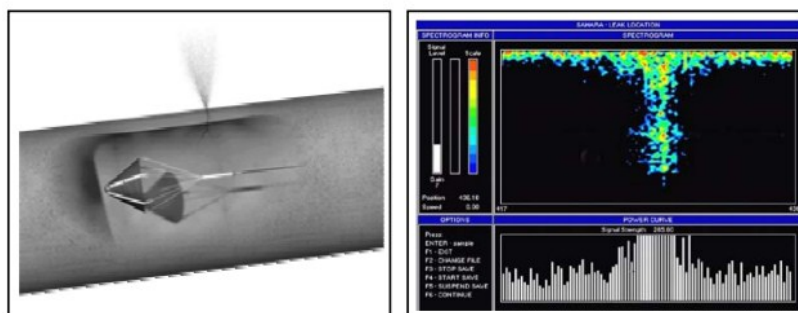


Figure (I.12). Détecteur Sahara [27]

La tête du détecteur figure (I.13)(a) enregistrera en permanence le bruit distinctif qui est généré par l'échappement de l'eau sous pression lorsque le système traverse la conduite. Une fois la fuite est détectée, la tête du capteur s'arrête à la position précise de la fuite. Un opérateur peut alors estimer l'amplitude de cette dernière par la quantification du signal acoustique enregistré par le capteur, qui est ensuite présenté en sortie de données visuelles Figure (I.13)(b) par la conversion des données audio. L'endroit de la fuite est localisé à l'aide d'une unité de localisation.

Inconvénient

La limitation la plus significative de ce système est qu'il est attaché par un câble pendant son fonctionnement. Dans des conditions optimales, il peut être utilisé à une longueur de 1.61 Km (1 mile). Toutefois, lorsque l'inspection doit être effectuée pendant plusieurs kilomètres, ce système est fastidieux, car il nécessite une mise en place et un démontage qui peuvent sembler trop lourdes et longues et donc inefficaces.



(a)

(b)

Figure (I.13) Tête du détecteur avec la représentation visuelle [27] (a) Schéma d'une tête en opération, (b) Représentation visuelle de la fuite

I.3.2 Méthode utilisée au Canada

Trois méthodes sont utilisées : Le gaz traceur, la thermographie et le GPR.

I.3.2.1 Gaz traceur

Un gaz non toxique, soluble dans l'eau et plus léger que l'air est injecté dans un segment isolé d'une conduite d'eau. Les gaz généralement utilisés sont l'hélium et l'hydrogène. Après que le gaz a été injecté dans la conduite isolé, il s'échappera à une ouverture de fuite et puis, étant plus léger, pénètre à la surface à travers le sol et le pavé. Par conséquent, partout où il ya une fuite dans les pipelines, une concentration plus élevée du gaz injecté s'accumule autour des zones de fuites. En balayant la surface du sol directement au-dessus du tuyau avec un gaz détecteur très sensible, la fuite peut être localisée, comme dans la Figure (I.14). Bien que la méthode soit plutôt facile à adopter, le niveau minimum de fuite détectable dépend de l'installation, le produit du pipeline et la sensibilité du détecteur.



Figure (I.14). Méthode du gaz traceur [27]

I.3.2.2 Thermographie

Les fuites d'eau d'une conduite souterraine modifient les caractéristiques thermiques du sol adjacent. Dans de nombreuses situations, un pipeline crée une modification de la température dans l'environnement entourant la conduite. Par exemple, dans les conduites sous pression, l'eau de fuite va produire une zone froide dans l'environnement entourant la conduite et ce qui rend la conduite comme un dissipateur de chaleur plus efficace que le sol sec environnant. Les anomalies thermiques résultantes au-dessus des conduites sont détectées avec une caméra infrarouge montée sur avion, un ordinateur de poche, ou un véhicule Figure (I.15).

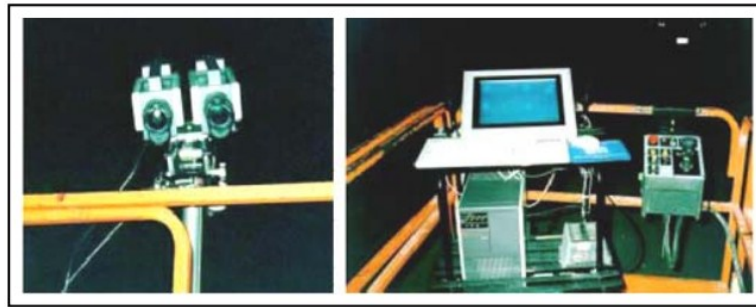


Figure (I.15). Méthode de la thermographie [27]

I.3.2.3 Méthode GPR

Pour localiser les fuites dans les conduites d'eau enfouis, un radar peut être utilisé soit en détectant des vides dans le sol créé par une fuite d'eau lors de sa circulation près de la conduite, soit en détectant des segments de la conduite qui semblent plus profonds qu'ils sont en raison de l'augmentation de la constante diélectrique du sol adjacent saturé par une fuite d'eau [53]. Les ondes radar pénétrant au sol sont partiellement réfléchies vers la surface du sol lorsqu'elles rencontrent une anomalie dans les propriétés diélectriques, par exemple un vide ou un tuyau. La taille et la forme de l'objet est formée comme une image radar par des traces-temps obtenues par balayage de la surface du sol. Le décalage temporel entre les ondes radar transmises et réfléchies détermine la profondeur de l'objet réfléchissant.

Inconvénients

Ces technologies sont généralement coûteuses et complexes. Ces techniques trouvent leurs applications dans la détection des fuites dans les gazoducs.

I.3.3 Méthode utilisée en Angleterre

Le détecteur PERMALOG est très utilisé en Angleterre à cause de son efficacité et de sa simplicité d'utilisation et de son faible coût.

I.3.3.1 Principe de fonctionnement

Le capteur PERMALOG installé sur le réseau détecte automatiquement la présence ou l'apparition d'une fuite, il transmet l'information à un « Patrouilleur », collecteur de données mobile, embarqué dans un véhicule ou portable. Les transmetteurs sont installés sur l'ensemble de la zone, pour assurer une surveillance permanente des fuites. Ils sont facilement placés sur les têtes de vannes dans les regards ou autres accessoires solidaires de la canalisation. Un puissant aimant assure leur maintien. Avec des piles de plus de 10 ans d'autonomie, les transmetteurs ont un indice de protection (IP 68) et fonctionnent même immergés. Aucune

maintenance n'est nécessaire. Chaque PERMALOG se calibre automatiquement selon son environnement. En l'absence de fuite, un signal est transmis pour indiquer qu'il n'y a pas de fuite. Dès l'apparition d'une fuite, le PERMALOG se met en mode « alarme » et transmet un signal pour indiquer la présence d'une fuite, ainsi que ses caractéristiques. La fréquence des relèves peut être effectuée à intervalles réguliers, ou lorsque les débits nocturnes augmentent. Le « patrouilleur » reçoit, analyse et identifie l'émetteur et ainsi pré localise la position de la fuite. Un signal sonore confirme la réception du message en provenance du PERMALOG, il s'inscrit sur l'écran LCD du « patrouilleur » et est simultanément sauvegardé. La position des fuites peut être consultée instantanément ou à la fin de la tournée de relève. Les données des PERMALOG ayant émis un signal de « fuite » sont imprimées ou transférées sur un PC, permettant une meilleure planification des interventions de localisation. Le système PERMALOG peut être associé en option complémentaire, d'un GPS pour une localisation automatique des fuites, Figure (I.16) [31].



Figure (I.16). Détecteur PERMALOG [31]

1.3.3.2 Avantages

- ✓ 100 % du réseau de distribution est sous surveillance.
- ✓ Plus de fuites trouvées rapidement qu'avec les autres méthodes.
- ✓ Permet la détection rapide de toute nouvelle fuite pour une meilleure continuité de la distribution d'eau.
- ✓ Automatise et simplifie la détection des fuites, éliminant aussi les erreurs humaines et les recherches infructueuses.
- ✓ Élimine l'utilisation des diverses techniques de sectorisation à l'aide de nombreux compteurs et de manœuvre de vannes.
- ✓ Fonctionne indépendamment de l'étendue ou de l'état du réseau à surveiller.
- ✓ Méthode non destructive, sans intervention directe sur le réseau, ne générant ainsi ni désordre ni désagrément pour l'abonné.

- ✓ Améliore l'efficacité et la motivation des techniciens pouvant se concentrer sur la localisation des fuites existantes au lieu de se disperser sur des zones sans fuites.
- ✓ Fonctionne en permanence pendant 10 ans, permettant facilement le maintien du niveau des fuites au plus bas.

1.3.3.3 Caractéristiques techniques

Dimensions 135 × 60mm (avec antenne)

Longueur de l'antenne 55mm

Poids 1kg

Alimentation Batterie interne autonome sur piles 10 ans

Matière Acier inoxydable

Indice de protection IP 68

Puissance aimant 35kg

PATROUILLEUR

Dimensions 290× 150 × 82 mm

Poids 1.8kg

Matière ABS

Protection IP 65

Antenne Magnétique sur véhicule avec 3m de câble pour connexion.

Interface Boîtier avec clavier et écran rétro éclairé.

Alimentation Batterie ou allume cigare 12V.

Accessoires :

Câble allume cigare 12 V ; Câble RS 232 / PC ; Câble imprimante ; Valise de transport ; Antenne pour utilisation en portable ; Chargeur de batterie ; Logiciel de programmation et de relève ; Sacoche de transport ; House de protection.

Accessoires en option sont : Batterie rechargeable ; Imprimante portable avec câble ; Kit support d'utilisation véhicule.

I.4 Etat de l'art des techniques de détection de fuite

Les dispositifs acoustiques tels que les bâtons d'écoute peuvent détecter les fuites sans déterminer leurs positions exactes. Par la suite, plusieurs techniques de traitement du signal telles que la corrélation et la cohérence sont appliquées pour obtenir des informations sur l'emplacement exact de la fuite.

Plusieurs chercheurs ont contribué pour le développement des détecteurs comme Gao et *al.* (2004) ; Hough (1988) ; Hunaidi et *al.* (1999, 2004) ; Klein (1993) ; Kurmer et *al.* (1993) ; Turner (1991) et Zhang (1997), ils ont trouvé plus facile, plus économique et plus efficace de détecter les fuites en utilisant des dispositifs acoustiques par rapport aux tests chimiques et aux dispositifs visuels.

Les dispositifs acoustiques détectent ces signaux de fuite soit en mettant des capteurs hydrophones (agissant ainsi sur l'écoulement) à l'intérieur de la conduite, soit en reliant des capteurs accélérométriques non invasifs aux points d'accès des conduites tels qu'une bouche d'incendie. Tenant compte qu'il existe plusieurs méthodes de détection des fuites que nous pouvons citer :

- ✓ Méthodes acoustiques
- ✓ Méthodes non acoustiques
- ✓ Méthodes transitoires
- ✓ Méthodes basées sur les techniques de surveillance continue des fuites

Les dispositifs acoustiques de détection des fuites peuvent être classés en deux grandes catégories :

a) Appareils acoustiques à l'intérieur de la conduite

Dans ces dispositifs, le capteur hydrophone est inséré à l'intérieur de la conduite pour détecter les signaux de fuite. A présent, le détecteur Sahara est le seul dispositif existant.

Méthode de Ballon intelligent (SmartBall)

SmartBall, est développé par Pure Technologies, utilise le bruit acoustique généré par la fuite des pipelines dans le but de détecter les fuites et connaître leur endroit dans les conduites. De distribution d'eau. Il est sphérique Figure (I.17) (a) et plus petit que le diamètre du pipeline, ce qui lui permet de se déplacer silencieusement dans le pipeline et de détecter des fuites silencieuses. Son principe de fonctionnement est illustré à la Figure (I.17) (b).

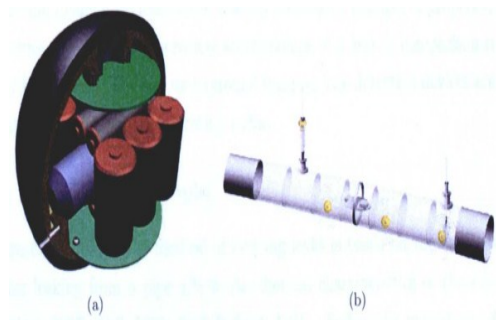


Figure (I.17) Balle intelligente : (a) Vue interne, (b) principe de fonctionnement.

Il se compose d'une boule en mousse dans laquelle un noyau en aluminium de 65 mm de diamètre est placé. Ce noyau en aluminium contient le capteur acoustique, un système d'acquisition de données, une alimentation électrique et autres instruments. SmartBall n'utilise qu'un seul capteur acoustique qui est utilisé à l'intérieur du pipeline, par rapport aux dispositifs acoustiques traditionnels qui emploient deux capteurs ou plus. Lorsqu'il est employé dans un pipeline, le SmartBall parcourt le pipeline sous contrôle et enregistre le bruit acoustique, qui peut ensuite être post-traité pour déterminer la présence et la position des fuites. Les fuites sont détectées par une combinaison d'une augmentation de la puissance acoustique et d'un spectre de fréquence typique. L'endroit de la fuite par rapport aux positions du récepteur est calculé en analysant les temps d'arrivée des impulsions acoustiques émises par la bille sur les récepteurs fixés aux accessoires du pipeline. SmartBall est sensé de fonctionner jusqu'à 17 heures dans une seule utilisation, ce qui lui permet de contrôler de nombreux kilomètres de pipeline. Par exemple, à un débit d'eau de 0,5 m/s, la bille peut parcourir presque 25 km en une seule utilisation. Son principal avantage est que son principe de fonctionnement est indépendant du matériau du pipeline. Cependant, il ne peut être utilisé que dans des pipelines dont le diamètre est supérieur à 110 mm. Pour son bon fonctionnement, sa taille est généralement limitée à moins d'un tiers du diamètre du pipeline. Un autre avantage est qu'il ne nécessite que deux points d'accès, l'un pour l'insertion et l'autre pour l'extraction pour le relevé de toutes les longueurs du pipeline et peut être inséré et extrait d'un pipeline dans des conditions normales d'exploitation. Cependant, il ne peut pas être utilisé efficacement dans les pipelines de diamètre inférieur à 125 mm et ceux fonctionnant à des pressions plus élevées, il n'est donc pas préféré dans les eaux industrielles. La détection de fuite acoustique exige également que le bruit de fond soit aussi bas que possible et cela signifie que la bille doit se déplacer relativement silencieusement à travers le pipeline. Par conséquent, un revêtement élastomère élastique est placé autour de la bille pour contrôler le bruit provenant du roulage.

Inconvénient : Le bruit des pompes voisines et d'autres appareils génèrent un bruit important, ce qui peut rendre l'analyse des signaux de fuite difficile. Un autre inconvénient de SmartBall est qu'il n'est pas en mesure de déterminer la taille de fuite et il est extrêmement difficile de suivre avec précision sa position dans la conduite [27].

b) Appareils acoustiques à l'extérieur de la conduite

En utilisant ces dispositifs, les signaux de fuite sont détectés en connectant des capteurs d'accéléromètre / vibration non invasifs à des points d'accès tels que des bouches d'incendie et des vannes ; ou parfois directement à la surface du tuyau si elle est accessible. Les dispositifs acoustiques de détection de fuite les plus courants sont :

- ✓ Bâton d'écoute
- ✓ Microphone au sol
- ✓ Enregistreurs de bruit de fuite
- ✓ Corrélateurs

I.4.1 Bâton d'écoute

Le bâton d'écoute est un dispositif ancien. Il a été utilisé depuis 1850. La technique repose sur l'utilisation de dispositifs acoustiques mécaniques ou électroniques tels que des bâtons d'écoute et des micros au sol sensibles aux bruits acoustiques ou aux vibrations induites par les fuites.

Les bâtons d'écoute sont de deux types : mécaniques et électroniques.

I.4.1.1 Bâton d'écoute mécanique

Communément appelé bâton d'écoute de base, est constitué d'une barre d'acier qui transmet les vibrations induites par la fuite depuis le point d'accès, comme une bouche d'incendie, vers un diaphragme en laiton dans une cavité de résonance. Ces signaux de vibration sont amplifiés mécaniquement dans la chambre de résonance acoustique avant de passer au diaphragme. Le diaphragme les convertit en signaux audibles.

I.4.1.2 Bâton d'écoute électronique

Un dispositif acoustique assez rudimentaire est basé sur un transducteur piézoélectrique. Il détecte les vibrations mécaniques produites par une fuite et les convertit en signaux électriques qui sont amplifiés. Les signaux qui ont été amplifiés vont alimenter un haut-parleur ou un casque. Il contient également un filtre de bruit intégré pour supprimer les bruits.

Les bâtons d'écoute sont simples à utiliser. L'inspecteur de fuite marche le long du pipeline et écoute les signaux de fuite à divers points d'accès le long du pipeline. Plus le bruit est élevé, plus la fuite est proche. Cependant, les fuites peuvent produire différents sons en fonction du matériau du pipeline, de la composition du sol, de la taille des fuites et de la forme des fuites. Les petites fuites sous haute pression font habituellement des bruits plus forts que les fuites plus importantes sous basse pression. Dans certains cas, de grandes fuites sous basse pression ne font pratiquement pas de bruit, ce qui les rend très difficiles à localiser. Les sons peuvent être trompeurs et sont parfois très déroutants car ils peuvent également être produit par d'autres sources ; tels que l'utilisation du client (prélèvement d'eau) et le trafic. L'efficacité et la précision des bâtons d'écoutes dépendent entièrement de l'expérience des individus, car ils ne donnent aucune indication visuelle ou d'alarme en présence de fuite. Cela dépend de l'utilisateur s'il peut faire la distinction entre le bruit produit lors du fonctionnement normal d'un pipeline et le bruit produit par une fuite [27].

I.4.2. Microphone au sol

Le principe d'un microphone au sol est semblable à un bâton d'écoute, mais dans ce cas le capteur est en contact direct avec le sol environnant plutôt que le réseau de distribution lui-même. La détection de fuites à l'aide de microphones au sol implique de déplacer le microphone sur le sol à des intervalles le long du pipeline et d'observer les changements de volume du son lorsque le microphone s'approche de la position de fuite.

Le microphone peut être assemblé pour être utilisé en mode contact ou en mode d'étude Figure (I.18).

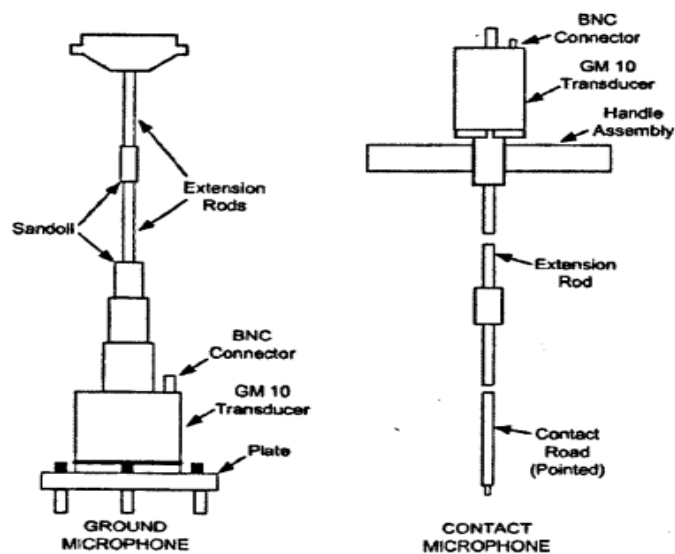


Figure (I.18). Microphone au sol en mode contact

Le mode contact est destiné à sonder sur les raccords, tandis que le mode d'étude est utilisé pour localiser les fuites sur des longueurs plus courtes de pipeline. Comme les bâtons d'écoute, les performances des microphones au sol dépendent également sur l'expérience individuelle. Cependant, les microphones au sol donnent une meilleure sensibilité que les bâtons d'écoute et peuvent détecter des signaux de fuite faible directement au-dessus de la surface du sol et ne nécessitent pas toujours des points d'accès pour la connexion. L'efficacité des écouteurs et des micros au sol (en particulier dans les pipes MDPE) dépend de plusieurs facteurs. Les signaux de fuite s'atténuent avec la distance, de sorte que la distance entre le point de surveillance et la position de fuite affecte considérablement la précision des bâtons d'écoute et des microphones au sol. Hunaidi et Chu ont mentionné que la détection acoustique des fuites à l'aide de bâtons d'écoute et de microphones au sol est plus efficace lorsqu'ils sont sur les raccords de pipeline tels que les robinets et les bouches d'incendie. Cependant, les raccords étroitement espacés ne

sont pas toujours rencontrés dans les réseaux de distributions. La détection des fuites à l'aide de l'écoute devient parfois difficile. Enfin, le bruit du trafic routier, le débit de l'eau ainsi que la profondeur influent considérablement sur les performances de la détection et de localisation des fuites en utilisant l'écoute.

I.4.3. Enregistreurs de bruit de fuite

Les enregistreurs de bruit de fuite utilisent typiquement les accéléromètres piézoélectriques pour détecter les signaux de fuite et un enregistreur programmable pour enregistrer les données. Contrairement aux bâtons d'écoute, les enregistreurs peuvent être installés en permanence ou temporairement sur des points d'accès à l'aide de fixateurs magnétiques. Dans la pratique, les enregistreurs sont placés en groupes sur des points d'accès adjacents aux pipelines tels que des bouches d'incendie et des vannes, habituellement distants de 200 à 500 mètres dans la plupart des réseaux de distribution. Les enregistreurs sont généralement programmés pour enregistrer le bruit acoustique pendant la nuit à intervalles d'une seconde durant deux heures (habituellement entre 2h et 4h), car toutes sortes de bruit et l'utilisation du client est susceptible d'être minimale. L'amplitude (ou l'intensité) du bruit acoustique varie en raison des effets aléatoires, mais s'il existe une fuite, il y aura alors un minimum de bruit constant qui est toujours présent dans le temps enregistré. Les données enregistrées sont soit téléchargées sur un ordinateur personnel, soit transmises simultanément au site de l'opérateur pour une analyse plus poussée. Les données enregistrées sont analysées statistiquement, c'est-à-dire que la fréquence et l'amplitude du bruit sont comparées à différents endroits pour déterminer la présence des fuites. Contrairement aux bâtons d'écoute, les enregistreurs donnent des alarmes et peuvent enregistrer du bruit. Les enregistreurs sont généralement utilisés pour fouiller les grandes surfaces, mais ils ne sont pas adaptés pour localiser des fuites individuelles. Toutefois, la viabilité économique et l'efficacité de détection des fuites temporairement ou en permanence utilisant les enregistreurs reste discutable. Les chercheurs par la suite ont trouvés que les enregistreurs ne constituent pas une alternative économique aux inspecteurs de fuite qualifiés et bien équipés.

1.4.4 Méthodes non acoustiques

Les méthodes non acoustiques peuvent être classées en deux groupes :

- *Appareils d'imagerie souterraine*
 - Thermographie
 - GPR (Ground penetrating radar) Géo radar
- *Les méthodes de détections chimiques*

- Test de fluorure
- Gaz traceur

1.4.5 Méthodes transitoires

En outre des méthodes acoustiques ou non acoustiques décrites, de nouvelles approches basées sur l'analyse transitoire sont émergées progressivement dans la recherche. Ces techniques sont encore sous test ; Cependant, les chercheurs espèrent que ces méthodologies pourraient fournir une solution pour détecter les fuites d'eau à l'avenir [23]. Les méthodes transitoires de détection de fuite sont basées sur l'extraction d'informations sur la présence de fuites à partir d'un événement transitoire mesuré. Un événement transitoire dans des conditions contrôlées peut être introduit dans le réseau de distribution d'eau en ouvrant ou en fermant une bouche ou une vanne d'incendie ; En démarrant ou en arrêtant une pompe ou en utilisant des dispositifs spéciaux comme des électrovannes. L'onde transitoire générée se déplace à la fois en amont et en aval le long de la canalisation. La pression est alors mesurée à un certain nombre d'endroits dans le réseau pendant l'événement transitoire, ensuite elle est analysée plus en détail pour obtenir des informations sur les fuites. Les différentes méthodes d'analyse de ces signaux mesurés sont :

1.4.5.1 Méthode de réflexion de fuite

La méthode de réflexion de fuite est basée sur la mesure et l'analyse des ondes transitoires réfléchies par une fuite (Brunone, 1999 ; Brunone & Ferrante, 2001 ; Jonsson & Larson, 1992). Brunone (1999) a constaté que les fuites reflètent partiellement l'onde transitoire. L'onde réfléchie est celle qui retourne à la section où l'onde de pression est mesurée. La grandeur de l'onde réfléchie dépend du rapport de la grandeur de l'onde transitoire générée et de la taille de l'orifice de fuite. Elle dépend aussi de sa distance par rapport à la position de la fuite. Une fuite de plus grande taille produit une onde réfléchie d'amplitude plus grande. La localisation d'une fuite est calculée en utilisant la différence de temps entre l'onde transitoire incidente et l'onde réfléchie mesurée. Cette méthode de détection de fuites donne des meilleurs résultats si une onde de forme transitoire est utilisée. Cependant, en pratique, il est extrêmement difficile de détecter les variations de la pression mesurée provoquée par la réflexion de fuite; Par conséquent, l'application de la méthode de réflexion de fuites dans les réseaux de tuyaux réels est encore en cours de développement.

1.4.5.2 Analyse transitoire inverse

La détection des fuites par l'analyse transitoire inverse (ITA) a été proposée pour la première fois par Liggett & Chan (1994). Depuis, elle a fait l'objet de recherches intensives menées par

un certain nombre de groupes de recherche tels que Covas et *al.* (2001); Kapelan et *al.* (2003); Vitkovsky et *al.* (2000) et Stephens et *al.* (2004). Dans cette méthode, un modèle de simulation du réseau par analyse transitoire est réalisé et étalonné pour les zones de fuite nodale effectives inconnues en comparant les pressions prédites du modèle avec les mesures de pression réelles prises. Elle utilise la régression des moindres carrés entre les courbes de pression transitoires modélisées et mesurées. La fuite est modélisée à des positions discrètes (habituellement des nœuds) dans le réseau et la minimisation de l'écart entre les pressions mesurées et calculées en utilisant le modèle simulé, donne une solution pour la localisation et la connaissance de taille de la fuite. Le grand problème pour l'application d'ITA est la modélisation précise des transitions et des conditions aux limites du système de conduites.

1.4.5.3 Méthode d'amortissement transitoire

Wang et *al.* (2002) ont indiqué que les fuites dans une conduite contribuent à l'amortissement des ondes transitoires. Ce dernier peut être exprimé en termes de séries de Fourier. Toutes les composantes de Fourier sont amorties uniformément à cause du frottement constant du pipeline ; Cependant, en présence d'une fuite, chaque composante est amortie différemment. Des fuites peuvent être détectées en comparant la réponse en fréquence de la pression mesurée contenant l'amortissement induit par une fuite avec la réponse en fréquence des valeurs de pression calculées pour la même canalisation sans fuite. L'amplitude de l'amortissement indique la taille de la fuite, alors que les différents rapports d'amortissement des composantes de Fourier peuvent être utilisés pour trouver l'endroit d'une fuite. La vitesse de l'amortissement induit par la fuite dépend des caractéristiques de la fuite, de la pression dans la canalisation, de l'endroit de la génération des phénomènes transitoires, du point de mesure de pression ainsi que de la forme du phénomène transitoire généré. Dans les situations réelles, les fuites et le frottement ne sont pas les seuls facteurs causant un amortissement transitoire. D'autres éléments physiques comme les joints, les raccords, les bouches d'incendie et la paroi des pipelines peuvent causer un amortissement transitoire. La modélisation transitoire de certains de ces éléments est très compliquée, ce qui rend difficile de calculer avec précision l'amortissement sans fuite pour un pipeline réel.

1.4.5.4. Analyse dans le domaine fréquentiel

La méthode d'analyse du domaine fréquentiel (Ferrante et Brunone.2003, Lee et *al.* 2005) est basée sur l'analyse des caractéristiques de la réponse de l'onde transitoire du domaine temporel, dans le domaine fréquentiel. La réponse en fréquence des ondes transitoires se déplaçant dans une canalisation comportant une fuite incluse des pics de grande amplitude supplémentaires qui sont faibles ou inexistantes dans la réponse en fréquence des pipelines sans fuites. La présence

d'une fuite peut être détectée en comparant les fréquences dominantes de la réponse en fréquence transitoire des signaux avec et sans fuite.

1.4.5.5. Analyse des réponses impulsionnelles

Cette méthode est basée sur l'analyse de la réponse du pipeline à une impulsion unitaire à son entrée (Liou, 1998). Par exemple, si on considère l'ouverture / fermeture d'une vanne dans une canalisation avec une fuite située à une distance x_L de la vanne. Une action sur cette dernière introduit une impulsion artificielle dans le pipeline. L'impulsion sera amortie par le frottement. A la position de la fuite, une partie de l'impulsion est transmise plus loin, une autre prend des directions différentes tandis que la partie restante est réfléchiée vers l'arrière. Cette onde réfléchiée peut être mesurée. Si le temps de parcours total de l'impulsion réfléchiée de fuite (calculée selon les techniques de corrélation croisée) est t_L , alors la distance x_L de la fuite à la vanne est donné par :

$$x_L = \frac{1}{2} c_w \cdot t_L \quad (1.21)$$

Où c_w est la vitesse de l'onde impulsionnelle. La taille d'une fuite est déterminée par l'amplitude de l'impulsion réfléchiée. Cependant, une réponse similaire peut être provoquée par des discontinuités de pipeline telles que des coudes et des joints, ce qui peut être difficile à identifier dans la pratique réelle.

1.4.6 Méthodes basées sur les techniques de surveillance continue des fuites

Dans les techniques de surveillance continue des fuites, le pipeline est continuellement contrôlé avec et sans présence de la fuite. Ces techniques surveillent en permanence les variables telles que la pression et le bruit acoustique qui peuvent être directement liées à une fuite potentielle. Une fuite est indiquée s'il existe une variation significative de ces paramètres. Sur la base de différentes variables comme la pression, il existe plusieurs types de techniques de surveillance continue des fuites. Les deux modèles basés sur la technique de surveillance continue des fuites sont :

- Surveillance acoustique continue
- Test de zone de compteurs (DMA)

1.4.6.1 Surveillance acoustique continue

La surveillance acoustique continue d'un pipeline se fait à l'aide d'enregistreurs de données en mode permanent. Les enregistreurs de données sont installés en permanence en groupes sur des points d'accès adjacents (habituellement des vannes ou des bouches d'incendie) du pipeline. Une fuite peut se produire à tout moment pendant la surveillance. Les enregistreurs sont configurés pour s'allumer automatiquement à un moment prédéterminer pendant une période

fixe. Les enregistreurs captent et enregistrent le bruit généré dans le pipeline pendant cette période. Le bruit est soit produit par des conditions normales de fonctionnement du pipeline, soit par des fuites dans le pipeline ou une combinaison des deux. Ce bruit est aussi analysé en comparant les niveaux sonores et la réponse fréquentielle enregistré par chaque enregistreur. La présence d'une fuite est typiquement représentée par un niveau de bruit élevé (décibel), et continu. En d'autres termes, la surveillance acoustique continue est bénéfique dans les systèmes qui ont un niveau élevé d'affaiblissement. Ce système a été connecté à un système SKADA (Supervisory Control And Data Acquisition system). Il a donné des bons résultats. Cette méthode n'est pas rentable pour l'utilisation dans des conduites MDPE non corrosifs qui ont un niveau d'affaiblissement élevée. Son inconvénient primordial est quelle coûteuse.

1.4.6.2 Test de zone de compteurs (DMA)

Les DMA's (District Meter Area) sont des petites parties bien définies des réseaux de distribution, où chacune peut être desservi par une seule conduite. Les limites d'un DMA peuvent parfois se produire naturellement (par exemple, dans de petites zones comme un village), mais la plupart sont créés par la fermeture des vannes appropriées. La technique la plus courante pratiquée par les compagnies d'eau pour identifier les fuites dans un DMA est de conduire un audit de l'eau. Les vérifications de l'eau représentent l'ensemble de l'eau qui s'écoule dans un DMA. Toute différence significative (entre le volume d'eau entrant et sortant d'un DMA par unité de temps) au-dessus d'un seuil fixé par les compagnies d'eau indique la présence d'une ou plusieurs fuites.

CONCLUSION

Pour aborder le problème des fuites, il a bien fallu dans ce chapitre d'évoquer l'ensemble d'infrastructures et d'installations nécessaires à satisfaire tous les besoins en eau potable d'une zone urbaine et industrielle. Les réseaux de transport et de distribution de cette ressource naturelle ont été bel et bien décrits. Vu l'importance et l'intérêt stratégique que présente ces derniers pour les populations, nous avons mis l'accent sur les techniques et moyens mis en œuvre permettant de réduire les pertes dues aux fuites conséquentes. La surveillance permanente de cette eau dans les canalisations par la recherche et la détection de fuites a incité les exploitants à installer différents moyens et techniques. Une description sommaire a été introduite dans ce chapitre pour l'ensemble des techniques existantes. Une attention particulière sur les détecteurs de fuites et les méthodes de détection correspondantes dans notre pays et dans d'autres pays tels que Canada, Angleterre et USA, ont été exposés. La détection des fuites d'eau à l'aide d'un seul signal vibratoire fait l'objet du chapitre suivant.

INTRODUCTION

L'objectif prioritaire, tant pour les collectivités locales que pour les industriels est de gérer le mieux possible les ressources en eaux, c'est-à-dire répondre à l'ensemble des besoins au moindre coût. L'un des éléments de cette gestion consiste à accroître le rendement des réseaux de distribution, en intervenant au plus vite lorsqu'un défaut d'étanchéité apparaît. Les fuites peuvent se produire en raison du vieillissement des canalisations, de la corrosion, de la pression excessive résultant d'une erreur de fonctionnement et de la fermeture ou de l'ouverture rapide des vannes. Les services d'eau utilisent généralement une large gamme de méthodes de détection des fuites, mais les signaux acoustiques sont principalement utilisés pour la détection et la localisation de ces fuites. Malheureusement, les méthodes qui se basent sur les informations acoustiques sont généralement laborieuses et souvent imprécises [32]. En outre, elles deviennent particulièrement inefficaces si le bruit créé par la fuite est faible (cas des grandes fuites), et s'atténue rapidement où il est dominé par d'autres bruits. Dans ce contexte, il existe de nombreuses méthodes alternatives pour la détection des fuites. Aucune de ces méthodes n'a prouvé sa fiabilité. Une alternative de ces approches est d'exploiter le comportement hydraulique de la conduite pour déterminer la position de la fuite. Actuellement, plusieurs recherches s'accroissent autour des signaux vibratoires qui utilisent un seul capteur. Dans ce chapitre, un état de l'art sur la méthode vibratoire est donné. Comme première contribution, nous proposons un nouveau système de détection de fuites dans les réseaux de distribution, inspiré des systèmes de détection des défauts prématurés dans les machines tournantes. Nous montrons les techniques d'acquisition du signal vibratoire. Le choix du capteur affecte significativement la précision de détection [23]. Afin qu'il soit exploitable, le signal ainsi acquis va subir un pré amplification, un conditionnement et une conversion avant d'être stocker dans le PC. Le programme de la méthode de détection choisie va être appliqué aux signaux numérisés. Après le traitement, une décision concernant la présence de la fuite est déduite. Les caractéristiques du signal vibratoire sont présentées, tenant compte que le problème de la non stationnarité des signaux de fuite a été pris en compte.

Enfin, comme deuxième contribution nous avons apporté des améliorations sur la méthode de détection des fuites des réseaux de distribution basée sur la FFT déjà existante. Cette dernière repose sur la segmentation du signal et l'utilisation d'un seuillage. Une décision partielle sur les différents segments est obtenue, et qui est suivi d'une décision finale pour la confirmation de la présence de la fuite.

II.1 Détection de fuite via un signal vibratoire

Les pressions transitoires dans les conduites d'eau sont connues sous le nom de surpressions résultant d'un changement de débit dans un système stationnaire. Parce qu'une fuite est avant tout un phénomène hydraulique, et puisqu'il est situé à un endroit spécifique, il n'est pas surprenant que sa présence puisse être détectée hydrauliquement et qu'une onde de pression transitoire soit un véhicule idéal pour sonder sa présence et son caractère [33]. En effet, tout changement dans la structure physique (ou de propagation) de la conduite ou du système, tel qu'une jonction, une constriction, une expansion, un blocage, une transition de rugosité ou une fuite, impose une réflexion d'onde à un signal transitoire entrant, modifiant ainsi d'une certaine manière le débit du système et la réponse de la pression. Ces modifications sont apparemment apparentes ou discernables à d'autres endroits du réseau et leur identification et caractérisation ont le potentiel de révéler des informations utiles sur la nature de la singularité d'origine ainsi que sur le système dans son ensemble. Si une singularité établit une signature claire et unique, il devrait être théoriquement possible de la localiser, typiquement via la comparaison du signal de pression enregistré par les dispositifs de contrôle par rapport au signal qui serait observé si le système ne contenait pas la fuite ou la singularité. L'idée d'utiliser les détecteurs de vibration vient des variations abruptes de l'écoulement qui induisent de grandes variations de pression et entraînent des coups de bélier. Ces variations se produisent généralement lors de l'ouverture et la fermeture soudaines des vannes [34]. Quand les coups de bélier se produisent dans les réseaux de distribution, ils peuvent causer des failles ou des fuites dans les pipelines. Lors de la fermeture soudaine de la vanne, la vitesse de l'eau près de la fermeture devienne nulle. Ce changement de vitesse provoque une augmentation de la pression et la création d'une onde qui se propagent à travers la conduite. L'onde se dissipe légèrement chaque fois qu'il se déplace le long de la conduite. Ce cycle se répètera jusqu'à ce que l'onde se dissipe complètement et que l'eau stabilisera. L'augmentation de la pression provoque une légère dilatation des parois surtout des conduites en plastiques qui peut provoquer leurs endommagements.

En [32], ils ont proposé une méthode de détection se reposant sur un seul capteur de vibration. Le signal produit pendant le processus transitoire est dans la plupart des cas non linéaire et non stationnaire. Ce travail exploite un certain nombre de techniques d'analyse des signaux pour analyser les données transitoires réfléchies afin d'identifier les caractéristiques des réseaux de distribution Figure (II.1).

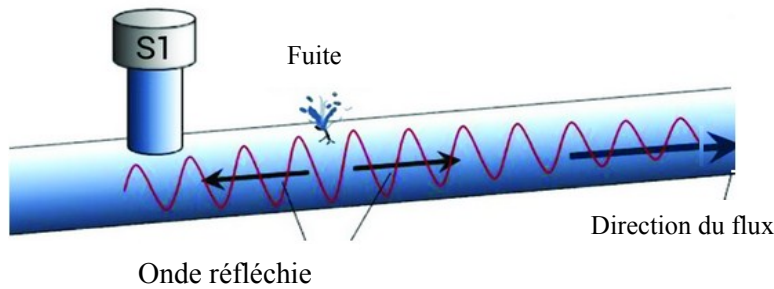


Figure (II.1) Signaux réfléchis par une fuite

Initialement, la méthode d'intercorrélation a été utilisée pour déterminer le nombre de réflexions dans les réseaux de distribution simples. Cette méthode fonctionnait, mais elle était exigeante en temps de calcul et difficile. Plus tard, ils ont effectué des transformées d'ondelettes sur des signaux transitoires simulés et expérimentaux dans des systèmes de canalisations. Bien que les résultats sont obtenus pour les données simulées, quand la même analyse a été appliquée aux données expérimentaux, aucun résultat utile n'a été trouvé. Ceci est causé par l'étalement des ondes en raison de la dispersion dans les systèmes réels, ce qui provoque une diminution d'amplitude des ondes incidentes et réfléchies.

En [32] ont proposé une méthode se basant sur l'analyse d'un signal transitoire. L'événement transitoire a été généré par l'ouverture et la fermeture rapide d'une petite électrovanne montée sur la bouche d'incendie de la conduite sous test. Les signaux temporels acquis Figure (II.2) prélevés à quatre différents tests montrent clairement l'événement transitoire. Comme on peut le constater sur cette dernière, la fermeture de l'électrovanne c'est produit à $t = 0.08$ s. La pression augmente rapidement immédiatement après la fermeture de l'électrovanne. Les signaux acquis noyés dans le bruit vont subir un filtrage dans le but de se rapprocher du signal utile. Le signal ainsi obtenu après filtrage est montré par la Figure (II.3). L'EMD (EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION) a été utilisée pour filtrer le signal en rejetant certaines IMFs non pertinentes (INTRINSEQUE MODE FUNCTION). Les IMFs de 3 à 6 sont recombinaées pour reconstruire le signal débruité par contre les deux premières IMFs représentent les composantes hautes fréquences et elles sont considérées comme un bruit. Les IMFs sont obtenues après exécution de l'algorithme EMD Figure (II.4). Après le débruitage ils ont appliqués plusieurs techniques telles que HT (la transformée d'Hilbert, NHT (Normalised Hilbert Transform) sur le signal utile obtenu. Ensuite, ils ont pris en considération des comparaisons des performances

entre différentes méthodes. L'organigramme sur lequel ils se sont basés est montré par la Figure (II.5).

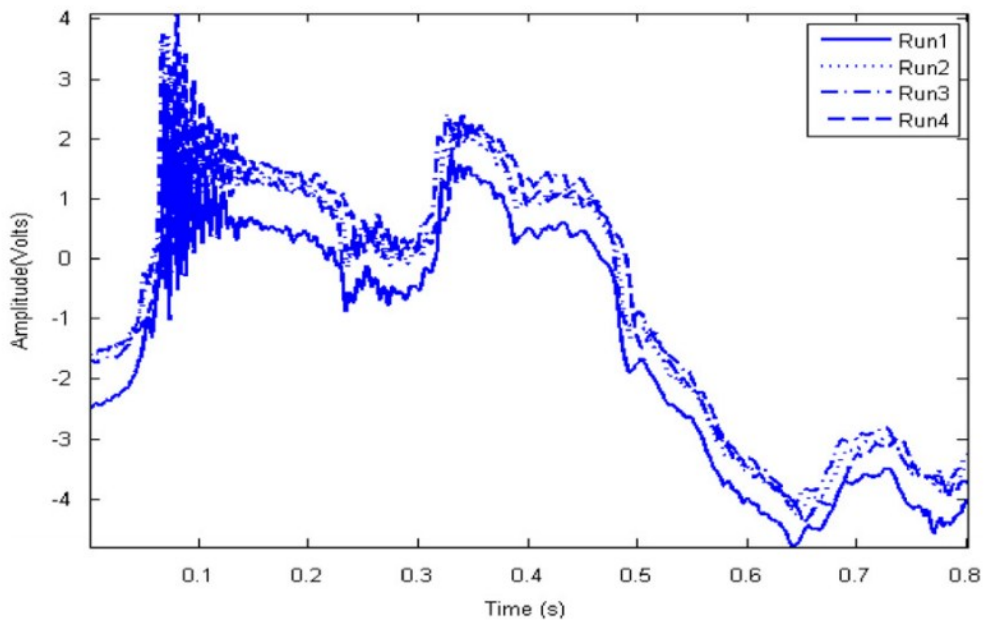
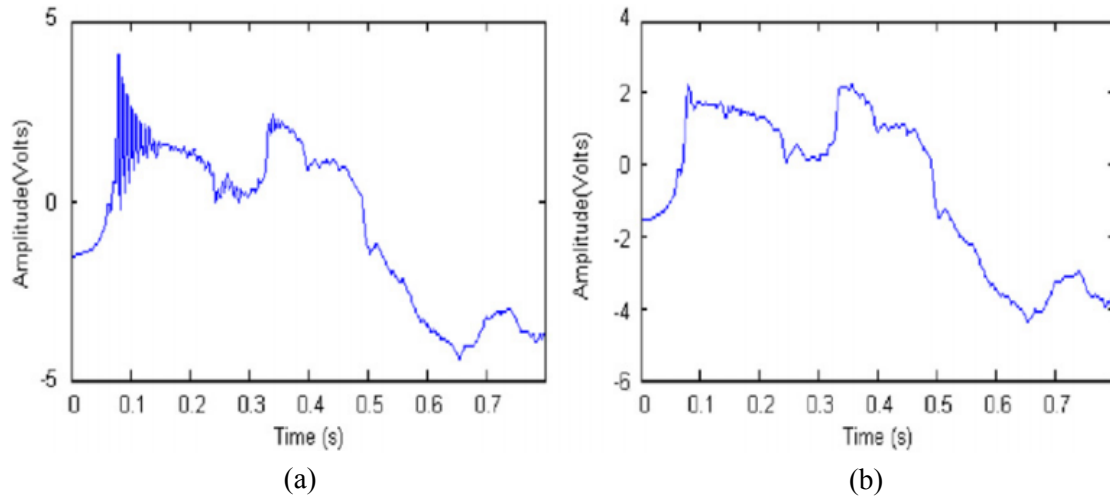


Figure (II.2) Profils des signaux transitoires prélevés avec quatre tests



Figure(II.3) Signal transitoire typique, (a) Avant filtrage, (b) Après filtrage

Cette technique est un peu compliquée et possède un temps de calcul long et au calcul des coefficients avec un temps important.

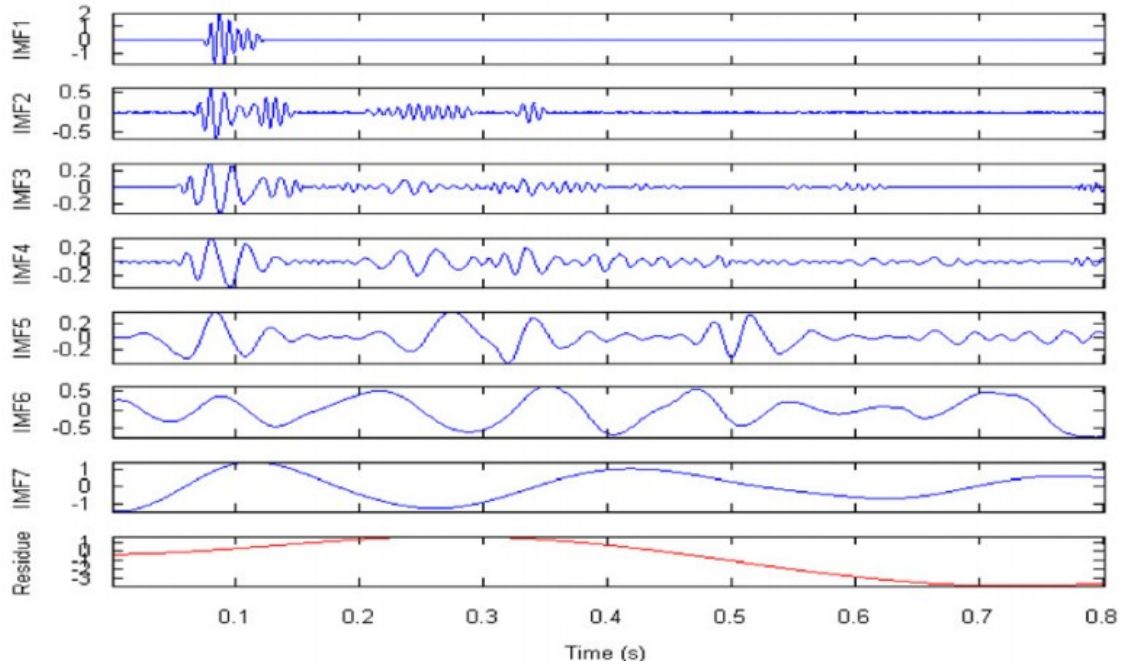


Figure (II.4) Les IMFs plus le résidu après application de l'EMD sur le signal [32]

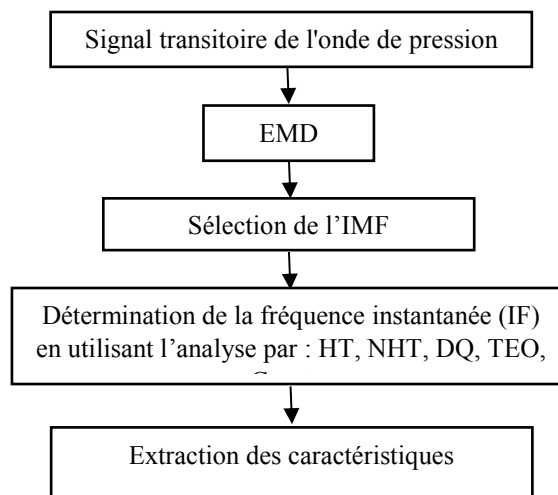


Figure (II.5) Mode opératoire de la méthode proposée dans [32]

Les résultats obtenus après application des différentes techniques sur le signal débruité montrent clairement la fuite comme montrée par la Figure (II.6). Les autres pics sont dû à d'autres éléments dans le réseau de distribution.

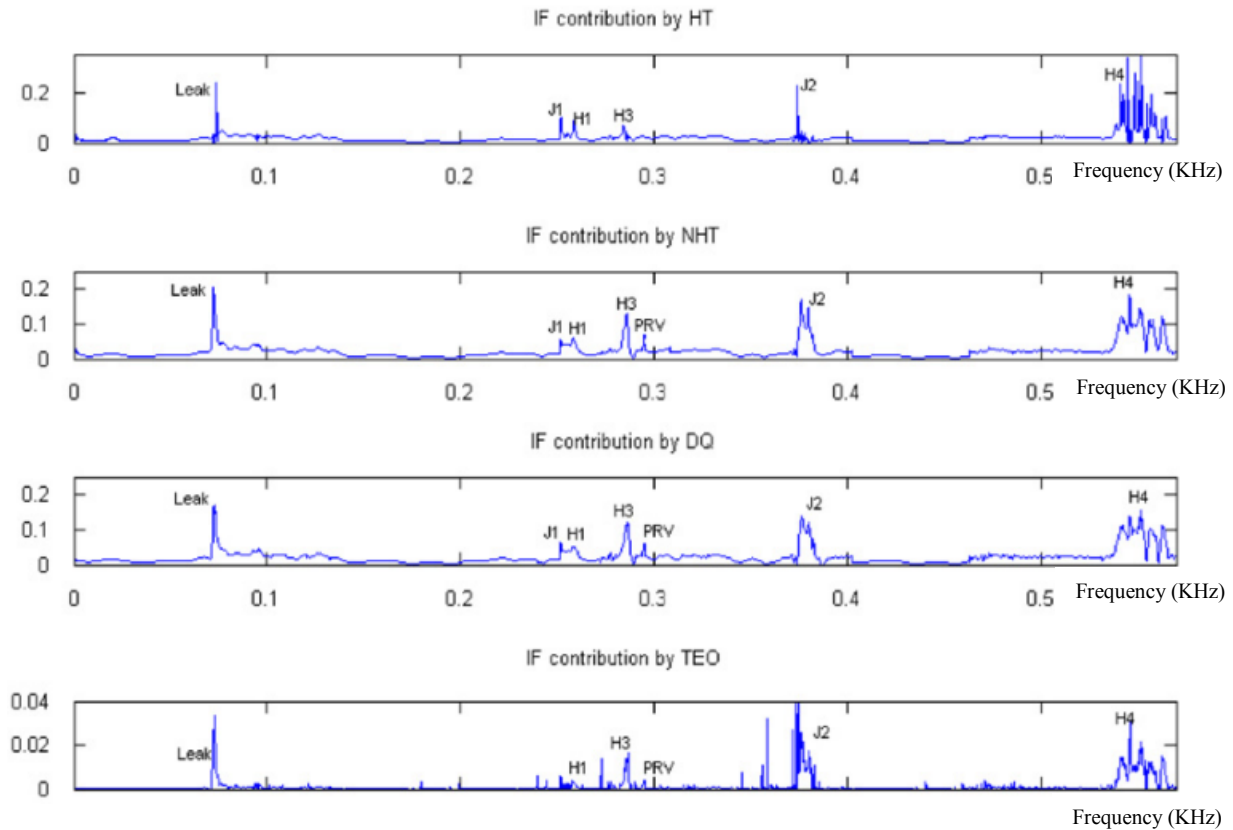


Figure (II.6) Résultats obtenus après application des différentes techniques [32]

Selon [15], ils ont utilisé aussi les signaux de pression causés par la fermeture/ l'ouverture rapide d'une électrovanne. En raison de leur simplicité et de leur robustesse, les analyses transitoires fournissent une voie prometteuse vers la détection des fuites. Dans ce travail, les signaux transitoires de pression du domaine temporel ont été obtenus en utilisant un seul transducteur de pression. Ces signaux de pression ont été d'abord filtrés à l'aide d'ondelettes discrètes pour éliminer le courant continu d'offset et les hautes fréquences. Ils ont analysé en utilisant la méthode cepstrale qui permet d'identifier le délai entre l'onde initiale et ses réflexions. Certaines caractéristiques des résultats obtenus peuvent être attribuées à des caractéristiques du réseau de canalisation telles que des jonctions et des extrémités de la conduite. Lorsque des orifices ont été percés dans la conduite, de nouveaux pics sont apparus qui ont permis d'identifier la présence d'une fuite dans le réseau de pipelines. Ils ont testé avec des orifices de tailles différentes, ils ont vu que l'amplitude du pic traité augmentait en tant que racine cubique du diamètre de la fuite. En utilisant cette méthode, il est possible d'identifier des

fuites qui sont difficiles à trouver par d'autres méthodes, car elles sont petites par rapport à l'écoulement dans la conduite.

Le montage de la Figure (II.7) représente la base de cette approche [15].

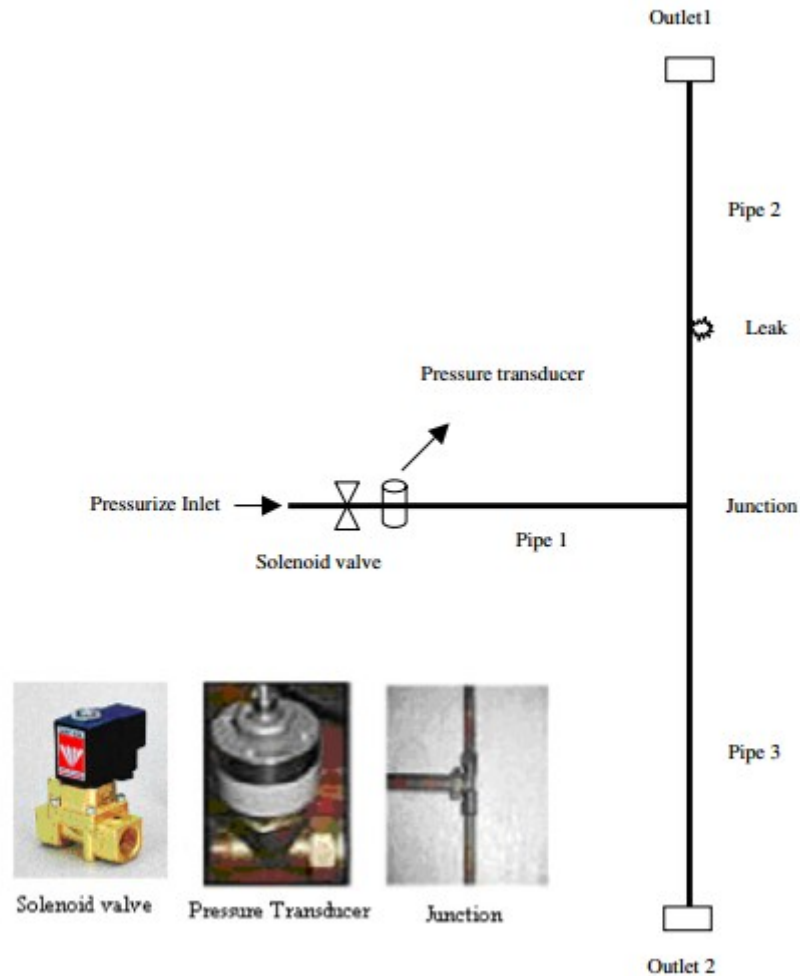


Figure (II.7) Diagramme des dispositifs utilisés dans l'expérience [15]

L'onde de pression est dû à un effet connu sous le nom de coup de bélier. Cela se produit lorsqu'une électrovanne est fermée rapidement, alors une onde de pression positive se génère à ce moment, et elle se propage en amont. Une autre onde, négative est aussi créé au même instant connu sous le nom d'onde de raréfaction et se propage en aval. Comme toutes les caractéristiques du pipeline telles qu'une jonction, le bout de la conduite ou une fuite causent des discontinuités dans le flux du fluide. Certaines de ces ondes de pression sont réfléchies dans le milieu et retournent à l'électrovanne à la vitesse du son et arrivent de nouveau à l'électrovanne quelque temps après que l'onde originale a été produite. Chaque fois que l'onde traverse le dispositif, une partie de celle-ci est transmise et l'autre partie est réfléchi vers l'électrovanne. L'onde réfléchi sera faible par rapport à l'onde initiale provoquée par la

fermeture de l'électrovanne. Les grandes fuites provoquent des changements importants dans les variations de pression et ces perturbations plus importantes du débit dans la conduite sont faciles à détecter. Toutefois, les petites fuites sont plus difficiles à identifier et, dans ces conditions, différents types d'analyse de signal peuvent être utilisés pour distinguer la présence de ces caractéristiques. Ils ont trouvé que le meilleur moyen pour détecter les petites fuites est d'utiliser l'analyse cepstrale.

Fondamentalement, le cepstre est un outil puissant et rapide de décodage d'un spectre, donc de diagnostic, notamment pour mettre en évidence un certain nombre de défauts. C'est une fonction définie comme la transformée inverse du logarithme du spectre. Il permet dans un spectre, de rechercher, d'identifier, et de quantifier rapidement toute famille de composantes de fréquence périodiques. Ces dernières peuvent se présenter sous forme de peignes de raies ou se forme de bandes latérales de modulation autour d'une fréquence cinématique caractéristique [35]. Autrement dit, le cepstre est l'outil capable de pallier la difficulté notamment lorsque les composantes fréquentielles d'un spectre s'imbriquent.

Le domaine fréquentiel est un domaine inverse de celui du temps (d'où le mot spectre), avec des grandeurs et des unités qui lui sont propres, la périodicité en seconde devenant la fréquence en Hertz. Le cepstre transformée de Fourier inverse du spectre transpose du domaine fréquentiel à un nouveau pseudo domaine temporel possédant son propre vocabulaire. Les fréquences deviennent des quéfrences ($1/f$) données en secondes ou plus généralement en millisecondes, les harmoniques deviennent des rhamoniques et les opérations de filtrage cepstral deviennent des liftrages.

Mathématiquement : le cepstre d'un signal = $TF^{-1}(\log(TF(\text{du signal})))$.

Algorithmiquement : Signal \longrightarrow TF \longrightarrow log \longrightarrow TF^{-1} \longrightarrow Cepstre

Où TF indique la transformée de Fourier. Ce dernier est résumé par le schéma de la Figure (II.8).

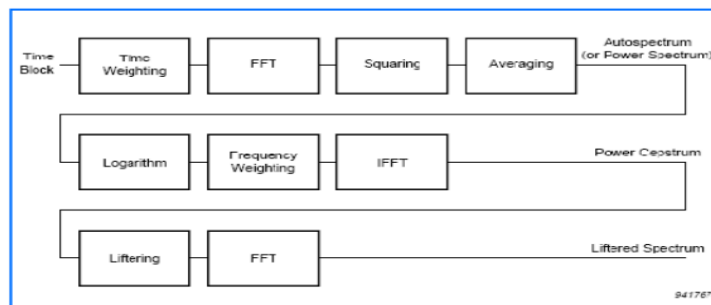


Figure (II.8) Schéma bloc de la technique cepstrale [54]

Il ya deux types de cepstres, cepstre de puissance et cepstre complexe. Ce dernier est réversible en retour au signal temporel et constitue un bon outil pour la détection de singularités locales. Le cepstre complexe est défini comme :

$$C_A = F^{-1}(\log A\{f\}) \quad (2.1)$$

Ou $A\{f\}$ est le cepstre complexe de $A\{t\}$. Il peut être représenté en termes d'amplitude et phase à chaque fréquence par :

$$A\{f\} = F\{a(t)\} = A_R + jA_I(f) \quad (2.2)$$

Prenant le logarithme complexe de l'équation 2.2 on aura :

$$\log A\{f\} = \log |A(f)| + j\phi(f) \quad (2.3)$$

Afin de filtrer le bruit des signaux, et aussi de supprimer tout offset du signal la transformée en ondelettes orthogonale (OWT) a été utilisée. Les résultats obtenus pour des différentes tailles de fuite et pour des différentes distances de la fuite par rapport à l'électrovanne sont donné par les Figures (II.11, II.12 et II.13). Avant de montrer les résultats obtenus après application du filtrage et l'ondelette orthogonale discrète, il est judicieux de présenter premièrement le signal temporel de pression issue du capteur Figure (II.9)

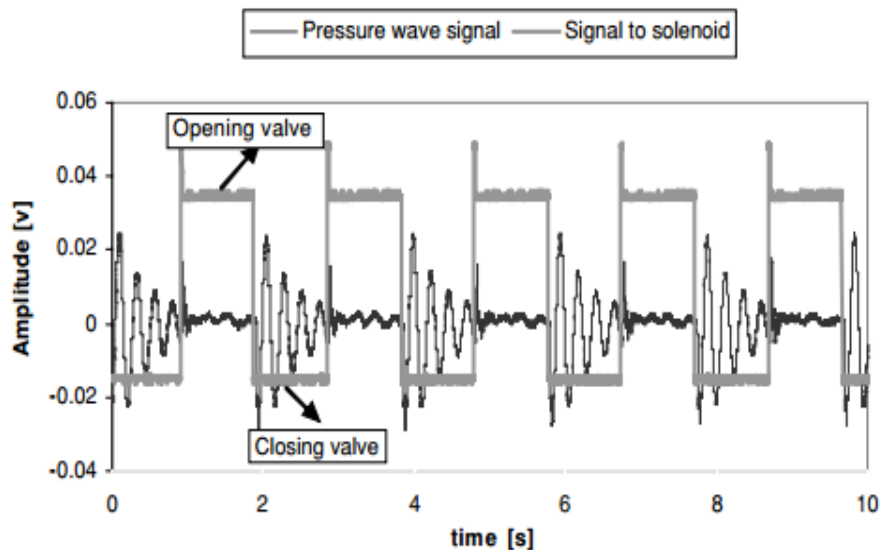


Figure (II.9) Signal temporel après fermeture / ouverture de l'électrovanne de la conduite [15]

L'application du cepstre pour un signal sans fuite a donné le résultat de la Figure (II.10).

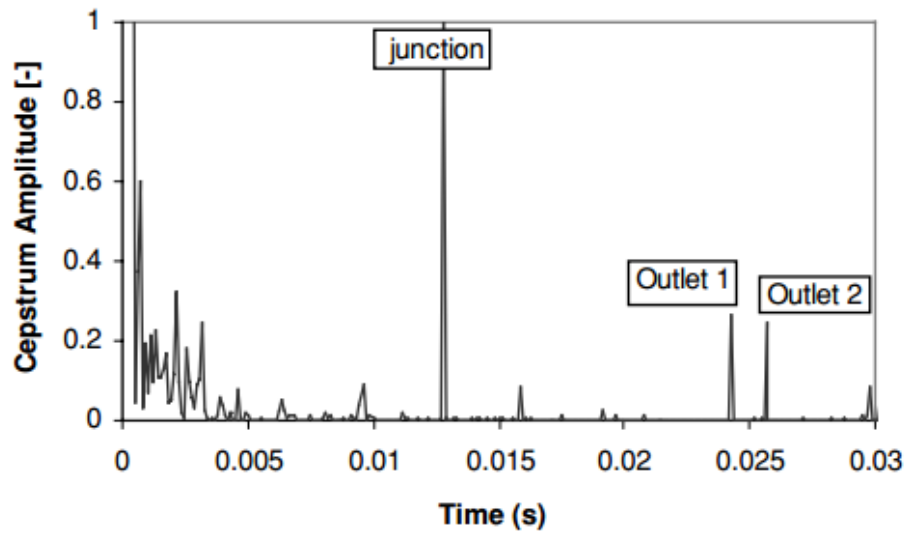
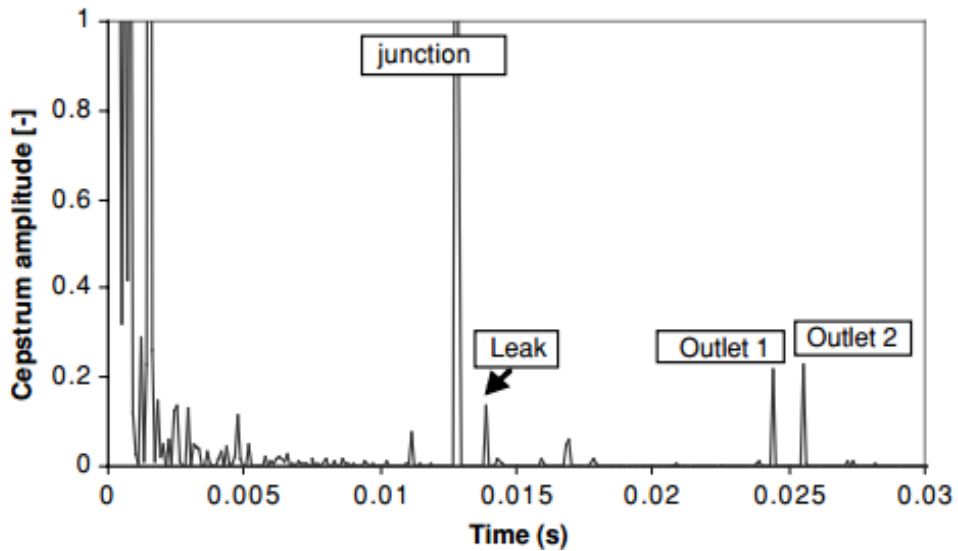


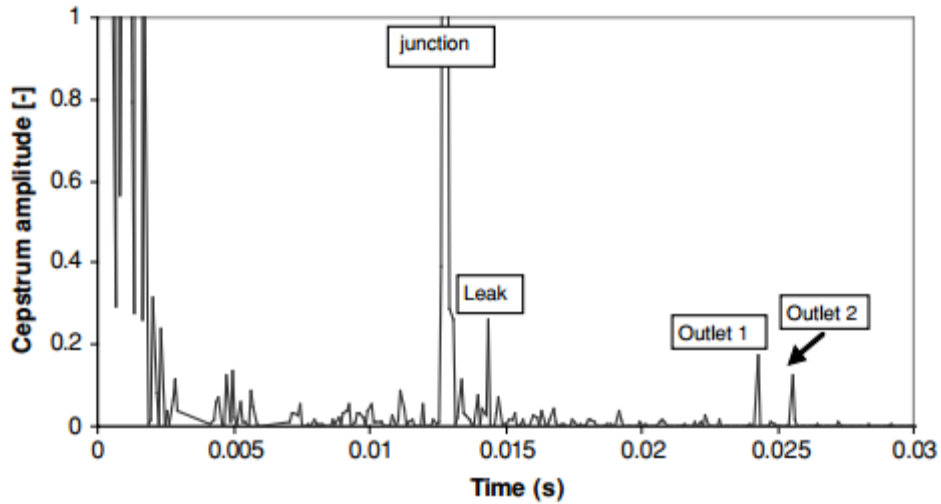
Figure (II.10) Analyse cepstrale du réseau sans fuite [15]

Pour une fuite de 2 mm et une distance de 9.5 par rapport à l'électrovanne ils ont obtenus le résultat donné par la Figure (II.11).



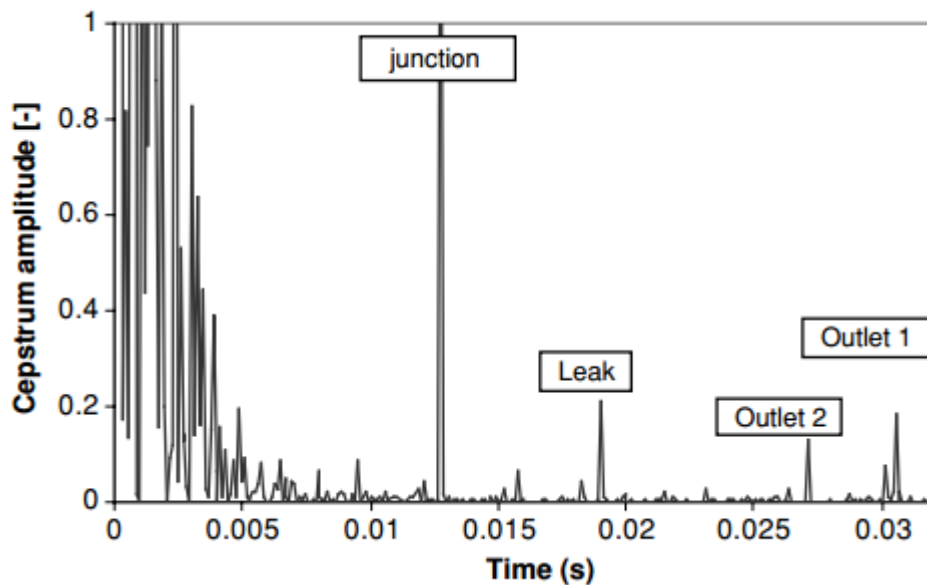
Figure(II.11) Analyse cepstrale du réseau avec une fuite de taille de 2mm localisée à une distance de 9.5m [15]

Pour une fuite de 4mm et une distance de 9.5 par rapport à l'électrovanne, ils ont obtenu le résultat donné par la Figure (II.12).



Figure(II.12) Analyse cepstrale du réseau avec fuite de taille de 4mm localisée à une distance de 9.5m

Pour une fuite de 4mm et une distance de 14m par rapport à l'électrovanne ils ont trouvé le résultat donné par la Figure (II.13).



Figure(II.13) Analyse cepstrale du réseau avec fuite de taille de 4mm située à une distance de 14m [15]

Comme on peut le constater, le pic de la fuite dépend de la taille de cette dernière et son emplacement temporel varie selon la position de la fuite.

II.2 Réalisation d'un banc d'essai et techniques d'acquisition du signal vibratoire

Notre première contribution était la réalisation d'un montage qui nous permet de simuler un réseau de distribution. Le travail est réalisé en deux variantes : la première était en temps réel et la seconde en temps différé, avec deux différents capteurs de vibrations.

II.3 Architecture du système de détection de fuite

L'étape primordiale de mesure des vibrations qui sont causées par les fuites est de collecter les signaux. La Figure (II.14) regroupe tous les éléments de l'architecture du système de détection. L'élément sensible de collection est un capteur (dans la plupart des cas un accéléromètre). Ce dernier donne une tension qui correspond au niveau de vibration. Les signaux analogiques donnés par l'accéléromètre sont ensuite collectés par une carte d'acquisition de données qui les transforme en signaux numériques de sorte qu'ils puissent être lus par une interface d'analyse. L'interface d'analyse (programmes) est utilisée pour effectuer et exploiter les méthodes d'analyse.

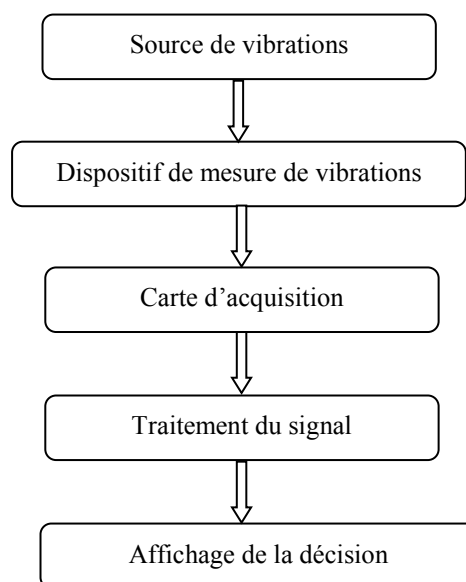


Figure (II.14) Eléments de l'architecture du système de détection de fuite réalisé

Le prototype réalisé est composé de deux parties : la partie hydraulique et la partie électrique.

II.3.1 Partie hydraulique

La partie hydraulique pour les deux variantes que nous avons utilisé est composée des éléments suivants :

a) Réservoir

Deux réservoirs Figure (II.15) l'une en acier et l'autre en plastique ayant une capacité de 100 litres et 150 litres respectivement jouant le rôle de la bêche à eau pour alimenter le canal prototype.



Figure (II.15) Réservoir d'eau

b) Pompes à eau

Pour valider la méthode de détection proposée, nous avons utilisé trois pompes de différents débits au lieu d'une seule pompe de vitesses de rotation différentes (voir Figure (II.16)).



Figure (II.16) Pompe à eau de type PENTAX

Les caractéristiques principales des trois pompes sont données comme suit :

1^{ère} pompe :

Type : **CALIPDA CMT61**

Tension de fonctionnement : En monophasé 220V-230V,

Puissance : 0.33 KWatts,

Vitesse de rotation : 2900 min⁻¹,

Débit : 0.48 m³/h

2^{ème} pompe :

Type : **PENTAX JM100**

Tension de fonctionnement : En monophasé 220V-230V,

Puissance : 0.74 KWatts,

Vitesse de rotation : 2800 min⁻¹,

Débit : 2.4 m³/h

3^{ème} pompe :

Type : **MITIDJA 32**

Tension de fonctionnement : En monophasé 220V-230V

Puissance : 1.1KWatts

Vitesse de rotation : 3000 min⁻¹

Débit : 8m³/h.

c) Conduite d'eau

Une conduite en acier de 8 mètres de long ayant un diamètre intérieur de 54 mm et un diamètre extérieur de 60 mm. Cette dernière est attachée aux extrémités de la pompe à travers des tuyaux souples en PVC.

d) Robinet d'arrêt

Afin de contrôler la pression dans la conduite un robinet d'arrêt est indispensable. Ce dernier est placé à l'une des extrémités de la conduite Figure (II.17).



Figure (II.17) Robinet d'arrêt avec son raccordement

e) Collier

Pour assurer une bonne adhésion avec la conduite, on a pensé à fabriquer un collier. Ce dernier à un double rôle. Il sert comme support pour le capteur et il nous permet de faire déplacer aisément le capteur à des différentes positions sur la conduite Figure (II.18).



Figure (II.18) Collier

f) Support

Deux supports en acier d'une hauteur de 90 cm, permettant la fixation de la conduite Figure (II.19).



Figure (II.19) Support

g) Fuite

Afin de simuler une fuite un orifice de 3 mm est percé sur la conduite Figure (II.20).



Figure (II.20) Perforation de la conduite, afin de stimuler une fuite

Le circuit hydraulique global de la première variante est illustré par le schéma de la Figure (II.21).



Figure (II.21) Prototype du circuit hydraulique global réalisé

La deuxième variante est pratiquement la version améliorée de la première. On a changé ici le réservoir pour augmenter la capacité en eau et ajouter une électrovanne pour commander la génération de la fuite par un bouton poussoir. Le système hydraulique de la deuxième variante est représenté par la Figure (II.22).



Figure (II.22) Circuit hydraulique avec ses principaux périphériques

II.3.2. Partie électrique

La partie électrique est constituée principalement de deux structures : une structure hardware qui comprend la carte de pré-amplification (montage Darlington), la chaîne d'acquisition et le port de communication (LPT), et une structure software, qui comprend les programmes de gestion des données.

La structure hardware de la première variante est composée des étages montrés par le schéma synoptique de la Figure (II.23)

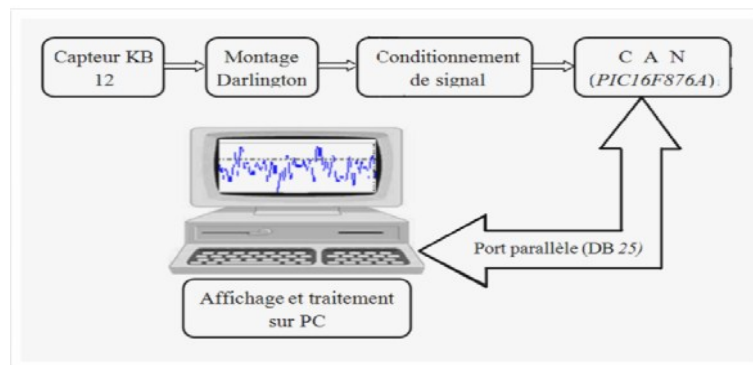


Figure (II.23) Schéma synoptique du circuit électrique

II.3.2.1 Capteur

C'est l'élément clé de toute chaîne de mesure. Il permet sous l'effet du mesurande d'en délivrer une image exploitable (signal électrique par exemple).

On parle aussi de transducteur, la grandeur physique d'entrée (le mesurande) étant transformée en une autre grandeur physique de sortie de telle sorte qu'on obtient un signal électrique Figure (2.24).

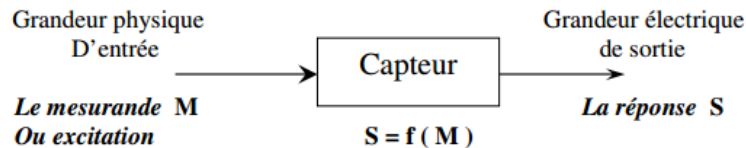


Figure (II.24) Principe d'un capteur

Mesurande : C'est la grandeur physique que l'on souhaite connaître Figure (II.25).

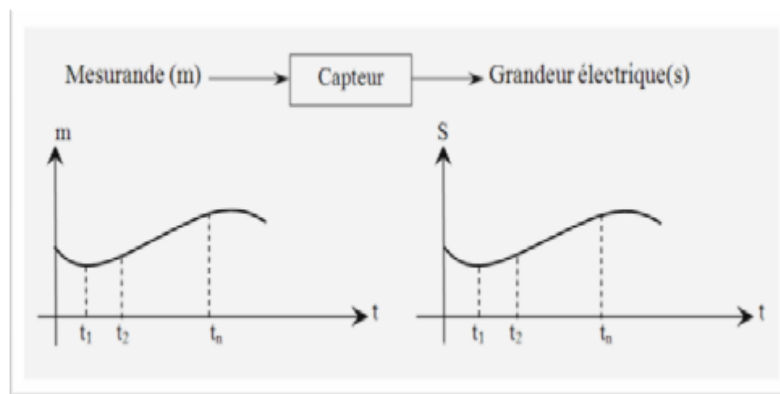


Figure (II.25) Analogie grandeur électrique et grandeur physique (mesurande)

Généralement, on obtient une grandeur de sortie de type électrique. Elle peut être soit :

- Une charge.
- Une tension.
- Un courant.
- Une impédance (R, L, C).

On classe les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification est responsable du conditionneur associé.

○ Capteurs passifs

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif.

○ **Capteurs actifs**

Dans ce cas, la sortie du capteur est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge.

a-1 Caractéristiques des capteurs

A ce niveau l'importance du capteur est bien mise en évidence. En effet, le signal électrique de sortie doit être effectivement le support de l'information puisque la décision de commande ou simplement l'interprétation de la mesure est faite à partir du signal et non de l'information elle-même. Les capteurs qui sont les éléments primordiaux du système d'acquisition, de traitement et de restitution de données, doivent être choisis avec beaucoup de précision. Ainsi les capteurs, comme composants essentiels de la chaîne de mesures vont s'écarter du capteur idéal à cause des différentes caractéristiques qui peuvent être classées en trois familles :

Caractéristiques fondamentales : Bande passante, résolution.

Caractéristiques intrinsèques : Sensibilité du capteur, étendue de la mesure

Caractéristiques liées à l'environnement. L'influence du milieu.

Le capteur de la première variante se base sur l'effet piézoélectrique dont le principe est décrit comme suit :

a-2 Piézoélectricité

La piézoélectricité tire son nom du grec " piézo " qui signifie presser. L'effet piézoélectrique décrit un phénomène qui transforme les pressions en électricité [36]. Plus précisément, il s'agit de l'apparition, de charges en surface d'un solide sous l'action de déformations macroscopiques. Ces charges sont produites par les déplacements locaux des centres liés à la maille cristalline. En fait, ce phénomène n'existe que dans les cristaux céramiques et polymères qui sont anisotropes, c'est-à-dire qui ne présentent pas de centre de symétrie dans la maille élémentaire. La piézoélectricité a été découverte par les frères Curie en 1880 seulement mise en application pratique pendant la 1^{ère} guerre mondiale par Paul Langevin pour réaliser le sonar, puis en 1918 par Walter Cady qui fabriqua le premier oscillateur à quartz. La piézoélectricité fait aujourd'hui partie intégrante de l'électronique en raison des grands facteurs de qualité des quartz mis en œuvre dans les oscillateurs.

a-3 Mise en œuvre des capteurs piézoélectriques

Le schéma électrique équivalent des capteurs piézoélectriques se déduit directement de son principe : un générateur de charges variables dans le temps que l'on représente par une source de courant $\frac{dQ}{dt}$ en parallèle avec la capacité C_d du diélectrique entre les deux électrodes et une

résistance de fuite R_d également caractéristique du diélectrique. En pratique, en raison des valeurs de C_d et R_d , il faut toujours tenir compte des capacités et résistances R_c et C_c des câbles de liaison. Le schéma se ramène donc à celui de la Figure (II .26).

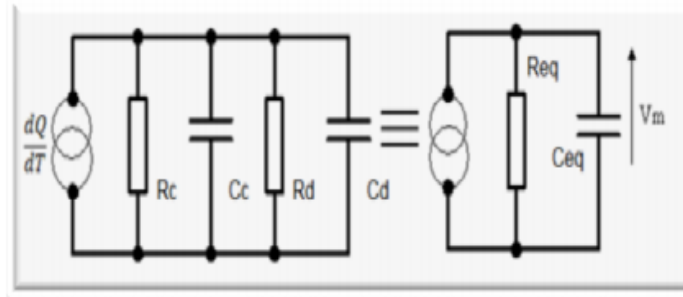


Figure (II.26) Schéma équivalent d'un capteur piézoélectrique

Si l'on mesure la tension aux bornes du capteur ou bien (ce qui est équivalent) en sortie d'un amplificateur de tension on obtient :

$$V_m = \frac{Q}{C_1} \cdot \frac{R_1}{1+R_1 C_1 j\omega} \quad (2.4)$$

Qui est une fonction d'un filtre passe-bas du premier ordre dont la fréquence de coupure ω_c et la valeur permanente Q / C_{eq} dépendent de l'impédance des câbles de liaison et, dans le cas échéant, de l'impédance d'entrée de l'amplificateur de tension. Cette situation est moins favorable que la mise en œuvre du convertisseur charge-tension Figure (II .27).

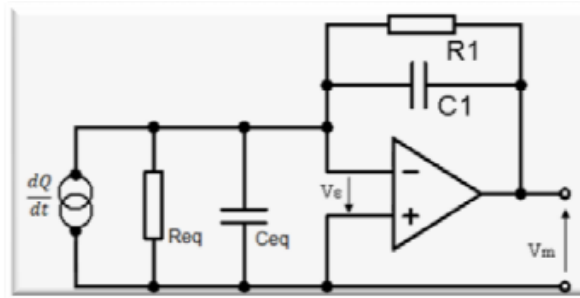


Figure (II.27) Convertisseur charge-tension

Si l'amplificateur opérationnel est considéré comme idéal, V_ε est nulle, on réalise effectivement la mise en court-circuit des électrodes et la fonction de transfert ne dépend que de l'impédance de contre-réaction :

$$V_m = \frac{Q}{C_1} \cdot \frac{R_1}{1+R_1 C_1 j\omega} = \frac{Q}{C_1} \cdot \frac{R_1}{1+j\omega\tau} \quad (2.5)$$

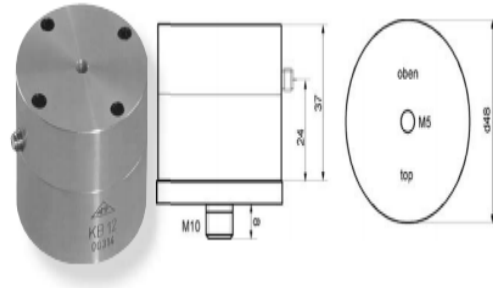
Le temps de réponse $\tau = R_1 C_1$ d'un tel montage ne dépend plus du capteur ni de sa liaison au convertisseur ce qui permet de le déporter de l'instrumentation. Pour des valeurs de C_r de l'ordre de quelques centaines de pF, et de R_r de l'ordre de quelques $10^4 \Omega$, on atteint des

constantes de temps de l'ordre de quelques centaines de ms et des tensions de mesure de quelques mV/ pC [36]. Le capteur piézoélectrique utilisé dans notre chaîne de mesure est un KB12

a-4 Capteur de vibrations KB12

Pour notre réalisation on a utilisé le capteur piézo-électrique KB12 Figure (II .28). Ce dernier est fabriqué par le constructeur MMF (Metra Mess-und Frequenztechnik Radebeul) ayant les caractéristiques suivantes :

- ✓ Type : Capteur piézo-électrique.
- ✓ Constructeur : MMF.
- ✓ Dimensions (L, Ø) : 70mm *50mm.
- ✓ Poids : 0,18 Kg.



- ✓ Mode de protection : IP43.
- ✓ Gamme de température de service : -25° à +55° C.
- ✓ Gamme de température de stockage : -40° à +70°C.
- ✓ Sensibilité : 6500±20% pC/g
- ✓ Capacité sans câble =1.5 nF.

Figure (II.28) Capteur piézoélectrique KB

12

a-5 Structure interne du capteur KB12

La Figure (II.29) représente l'architecture interne du capteur KB12

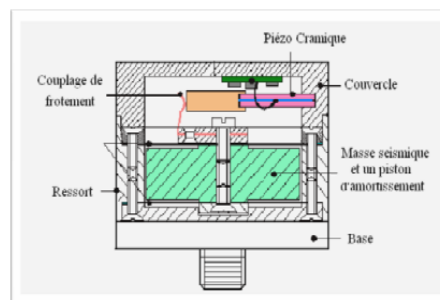


Figure (II.29) Structure interne du capteur KB12 [36]

a-6 Principe de détection

Le principe consiste à placer le capteur de vibration en un point sur la conduite Figure (II.30). Les vibrations de la fuite dues à la turbulence se propagent sur une onde longitudinale avec la même vitesse. Cette vitesse est la même de part et d'autre de la fuite. Cette onde engendre une vibration de la conduite dont on peut mesurer soit l'amplitude, soit la vitesse de déformation (dérivée de l'amplitude en fonction du temps), soit l'accélération (dérivée seconde). Cette dernière est captée au moyen d'un accéléromètre.

Le bruit est aléatoire, mais continu, ce qui permet d'éliminer les bruits transitoires.

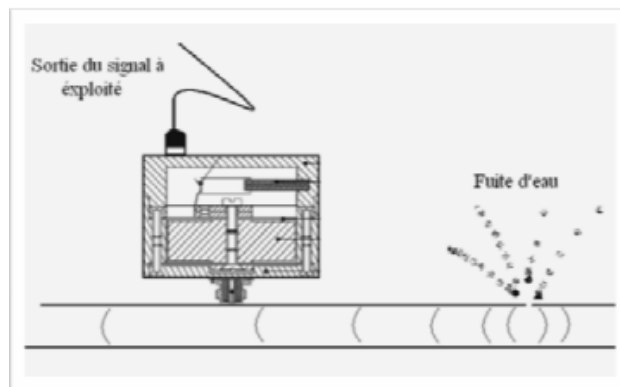


Figure (II.30) Système de détection de fuite de base

II.3.2.2. Etage de Pré-amplification (montage Darlington)

Le montage Darlington associe deux transistors, l'émetteur de l'un étant relié à la base de l'autre, les collecteurs étant directement raccordés à la tension d'alimentation, comme indiqué sur la Figure (II.31). Ces deux transistors ainsi montés se comportent comme un seul transistor, dont le gain β est égal au produit des gains des deux transistors.

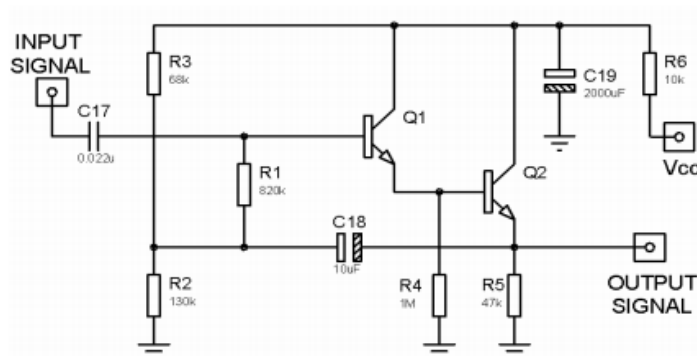


Figure (II.31) Etage de pré amplification

Le signal de sortie est une tension récupérée aux bornes de R5. Cette tension représente l'image de vibration causée par les turbulences provoquées par la fuite en un point donné sur la conduite.

Le signal obtenu de la pré-amplification est visualisé sur un oscilloscope numérique (INSTEK –GRS-6052 de bande passante 50 MHz), ce signal est donné par la Figure (II.32).

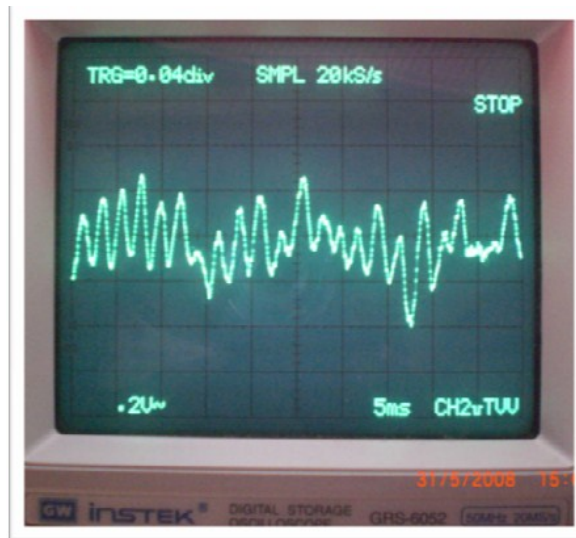


Figure (II.32) Signal issu après une pré-amplification

II.3.2.3. Conditionnement du signal

Nous savons que le signal issu du capteur est très faible donc il faut l'amplifier afin de le rendre exploitable. Nous avons utilisé pour cela un montage amplificateur de gain ajustable composé d'un circuit intégré LM324 qui comporte quatre amplificateurs opérationnels. Le schéma de l'amplificateur est représenté par la figure (II.33).

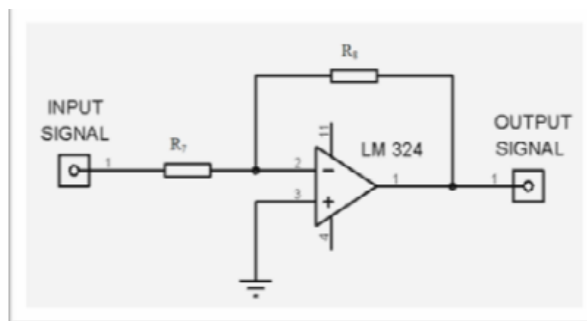


Figure (II.33) Schéma électrique de l'amplificateur inverseur

Remarque

Ce montage fait l'amplification et l'inversion du signal, son gain est donné par l'équation ci-dessous

$$G = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_8}{R_7} \quad (2.6)$$

Nous avons visualisé le signal après amplification et le résultat est montré par la Figure (II.34).

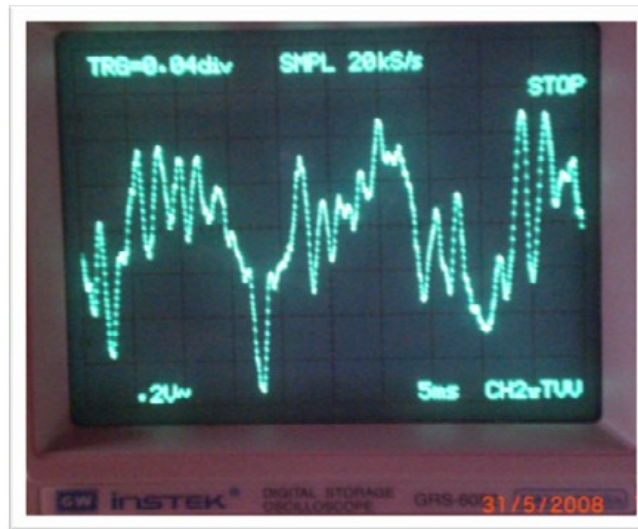


Figure (II.34) Signal vibratoire amplifié

II.3.2.4. Adaptation

Le convertisseur analogique/numérique utilisé est un CAN intégré dans le microcontrôleur PIC 16F876, qui accepte en entrée des tensions variables comprise entre 0V et 5V, pour cette raison et dans le but d'avoir une plus grande précision et une meilleure utilisation du CAN, on a fait un conditionnement du signal délivré par le capteur pour qu'il soit compatible avec la gamme de variation du CAN. La Figure (II.35) ci-dessous montre le montage du conditionneur utilisé

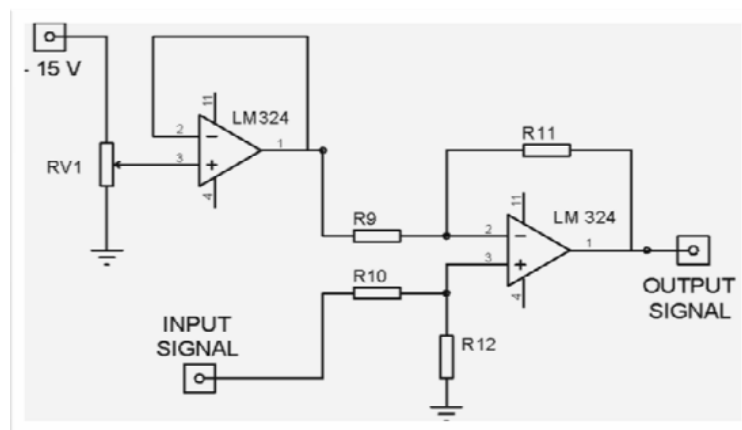


Figure (II.35) Circuit de conditionnement

Nous avons visualisé le signal après le conditionnement et le résultat et montré par la Figure (II.36).

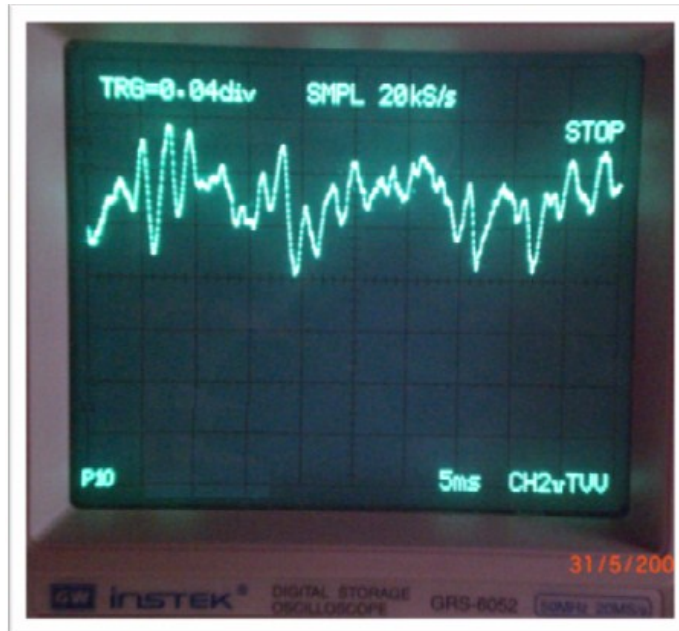


Figure (II.36) Etage d'adaptation (conditionnement)

II.3.2.5. Conversion analogique/numérique à base du PIC 16F876

On a exploité le microcontrôleur PIC 16F876 puisqu'il intègre quatre convertisseurs analogiques numériques. Ce dernier a une résolution de 10 bits. Il suffit de configurer leurs registres ADCON0 et ADCON1. Le schéma fonctionnel du PIC16F876 est présenté par la figure (II.37).

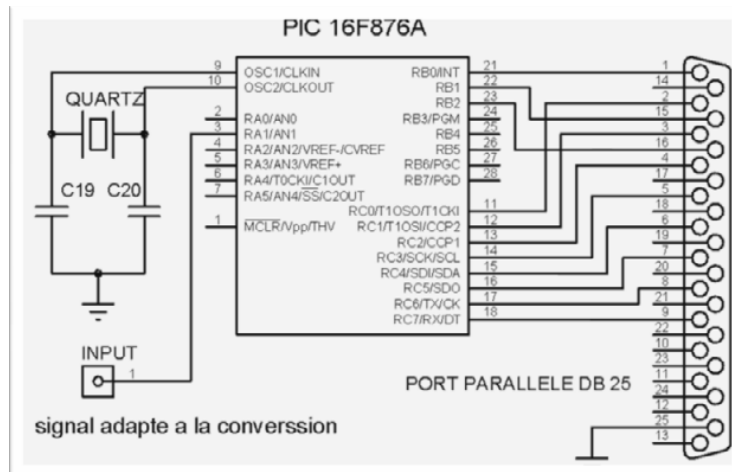


Figure (II.37) Schéma du CAN à base du microcontrôleur PIC16F876

II.3.2.6. Schéma électrique global de la carte d'acquisition

Le schéma global de la carte d'acquisition conçu par le logiciel Proteus comporte tous les étages précédents déjà cités. Il est représenté par la Figure (II.38).

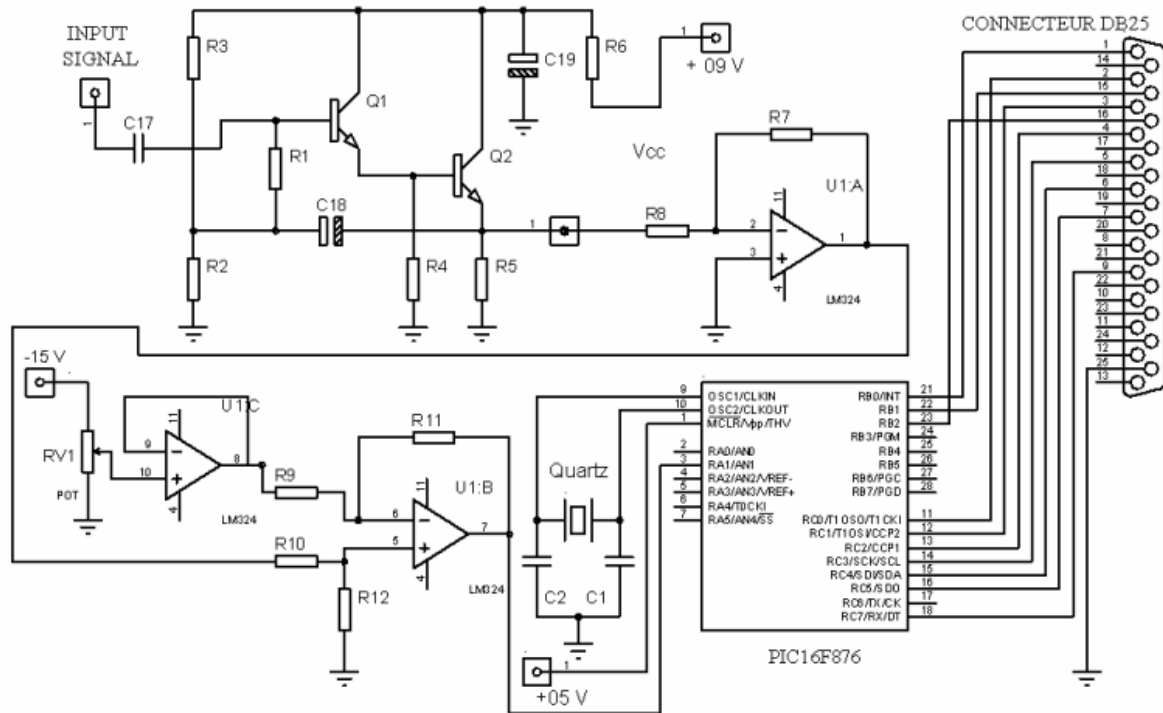


Figure (II.38) Schéma électrique global de la carte d'acquisition

Structure software

Pour la bonne gestion de la communication entre l'environnement du PC et le PC, on a besoin d'une structure software. On a opté pour une communication parallèle (LPT) à cause de ces performances en termes de simplicité et rapidité. Avant de donner l'organigramme de communication utilisant le port parallèle il est judicieux de montrer le programme source du PIC utilisant HT-PIC PICC pour la conversion de données sans entrer dans les détails.

Programme de conversion

Le programme de conversion analogique numérique du signal issu de l'entrée analogique AN1 délivre les données au port C. Le port B est utilisé pour communiqué avec les registres du PC (registre de contrôle et d'état) pour permettre le transfert des données Figure (II.39).

```
#include <pic.h> /* la bibliothèque globale de l'HT-PIC */
void main(void)
{
    TRISB=0xfd; /* configuration du port B */
    TRISC=0x00; /* configuration du port C */
    TRISA=0xff; /* configuration du port A */

    ADCON0 = 0b01000001; /* configuration de la fréquence d'horloge et AN1 */
    ADCON1 = 0b10000000; /* choix du décalage à droite */
    while(RB0==0) /* tester le démarrage de la conversion par RB0 */
    {
        ADGO = 1; /* activation de la conversion */
        while( ADGO == 1 ) /* tester la fin de la conversion par le bit ADGO */
        {
            PORTC=ADRESL; /* envoi des 8 bits poids faible */
            RB1=1; /* informer le PC de l'envoi des 8 bits */
            while(RB2==0) /* tester la réception des 8 bits sur le PC par RB2 */
            {
                PORTC=ADRESH; /* envoi des 2 bits poids fort */
                RB1=0; /* informer le PC de l'envoi des 2 bits */
                while(RB2==1) /* tester la réception des 2 bits sur le PC par RB2 */
                {
                }
            }
        }
    }
}
```

Figure (II.39) Programme de conversion

Programme d'acquisition de la première variante

Les données envoyées par le microcontrôleur PIC 16F876 sont par la suite lues et stockées dans un fichier dans la mémoire. Cette opération est assurée par un programme d'acquisition écrit en langage C au niveau du PC en utilisant le TURBO C+.

Organigramme d'acquisition :

L'organigramme de la Figure (II.40) montre le déroulement du processus de lecture et du stockage des données dans le PC.

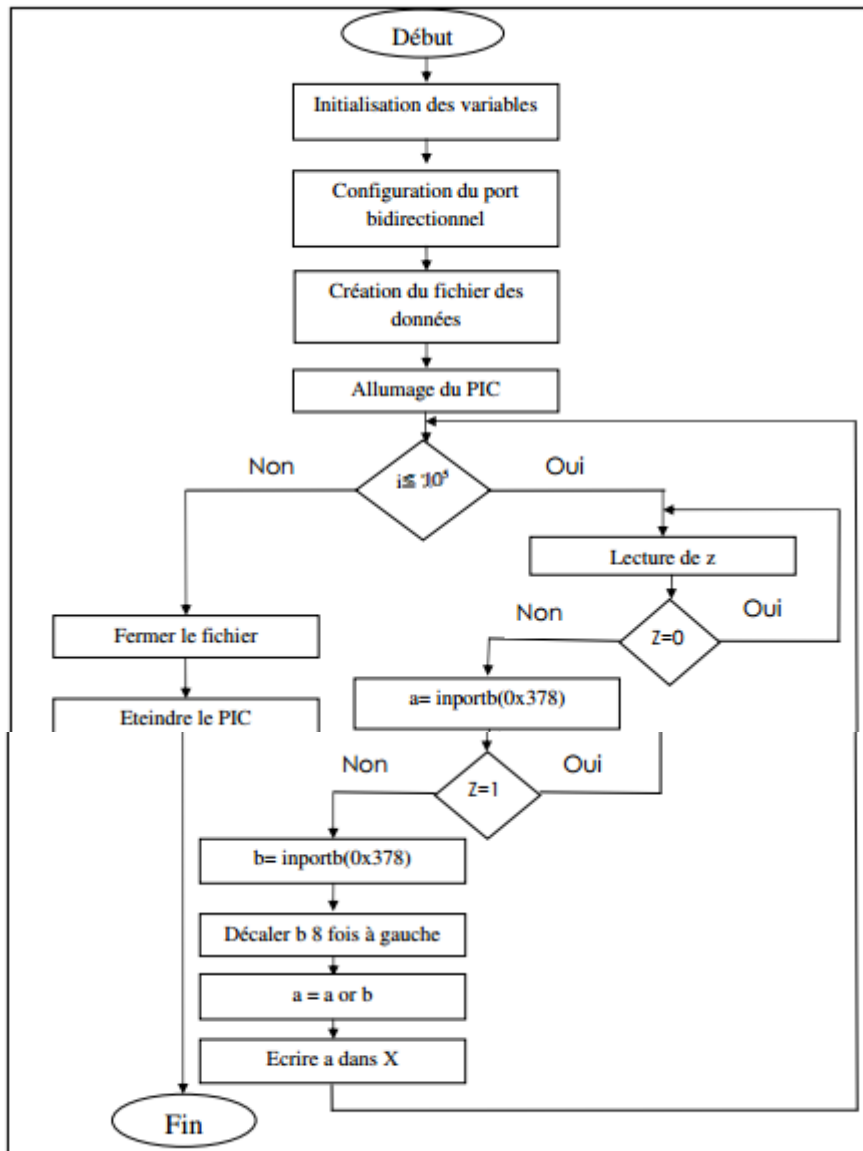


Figure (II.40) Organigramme de lecture et stockage des données dans le PC

II.3.2.7 Affichage des résultats expérimentaux

Après l'élaboration des programmes de conversion et d'acquisition sous environnement C, on a opté à utiliser le logiciel Matlab pour l'affichage et le traitement des données. Les signaux ainsi obtenus sont représentés par les deux Figures II.41 et II.42.

a) Signal sans fuite

A une position bien définie par rapport au capteur, on a relevé le signal avant le déclenchement de la fuite. Le signal obtenu est représenté par la Figure (II.41). En analysant le signal sans fuite, on constate que ses variations montrent l'allure d'un signal aléatoire non stationnaire.

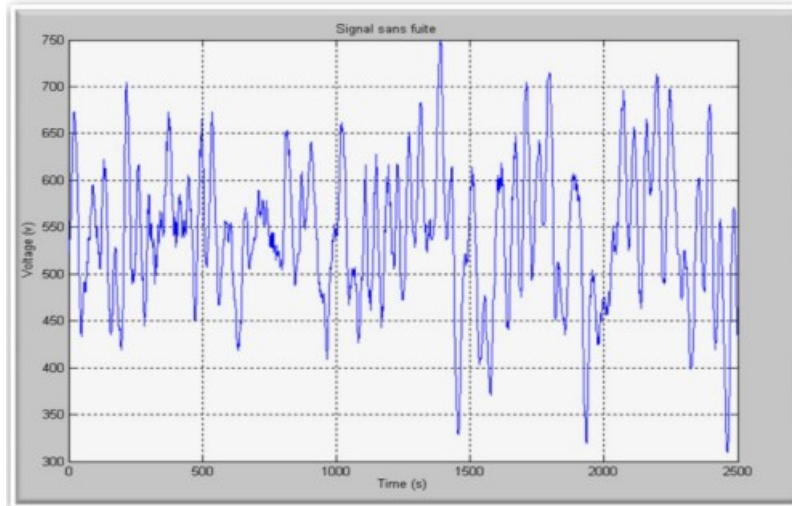


Figure (II.41) Signal sans fuite

b) Signal avec fuite

Après la création de la fuite, le signal récupéré est représenté par la Figure (II.42). De la même manière, concernant le signal avec fuite on constate qu'il a l'allure d'un signal aléatoire non stationnaire.

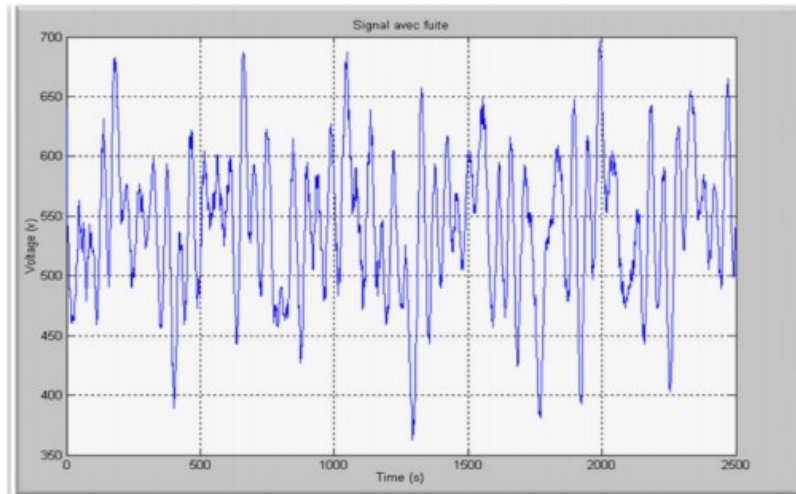


Figure (II.42) Signal avec fuite

Afin de confirmer l'efficacité de la méthode de détection proposée, on a utilisé une deuxième variante de système de détection. Cette dernière se base sur autre capteur de vibration. Nous avons également utilisé un oscilloscope numérique de la série GDS 1000 pour l'acquisition des données via le port USB. L'une de ses innovantes fonctions de cet oscilloscope est qu'il permet l'interfaçage à travers un logiciel fonctionnant avec le logiciel Matlab. Pour la deuxième variante, on a utilisé uniquement un étage d'amplification pour le conditionnement du signal.

En installant les drivers de l'oscilloscope sur le PC et en exploitant un programme d'interfaçage donné par la société GDS accessible sur son site internet, on est arrivé à faire la communication. En exécutant le programme sous logiciel Matlab, donné par le constructeur sur lequel, on a porté quelques modifications. On peut également choisir le nombre d'échantillons, et la vitesse de transmission des données (Baud rate), nous avons formés une base de données en faisant déplacer le capteur sur la conduite avec des distances équidistantes. La partie électrique de la deuxième variante est donnée par la Figure (II.43).

Le deuxième capteur de vibration utilisé est un AD 102 de la firme KMD [37]

Caractéristiques du capteur utilisé :

Type : DA 102

Dimensions (L x Ø) : 75 mm x 50 mm

Poids : 0.7 kg

Longueur du câble : 1.4m

Impédance d'entrée : $\geq 50 \text{ k}\Omega$.

Sensibilité : $\leq 80 \mu\text{V}$ à 400 Hz

Bande passante : 100- 2000 Hz



Figure (II.43) Photo de la partie électrique de la deuxième variante

II.4. Méthode de traitement du signal par la FFT

L'analyse de Fourier est l'une des premières méthodes de traitement du signal appliquée pour détecter les fuites des pipelines. Cette méthode classique n'est plus utilisée car elle a beaucoup de limites. L'une d'entre elles est que cette méthode ne peut être utilisée que pour le système de canalisation linéaire. En revanche, la TF donne une représentation globale de l'énergie en fonction de la fréquence de la séquence de données. Si les données sont non stationnaires, le spectre de Fourier ne peut pas donner aucune signification physique. En plus, Fourier ne peut

localiser aucune fréquence dans le temps. Lors de l'utilisation de la TF, la suppression de 96% des valeurs du signal de transformation, à savoir les valeurs de signal de transformation ayant des valeurs absolues inférieures à celles retenues, due à un lissage global (filtrage passe-bas) et donc les pics locaux pendant la phase d'attaque ne sont plus reproduits [24].

Plusieurs travaux ont été menés pour l'analyse de la fuite en utilisant la FFT. Sang-Guk Lee et *al* ont mené une étude sur les signaux acoustiques émis par la fuite. Ils présentent une étude quantitative des fuites des soupapes à vapeur par l'analyse des paramètres AE, FFT et du RMS (Root Mean Square), afin de déterminer quelles caractéristiques du signal AE changent avec des conditions de fuite [36]. Les données pour chaque vanne ont été obtenues en faisant varier le taux de fuite et en enregistrant le niveau RMS moyen en fonction du temps et ensuite la fréquence par rapport à l'amplitude. Les taux de fuite ont été variés par la pression différentielle de la vanne. La majeure partie de l'analyse des données nécessite de tracer le taux de fuite par rapport au niveau RMS à une fréquence spécifique pour déterminer le degré de corrélation entre les deux variables en termes de précision, de résolution et de répétabilité.

Les résultats obtenus sont représentés par les Figures (II.44) et (II.45).

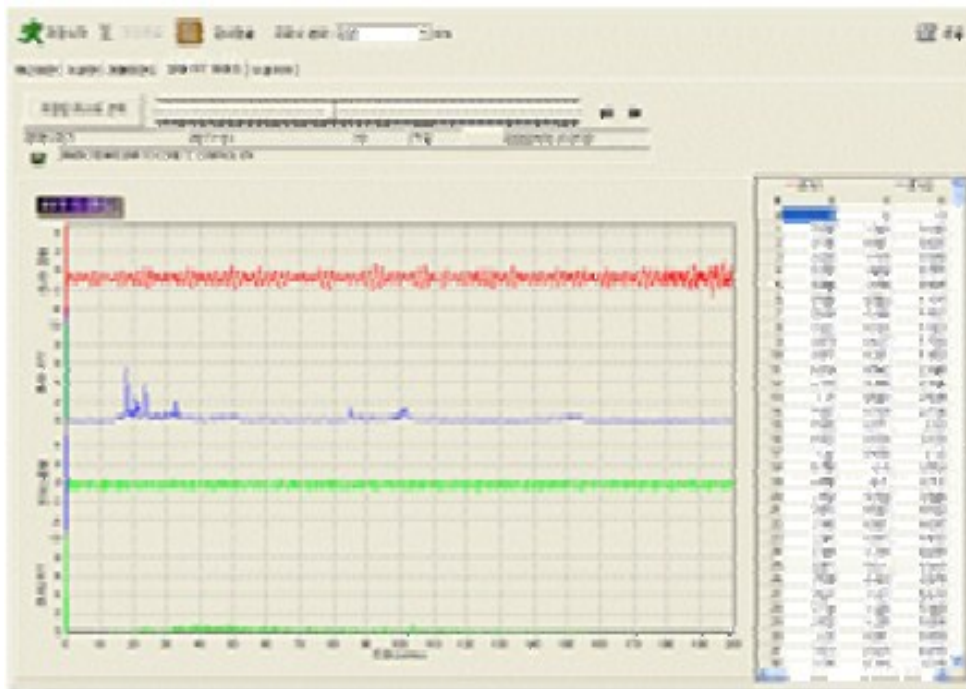


Figure (II.44) Signal temporel sans fuite et son FFT [36]

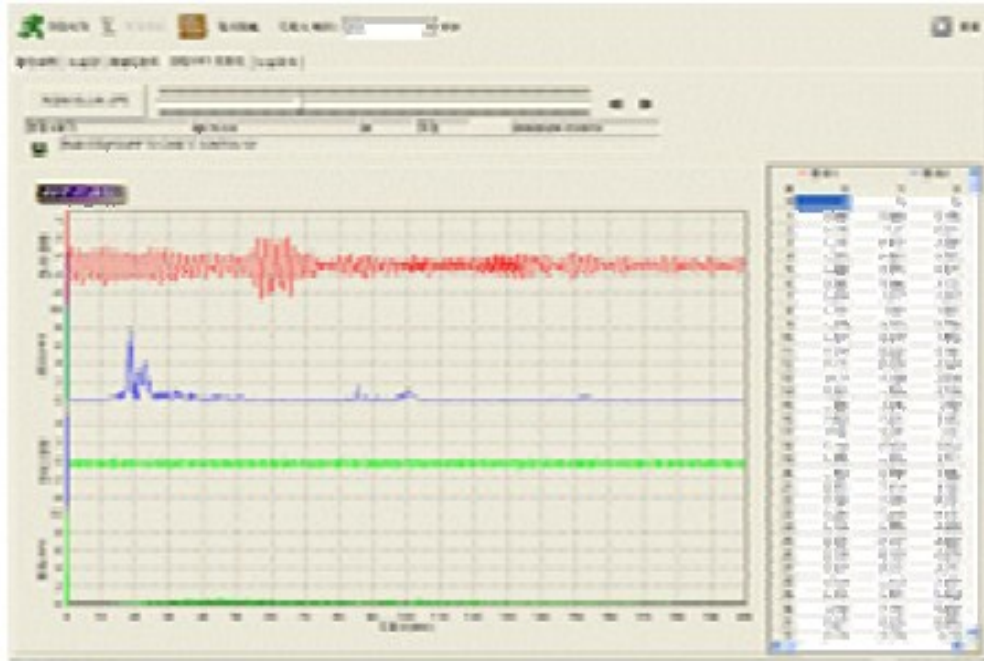


Figure (II.45) Signal temporel avec fuite et son FFT [36]

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle présente beaucoup de fausses détections à cause des perturbations du milieu extérieur qui peuvent avoir des pics plus grands que celui de la fuite. En outre le signal étant considéré comme stationnaire sur toute la fenêtre de mesure.

Souza et *al* [37] ont proposé une technique basée sur l'analyse spectrale des signaux de pression mesurés dans les sections de pipeline où la formation d'ondes stationnaires est favorisée, permettant une détection de fuite lors du démarrage / arrêt des pompes.

Les essais expérimentaux ont été effectués dans un pipeline de 1250 m de long pour diverses conditions opérationnelles de la canalisation (débit de liquide et configuration de fuite). Les prises des pressions transitoires ont été obtenues par quatre transducteurs connectés à un ordinateur PC Figure (II.46). Lorsqu'une fuite se produit dans une canalisation, une onde de pression se propage dans la canalisation, en amont et en aval par rapport à la position de fuite. La détection et l'analyse des pressions transitoires générées par l'apparition de fuite avec la vitesse d'onde de pression mesurée permettent la détection et la localisation des fuites dans les pipelines.

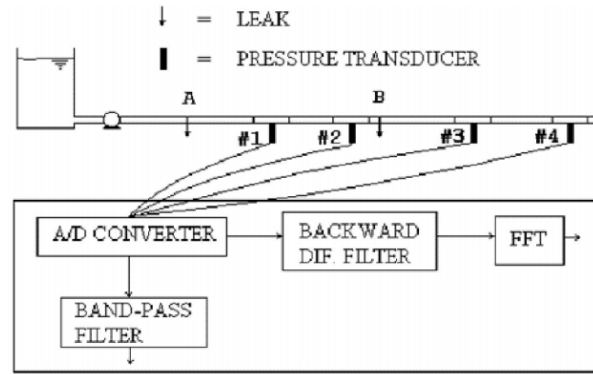


Figure (II.46) Schéma du montage expérimental [37]

A partir des résultats obtenus Figures ((II.47) (a), (b), (c), (d)), une analyse spectrale des pressions transitoires fournit un chemin simple et efficace pour l'identification des fuites lors de l'ouverture et la fermeture des pompes dans les pipelines.

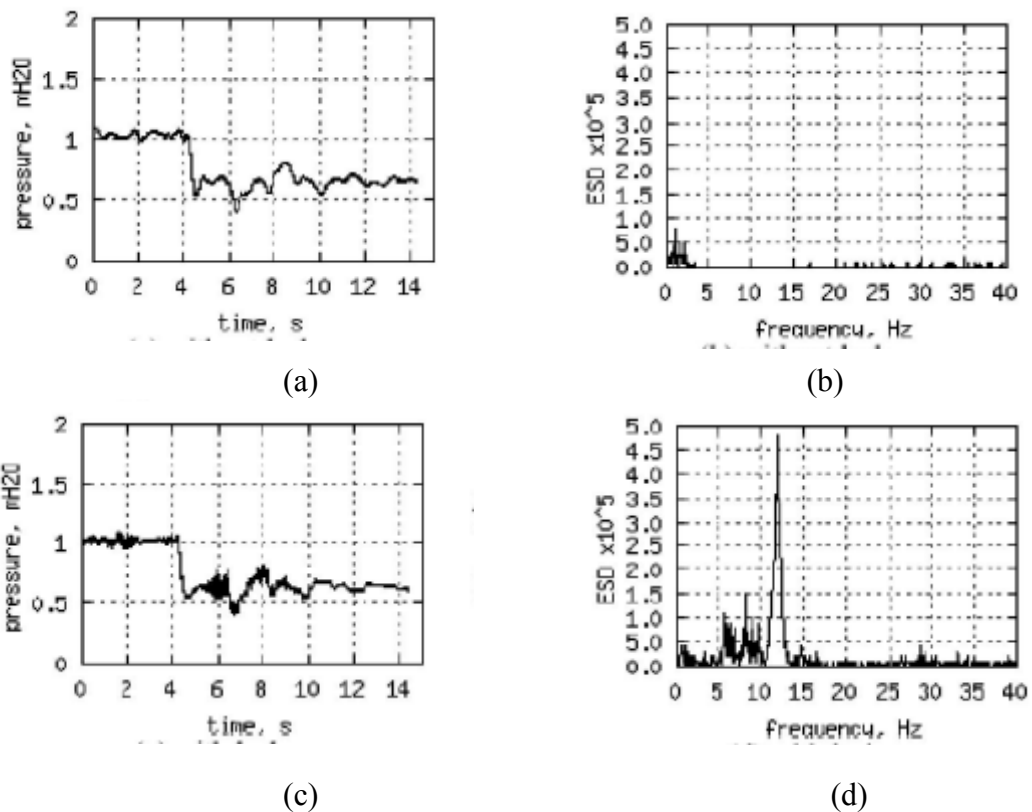


Figure (II.47) Signaux sans et avec fuite avec leurs spectres (a) Signal temporel sans fuite, (b) FFT du signal sans fuite (c) Signal temporel avec fuite, (d) FFT du signal avec fuite [37]

De la même façon, l'inconvénient de cette méthode est que le signal est pris sur toute sa plage temporelle comme étant stationnaire. En plus, ces travaux de recherche visent toujours la valeur maximale de la FFT comme étant la fréquence de la fuite ce qui n'est toujours juste.

Pour surmonter le choix de la valeur maximale, Brunner, et *al*, [38] ont proposé une méthode se basant sur un seuillage pour prendre une décision de la présence de la fuite. Les résultats qu'ils ont obtenus indiquent que l'analyse des amplitudes maximales du signal AE n'est pas bien adaptée pour l'identification des fuites. L'étude a été faite pour deux différentes pressions et diamètres de la fuite. Les résultats qu'ils ont obtenus sont donnés par la Figure (II.48).

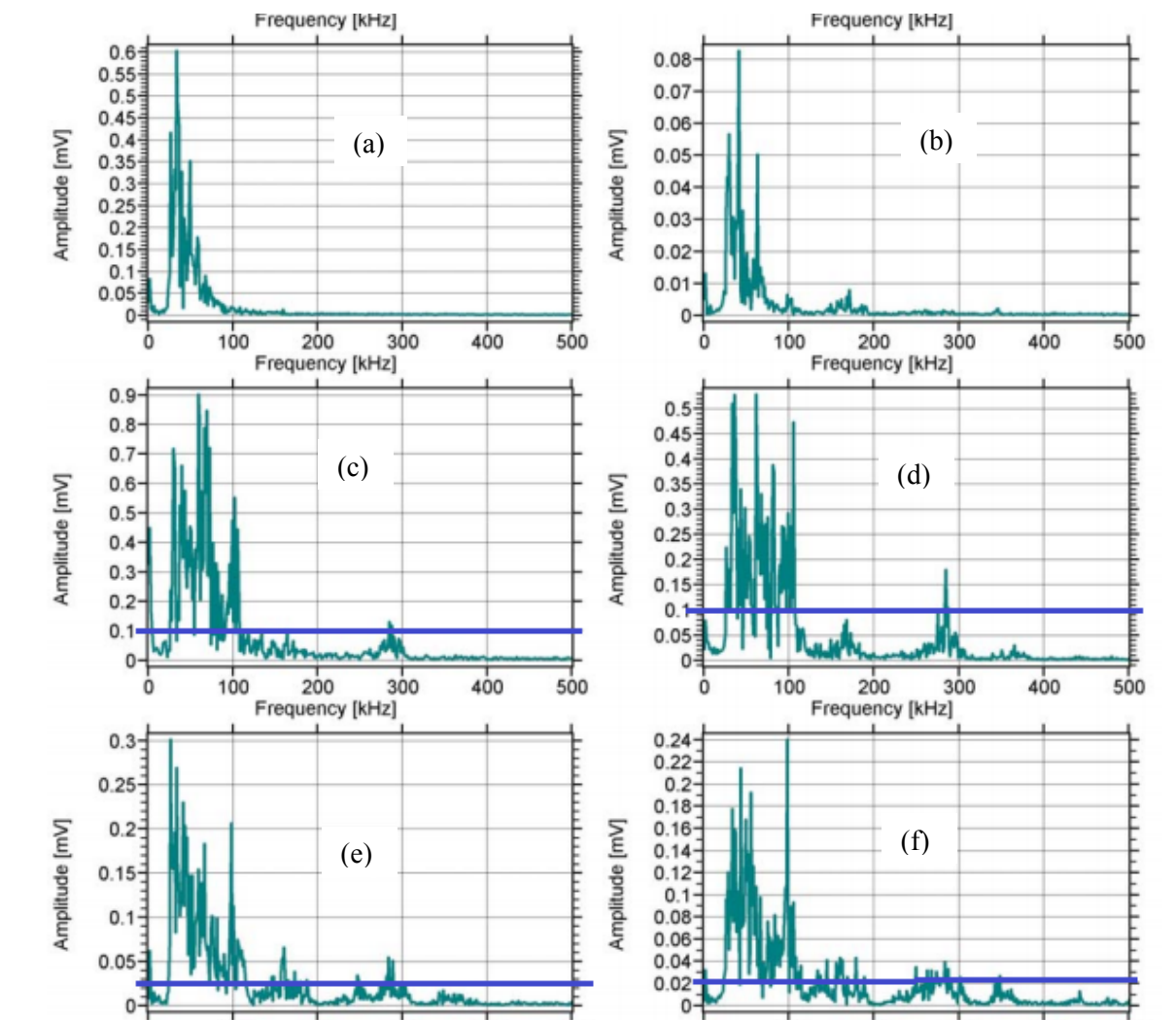


Figure (II.47) Spectres d'amplitude des signaux vibratoires

- (a) Signal sans fuite pour $\varnothing = 0.35$ mm et $P=6$ bars,
- (b) Signal sans fuite pour $\varnothing = 0.35$ mm et $P=8$ bars
- (c) Signal avec fuite pour $\varnothing = 0.35$ mm et $P=6$ bars
- (d) Signal avec fuite pour $\varnothing = 0.35$ mm et $P=8$ bars,
- (e) Signal avec fuite pour $\varnothing = 0.50$ mm et $P=6$ bars
- (f) Signal avec fuite pour $\varnothing = 0.50$ mm et $P=8$ bars

Où P désigne la pression

Pour une fréquence supérieure à 200KHz et un seuil $TH = 0.1mV$, la de décision d'existence de la fuite est prise (cas d'une pression de 6 Bars).

II.5. Caractéristiques du signal vibratoire

Les signaux de vibration sont des signaux aléatoires c.-à-d. l'évolution du signal est imprévisible en fonction du temps, et l'évaluation du signal se fait par un modèle statistique. Les signaux aléatoires sont classés en deux catégories.

- **Signaux stationnaires** : Les propriétés statistiques (moyenne, écart type, ...) du signal ne changent pas au cours du temps Figure (II.48).



Figure (II.49) Représentation d'un signal stationnaire

- **Signaux non stationnaires** : Les propriétés statistiques du signal changent au cours du temps Figure (II.50).

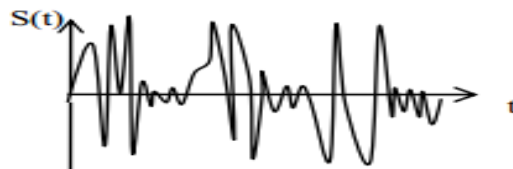


Figure (II.50) Représentation d'un signal non stationnaire

Les signaux stationnaires sont eux aussi divisés en deux classes

- **Signaux ergodiques** : Si les moyennes statistiques du signal stationnaire sont équivalentes aux moyennes temporelles alors le signal aléatoire stationnaire est ergodique.
- **Signaux non ergodiques** : Dans le cas où la moyenne statistique est différente de la moyenne temporelle le signal aléatoire est dit non ergodique.

II.5.1. Linéarité

En se basant sur les travaux effectués par Wenqing et al qui montrent que les systèmes de transmission de pipeline sont des systèmes non linéaires [39]. En général, les termes signaux linéaires et non linéaires sont largement utilisés dans la littérature d'ingénierie, en particulier dans le contexte des techniques d'analyse de signaux qui traitent de tels signaux. A cet égard, nous pouvons nous référer à une fonction comme étant linéaire si elle satisfait la condition ci-dessous :

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\forall x, y, n \in \mathbb{R}, f(x + y) = f(x) + f(y) \text{ et } f(nx) = nf(x) \quad (2.7)$$

Par conséquent, il est prudent de considérer les signaux linéaires et non linéaires comme ceux qui proviennent respectivement de systèmes linéaires et non linéaires. Par exemple, les signaux non linéaires peuvent être considérés comme ceux générés par les systèmes dynamiques qui obéissent à des équations non linéaires.

II.5.2. Stationnarité

Les signaux issus des capteurs de vibration placés sur des pipelines sont des signaux non stationnaires [40]. Pour confirmer la non stationnarité de notre signal, nous avons pris deux mesures pour deux différentes distances et voir leurs moyennes statistiques et leurs écarts type respectivement.

Tableau (II.1) Confirmation de la non stationnarité du signal vibratoire

Distance en cm	Moyenne	Ecart type
20	130.30	27.0310
30	130.45	13.2502

II.5.2.1. Effet de la segmentation du signal vibratoire non stationnaire

Pour remédier au problème de la stationnarité, nous avons procédé à la segmentation du signal issu du capteur de vibration. L'idée est formée des travaux des autres chercheurs qui ont au premier lieu appliqué des méthodes de traitement de signal tel que la FFT, STFT, en supposant que le signal sur toute la fenêtre d'acquisition est stationnaire. En second lieu la plupart des travaux ont visé la valeur maximale du spectre fréquentiel pour prendre la décision d'existence de la fuite. Afin de réduire considérablement l'effet de la stationnarité, nous avons proposés comme deuxième contribution la segmentation du signal en des segments de durée suffisante pour qu'il soit stationnaire me permettant ainsi d'appliquer la TF. Le temps optimal que nous

avons obtenu est de 50 ms sur une fenêtre temporelle de 500 ms. L'application a été vérifiée pour des différentes distances du signal acquis.

II.6. Détection et localisation de fuites d'eau par un signal segmenté

Avant d'expliquer la méthode proposée utilisant la FFT comme méthode de détection, il est judicieux de donner quelques détails sur la FFT.

a - Rappel théorique

Les définitions générales de la transformée de Fourier \mathcal{F} et de sa transformée inverse \mathcal{F}^{-1} sont donnée par :

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f)e^{j2\pi ft} df = \mathcal{F}\{H(f)\} \quad (2.8)$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt = \mathcal{F}^{-1}\{h(t)\} \quad (2.9)$$

$H(f)$ est appelée le spectre du signal temporel $h(t)$ [41]. L'opérateur de la TF inverse \mathcal{F}^{-1} génère le spectre à partir d'un signal, et l'opérateur \mathcal{F} de la transformée de Fourier rétablit le signal d'un spectre. Un seul point du spectre correspond à une seule onde exponentielle dans le signal, et vice versa. Le signal est souvent défini dans le domaine temporel et le spectre dans le domaine fréquentiel, comme ci-dessus.

Usuellement, le signal $h(t)$ est réel. Le spectre $H(f)$ peut être encore complexe car

$$\begin{aligned} H(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt = \mathcal{F}^{-1}\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cos(2\pi ft) dt \\ &\quad -j \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \sin(2\pi ft) dt = \mathcal{F}_{\cos}\{h(t)\} - j \mathcal{F}_{\sin}\{h(t)\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$\mathcal{F}_{\cos}\{h(t)\}$ et $\mathcal{F}_{\sin}\{h(t)\}$ sont appelées la transformée en cosinus, et la transformée en sinus respectivement de $h(t)$.

$$|H(f)| = \sqrt{[\mathcal{F}_{\cos}\{h(t)\}]^2 + [\mathcal{F}_{\sin}\{h(t)\}]^2} \quad (2.11)$$

$|H(f)|$ est appelé l'amplitude du spectre et

$$\theta(f) = \arctang \frac{\mathcal{F}_{\sin}\{h(t)\}}{\mathcal{F}_{\cos}\{h(t)\}} \quad (2.12)$$

$\theta(f)$ est appelée la phase du spectre (l'équation 2.12 est valable seulement si $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq +\frac{\pi}{2}$). Le spectre d'amplitude et le spectre de phase sont illustrés par la Figure (II.51). La TF inverse et la TF peuvent être exprimées à l'aide de la transformation du cosinus et de la transformée sinus comme

$$\mathcal{F}^{-1}\{h(t)\} = \mathcal{F}_{\cos}\{h(t)\} - j \mathcal{F}_{\sin}\{h(t)\} \quad (2.13)$$

et

$$\mathcal{F}\{H(f)\} = \mathcal{F}_{\cos}\{H(f)\} + j \mathcal{F}_{\sin}\{H(f)\} \quad (2.14)$$

Souvent $j \mathcal{F}_{\sin}\{H(f)\}$ égale à zéro.

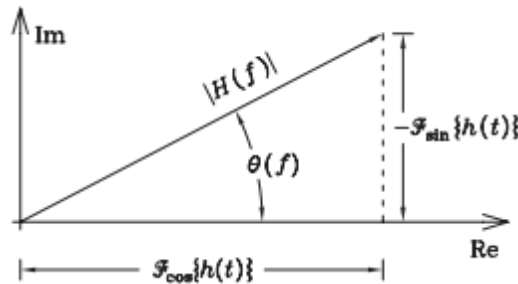


Figure (II.51) Spectre d'amplitude $|H(f)|$ et spectre de phase $\theta(f)$

Dans la pratique, nous ne traitons pas les fonctions qui sont exprimées sous forme d'expressions mathématiques explicites dont les transformées de Fourier sont connues. Au lieu de cela, les TFs sont calculées numériquement. En pratique, la mesure d'un signal nous donne habituellement un nombre fini de données, mesuré à des points discrets (un nombre d'échantillons bien déterminé). En conséquence, aussi les intégrales des transformées de Fourier doivent être approximées par des sommes finies. L'intégrale de $-\infty$ à $+\infty$ est remplacée par une somme de $-N$ à $N-1$.

Le calcul d'une TFD est possible, si l'on enregistre le signal $h(t)$ à $2N$ échantillons également espacés.

$$t_m = m\Delta t, \quad m = -N, -N + 1, -N + 2, \dots, N - 1 \quad (2.15)$$

Généralement, le signal enregistré est une fonction réelle. Si le signal est réel et symétrique, alors, selon l'équation 2.9, le spectre $H(f)$ est aussi réel et symétrique.

$$H(-f) = H(f). \quad (2.16)$$

Le spectre calculé à partir des échantillons de signaux discrets est donné par une approximation discrète de $H(f)$ dans l'équation 2.9. Le spectre obtenu est

$$H_T^{\Delta t}(f) = \Delta t \sum_{m=-N}^{N-1} h(m\Delta t) e^{-j2\pi f m \Delta t} \quad (2.17)$$

Où

$$T = N \Delta t \quad (2.18)$$

Il est clair qu'un signal qui se compose d'un nombre fini de points discrets ne peut pas contenir la même quantité d'informations qu'un signal continu à l'infini. Ceci, inévitablement, conduit à des distorsions, par rapport au cas réel.

b- Détecteur de fuites basé sur la méthode FFT

Dans la plupart des expériences, la méthode FFT a été appliquée à des canalisations principalement longues et non enterrées ayant quelques coudes. En se basant sur des systèmes de détection rapide, la réponse à l'analyse spectrale est d'un grand intérêt. L'utilisation de la méthode FFT permet de détecter des fuites avec une précision insatisfaisante. En outre, cette méthode nécessite un petit signal transitoire. Cependant, comme l'impact de la non-linéarité sur le système du pipeline est négligeable, il peut être considéré comme linéaire. Dans [9, 24], la méthode de détection des fuites utilisant l'analyse FFT est effectuée pour tous les échantillons reçus. Un seuil est alors appliqué pour prendre une décision binaire sur l'absence ou la présence de fuites. Dans les deux travaux, la méthodologie de détection des fuites consiste à capturer les données expérimentales puis à utiliser l'analyse FFT. Cela génère la réponse en fréquence (spectre) qui montre les fréquences prédominantes de chaque situation de fonctionnement. Dans les situations où des fuites existent, des pics apparaissent dans le spectre de fréquence du signal reçu. Néanmoins, ces pics ne doivent pas être observés dans une situation sans fuite. Cependant, il est montré dans [24-25] que la détection de fuites basée sur la FFT en utilisant le maximum du spectre résultant n'est pas toujours fiable. Par conséquent, une étape de seuillage est nécessaire pour améliorer les performances de la détection des fuites. À des fins de comparaison avec la méthode de fuite CWTDT proposée, la FFT est appliquée au segment individuel ; $\ell = 1, \dots, L$ des signaux de vibration reçus. Ensuite un seuillage trouvé empiriquement après plusieurs tests d'apprentissage le long de la conduite est appliqué. La décision finale est alors obtenue à partir des décisions partielles sur tous les segments. Tenant compte que dans un segment lorsque l'amplitude de la FFT dépasse le seuil en prend un '1' et dans le cas contraire en prend un '0'. À cette fin, le détecteur de fuite basé sur l'algorithme FFT existant est résumé comme suit.

c- Algorithmes

début

Etape 1 : Acquérir les échantillons de $i = 1, \dots, n$ du signal analogique de vibration du segment ℓ (temps d'échantillonnage T_s , et la fréquence d'échantillonnage $F_s=1/T_s$) .

Etape 2 : Calcul de $C_i = FFT(x_i)$ pour $i= 0, 1, \dots, n-1$.

Etape 3 : Calcul de l'amplitude $|C_i|$ for $i = 0, 1, \dots, n-1$.

Prendre $n/2$ points f_j sur l'intervalle $[0, F_s/2]$ définie comme $f_j= 0.5F_s j/(0.5n-1)$ pour $j= 0, 1, \dots, 0.5n-1$.

L'estimation de l'amplitude du spectre pour $f > 0$ est données par les points $(f_j, T_s |C_j|)$ pour $j=0, 1, \dots, 0.5n-1$.

Etape 4 : Calculer le maximum des coefficients obtenus de la FFT notés $\max(|C_j|)$.

Prendre une décision binaire, c-à-d
$$\begin{cases} D_\ell = 1 \text{ si } \max(|C_j|) \geq T \\ D_\ell = 0 \text{ si } \max(|C_j|) < T \end{cases}$$

Etape 5 : Répéter l'étape 1 jusqu'à l'étape 4 jusqu'à $\ell = L$.

Etape 6 : Compter le nombre des '1' des D_ℓ pour $\ell = 1, \dots, L$. Ensuite prendre une décision finale selon la règle de fusion 'K parmi L'

Fin

A noter que T et K sont obtenus empiriquement durant la phase d'entraînement. Les étapes décrites ci-dessus sont présentées par l'organigramme de la Figure (II.52).

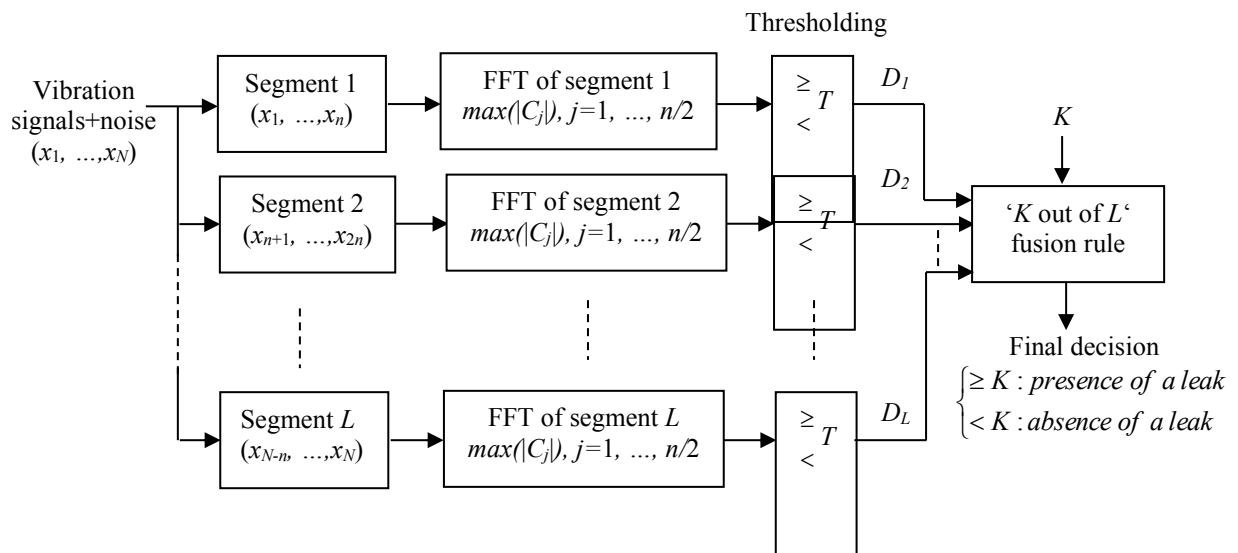


Figure (II.52) Organigramme de la méthode de détection de fuite proposée à base de la FFT [59]

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons abordé la détection des fuites à base d'un seul signal vibratoire sans oublier de donner un panorama des travaux des chercheurs impliqués. La première contribution est déduite des systèmes de détection prématurée des défauts dans les engrenages des machines tournantes. Cette dernière consiste à proposer un système de détection pour l'acquisition des signaux issus d'une fuite. Les techniques d'acquisition des signaux vibratoires ont pris une part importante. La méthode de traitement de signal vibratoire se basant sur la FFT a été présentée. Les commentaires des méthodes précédentes utilisant la FFT ont été exposés. La caractérisation du signal vibratoire a été décrite en se basant sur les deux critères de linéarité et stationnarité. Sans oublier de donner notre contribution personnelle pour remédier au problème de stationnarité. Finalement, une méthode de détection de fuite a été proposée se basant sur la segmentation du signal et l'application d'un seuil choisi empiriquement. Une décision partielle sur chaque segment est prise suivie d'une décision finale afin de prendre la décision d'existence de la fuite. D'autres méthodes dans la littérature ont été proposées pour surmonter le problème de stationnarité du signal comme l'analyse par l'ondelette. L'accent sur cette dernière fera le sujet du prochain chapitre.

INTRODUCTION

L'objectif du traitement du signal est d'analyser avec précision, coder efficacement, transmettre rapidement et reconstruire soigneusement un signal physique pris avec ses perturbations et ses oscillations. Autrement dit les outils de traitement de signal ont pris naissance l'un après l'autre de la TF avec ses variétés ainsi que les ondelettes de nos jours utilisées fréquemment dans le traitement des signaux dans différents domaines.

Dans ce chapitre, la technique d'ondelette continue va être présentée. Son application dans le domaine de la détection des fuites va être décrite et finalement l'application de l'ondelette de 'Haar' qui a été trouvée efficace pour l'étude des phénomènes transitoires va être appliquée.

L'ondelette est très bien adaptée à l'étude des signaux non stationnaires et non linéaires. Il est intuitif avant de décrire l'ondelette de passer par l'analyse temps/fréquence d'un signal qui a permis de combler les lacunes de la TF. Parmi les méthodes temps/fréquences les plus utilisées dans l'analyse des signaux de fuite on trouve à titre d'exemple la STFT. Chacune de ces méthodes a été illustrée par un exemple qui montre ses avantages et ses limitations. Il n'existe pas a priori une méthode d'analyse universelle adaptée à tous les signaux. L'analyse des signaux impose un choix judicieux de la méthode utilisée. Les résultats de l'application de l'ondelette de 'Haar' sur le signal de fuite vont être discutés et analysés.

III.1. Transformée de Fourier discrète (TFD)

La transformée de Fourier Discrète, généralement notée TFD, assigne à la séquence finie de N termes d'index k , $0 \leq k \leq N - 1$ d'un signal dans le domaine temporel

$$\{x(k)\}_{0 \leq k \leq N-1} = \{x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)\}$$

la séquence finie de N termes d'index ℓ , $0 \leq \ell \leq N - 1$

$\{X(\ell)\}_{0 \leq \ell \leq N} = \{X(0), X(1), \dots, X(N-1)\}$ dans le domaine spectral telle que :

$$X(\ell) = TFD\{x(k)\} = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j\frac{2\pi\ell k}{N}} \quad (3.1)$$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la TFD. Ce terme joue sur la précision du tracé alors que le terme X est lié à la résolution en fréquence [55].

La transformée de Fourier inverse est donnée par :

$$x(k) = ITFD\{X(\ell)\} = \frac{1}{N} \sum_{\ell=0}^{N-1} X(\ell) \cdot e^{j\frac{2\pi k \ell}{N}} \quad (3.2)$$

Le passage d'un plan à un autre est illustré par la Figure (III.1).

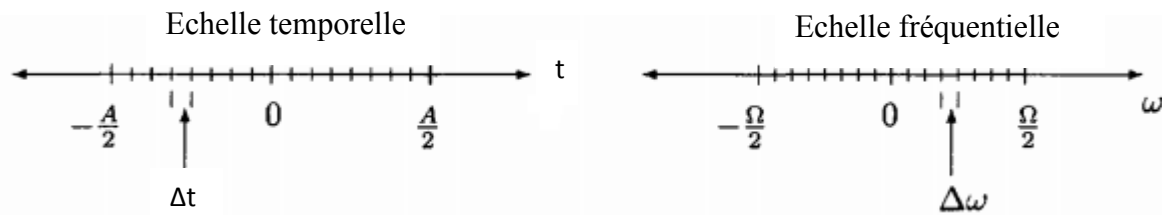


Figure (III.1) Relations de réciprocité temps-fréquence [56]

Tenant compte que l'échelle temporelle de la TFD est associée avec l'échelle fréquentielle à travers les relations de réciprocité.

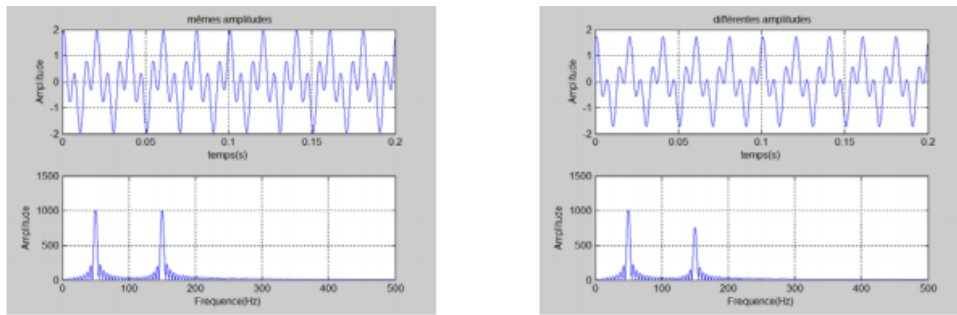
$$A \cdot \Omega = N \quad (3.3)$$

$$\Delta t \cdot \Delta \omega = \frac{1}{N} \quad (3.4)$$

III.2 Transformée de Fourier Rapide (FFT)

La transformée de Fourier rapide, est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey. C'est une méthode très efficace pour déterminer le spectre de n'importe quel signal. La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de N^2 à $N \cdot \log_2(N)$ opérations. La TFD calculée sur $N = 1000$ points nécessiteraient 10^6 cycles machine. Même sur un DSP (pourtant optimisé pour ce type d'opération), ayant un temps de cycle de 50 ns cela prendrait 50 ms, soit une fréquence f_c de 20Hz. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. Malgré sa célébrité et son succès, la FFT reste inadaptable pour les signaux non stationnaires et elle montre assez vite ses limitations, à cause de la perte de la localisation temporelle.

Un premier exemple sur un signal stationnaire est donné par la Figure (III.2) (a) et (b). Ce signal est composé d'une somme de deux sinusoïdes de fréquences (50 et 150 Hertz) de même amplitude, dont la FFT illustrée par la Figure (III.2) (a), et d'amplitude différente, dont la FFT tracée par Figure (III.2) (b). On constate qu'avec l'analyse de Fourier, les deux signaux sont identiques en raies spectrales et bien sûr avec des amplitudes différentes.



(a) Mêmes amplitudes

(b) Différentes amplitudes

Figure (III.2) Représentation temporelle et fréquentielle de la somme de deux sinusoïdes [57]

Un deuxième exemple sur un signal non stationnaire changeant l'allure fréquentielle dans le temps, en passant d'une sinusoïde de 50 Hz à une autre de 150 Hz en gardant la même amplitude. On remarque que l'analyse en fréquence est incapable de donner l'information sur la localisation temporelle du changement de régime dans le signal de la Figure (III.3). On le constate aussi dans la Figure (III.3) (b) une impulsion est ajoutée par rapport à la Figure (III.2) (a), mais sans aucun impact sur la FFT.

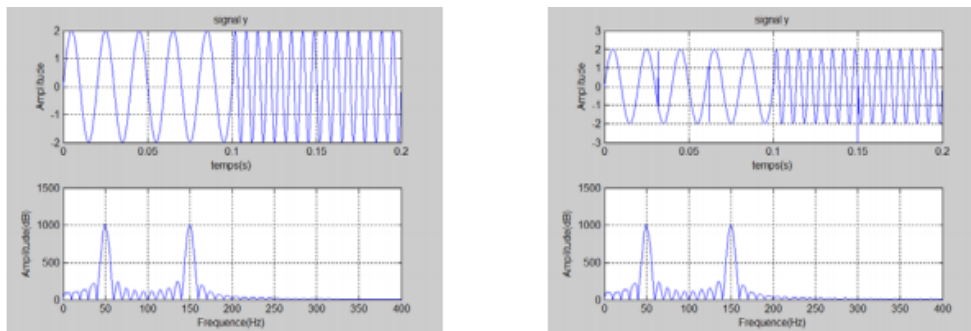


Figure (III.3) Perte de localisation temporelle [57]

(a) Représentation temporelle et fréquentielle d'une succession de deux sinusoïdes

(b) Représentation temporelle et fréquentielle d'une succession de deux sinusoïdes + une impulsion

III.2.1 Analyse des signaux dans le domaine temps-fréquence (STFT)

Pour surmonter les problèmes de stationnarité, l'analyse, par cette méthode, est introduite. L'idée originale sur laquelle est basée cette méthode est apparue en 1946 grâce au physicien Denis Gabor. Il s'agit de calculer la TF du signal temporel découpé en morceaux. Il s'agit de la multiplication du signal $x(t)$ par une fenêtre glissante $h(t - b)$ (réelle) et calcul de la TF de ce produit.

$$F(f, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)h(t - b)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

Par conséquent, la STFT décompose le signal dans le domaine temporel en deux dimensions temps et fréquence (f, b). Le module de ce plan qui est le carré de l'amplitude de la STFT. $|F(f, b)|^2$ est appelé le spectrogramme. Le problème, pour cette représentation, est le fenêtrage où le signal ne peut être représenté fidèlement et il se retrouve, donc, dans les mêmes limites que la TF. La résolution en temps et en fréquence du spectrogramme est limitée par le principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor qui stipule que l'on ne peut être infiniment précis en temps et en fréquence, la formulation mathématique du principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor est donnée par l'inégalité (3.6):

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (3.6)$$

Où Δt et Δf sont respectivement la résolution temporelle et la résolution fréquentielle et sont définies par (3.7) et (3.8) :

$$\Delta t = \sqrt{\frac{1}{E} \int (t - C_t)^2 |x(t)|^2 dt} \quad (3.7)$$

$$\Delta f = \sqrt{\frac{1}{E} \int (f - C_f)^2 |X(f)|^2 df} \quad (3.8)$$

E: étant l'énergie du signal C_f et C_t , correspondent respectivement au centre temporel et fréquentiel de l'énergie. Ces quantités sont définies par les équations (3.9) et (3.10).

$$C_t = \frac{1}{E} \int t \cdot |x(t)|^2 dt \quad (3.9)$$

$$C_f = \frac{1}{E} \int f \cdot |X(f)|^2 df \quad (3.10)$$

Le spectrogramme est une analyse mono-résolution ; on ne pas être à la fois « précis » en temps et en fréquence. Cependant, pour une large classe de signaux réels, les zones d'énergie sont non stationnaires sur des périodes courtes à haute fréquence d'où l'intérêt d'une analyse multi-résolution

Il est à noter qu'il est impossible d'analyser le signal sur une période infinie, d'où il faut choisir une fonction de pondération (Hamming, Hanning, Blackmann, Kaiser...) pour corriger les effets d'un fenêtrage fini comme illustré sur la Figure (III.4). De nombreuses fenêtres existent, certaines possèdent des paramètres de taille permettant de sélectionner la région la plus

adéquate du signal (sachant que cela a une influence alors sur les lobes secondaires et la taille du lobe principal). Parmi les fonctions de fenêtrage, on cite :

$$\text{Hamming} : w_{\text{hamming}}(n) = 0.54 - 0.46\cos\left(2\pi\frac{n}{N}\right), \text{ pour } 0 \leq n \leq N \quad (3.11)$$

$$\text{Blackman: } w_{\text{blackmann}}(n) = 0.42 - 0.5 \cos\left(2\pi\frac{n}{N}\right) + 0.08 \cos\left(2\pi\frac{n}{N}\right)^2$$

pour $0 \leq n \leq N$ (3.12)

$$\text{Triangulaire : } w_{\text{tri}}(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N} & \text{pour } 0 \leq n \leq \frac{N}{2} \\ \frac{2-2n}{N} & \text{pour } \frac{N}{2} \leq n \leq N \end{cases} \quad (3.13)$$

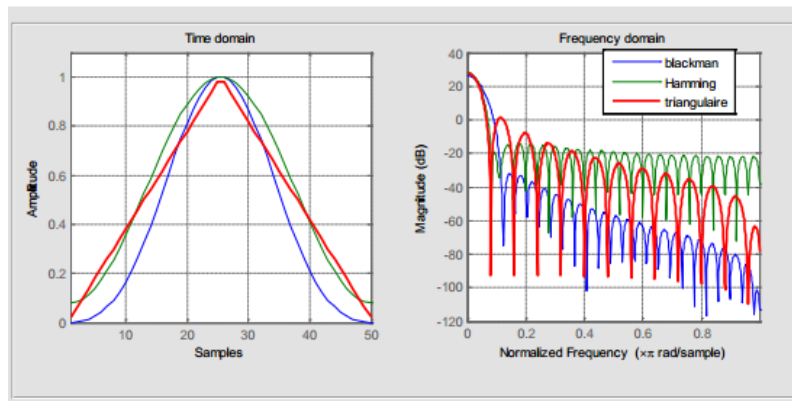


Figure (III.4) Fonctions de fenêtrage et leurs enveloppes de réponses fréquentielles [57]

Ainsi, l'étude d'un signal avec la STFT permet d'obtenir à la fois une information sur le temps et sur la fréquence, mais la résolution d'analyse est fixée par le choix de la taille de l'enveloppe :

- Si la fenêtre est trop petite, les basses fréquences n'y seront pas contenues.
- Si la fenêtre est trop grande, l'information sur les hautes fréquences est noyée dans l'information concernant la totalité de l'intervalle contenu dans la fenêtre.

Donc la taille fixe de la fenêtre est un gros inconvénient. L'outil idéal serait une fenêtre qui s'adapte aux variations de fréquence dans le signal à analyser. Cet outil existe, il s'agit de l'analyse par ondelettes.

Dans la transformée de Gabor, la fenêtre h est une fonction Gaussienne d'échelle (a):

$$h(x) = \frac{1}{a} e^{-\pi\left(\frac{x}{a}\right)^2} \cdot e^{2j\pi x}$$

Les fonctions de Gabor sont alors ($a=1$) : $e^{-\pi(x)^2} \cdot e^{2j\pi f x}$

Les fonctions de Gabor pour $f = 1, 2, 6$ et 10 Hz (partie réelle). La taille de la fenêtre est fixe et le nombre d'oscillations varie, principe présenté par la Figure (III.5). C'est au contraire à base de l'ondelette où la taille de la fenêtre qui varie et le nombre d'oscillations est fixe, principe illustré par la Figure (III.6) par ondelette complexe de Morlet $\Psi_{a,f}(x)e^{-\pi(x)^2} \cdot e^{j2\pi fx}$

Ondelettes de Morlet d'échelles $a = 2, 1, 1/2$ et $1/4$ (partie réelle). L'échelle (a) donne la taille du support. Lorsque $a > 1$ on a une dilatation, et si $a < 1$ on a une contraction.

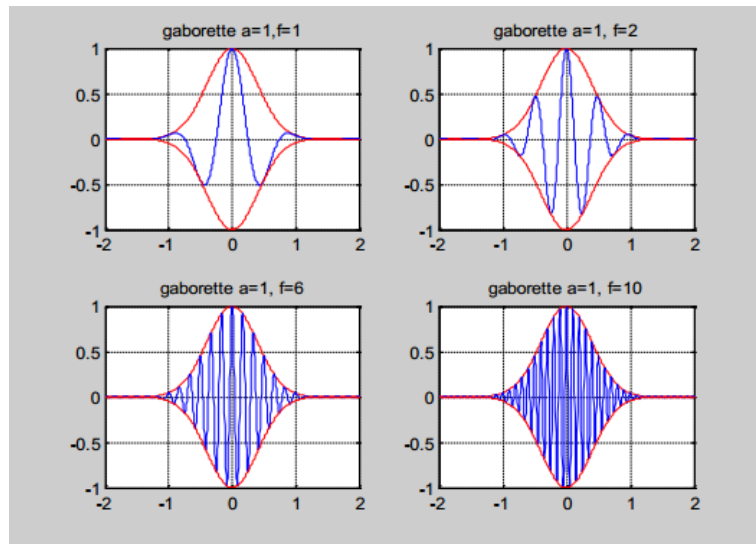


Figure (III.5) Base de Gabor

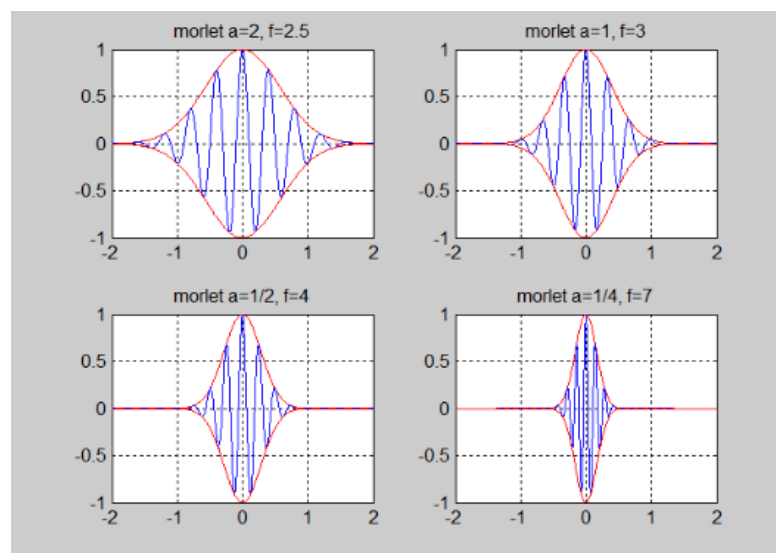


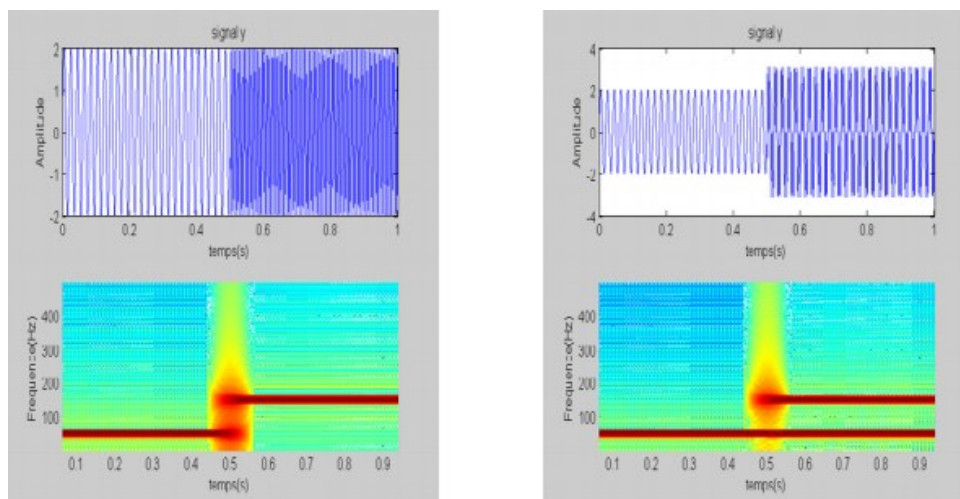
Figure (III.6) Base d'ondelette [57]

Si nous comparons la STFT à la TF, nous pouvons dire que cette perte de résolution est due au fait que les fonctions $e^{j\omega t}$ ne sont plus multipliées et intégrées de $-\infty$ à $+\infty$ mais de $-T/2$ à $T/2$.

Pour obtenir une résolution fréquentielle parfaite, il nous faudrait une fenêtre de longueur infinie, mais alors, nous aurions le même problème qu'au départ au sujet de la stationnarité du signal. Donc,

- La fenêtre ne doit pas être trop grande pour que le signal fenêtré soit stationnaire et que la résolution temporelle soit correcte
- Mais elle ne doit pas être trop petite non plus pour que les lobes correspondant à la TF de la fenêtre ne soient pas trop larges et pour que la résolution fréquentielle soit correcte.

Le troisième exemple illustre la succession de deux signaux. La Figure (III.7) (a) représente la succession de deux sinusoïdes de fréquence 50Hz à 150Hz. La Figure (III.7) (b) représente une sinusoïde de 50Hz puis sa somme avec une autre sinusoïde de 150Hz. On peut remarquer clairement que l'analyse temps-fréquence permet cette fois-ci de retrouver à la fois les fréquences et l'information temporelle du changement.



(a) : La succession de deux sinusoïdes.

(b) : La somme de deux sinusoïdes.

Figure (III.7) Représentation temporelle de la succession de deux sinusoïdes et leur STFT

Un quatrième exemple montre où la STFT trouve ses limites, voir Figure (III.8). La Figure (III.8) (a) donne les informations sur sa composition fréquentielle, la variation du signal ainsi que sur les impulsions introduites aux différents instants et ceci par un choix adéquat de la fenêtre d'analyse. La Figure (III.8) (a) montre le bon choix, la taille de la fenêtre est de 128 points. Par contre la Figure (III.8) (b) illustre un mauvais choix de la fenêtre donc le spectrogramme ne peut rien identifier, pour une taille de la fenêtre de 1024 points. La Figure (III.9) (a) présente la fenêtre de 64 points et qui est précise en temps mais pas en fréquence

alors que celle de 256 points est précise en fréquence mais pas en temps, voir Figure (III.9) (b). Il est à noter que le pas d'échantillonnage est de 0.1ms pour tous les exemples.

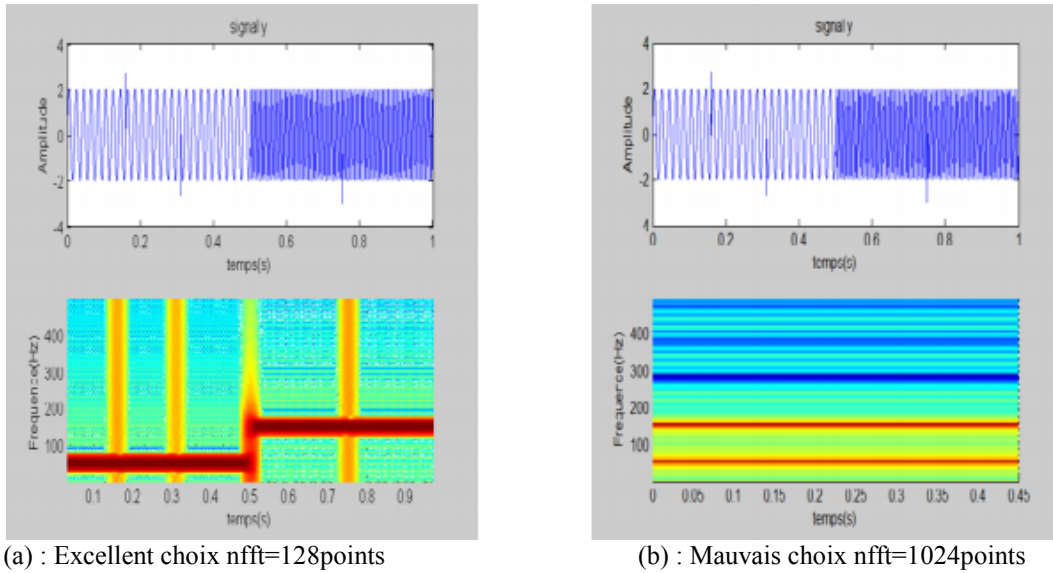


Figure (III.8) Représentations temporelles de la succession de deux sinusoides et leurs STFTs

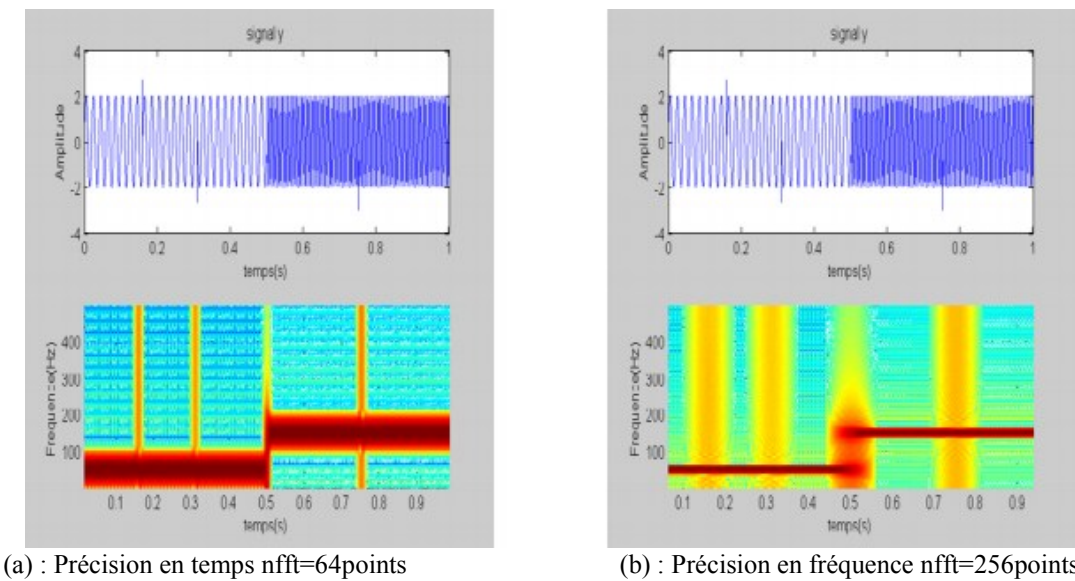


Figure (III.9) Représentation temporelle de la succession de deux sinusoides et leurs STFT [57]

III.3. Ondelettes (WAVELETS)

Il est apparu que la décomposition obtenue par la TF et de Gabor (STFT), n'était pas toujours la plus satisfaisante et la première transformation en ondelettes (le nom n'est pas encore utilisé) est proposée par 'Haar' en 1910 ; il serait plus judicieux de parler alors de « paléo-ondelette ». Les précurseurs conscients de cette technique ont été des mathématiciens (Calderon 1964), des physiciens (Aslaken et Klauder en 1968, Paul en 1985), et surtout des ingénieurs (ou des chercheurs en sciences pour l'ingénieur) comme Esteban et Galand (1977), Smith et Barnwell (1986), Vetterli (1986), nous pourrions parler dans leur cas de « pré-ondelette ». Mais le premier à avoir utilisé la méthode et le premier à avoir proposé le nom d'ondelettes fut Jean Morlet (1983) [58].

Le terme ondelette désigne une fonction $\psi \in L^2(\mathfrak{R})$ qui oscille sur un intervalle de longueur finie, donc d'intégrale nulle. Au-delà, la fonction décroît très vite vers zéro. Elle est normée $|\psi| = 1$ et elle vérifie la condition d'admissibilité :

$$\int_{\mathfrak{R}^+} \frac{|\hat{\psi}(t)|^2}{|t|} dt = \int_{\mathfrak{R}^-} \frac{|\hat{\psi}(t)|^2}{|t|} dt < +\infty \quad (3.14)$$

Où $\hat{\psi}$ désigne la transformée de Fourier de ψ .

A partir de l'unique fonction ψ , on construit par translation et dilatation une famille d'ondelettes :

$$\Psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right), a \in \mathfrak{R}^+, b \in \mathfrak{R} \quad (3.15)$$

Dans cette expression, a est le facteur d'échelle et b le paramètre de translation. La variable a joue le rôle de l'inverse de la fréquence : plus a est petit moins l'ondelette (la fonction analysante) est étendue temporellement, donc plus la fréquence centrale de son spectre est élevée.

III.3.1 Transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes est un outil qui découpe les données, les fonctions ou les opérateurs en composantes fréquentielles suivant une résolution adaptée à l'échelle. C'est un moyen efficace de réaliser une analyse temps-fréquence et un outil pour la détection des singularités. Autrement dit, les deux résolutions doivent varier en sens inverse en conservant un produit constant pour un pavage énergétiquement régulier de l'espace temps-fréquence. Ceci doit conduire à une utilisation rationnelle de cet espace par la réalisation dans tous les cas du meilleur compromis possible entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle.

Il existe aussi de nombreuses manières de classer les types de transformées en ondelettes. On peut utiliser les ondelettes orthogonales pour le développement en ondelettes discret et les ondelettes non orthogonales pour le développement en ondelettes continu. D'une autre manière, on peut classer les transformées en ondelettes selon la famille à laquelle appartiennent les fonctions analysantes choisies. Les transformées obtenues sont suivant les cas discrètes ou continues, redondantes ou non [58].

III.3.2. Transformée en ondelettes continue

La transformation en ondelettes continue (CWT) est une méthode d'analyse temps-fréquence qui diffère de la (STFT) plus traditionnelle en permettant une localisation arbitrairement élevée dans le temps, des caractéristiques du signal haute fréquence [19]. Le CWT fait cela en ayant une largeur de fenêtre variable, qui est liée à l'échelle d'observation - Une flexibilité qui permet d'isoler les caractéristiques hautes fréquences. Les transformées continues sont obtenues en prenant le facteur d'échelle a et le pas de translation b dans l'ensemble des nombres réels [58]. Une autre distinction importante du STFT est que le CWT n'est pas limité à l'utilisation de fonctions d'analyse sinusoïdale.

Une grande sélection de formes d'ondes localisées peut être employée tant qu'elles satisfont à des critères mathématiques prédéfinis. La CWT d'un signal de temps continu, $x(t)$, est définie comme suit :

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.16)$$

Où $\psi^*(t)$ est le conjugué complexe de la fonction d'ondelette d'analyse $\psi(t)$, a et b sont les paramètres de dilatation et de localisation de l'ondelette respectivement. Pour quelle soit classée comme ondelette, une fonction doit satisfaire certains critères mathématiques.

1. Il doit avoir une énergie finie :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (3.17)$$

2. Si $\hat{\psi}(f)$ est la transformée de Fourier de $\psi(t)$, i.e.

$$\hat{\psi}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.18)$$

Ensuite, la condition suivante doit contenir

$$C_g = \int_0^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} df < \infty \quad (3.19)$$

Cela implique que l'ondelette n'a pas de composante de fréquence zéro, i.e. $\hat{\psi}(0) = 0$, où d'une autre manière, il doit avoir une moyenne zéro.

L'équation (3.19) est connue sous le nom de condition d'admissibilité et C_g est appelée constante d'admissibilité. La valeur de C_g dépend de l'ondelette choisie.

3. Pour les ondelettes complexes (ou analytiques), la TF doit être à la fois réelle et nulle pour les fréquences négatives.

La contribution énergétique du signal à l'échelle spécifique a et à l'emplacement b est donnée par la fonction de densité d'énergie en ondelettes bidimensionnelle connue sous le nom de scalogramme (analogue au spectrogramme - la surface de densité d'énergie du STFT) :

$$E(a, b) = |T(a, b)|^2 \quad (3.20)$$

En pratique, toutes les fonctions qui diffèrent de $|T(a, b)|^2$ par seulement un facteur multiplicatif constant sont également appelées scalogrammes, comme $\frac{|T(a, b)|^2}{C_g}$, $\frac{|T(a, b)|^2}{C_g f_c}$, etc où f_c est une fréquence caractéristique de la fonction ondelette. Le scalogramme peut être intégré à travers a et b pour récupérer l'énergie totale dans le signal en utilisant la constante d'admissibilité, C_g , comme suit :

$$E = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} |T(a, b)|^2 \frac{da}{a^2} db, \quad [= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)^2 dt] \quad (3.21)$$

La contribution relative de l'énergie totale contenue dans le signal à une échelle spécifique a est donnée par la distribution d'énergie dépendant de l'échelle:

$$E(a) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{+\infty} |T(a, b)|^2 db \quad (3.22)$$

Les pics dans (3.22) mettent en évidence les échelles énergétiques dominantes dans le signal. Nous pouvons convertir le spectre d'énergie d'ondelettes dépendant de l'échelle du signal, de (3.22), à un spectre d'énergie d'ondelettes dépendant de la fréquence $E_w(f)$ afin de comparer directement avec le spectre d'énergie de Fourier du signal $E_F(f)$. Pour ce faire, nous devons convertir de l'échelle a de l'ondelette (qui peut être interprétée comme une période représentative temporelle, ou spatio-temporelle pour les données physiques) à une fréquence caractéristique de l'ondelette telle que la fréquence de crête spectrale, le centre de la bande passante, la fréquence centrale. Les composantes spectrales sont inversement proportionnelles à la dilatation, i.e. f est proportionnelle à $\frac{1}{a}$. La fréquence associée à une ondelette d'échelle arbitraire a est donnée par

$$f = \frac{f_c}{a} \quad (3.23)$$

Où la fréquence caractéristique de l'ondelette mère (à l'échelle $a = 1$ et l'emplacement $b = 0$), f_c , devient une constante de mise à l'échelle et f est le représentant ou la fréquence de l'ondelette à l'échelle arbitraire a .

Enfin, comme pour la TF, le signal d'origine peut être reconstruit en utilisant une transformée inverse :

$$x(t) = \frac{1}{c_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} T(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (3.24)$$

Dans la pratique, une discrétisation fine du CWT est calculée quand l'emplacement b est discrétisé à l'intervalle d'échantillonnage et l'échelle a est discrétisée logarithmiquement.

III.4. Ondelette de ‘Haar’

L'ondelette de ‘Haar’ est applicable pour la décomposition et la détection de structures temporelles telles que les caractéristiques transitoires contenues dans les données vibratoires brutes unidimensionnelles. La sélection d'une fonction de base est motivée par les caractéristiques de données à extraire. Les fonctions alternatives déplacent différentes caractéristiques du jeu de données brutes entre les échelles. En particulier, l'onde mère $\psi(t)$ Figure (III.10) est discontinue et la fonction échelle $\varphi(t)$ de Haar sont exprimées par :

$$\psi(t) = \begin{cases} +1 \text{ pour } 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1 \text{ pour } \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0 \text{ ailleurs} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\varphi(t) = \begin{cases} +1 \text{ pour } 0 \leq t \leq 1 \\ 0 \text{ ailleurs} \end{cases} \quad (3.26)$$

La CWT de ‘Haar’ produit des différences sans chevauchement de moyennes pondérées des observations lorsqu'elles sont utilisées avec une série chronologique donnée à une seule dimension. Cette transformation tend à mettre en évidence les discontinuités dans l'ensemble de données brutes [44].

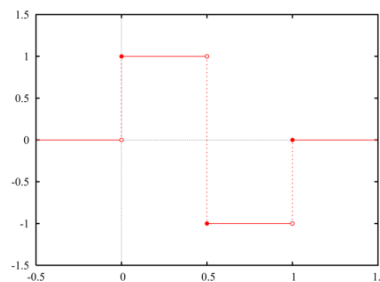


Figure (III.10) Ondelette mère de ‘Haar’

Dans la première partie de notre travail, nous n'avons traité qu'une seule position de fuite. Nous avons choisi arbitrairement une distance séparant la fuite du capteur. Après l'acquisition des deux signaux sans et avec fuite, on a segmenté ces derniers et sur chaque segment on a pris 256 échantillons. La méthode de détection proposée repose sur l'application de la CWT de ‘Haar’ aux deux signaux, sans et avec fuite respectivement. Afin de débruité les signaux plusieurs

méthodes sont utilisées pour le choix du seuil. Nous avons trouvé que le meilleur seuillage pour ce type de signaux est celui de Donoho [32]. Sur la matrice des coefficients de l'ondelette obtenue on a appliqué un premier seuillage trouvé empiriquement. Après application de ce seuil nous avons obtenu une matrice qui ne comporte que des '0' et des '1'. On a comptabilisé le nombre des 1. Pour prendre une décision finale de la présence de la fuite on a passé par un deuxième seuillage. Ce dernier est aussi trouvé empiriquement. La décision de la présence de la fuite est prise si on trouve un nombre suffisant de segment qui vérifie la condition donnée en haut. Un choix de la fréquence d'échantillonnage du signal peut se faire en configurant les deux registres ADCON0 et ADCON1 du microcontrôleur PIC 16F877 qui intègre 4 convertisseurs analogiques numériques.

III.5. Résultats expérimentaux

III.5.1. Application de la FFT pour le signal avec et sans fuites

Pour traiter le signal avec et sans fuite nous avons utilisé, en premier lieu, la FFT en essayant d'obtenir un critère discriminatif entre les deux signaux avec et sans fuite. C'est pour cette raison qu'on a partagé le signal en segments de 1024 points. Dans ce qui suit, on montre quelques résultats de l'application de la FFT sur des segments choisis aléatoirement, du signal avec et sans fuite. Figure (III.11), Figure (III.12) et Figure (III.13).

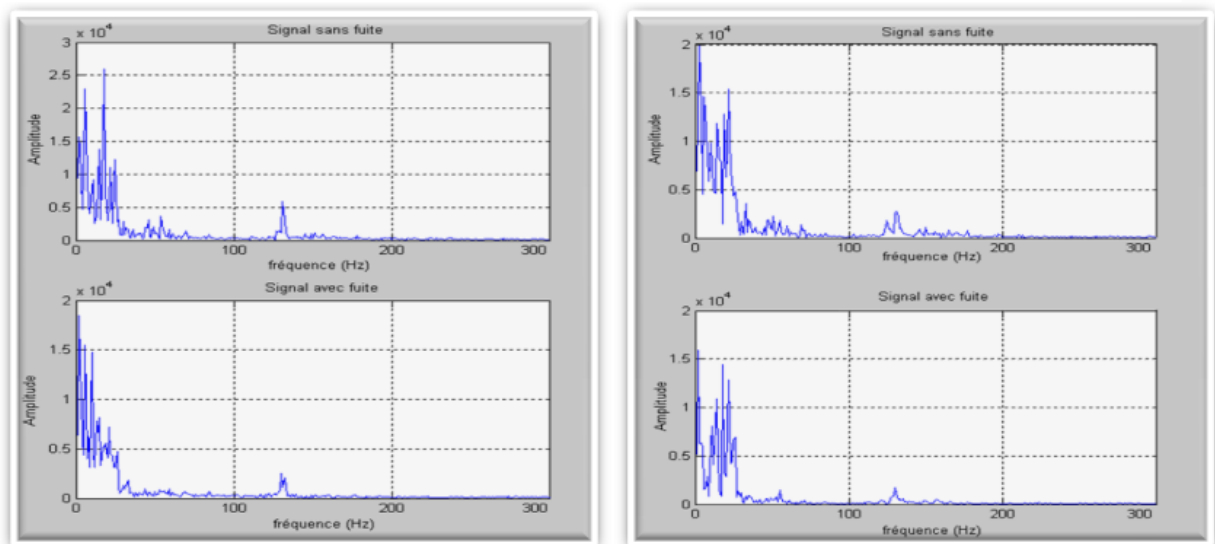


Figure (III.11) Résultats de l'application de la FFT sur les segments $n=3$ et $n=13$

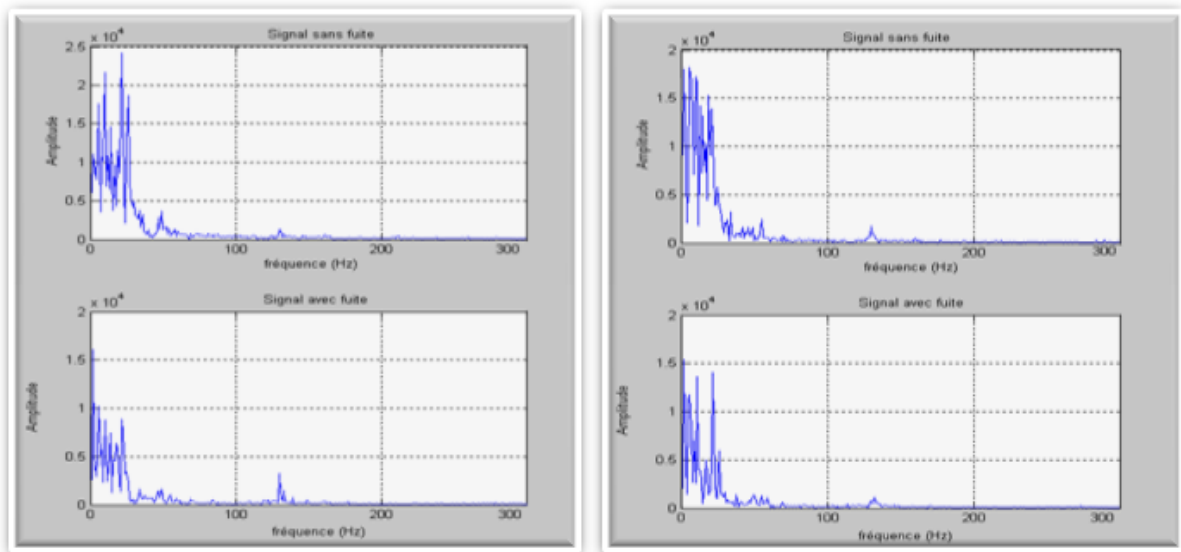


Figure (III.12) Résultats de l'application de la FFT sur les segments $n=20$ et $n=28$

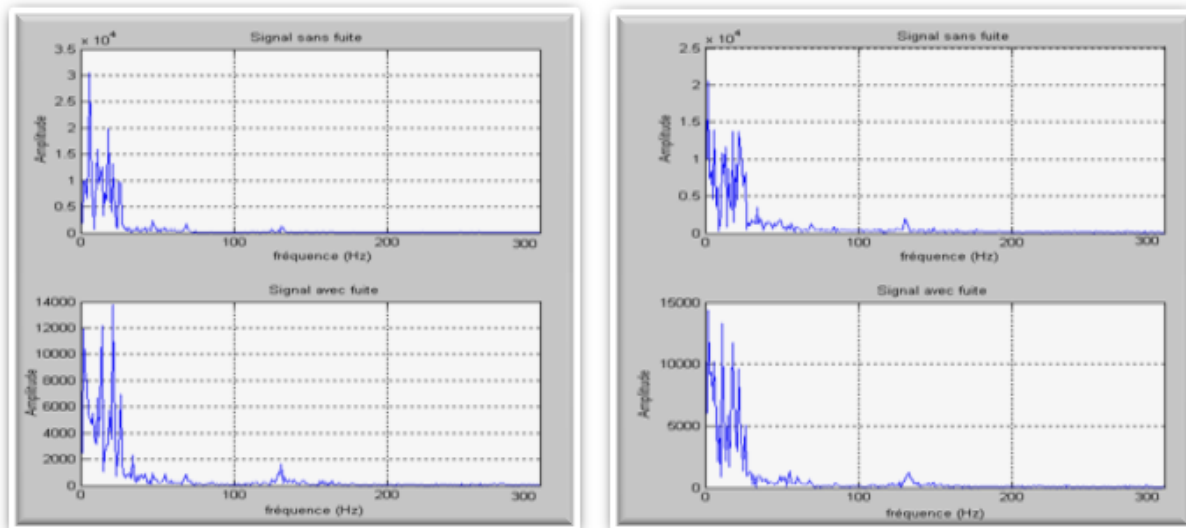


Figure (III.13) Résultats de l'application de la FFT sur les segments $n=37$ et $n=43$

Malheureusement, en utilisant la FFT, nous n'avons pas pu mettre en évidence un critère de discrimination efficace, ce qui nous a amené à penser à appliquer un outil plus performant valable pour les signaux non stationnaires qu'est la CWT. Les figures montrent la CWT obtenue lors de son application aux signaux sans et avec fuite. Notons, qu'on ne montre que la CWT de quelques segments choisis arbitrairement. (La longueur du segment est de 256 échantillons).

III.5.2. Organigramme de la méthode de détection de fuites proposée utilisant la CWT

Dans notre application, l'image des vibrations qui sont provoquée par la fuite dû aux fluctuations turbulentes dans le flux sont des charges électriques. Ces derniers vont subir une transformation courant -tension. Sur le signal électrique ainsi obtenue va être appliquée un pré amplification, un conditionnement et dernièrement une discrétisation. On a choisi une fenêtre temporelle de 10^5 échantillons. Le long de cette dernière on a découpé le signal à des segments de 256 échantillons. Comme il est mentionné on a appliqué La CWT et deux seuils

Figure (III.14).

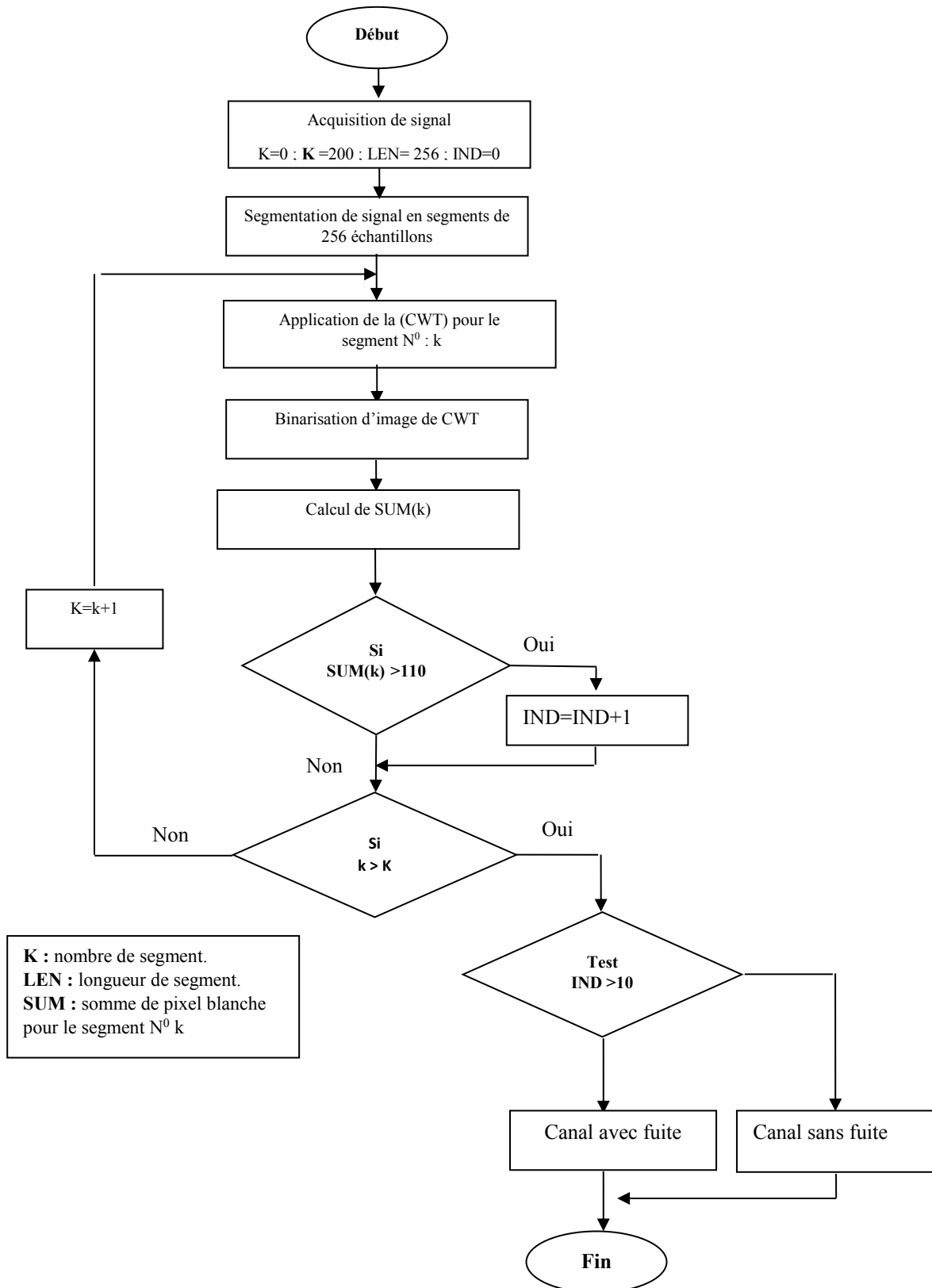


Figure (III.14) Organigramme de la méthode de détection par la CWT

III.5.3. Choix du critère discriminant

Nous avons appliqué à chaque segment la CWT, aux signaux sans et avec fuite. Les Figures (III.15), (III.16) et (III.17) montrent le résultat de l'application de la CWT de quelques segments désignés arbitrairement. On passe à un simple seuillage utilisé, communément, en traitement d'images pour éliminer le bruit entaché au signal. Suivi d'une binarisation s'agissant de mettre à zéro tous les coefficients de la matrice d'ondelette (en valeur absolue), à partir du 50^{ème} segment jusqu'au 200^{ème} segment sur l'axe des temps et entre 1 à 32 sur l'axe des échelles, qui sont inférieures à un seuil $TH=30$ obtenu à partir de la relation de Donoho [20]. Ceci mène à ce que tous les autres coefficients, appartenant à cette région et qui sont supérieur à TH sont mis à 1, Figures (III.18), (III.19) jusqu'à (III.23). A la fin, on comptabilise le nombre de pixels =1 (noté par SUM), si elle est supérieure à un autre seuil = 110 choisi empiriquement après plusieurs tests sur les signaux de fuite, et en appliquant le critère à partir duquel, on décide si le segment indique un canal sans fuite, sinon on décide le contraire (canal avec fuite). Notons qu'on a découpé le signal global sans/avec fuite en 200 segments. La décision que la conduite est sans ou avec fuite est prise suivant la règle qui suit :

- Si SUM est supérieure à 110 pour 5 segments ou plus (parmi les 200 segments du signal global), on décide que le signal indique un canal sans fuite, sinon, le canal est avec fuite.

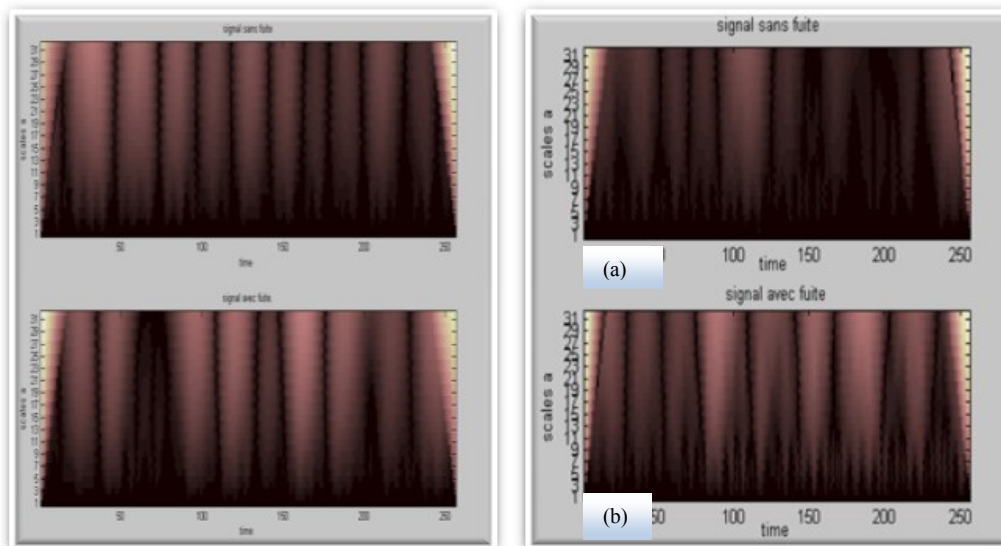


Figure (III.15) Résultats obtenus après application de la CWT sur les segments $n = 3$, et $n = 13$

(a) Signal sans fuite, (b) Signal avec fuite

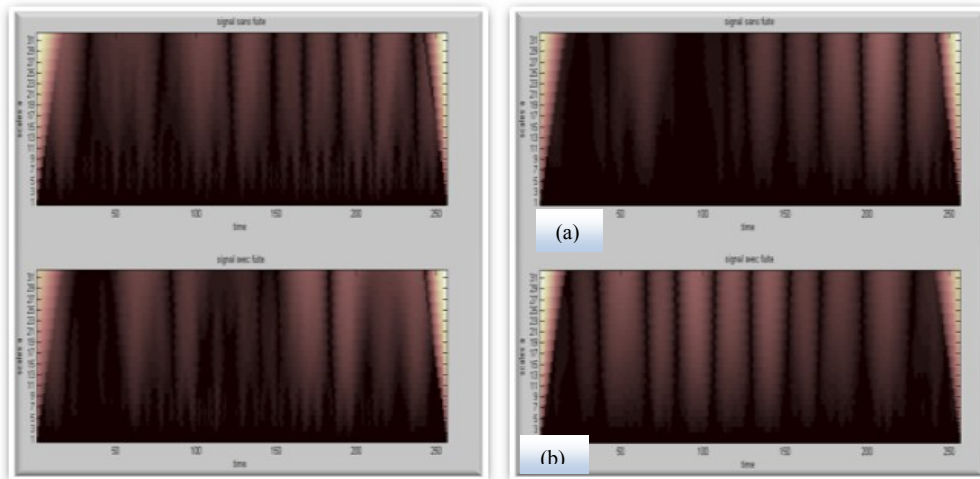


Figure (III.16) Résultats obtenus après application de la CWT sur les segments $n = 20$, et $n = 28$.
(a) Signal sans fuite, (b) Signal avec fuite

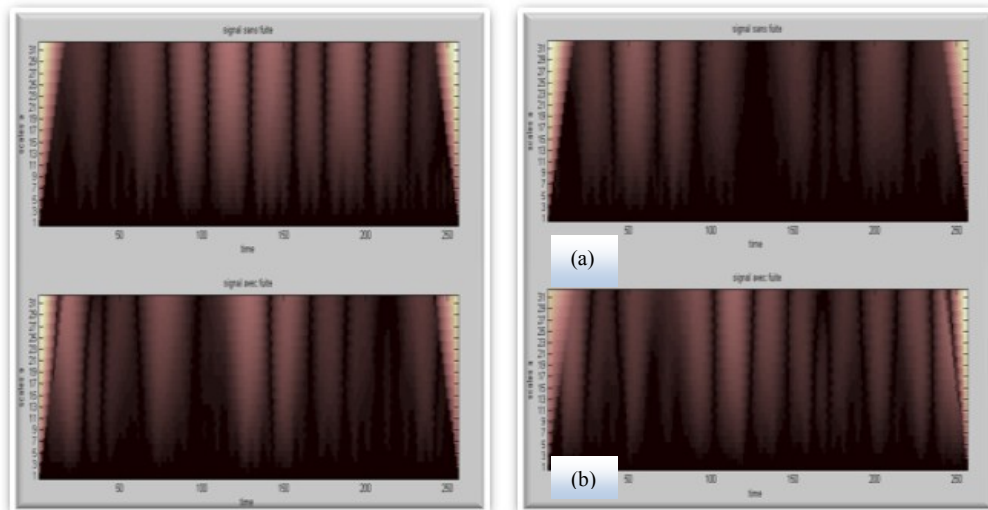


Figure (III.17) Résultats obtenus après application de la CWT sur les segments $n = 37$, et $n = 47$.
(a) Signal sans fuite, (b) Signal avec fuite

III.5.4. Binarisation d'image

L'image de la binarisation est obtenue en appliquant un premier seuillage. Les zones de couleur blanche représentent les '1' et les zones de couleur noire représentent les '0'.

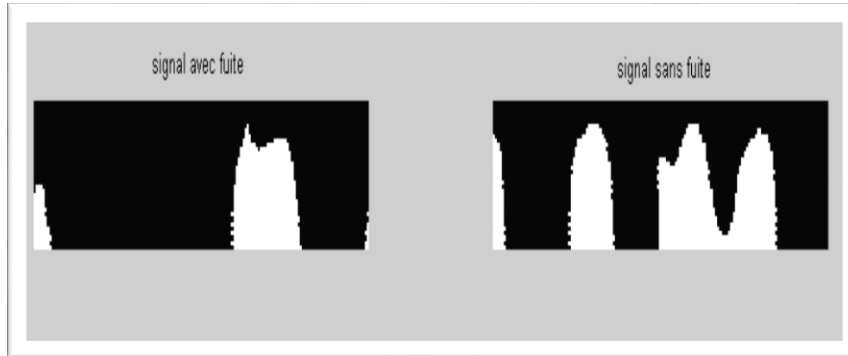


Figure (III.18) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 3$



Figure (III.19) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 13$

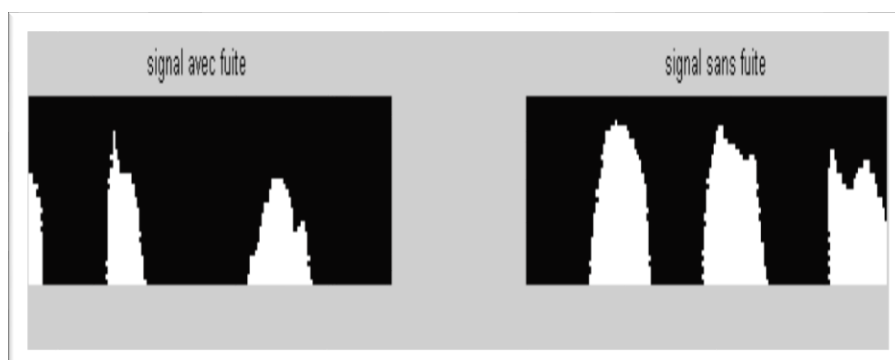


Figure (III.20) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 20$

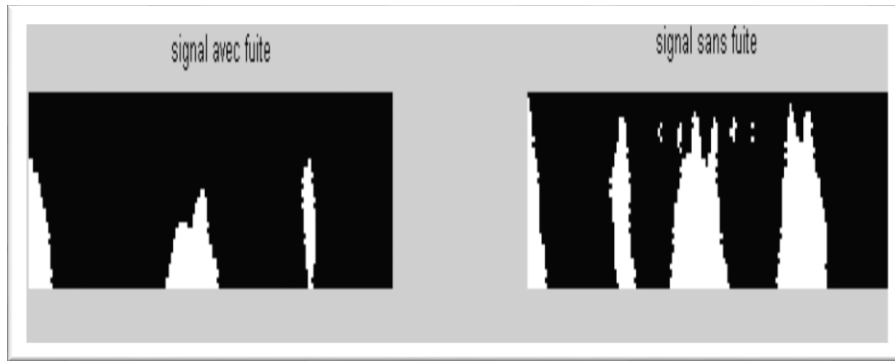


Figure (III.21) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 28$

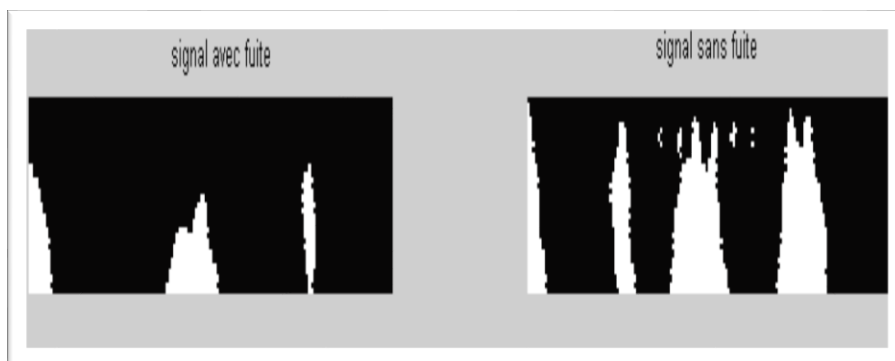


Figure (III.22) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 37$



Figure (III.23) Résultats obtenus après binarisation du segment $n = 47$

CONCLUSION

Dans ce chapitre, au premier lieu, un panorama des outils de traitement de signal a été présenté, en mode progressif, de la transformée de Fourier aux ondelettes. L'analyse des signaux a été illustrée didactiquement par des exemples montrant clairement l'apport de chacun de ces outils du traitement du signal. L'analyse du spectre par la FFT trouve ses limites par son incapacité de reconnaissance des signaux non stationnaires alors que la STFT semble avoir résoudre cet inconvénient dans le plan temps-fréquence. Malheureusement, le problème de fenêtrage reste insurmontable à cause du problème de l'incertitude de Heinsenberg, ce qui n'est pas le cas pour les ondelettes qui ont trouvé leur suprématie par rapport aux outils précédents. Ces dernières sont largement appliquées pour des signaux non stationnaires et non linéaires, cas de la majorité des signaux physiques. L'organigramme de la méthode de détection existante se basant sur la CWT a été donné. L'application de la technique sur des signaux réels a fait part de notre travail. L'incapacité de l'application de la FFT pour la prise de décision discriminative de la présence de fuite est explicitée. Enfin la méthode de détection se basant sur la CWT a été appliquée. Cette dernière fera l'objet du prochain chapitre.

INTRODUCTION

De nos jours, les responsables des AEPs font de grands efforts pour mettre en œuvre un programme d'entretien efficace, ce qui permet la détection des fuites au temps opportun. Les fuites peuvent causer des problèmes sérieux. En plus de la perte d'une grande quantité d'eau qui ne sera pas comptabilisée s'ajoute leurs effets nuisibles sur la santé publique due à la pénétration des contaminants à cause de la chute de pression. La recherche dans le domaine de détection et localisation des fuites est toujours en perpétuelle évolution. Dans ce chapitre, la méthode de détection se basant sur la CWT et la STFT va être exposée. La troisième contribution, proposant une nouvelle méthode de détection CWTDT sera détaillée. Les résultats de l'application de cette approche vont être exposés et comparés à celle des résultats obtenus par la FFT et la CWT présentées dans les Chapitres II et III respectivement.

VI.1 Détection des fuites à base de la CWT

Madjid Ahadi et al [14] ont proposé une nouvelle méthode se basant sur la SFFT et la CWT pour la détection et la localisation des fuites, dans les conduites en plastique. Dans cette méthode, le signal temporel est premièrement acquis, ensuite il est contrôlé par la STFT pour la localisation de la bande fréquentielle de la fuite. Une fois la bande de fréquence est déterminée. Il a utilisé l'ondelette de 'Gauss' pour déterminer l'instant où l'événement de la fuite s'est produit, en utilisant un seuil approprié pour la prise de décision.

VI.2 Algorithme de la méthode de détection par la CWT

L'étude est effectuée sur une conduite en plastique. Pour la collection du signal il a utilisé un hydrophone. Ce dernier est immergé dans la conduite, il transforme les fluctuations qui sont dû à la turbulence du flux, en un signal électrique. Afin de ne pas perdre toutes les informations dans le signal il a pris un long intervalle temporel pour l'acquisition. Au début et à un endroit bien défini, il a reçu le signal analogique $x(t)$ sans fuite. Il a discrétisé ce dernier en N échantillons x_i pour $i = 1, \dots, N$. La même application a été faite pour le signal avec fuite $y(t)$ en créant un orifice de diamètre bien défini sur la conduite. Le signal avec fuite échantillonné y_i a la même taille que le précédent. Après application de la FFT sur les deux signaux sans et avec fuite et en faisant une comparaison des spectres fréquentielles, il a déterminé la plage fréquentielle distinctes. Autrement dit, la plage où la fuite est située. Il a trouvé utile que l'utilisation de la STFT, lui permet d'extraire des informations sur le temps en analysant les spectrogrammes. Ensuite par application de la CWT et un choix judicieux du seuil sur l'axe des échelles il a en déduit et la position et le moment où la fuite c'est produit.

Cette procédure qui applique la CWT est résumée par les étapes suivantes :

Debut

Etape 1

- Recevoir x_i et y_i pour $i = 1, \dots, N$ des deux signaux vibratoires analogiques sans et avec fuite (Le temps d'échantillonnage T_s et la fréquence d'échantillonnage $F_s = 1/T_s$).

Etape 2

- Calculer les spectres $X_i = \|\text{FFT}(x_i)\|$ and $Y_i = \|\text{FFT}(y_i)\|$ for $i = 0, 1, \dots, (N-1)/2$.

Etape 3

- Calculer l'amplitude $Z_i = |X_i - Y_i|$ for $i = 0, 1, \dots, (N-1)/2$.

(Détermination de la bande fréquentielle là où il y a une différence entre ces deux signaux sans et avec fuite afin d'éliminer le bruit généré par le système hydraulique.)

Etape 4

- Calculer la matrice $S_{ij} = \text{STFT}(x_i)$ pour $i = 0, 1, \dots, (N-1)$ et $j = 1, \dots, R$

(Détermination du domaine temporel là où la fuite est produite)

Etape 5

- Après la détermination des bandes fréquentielle et temporelle en utilisant l'étape 3 et l'étape 4 respectivement

Calculer $W_{ij} = \text{CWT} - \text{Gauss27}(x_i)$ for $i = 0, 1, \dots, (N-1)$, and $j = 0, 1, \dots, m$.

Etape 6

- Mettre $i = h_1$ et $j = h_2$ (h_1 et h_2 sont des seuils temps/fréquence respectivement présélectionné expérimentalement).

Etape 7

- Si $W_{ij} \geq T$, $i \geq h_1$ et $j \geq h_2$: présence de la fuite.

Autrement

: Absence de la fuite

Fin

Les étapes mentionnées ci-dessus sont présentées par l'organigramme de la Figure (IV.1).

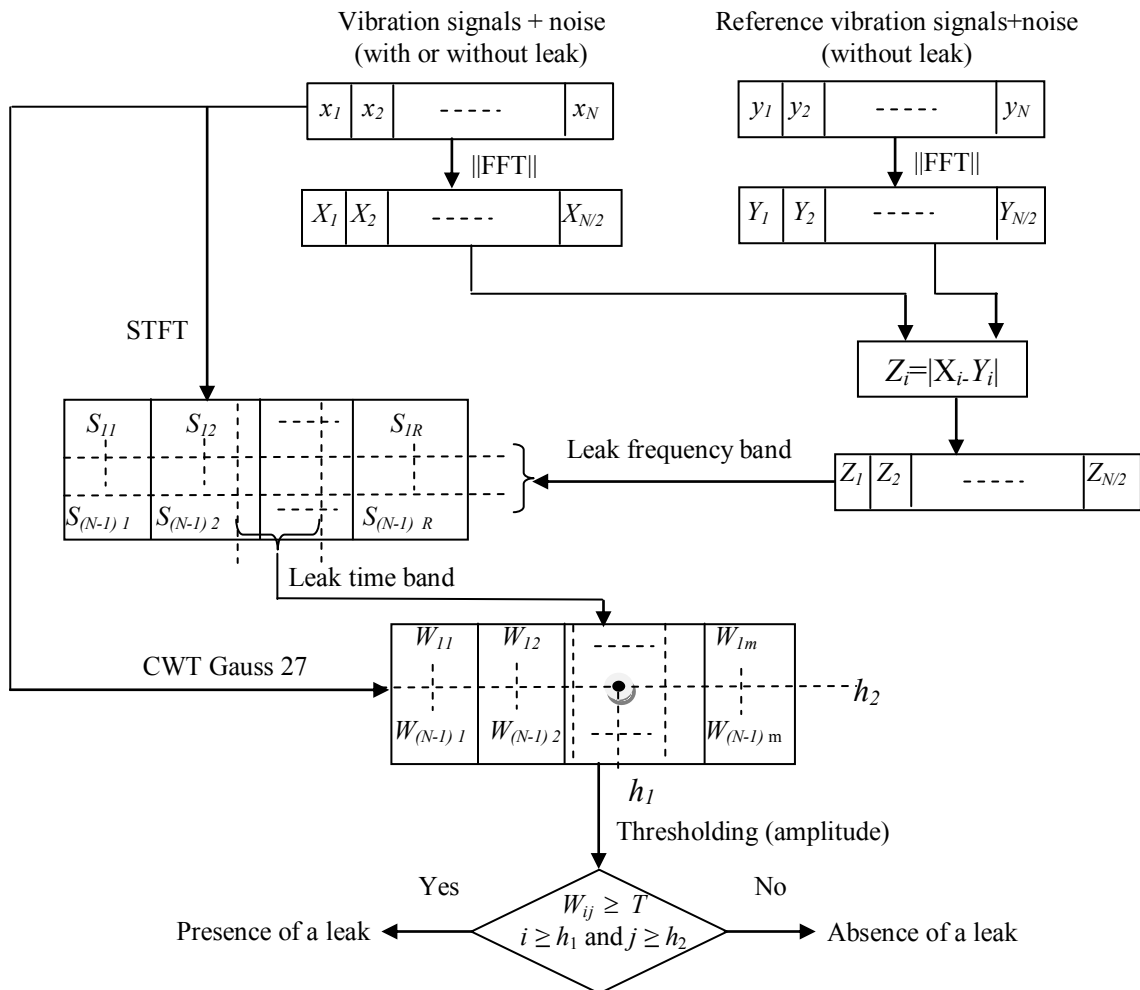


Figure (VI.1) Organigramme de détection par la CWT [59]

La FFT est appliquée aux deux signaux sans et avec fuite respectivement, afin de différencier entre eux et apprécier la bande là où il y a une distinction Figure (VI.2).

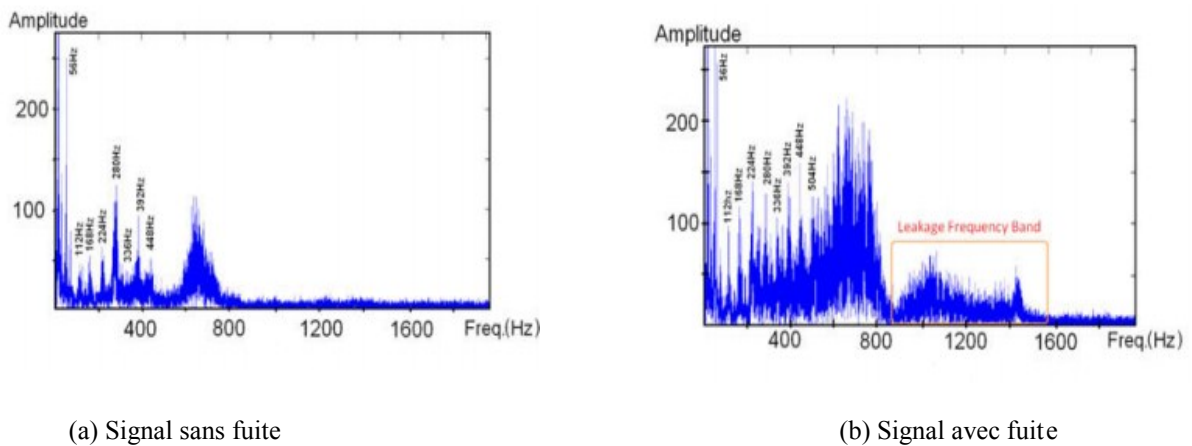


Figure (VI.2) La FFT des deux signaux (a) signal sans fuite, (b) signal avec fuite [14]

En connaissant la plage fréquentielle, et en utilisant la STFT, on peut connaître le segment où l'événement de la fuite est constaté par analyse du spectrogramme. La STFT a permis de déceler l'instant où la fuite est déclenchée. Les résultats de l'application de la CWT pour des différents diamètres de la fuite sont donnés par la Figures (IV.3). L'ouverture de l'électrovanne a été effectuée à l'instant $t=100$ ms. La prise de décision de l'existence d'une fuite est réalisée en prenant des seuils, Figure (IV.4).

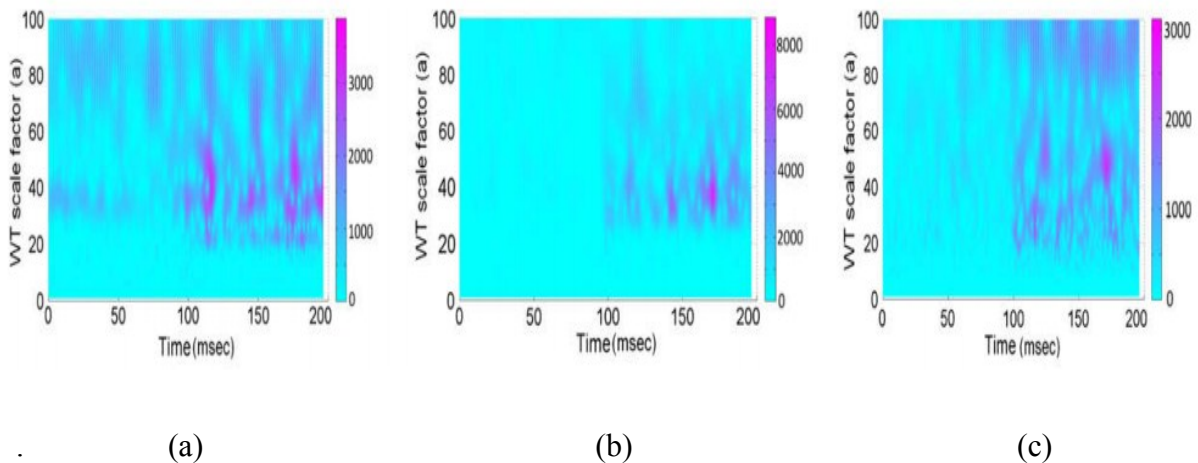


Figure (VI.3) Le spectrogramme de la CWT du signal avec fuite pour des différents diamètres de la fuite (a) 2 mm, (b) 4mm, (c) 6 mm [14]

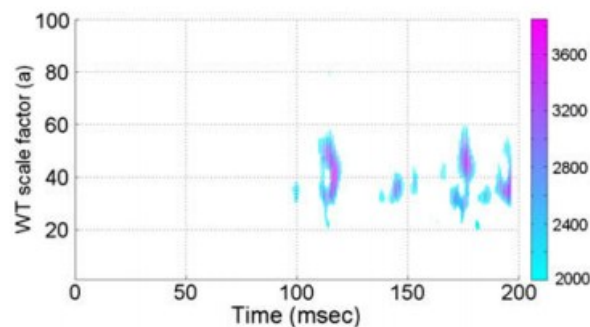


Figure (VI.4) Régions du spectrogramme pour la prise de décision [14]

Pour un facteur d'échelle $20 \leq a \leq 55$ et une amplitude dépassant la valeur du seuil, $T= 2500$. On décide l'existence de la fuite.

Afin de confirmer l'efficacité de la méthode de détection proposée, nous avons déplacé le capteur le long de la conduite par rapport à la fuite et étudier les performances de la méthode CWTDT proposée en analysant l'effet de la distance sur la détection.

VI.3 Méthode de détection de fuite à base de la CWTDT

Une façon intéressante d'améliorer les performances de détection des fuites consiste à analyser à plusieurs endroits de longueurs équidistantes le signal de vibration reçu. Le détecteur de fuite proposé utilise un capteur de vibration très sensible. L'analyse va être portée sur le signal sans fuite, qui représente les vibrations du bruit de flux d'écoulement interne, et le signal avec fuite qui véhicule à la fois les vibrations du bruit de flux d'écoulement et les vibrations de la fuite. Il est judicieux de décrire le système de détection élaboré avant de détailler la méthode de détection de fuite CWTDT proposée. Afin de s'assurer que l'on capte le signal de vibration, il nous a fallu faire un très grand nombre de test. Pour ce faire, les sous-sections suivantes commencent par décrire le prototype de l'installation hydraulique puis une explication exhaustive de la méthode de détection CWTDT proposée va être prise en considération, en analysant les étapes de l'algorithme de la méthode.

VI.3.1 Circuit hydraulique du système élaboré

Le système de détection proposé se base sur le circuit hydraulique donné par la Figure (VI.5) (a). Il se compose principalement d'une conduite d'eau, de trois pompes à eau ayant des débits différents, d'un réservoir d'eau, d'un capteur de vibration et d'une carte d'acquisition de données. Figure (VI.5) (b). Le pipeline à un diamètre intérieur de $\varnothing = 54$ mm, d'une longueur de 8 m et il comporte un orifice de diamètre $\varnothing = 3$ mm. . Afin de simuler les différentes distances de fuite, nous faisons simplement glisser le capteur de vibration le long de la canalisation d'eau. L'eau circule dans le pipeline à travers un circuit fermé à l'aide de la pompe à eau n°1, la pompe à eau n°2 ou la pompe à eau n°3, ayant respectivement les débits $0.48 \text{ m}^3/\text{h}$, $2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ou $8 \text{ m}^3/\text{h}$ comme indiqués au Tableau (VI.1). En d'autres termes, on capte deux signaux. Ces derniers se propagent le long de la paroi de la conduite d'eau. Lorsqu'il y a une fuite le signal acquis est composé d'un signal vibratoire dû à l'effet de l'écoulement du flux d'eau et le signal de la fuite, elle-même. Cependant, lorsqu'il n'y en a pas, c'est-à-dire le signal produit et provoqué par l'effet du flux d'eau, la circulation de l'eau génère encore un signal mais avec de petites amplitudes. Maintenant, lorsqu'une fuite se manifeste, l'eau s'échappe du pipeline en créant un jet turbulent. Le jet frappe la paroi du pipeline, il entraîne une fluctuation de pression turbulente importante qui influe sur le pipeline générant

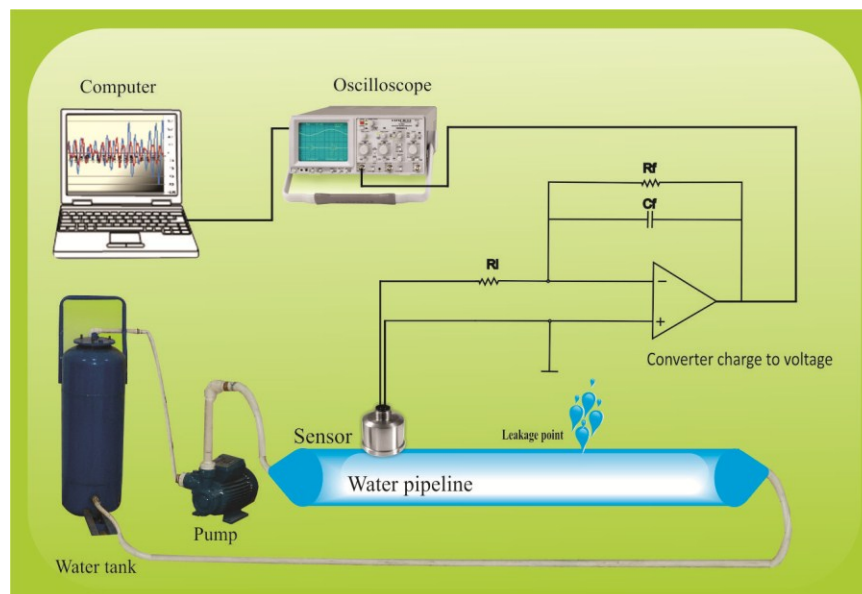
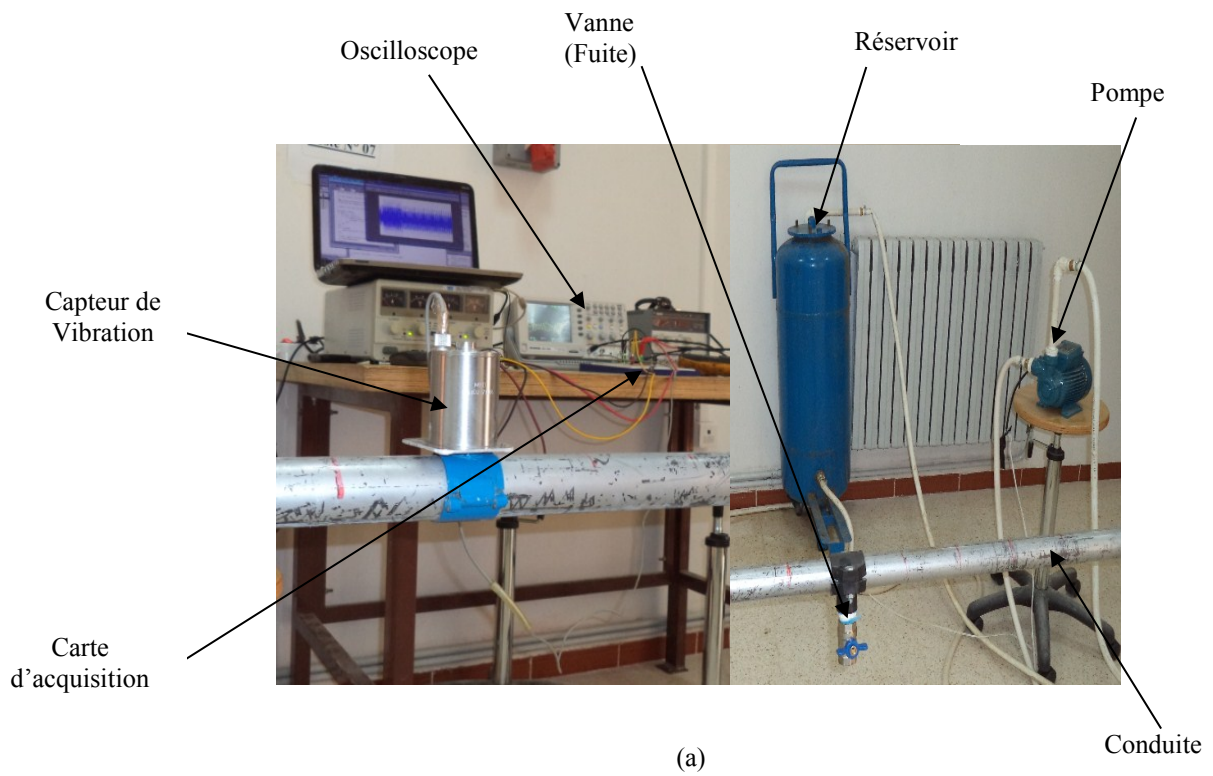


Figure (VI.5) Circuit hydraulique du système de détection des fuites d'eau avec un seul capteur de vibration.

- (a) Système de détection réel élaboré
- (b) Schéma synoptique

Un signal de vibration de fuite qui se propage le long de la paroi de la canalisation. A cet effet, le capteur piézoélectrique, génère des charges électriques, qui vont être transformées en une tension par un conditionneur électronique. L'oscilloscope, parmi d'autres composants, dont les caractéristiques sont données dans le Tableau (VI.1), amplifie et échantillonne le signal de tension obtenu. Tenant compte que l'oscilloscope intègre une carte d'acquisition.

Tableau (VI.1) Principales composantes matériel du banc d'essai hydraulique

Désignation	Référence	prix (\$)
Capteurs de vibration	Société MKD, DA 102-71208 Société	714.798
Conduite d'eau	Tube en acier de 8 m long, 60 mm de diamètre extérieur et 54 mm de diamètre intérieur. Un trou de 3mm de diamètre	400
Réservoir	150 L	559.630
pompe à eau #1	CALIPDA CMT61, 220V, 0.33 kwatts, 2900 minu^{-1} , 0.48 m^3/h	196.576
pompe à eau #2	PENTAX JM100, 220V, 0.74 kwatts, 2800 minu^{-1} , 2.4 m^3/h	120
pompe à eau #3	MITIDJA 32, 220V, 1.1 kwatts, 3000 minu^{-1} , 8 m^3/h	150
Oscilloscope	Gw Instek Company, 220V, GRS-6052A: 50 MHz	1,230.63
Circuit conditionneur	TL082, $R_1=10\Omega$, $R_2=1M\Omega$, $C=22nF$	50
Accessoires	Valves Electrique, Joins, ...etc	70

Ensuite, un PC, connecté à l'oscilloscope via le port série RS 232, permet de calculer via la CWT les coefficients des matrices temps / échelle des signaux temporels sans et avec fuite pour des différentes distances sur la conduite. Ces matrices sont ensuite soumises à deux seuils successifs.

VI.3.2 Organigramme de la méthode de détection de fuite CWTDT

Le système hydraulique de la méthode de détection proposée est utilisé pour simuler un réseau de distribution réelle. Afin de collecter les vibrations qui sont provoquées par la génération de la fuite on a utilisé un capteur accélérométrique. Les informations, électriques de ce dernier sont l'image de vibrations produites. Les signaux sont pris sur une fenêtre temporelle

comportant N échantillons. Ces signaux vont être divisés au premier lieu en L segments. La CWT est appliquée sur chaque segment donnant naissance à des matrices ayant une dimension $(k \times n)$ comme indiqué dans l'organigramme proposé de la Figure (VI. 6). k désigne le facteur d'échelle choisi. Les signaux de vibrations sont généralement immergés dans le bruit, pour un débruitage est nécessaire. Le coefficient de débruitage est obtenu à partir de la relation de Donoho. Sur les matrices résultantes après avoir appliqué le débruitage au signal, une binarisation est effectuée en utilisant un premier seuil T_1 trouvé empiriquement. Une comptabilisation des '1' est opérée et un deuxième seuil T_2 est aussi appliqué. Un critère de prise de décision de la fuite est appliqué.

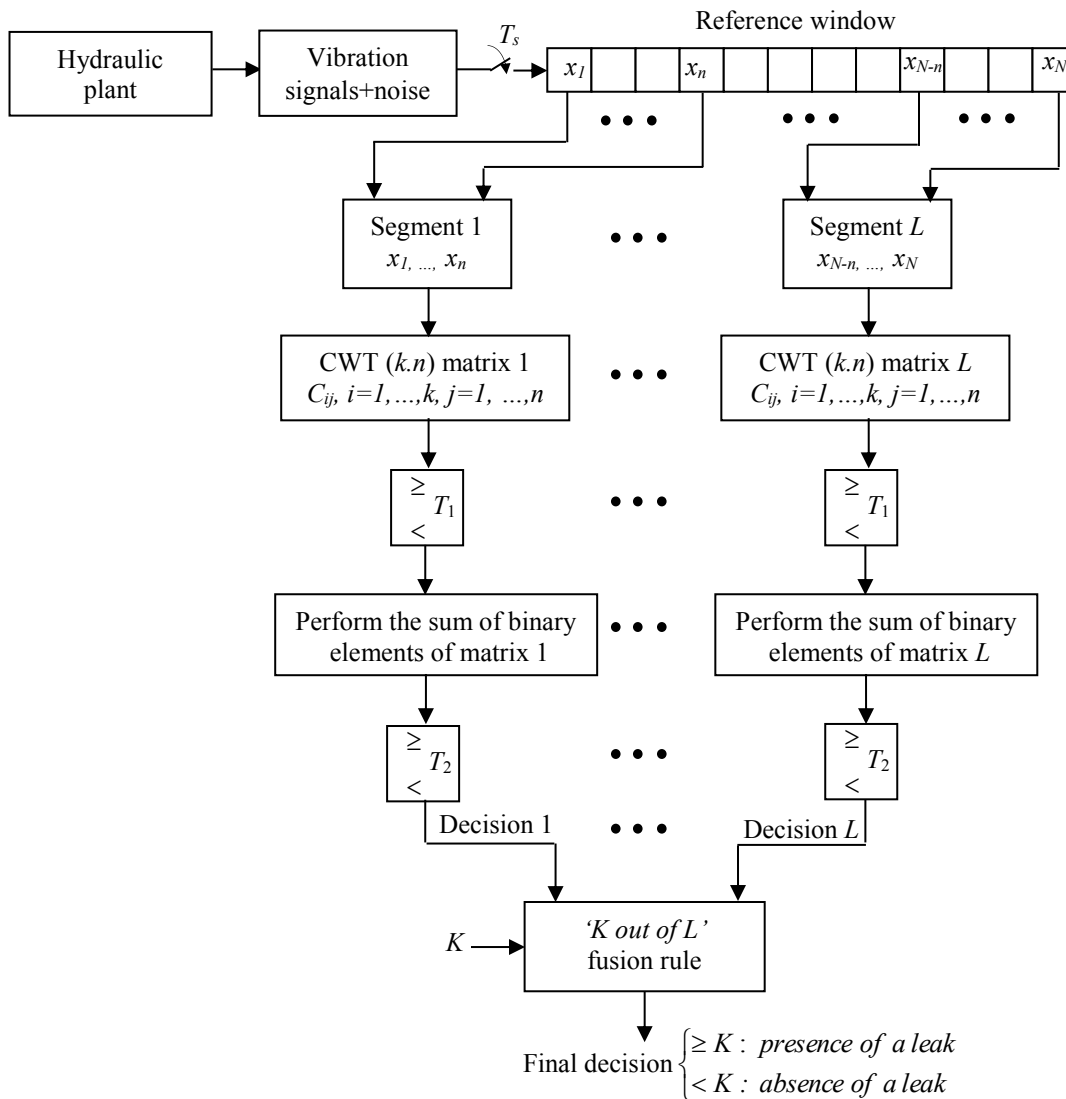


Figure (VI.6) Organigramme de la méthode de détection CWTDT de fuite d'eau avec $k=32$ [59]

VI.4 Description du détecteur de fuite d'eau CWTDT

Les détecteurs qui sont utilisés dans la plupart des pays du monde se basent sur la méthode acoustique. Leurs inconvénients majeurs est la détection des bruits environnant provoqué par le trafic routier et d'autres bruits associés aux activités quotidiennes provoquant ainsi des fausses détections, généralement coûteuse et onéreuse. Cela a poussé les chercheurs à penser à d'autre issue avec un minimum de risques. Au cours des deux dernières décennies, le domaine de détection décentralisée de cibles radar utilisant un centre de fusion de données est très considéré, ce qui a permis d'améliorer la probabilité de détection du signal des cibles d'intérêt [42, 43]. Dans ce contexte, Barkat et Varshney [42] ont proposé une architecture de décision optimale sous l'hypothèse de l'indépendance statistique des observations Gaussiennes au niveau des radars locaux. Les probabilités de détection et de fausse alarme sont développées et les améliorations des performances de détection sont obtenues lorsque le nombre de décisions binaires locales est important. Après, Gini et al [43] ont optimisé le même algorithme de détection décentralisée avec une intégration binaire pour la détection de cibles immergées dans un clutter de distribution Weibull. Ils ont également prouvé que les meilleures performances de détection peuvent être obtenues au moyen de la règle 'K parmi n' au centre de fusion. A cet effet, nous sommes motivés par l'application de ces principes de détection radar à un système de détection des fuites d'eau dans les réseaux de distribution à l'aide de signaux vibratoires. A cause du manque des distributions statistiques des signaux vibratoires observés avec et sans fuites, les performances de détection sont évaluées par l'utilisation de nouveaux critères qui sont le taux de fausse alarme (FAR: false alarm rate) et le taux de réussite (SR: success rate) obtenus à partir des décisions binaires. De plus, la division de la fenêtre de référence contenant les signaux de vibration reçus en plusieurs segments améliorerait naturellement les performances de détection de fuite au moyen de la règle de fusion 'K parmi L' au détriment du temps du CPU. Nous voulions connaître les performances du détecteur de fuite proposé appliqué sur les signaux vibratoires issus du système hydraulique prototype de la Figure (VI.5). L'objectif de l'organigramme de la Figure (VI.6) est de prendre une décision automatique sur l'existence ou non d'une fuite dans la conduite d'eau. La fenêtre de référence de durée 500 ms est divisée en 10 segments, d'une durée de 50 ms. La CWT est appliquée aux segments successifs, en donnant une image représentée par une matrice de deux dimensions, avec ($k \times n$) échantillons à travers l'ondelette mère de "Haar" donnée par [44].

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.1.a)$$

Dont la fonction de mise à l'échelle est

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.1.b)$$

Notez que, l'ondelette de 'Haar' est simple et compacte, sa discontinuité est souhaitable pour la détection d'un changement brusque du signal. Cette dernière trouve son application parfaite lors de la création d'une fuite [44].

Ensuite, ces images obtenues après l'application de l'ondelette de 'Haar' et qui sont représentées par des matrices de $k \times n$ coefficients sont traitées par la comparaison de tous leurs éléments (coefficients des matrices) à un premier seuil T_1 ; C'est-à-dire que ce seuil doit être ajusté de sorte que les signaux recherchés puissent passer et que le bruit soit réduit. Les matrices binaires sont ensuite obtenues et un second seuil T_2 est également appliqué pour produire des décisions locales. La décision finale binaire est prise par une règle de fusion 'K parmi L', c'est-à-dire qu'une fuite est déclarée présente si au moins les résultats des décisions 'K parmi L' sont identiques. Notez que K s'étend de 1 à L ; correspondant aux règles de fusion 'OR' et 'AND' booléennes, respectivement. Notez qu'une fois, les valeurs des deux seuils T_1 , T_2 et K sont fixés, ils vont être appliqués pour tous les tests. Les données enregistrées correspondent à des intervalles de temps de 500 ms, avec une fréquence d'échantillonnage de $F_s = 1 / T_s = 2$ kHz. Inspiré de l'idée de la technique d'intégration binaire dans la détection de cible radar [20]; Comme le montre la Figure (VI.6), les segments ainsi générés sont transformés en matrices à travers de la CWT de 'Haar'. Plus précisément, la méthode CWTDT repose essentiellement sur l'application de deux seuils. Le premier seuil, T_1 est obtenu en utilisant la relation de Donoho [45, 46] afin de débruité le signal.

$$T_1 = \sigma \sqrt{2 \log 2(N)} \quad (4.2)$$

Où σ est l'écart-type du signal de vibration (avec ou sans fuites) et $N=1000$ qui indique le nombre d'échantillons. Dans notre cas, $\sigma \approx 18.39$. En d'autres termes, T_1 ramène la matrice des coefficients obtenue par la CWT a des '1' représenté par des pixels blancs, et des '0' représentés par des pixels noirs. Après la comptabilisation des '1', un deuxième seuil T_2 est appliqué sur tous les segments donnant naissance à une décision partielle. Une décision finale est obtenue en appliquant la règle de fusion 'K parmi L' pour l'élaboration de la décision de la présence ou l'absence de la fuite. En ce qui concerne T_2 et K, ils sont obtenus empiriquement

pendant la phase d'apprentissage, c'est-à-dire pour les distances d'entraînement telles que le SR et le FAR valent respectivement 100% et 0%. Autrement dit ceci est d'abord réalisé en additionnant les éléments de la matrice binaire de chaque segment ; Puis en comparant les résultats à T_2 , on obtient les décisions locales, $D_l, l = 1, \dots, L$. La décision finale de fuite se calcule via une règle de fusion "K parmi L". Cette dernière est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^L \{D_l \setminus D_l = 1\} \geq K; \text{Présence de la fuite} \\ \sum_{l=1}^L \{D_l \setminus D_l = 1\} < K; \text{Absence de la fuite} \end{cases} \quad (4.3)$$

Compte tenu des données de vibration observées qui sont divisées en L segments, la méthode de fuite CWTDT proposée de la Figure 2c est détaillée par les étapes de l'algorithme suivant.

VI.5 Algorithme de la méthode de détection proposée

Les signaux sans et avec fuite acquis de longueur L vont être segmentés en l segments de taille n . La CWT est appliquée à chaque segment produisant une matrice temps-échelle C_{ij} de taille $(k \times n)$ coefficients. Une binarisation est effectuée en utilisant le seuil T_1 pour obtenir une matrice de même taille dont les coefficients b_{ij} ne comportant que des '1' et des '0'. Une décision partielle D_l est obtenue en choisissant un autre seuil T_2 . Enfin une décision finale peut être déduite en appliquant la règle de fusion 'K parmi L' pour confirmer l'existence de la fuite. L'algorithme résumant les étapes déjà décrites est donné comme suit :

Etape1

- Soit $x_i, i=1, \dots, n$ les données observées du segment l

Etape2

- Compter les coefficients temps/échelle, $i=1, \dots, k$ et $j=1, \dots, n$ en utilisant l'équation (4.1)

Etape3

- Calculer la matrice binaire en utilisant T_1 donnée par l'équation (4.2)

$$b_{ij}=1 \text{ si } C_{ij} \geq T_1 \quad \text{pour } i=1, \dots, k \text{ et } j=1, \dots, n$$

$$b_{ij}=0 \text{ si } C_{ij} < T_1$$

Etape4

- Comptez le nombre de '1s' et prenez une décision locale, D_l en utilisant T_2 . Par conséquent

$$D_l=1 \text{ si le nombre des '1s'} \geq T_2$$

$$D_l=0 \text{ autrement}$$

Etape5

- Refaire les étapes de 1 à 4 jusqu'à ce que $l=L$

Step 6

- Compter le nombre des '1s' de D_l , pour $l=1, \dots, L$. prendre une décision finale en se basant sur (4.3).

Qu'il s'agisse ou non d'une fuite, le signal de vibration observé X peut être écrit comme [42]

$$\begin{cases} H_1 = X: \text{Signal de fuite} + \text{le Signal de bruit} \\ H_0 = X: \text{Signal de bruit} \end{cases} \quad (4.4)$$

Où H_1 dénote l'hypothèse de la présence d'une fuite et H_0 l'hypothèse de l'absence de la fuite. Au centre de fusion, les probabilités de fausse alarme et de détection des événements de fuite peuvent être obtenues par l'expression binomiale suivante [47]:

$$P = \sum_{k=K}^L \binom{L}{k} P_l^k (1 - P_l)^{L-k} \quad (4.5)$$

Où P représente la probabilité de fausse alarme globale ou la probabilité de détection globale et P_l est la probabilité de fausse alarme ou la probabilité de détection du détecteur local correspondant au l^{th} segment.

Comme indiqué précédemment, il est difficile de quantifier statistiquement P_l . Pour ce faire, nous considérons le SR et le FAR comme de nouveaux critères de détection des fuites, obtenus directement à l'aide d'un certain nombre de tests expérimentaux. Par conséquent

$$SR = \frac{\text{Nombre de résultats dépassant } K \setminus \text{Présence de fuite}}{\text{Nombre total sur les distances testées}} 100\% \text{ Taux de succès} \quad (4.6)$$

$$FAR = \frac{\text{Nombre de résultats dépassant } K \setminus \text{Absence de fuite}}{\text{Nombre total sur les distances testées}} 100\% \text{ Taux de fausse alarme} \quad (4.7)$$

Où ' \setminus ' signifie 'quand'

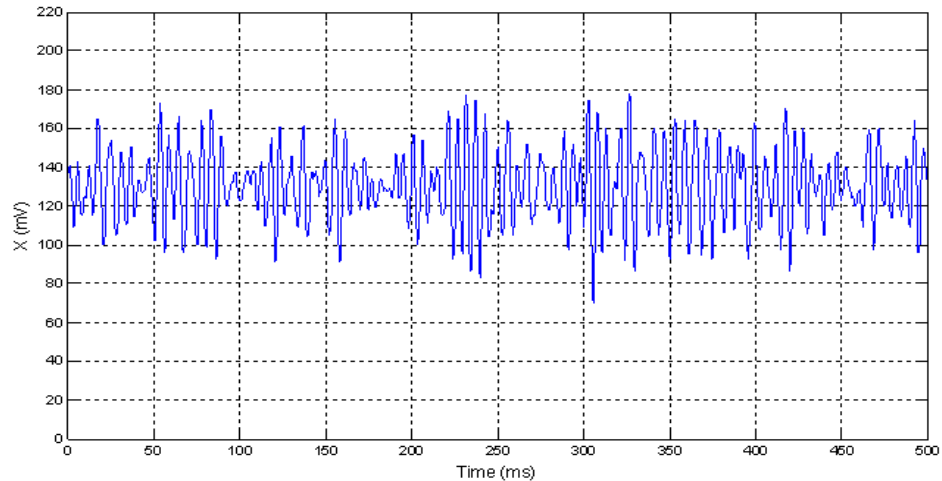
VI.6 Analyse des résultats de fuite expérimentaux

En se basant sur l'installation hydraulique prototype et le détecteur CWTDT décrit dans la section précédente, nous voulons analyser la précision du système pour détecter la présence de toute fuite dans une conduite d'eau. Pour cette fin et selon la Figure (VI.6), la longueur de la fenêtre de référence est fixée à $N = 1000$ échantillons pour la pompe n°1 et $N=4000$ échantillons pour les pompes n°2 et n°3. En d'autres termes, le nombre total de segments est $L = 10$. Chaque segment contient $n = 100$ échantillons la pompe n°1 et $L = 16$ de $n = 250$ échantillons pour les pompes n°2 et n°3 respectivement. Enfin, l'échelle de l'ondelette est trouvée meilleure pour un $k = 32$ pour toutes les trois pompes. Comme il est décrit dans la section (VI.2), l'utilisation des détecteurs CWTDT, FFT et CWT nécessitent respectivement différentes valeurs de (k, T_1, T_2, K) (T, K) et $(R, m, h_1, h_2$ and $T)$; comme il est montré dans le Tableau(VI.2). Nous observons que la valeur de T_1 pour la pompe n°1 est significativement supérieure par rapport à ses valeurs pour les pompes n°2 et n°3. Autrement dit, nous avons amplifié les signaux de vibration acquis à partir de la pompe n°1 dont le débit est très faible par rapport aux deux autres pompes. En ce qui concerne les valeurs de T_2 , plusieurs essais donnent $T_2 = 400$ pour la pompe n°1 et $T_2 = 300$ pour les pompes n°2 et n°3. Enfin, puisque K est fixé pour satisfaire les meilleures performances de détection de fuite, les mêmes valeurs ont été trouvées pour les méthodes CWTDT et FFT. C'est-à-dire le traitement des signaux de vibration reçus sur des positions de fuite connus, après plusieurs tests d'entraînement, on a trouvé les valeurs présélectionnées de ces seuils étant $T_1 = 80$, $T_2 = 400$ et $K = 5$. Les expériences ultérieures portent sur l'analyse de la robustesse du détecteur de fuite avec des positions de fuite inconnues. Tout d'abord la Figure (VI.7) (a) et (b) représentent les signaux de vibration temporelles (temps d'échantillonnage $T_s = 500 \mu s$) sans et avec fuite distant de 1.6m du capteur de vibration par rapport à la fuite, respectivement. De toute évidence, en raison de la non-stationnarité des signaux reçus qui a été confirmé en calculant la moyenne statistique et l'écart type, des signaux de vibration pour chaque distance, ces représentations temporelles ne peuvent pas être analysées. En plus, l'analyse temporelle ne peut pas nous renseigner sur les composantes spectrales du signal. En outre, on ne peut pas connaître le moment où la fuite s'est produit. En effet, si le nombre de fausses alarmes devait être excessif, une panne de détection de fuite du système pourrait se produire. Néanmoins, les Figures (VI.7) (a)(b) peuvent être divisées chacune en deux intervalles de temps, c'est-à-dire $[0, 250 \text{ ms}]$ et $[250 \text{ ms}, 500 \text{ ms}]$. Dans le premier intervalle, $[0, 250 \text{ ms}]$, nous pouvons constater si on compare les deux signaux sans et avec fuite, la présence d'un phénomène transitoire due à la présence de la fuite, par

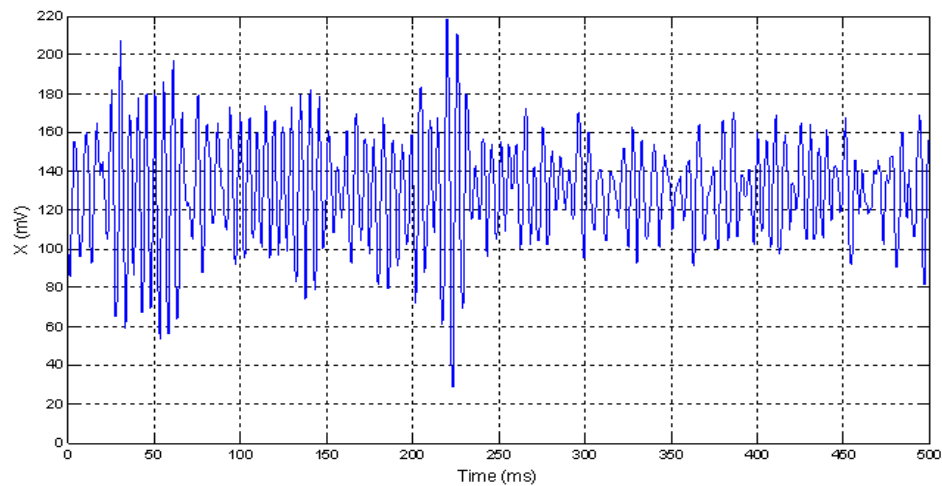
contre dans le second intervalle, [250 ms, 500 ms] ce dernier disparaît laissant la place au seul signal de bruit.

Tableau (IV. 2) Valeurs des seuils des méthodes de détection à base de la CWTDT, la FFT et la CWT pour des différentes pompes à eau en utilisant les distances d'apprentissage

Détecteur de fuite	Seuils	Pompe #1 (0.48m ³ /h)	Pompe #2 (2.4m ³ /h)	Pompe #3 (8m ³ /h)
CWTDT proposé	k	32	32	32
	T_1	80	2.77	2.16
	T_2	400	300	300
	K	5	7	8
FFT [24]	T	2.49	3.5	4
	K	5	7	8
CWT [13]	m	32	32	32
	R	873	873	873
	h_1	25	26	20.68
	h_2	12	12	12
	T	120	4.5	6



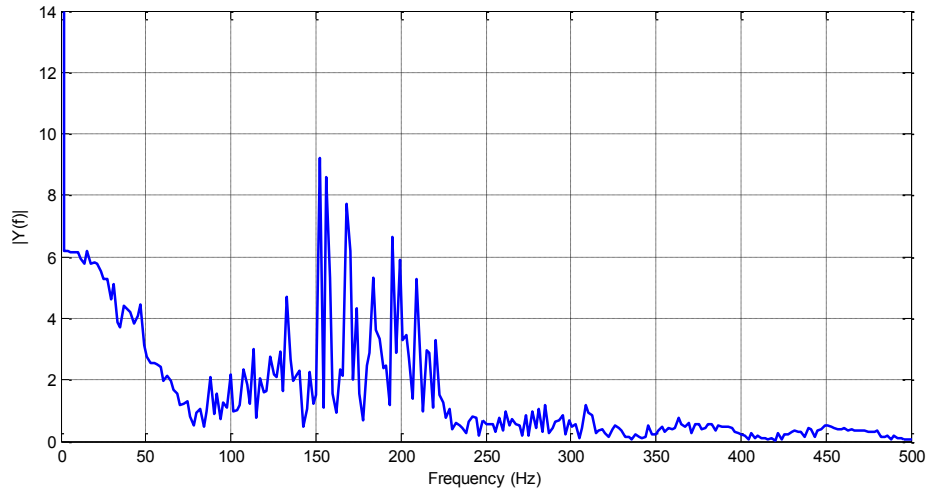
(a)



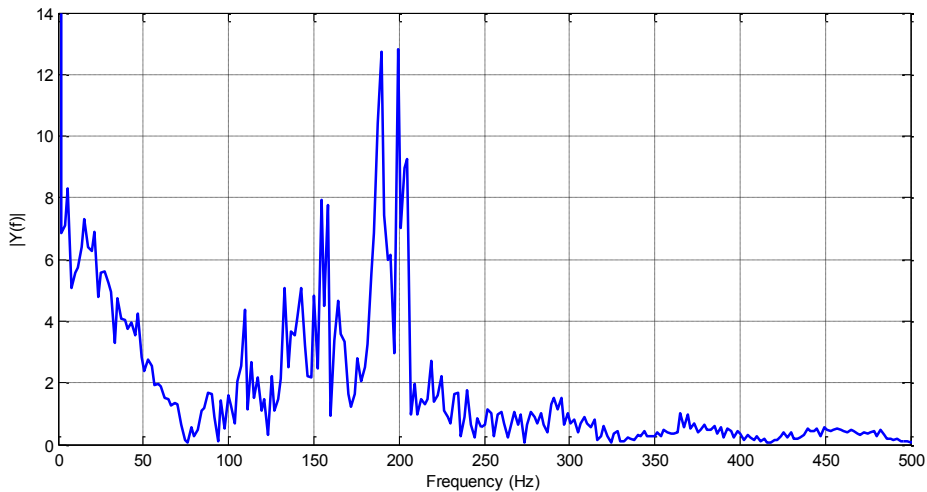
(b)

Figure (VI.7) Représentation des signaux de vibration à la distance de 1.6m
(a) Représentation temporelle sans fuite
(b) Représentation temporelle avec fuite

D'autre part, comme le montrent les Figures (VI.8) (a) (b), l'application de la FFT sur les deux signaux temporels sans et avec fuite représenté par les Figures (VI.7) (a) et (b) est utilisée afin de connaître les composantes spectrales différenciant les deux signaux. Nous constatons en faisant une analyse des deux spectres des signaux avec et sans fuite que cette dernière se situe dans la bande spectrale de [100 Hz à 300 Hz]. A partir de 300 Hz les signaux sont pratiquement similaires. Par conséquent, les spectres fréquentiels ne donnent pas beaucoup d'informations sur le comportement du détecteur de fuites.



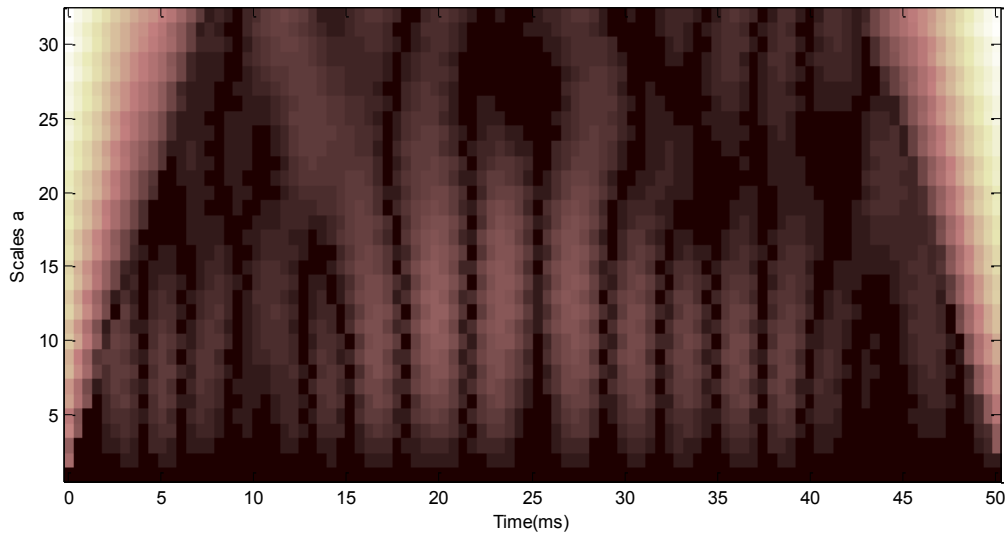
(a)



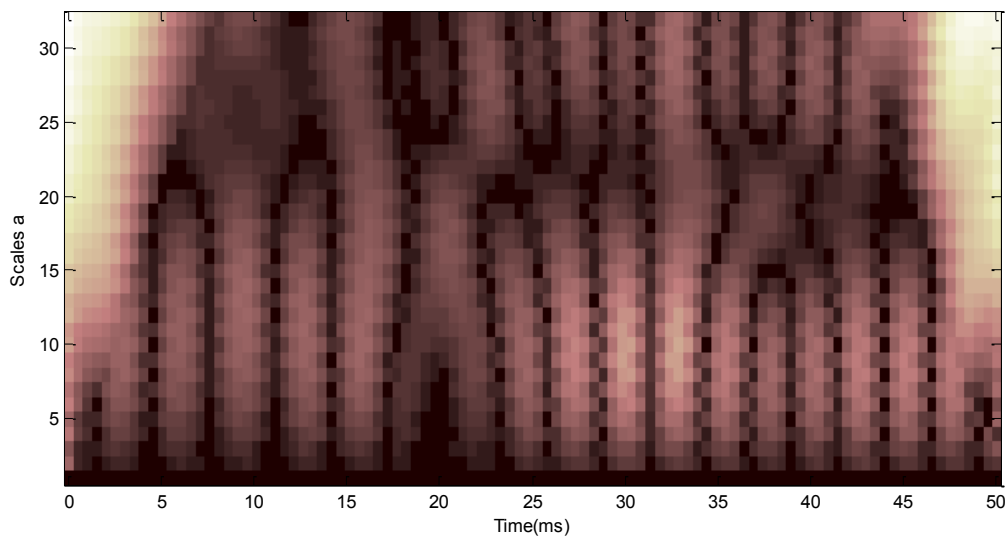
(b)

Figure (VI.8) Représentation des signaux de vibration a la distance 1.6m
(a) Représentation fréquentielle signal sans fuite
(b) Représentation fréquentielle signal avec fuite

Comme l'analyse par ondelette est typique pour les signaux non stationnaires, c'est-à-dire la représentation temps/échelle est considérée dans l'algorithme de détection proposé. À cet effet, dans les mêmes conditions que précédemment les Figures (VI.9) (a) et (b) montrent la représentation temps/échelle après l'application de l'ondelette de 'Haar' sur les des signaux précédents. L'ondelette de 'Haar' est conseillée pour les applications montrant des singularités.



(a)

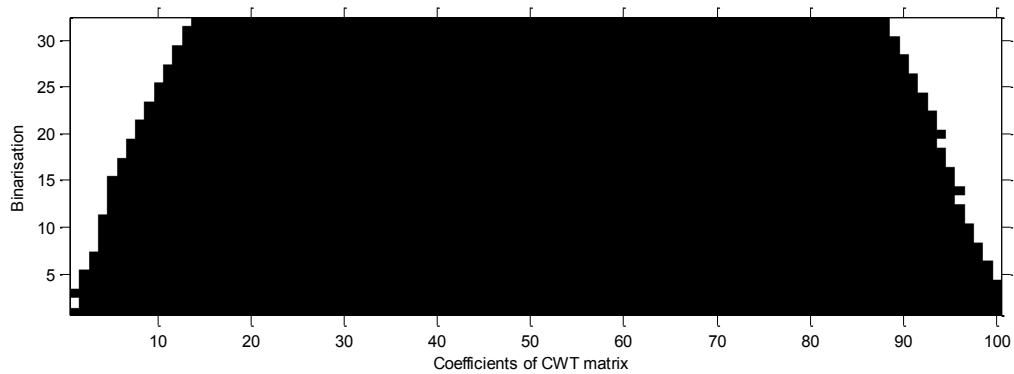


(b)

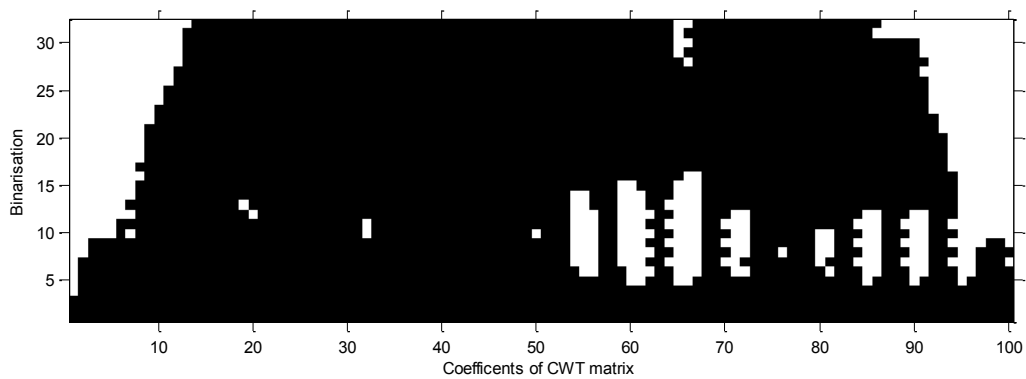
Figure (VI.9) Représentation temps/échelle du premier segment.

- (a) Signal sans fuite
- (b) Signal avec fuite

Toutefois, pour se rapprocher du signal utile l'effet de bruit doit être minimisé. Cette illustration ne peut pas donner des informations rigoureuses sur la présence de la fuite. Pour ce faire, comme le montrent dans les Figures (VI.10) (a) et (b), on a binarisé les matrices résultantes via l'application d'un premier seuil T_1 .



(a)

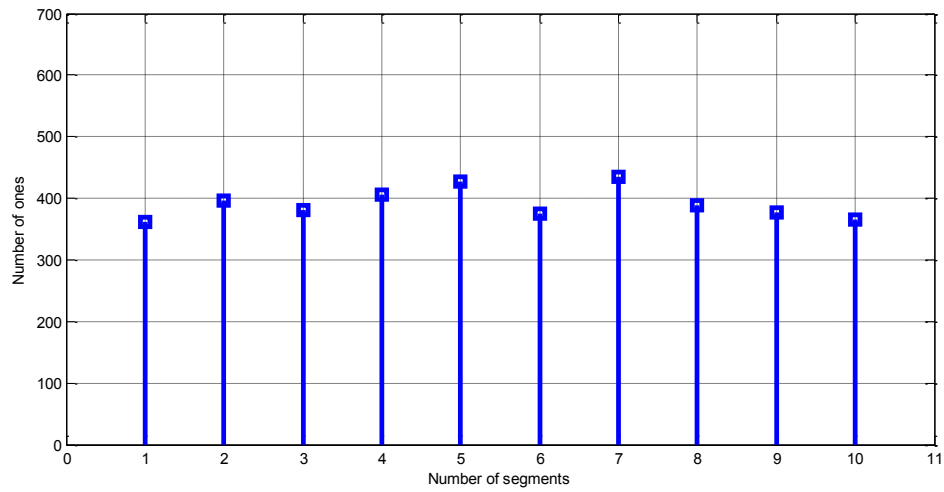


(b)

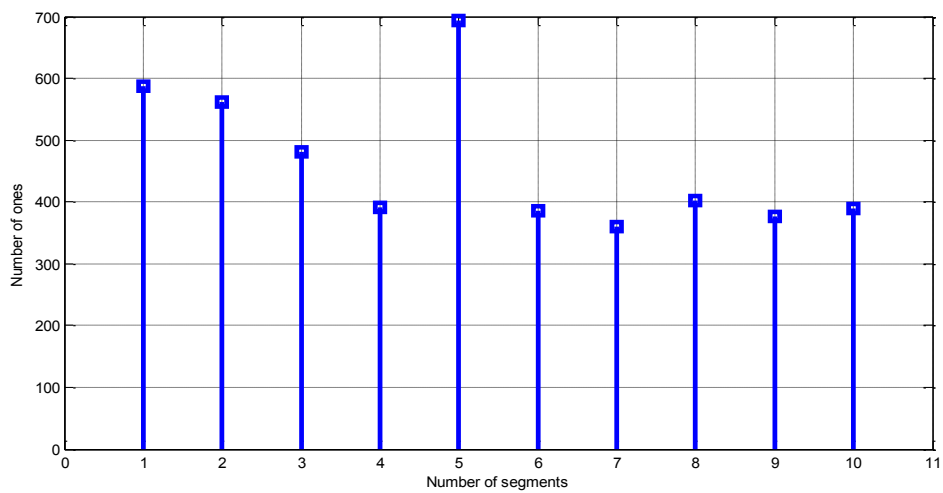
Figure (VI.10) Résultats de binarisation du 1^{er} segment.

- (a) Signal sans fuite
- (b) Signal avec fuite

Bien que les courbes obtenus montrent des régions blanches pour (les uns) et des régions noires pour (les zéros), leurs formes diverses ne ramènent à aucune décision sur la présence de la fuite dans la conduite d'eau. Pour surmonter cette question, nous avons d'abord comptabiliser le nombre des 'uns' dans la matrice binaire de $(k \times n)$ coefficients de chaque segment comme illustré dans les Figures (VI.11) (a) et (b).



(a)

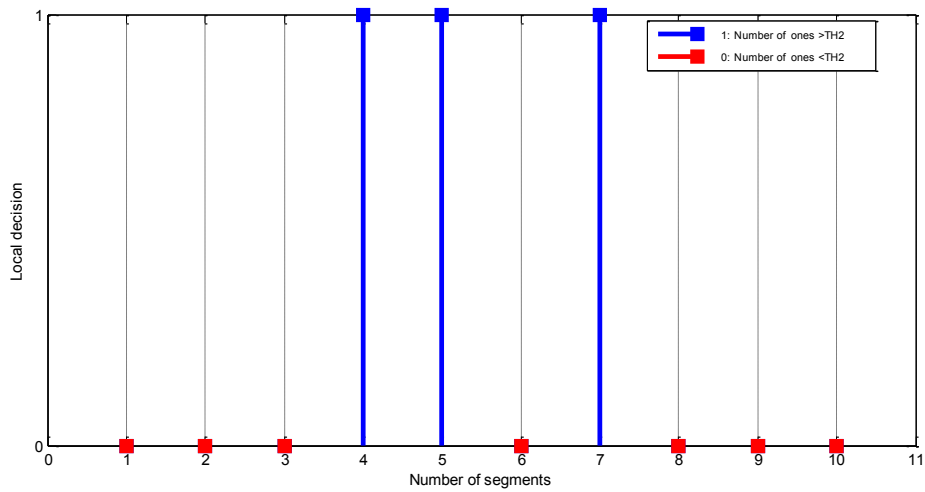


(b)

Figure (VI.11) Nombre des '1' de chaque segment

(a) Signal sans fuite pour une distance de 1.6 m

(b) Signal avec fuite pour une distance de 1.6 m



(a)

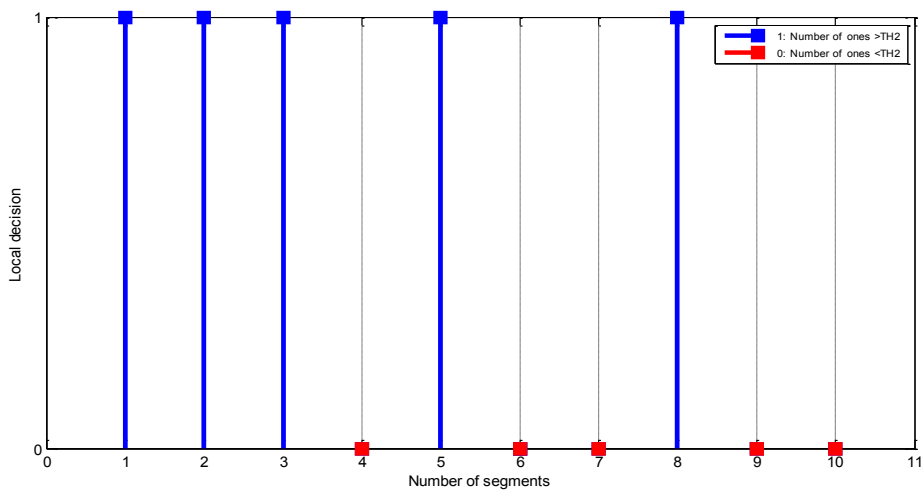


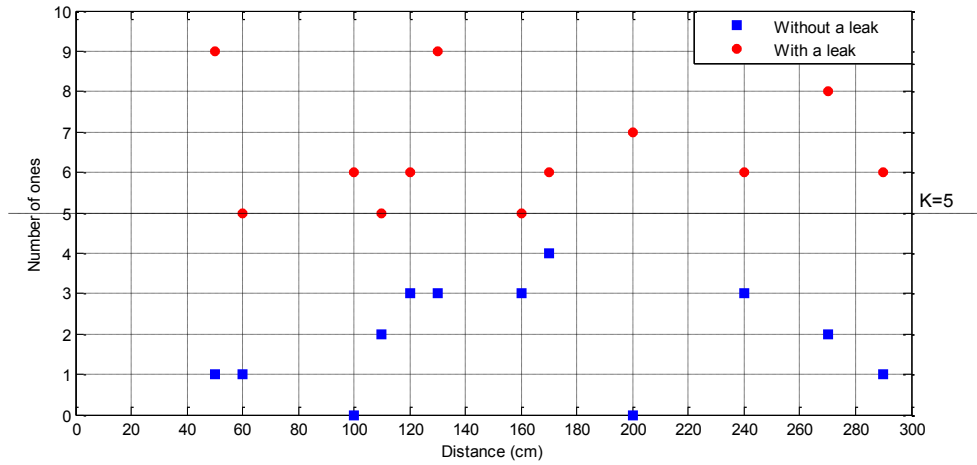
Figure (VI.12) Décisions partielles à chaque segment

(a) Signal sans fuite pour une distance de 1.6 m

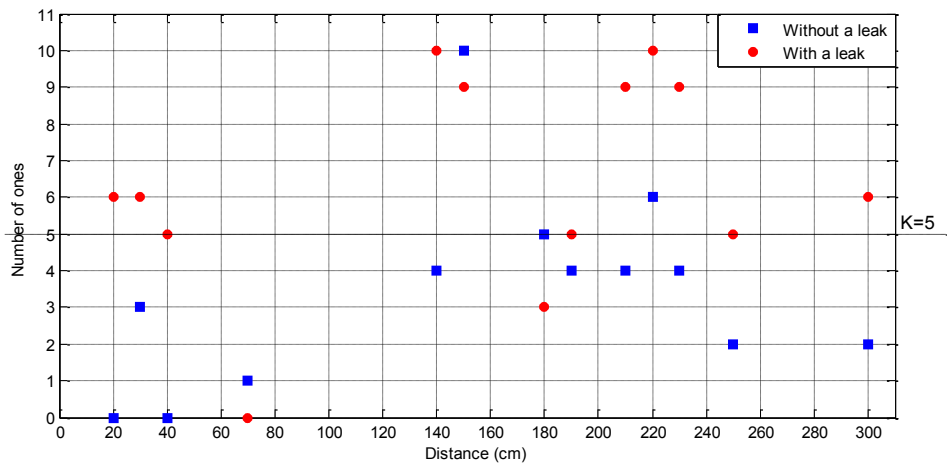
(b) Signal avec fuite pour une distance de 1.6 m

Ensuite, nous avons effectué des décisions binaires locales au sein de chaque segment via un deuxième seuil T_2 trouvé empiriquement après plusieurs essais effectués sur le réseau. Les Figures (VI.12) (a) et (b) montrent les deux niveaux de décision résultants inhérents aux deux signaux sans et avec fuite. Notez que, même dans le cas d'un signal avec fuite, Figure (VI, 12), on peut trouver des segments qui produisent de mauvaises décisions binaires, c'est-à-dire '0s'.

À l'inverse, la Figure (VI.12) montre certaines mauvaises décisions binaires, c'est-à-dire '1' dans le cas d'un signal sans fuites. Par conséquent, une décision finale devrait être prise par une règle de fusion 'K parmi L' sur toutes les décisions locales obtenues. Pour généraliser l'analyse à n'importe quelle distance du capteur-orifice, avec les mêmes valeurs de seuil que précédemment, nous procédons maintenant à d'autres expériences avec des distances capteur-orifice avec entraînement et arbitraires. Les Figures (VI.13-14) montrent les résultats respectifs de la règle de fusion 'K parmi L' au centre de fusion pour les pompes n°1, n°2 et n°3. Pour la phase d'entraînement, les différentes distances sont sélectionnées pour être : 50, 60, 100, 110, 120, 130, 160, 170, 200, 240, 270 et 290 cm. Comme il est montré aux Figures (VI.13) (a), Figure (VI.14) (a) et (c), le système de détection de fuite proposé répond sans problème, c.-à-d. Le taux de réussite est égal à 'l'unité' dans le cas de fuite et un taux de fausses alarmes "zéro" dans le cas sans fuites. Pour l'étape de validation (test), les différentes décisions sont choisies pour être : 20, 30, 40, 70, 140, 150, 180, 190, 210, 220, 230, 250 et 300 cm. Bien que, comme le montrent les Figures (VI.13)(b), (VI.14)(b), (VI.14)(d) et la figure (VI.15), les distances de test peuvent donner le SR obtenu par (4.6), le FAR obtenu par (4.7) et le temps de calcul CPU du Tableau 3 pour le CWTDT, le FFT et le CWT des trois détecteurs de fuite. Une analyse de ce tableau montre que pour chaque pompe, la méthode basée sur la FFT, malgré les améliorations qui ont été portées donne des résultats les plus mauvais en termes de SR et FAR. En outre, lorsque le débit augmente, le SR et le FAR de la méthode basée sur CWTDT sont légèrement meilleurs que ceux de la méthode basée sur CWT. Finalement, dans la mesure où les applications sont en temps réel elles seront préoccupantes, car le temps de traitement du détecteur de fuite CWTDT proposé devrait être un facteur déterminant. Ainsi, afin d'évaluer le temps d'exécution du détecteur de fuite sous test, nous avons utilisé le sous-programme du logiciel Matlab du temps CPU sur une CPU Intel Core i5-2410M: 2,30 GHz. Par exemple, le temps moyen d'exécution à toute distance d'entraînement ou de test pour les méthodes de fuite CWTDT, FFT et CWT est donné dans le Tableau (VI.3). Notez que les exigences de temps pour toutes les pompes sont beaucoup plus faibles pour la méthode basée sur la FFT améliorée que les autres méthodes CWTDT et CWT. Comme la FFT, les outils STFT et la CWT-Gauss27 sont indispensables pour le détecteur qui se base sur la CWT. Ce dernier nécessite plus de temps que le détecteur CWTDT. Par conséquent, à la lumière de ce qui précède, la méthode CWTDT proposée atteint globalement une meilleure détection de fuites que les méthodes FFT et CWT.



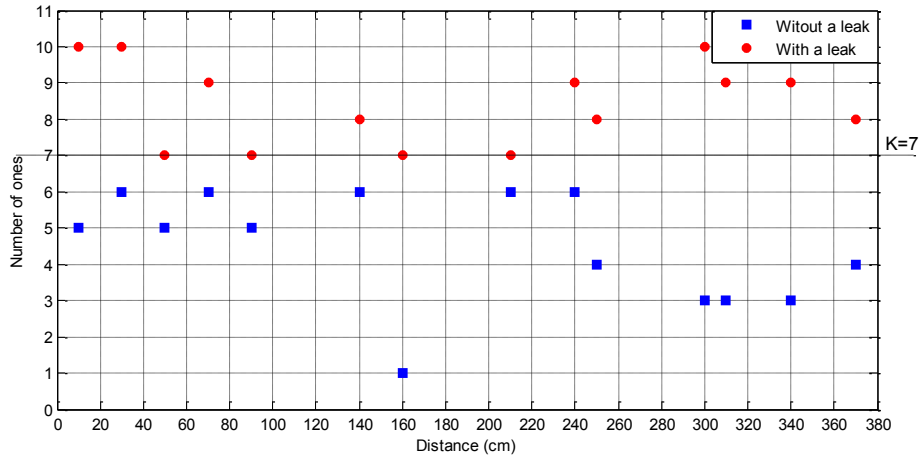
(a)



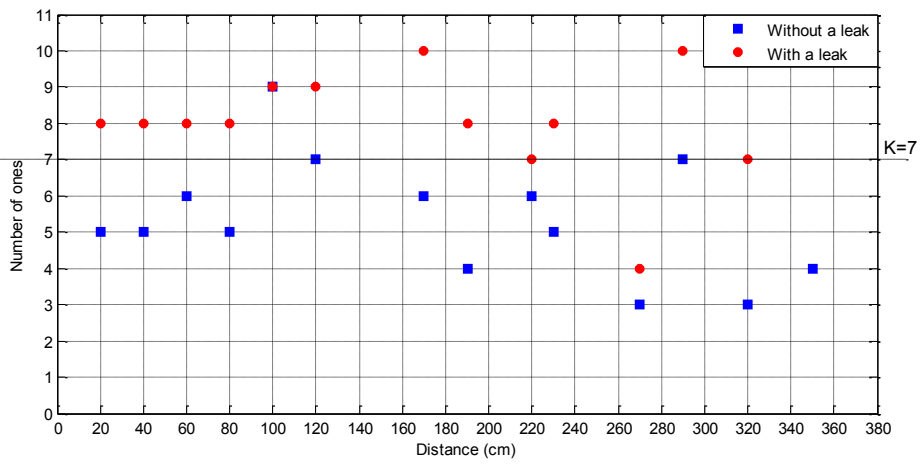
(b)

Figure (VI.13) Performances de détection de fuites obtenues par l'algorithme CWTDT pour la pompe n°1

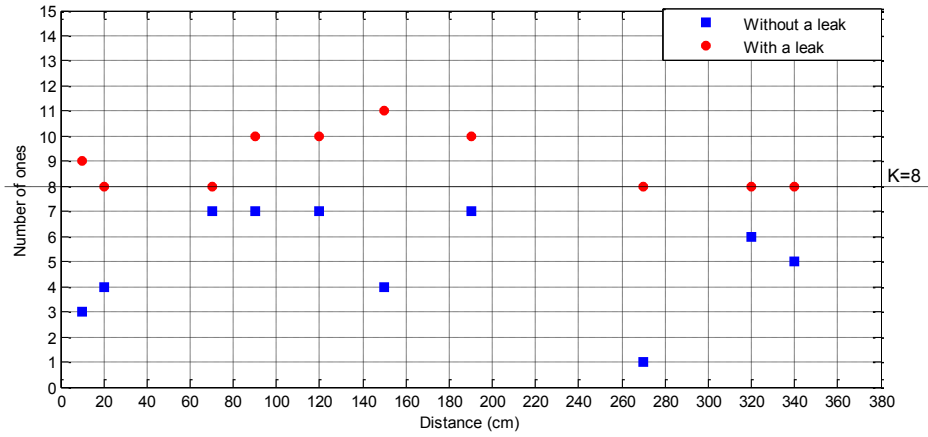
- (a) Utilisant des distances d'entraînement SR = 100% and FAR = 0%
- (b) Utilisant des distances arbitraires



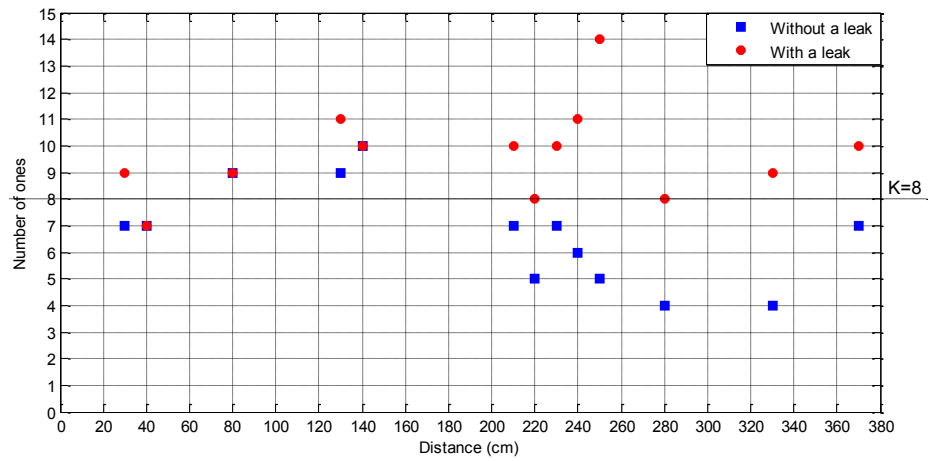
(a)



(b)



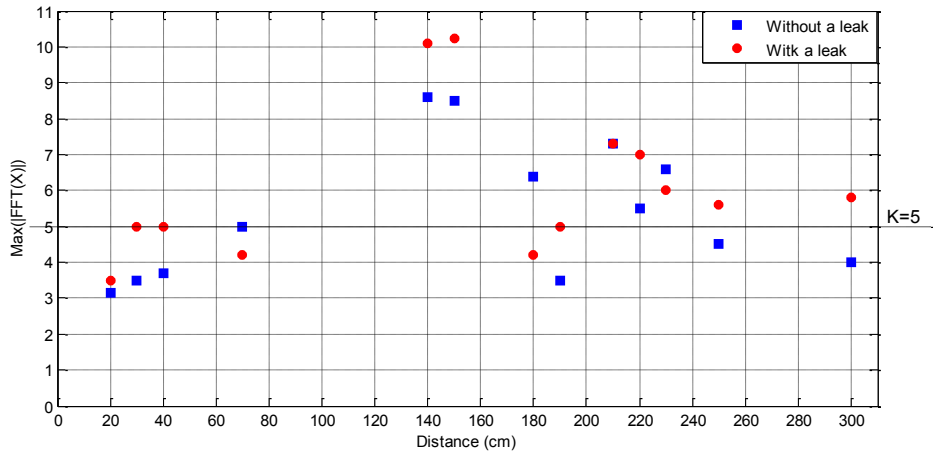
(c)



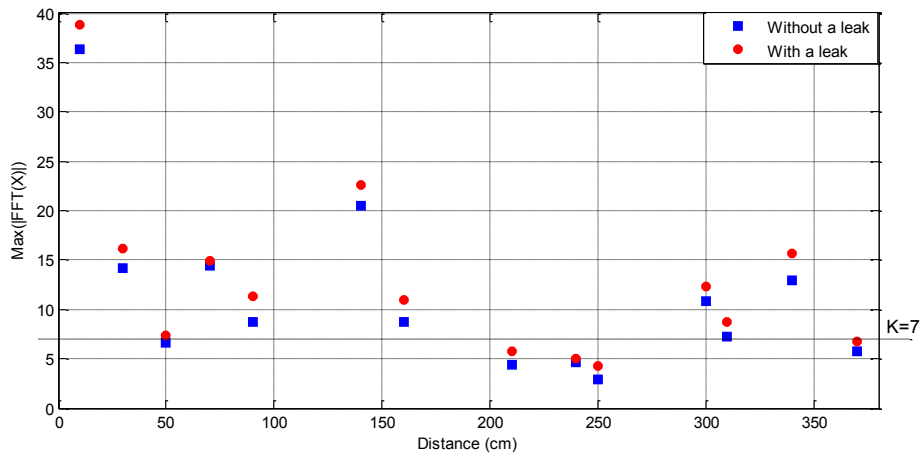
(d)

Figure (VI.14) Performances de détection de fuite obtenues par l'algorithme CWTDT pour la pompe n°2 pour $N = 4000$, $n = 250$, $L = 16$ et $k = 32$

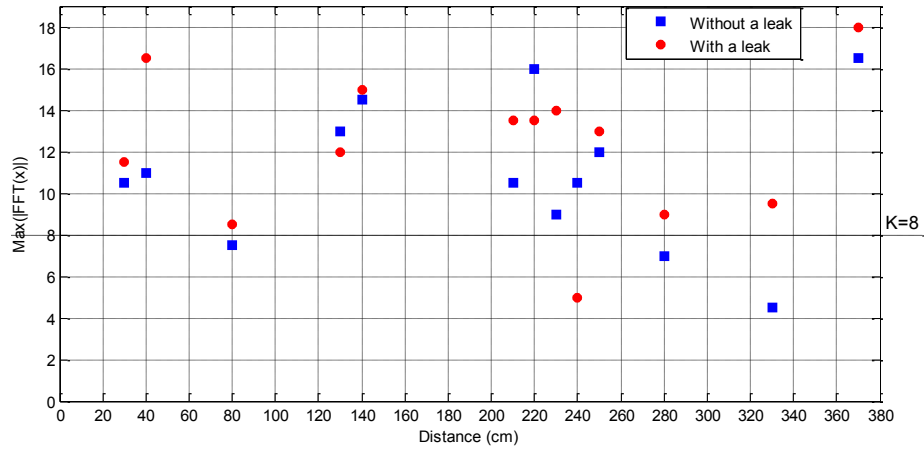
- (a) Pompe #2 utilisant des distances d'entraînement avec $T_1=2.77$, $T_2=300$ et $K=7$
- (b) Pompe #2 utilisant des distances intermédiaires
- (c) Pompe #3 utilisant des distances d'entraînement avec $T_1=2.16$, $T_2=300$ et $K=8$
- (d) Pompe #3 utilisant des distances arbitraires



(a)



(b)



(c)

Figure (VI.15) Performances de détection de fuite obtenues par la méthode basée sur la FFT pour les distances sans apprentissage.

- (a) Pompe #1 avec $N=1000$ and $K=5$
- (b) Pompe #2 avec $N=4000$ et $K=7$
- (c) Pompe #3 avec $N=4000$ et $K=8$

Tableau (VI. 3) Comparaison des performances des méthodes CWTDT ($m=32$), la FFT et la CWT ($m=32$) pour des distances quelconques

Détecteur de fuite	Performances (%)	Pompe #1 (0.48m ³ /h)	Pompe #2 (2.4m ³ /h)	Pompe #3 (8m ³ /h)
CWTDT proposée	SR	84.62	92.85	92.33
	FAR	23	21.42	23.07
	Temps CPU (sec)	6.6535	10.7894	10.7894
FFT	SR	76	71.42	92.30
	FAR	53	64.28	76.92
	Temps CPU (sec)	0.0658	0.0667	0.0667
CWT	SR	86.42	92.62	92.21
	FAR	23	21.42	23.28
	Temps CPU (sec)	34.6307	55.5128	55.5128

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons expliqué en premier temps l'application des ondelettes continue dans le domaine de détection des fuites ainsi que les travaux de la littérature. Nous avons présenté à partir d'un algorithme, la méthode la CWT existante. Cette dernière a montré une bonne efficacité pour la localisation temporelle du moment où la fuite s'est produite. Une explication exhaustive de la méthode CWTDT de détection proposée a pris le grand part dans ce chapitre. Cette dernière utilise deux seuils qui sont obtenus empiriquement dépendants du type de capteur utilisé et les caractéristiques de l'installation hydraulique utilisée, telle que le débit des pompes et la nature de la canalisation. Enfin, une comparaison a été faite entre les méthodes de détection FFT, CWT et CWTDT proposée. Cette comparaison est basée sur deux critères inspirés des méthodes de détection des cibles radars. Ces derniers représentent le taux de détection et le taux de fausse alarme. Les résultats expérimentaux ont montré que malgré les améliorations qui ont été portés sur la méthode FFT, elle n'a pas présenté une bonne efficacité par rapport aux deux autres méthodes. La CWTDT a montré sa supériorité avec des meilleures valeurs du SR et du FAR en dépit des variations des débits effectués par les trois pompes à eau.

CONCLUSION GENERALE

Les divers dispositifs et outils de contrôle existants actuellement de par le monde, sont réalisés dans le but d'assurer une surveillance permanente et efficace des ressources naturelles au niveau des canalisations. C'est dans l'esprit et l'intérêt considérable que présente la détection des fuites dans les réseaux de transport et de distribution, que nous avons tenté d'exposer notre contribution. Le système de détection proposé doit jumeler à la fois moindre coût, souplesse, et rapidité de traitement. Le critère économique en est pour cause essentielle, quand on sait que le système doit être apte à gérer tout un réseau de conduites.

Pour aborder le problème des fuites, il a bien fallu évoquer dans le premier chapitre l'ensemble des dispositifs de détection utilisés dans le monde. Les réseaux de transport et de distribution de cette ressource naturelle ont été bel et bien décrits. Nous avons particulièrement mis l'accent sur les techniques et moyens mis en œuvre pour réduire les pertes dues aux fuites conséquentes. Une description sommaire a été introduite quant à l'ensemble des techniques de surveillance existantes

Dans le second chapitre, il était question de donner un aperçu sur la méthode vibratoire avec les chercheurs impliqués. Comme première contribution, nous avons proposé un système de détection de fuites et nous avons montré les techniques d'acquisition du signal vibratoire. Le signal ainsi acquis va subir un traitement pour donner une décision concernant la présence de la fuite. Les caractéristiques du signal vibratoire ont été bien présentées. Enfin une deuxième contribution a été présentée. Elle consiste à apporter des améliorations de la méthode de détection des fuites des réseaux de distribution basée sur la FFT déjà existante, tenant compte que le problème de la non stationnarité des signaux de fuite a été pris en compte en utilisant la segmentation du signal.

Le chapitre trois a été plutôt dédié à la description de la technique d'ondelette continue. Son application dans le domaine de détection des fuites a été décrite et finalement l'application de l'ondelette de 'Haar' qui a été trouvée efficace pour l'étude des phénomènes transitoires a été appliquée. L'ondelette est très bien adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires et non-linéaire.

Nous avons particulièrement proposé notre système de détection pour la localisation d'une seule fuite. Le travail a porté essentiellement sur la conception et la mise en œuvre des programmes d'acquisition et de traitement des signaux de fuites provenant d'un seul capteur.

Une interface d'acquisition a été proposée dans ce sens pour acquérir les échantillons des signaux en entrée. Les résultats de l'application de l'ondelette de 'Haar' sur le signal de fuite ont été commentés et analysés.

Enfin le dernier chapitre a fait plutôt l'objet d'une évaluation des performances d'une nouvelle technique de détection de fuites nommé CWTDT proposée. Inspiré de l'idée de la technique d'intégration binaire dans la détection des cibles radar, nous avons analysé le signal de vibration non stationnaire issu d'une canalisation d'eau. C'est-à-dire que les résultats de la règle de fusion 'K parmi L' sont utilisés pour décider s'il existe ou non une fuite dans le transport de l'eau. Pour ce faire, nous avons divisé l'ensemble de la fenêtre de référence en segments temporels. Nous avons ensuite effectué des décisions binaires partielles au sein de chaque segment grâce à l'utilisation de deux seuils présélectionnés. La décision finale binaire est obtenue au centre de fusion. En faisant cela, nous avons formé le matériel / logiciel proposé avec des positions de fuite connues dans le pipeline d'eau. Ensuite, pour des positions de fuite arbitraires, nous avons testé la robustesse du détecteur de fuite CWTDT proposé au moyen des critères SR et FAR. Les tests effectués ont bien confirmé l'efficacité du détecteur proposée par rapport à d'autres détecteurs existants qui sont la FFT et la CWT. Les performances obtenues peuvent aussi être améliorées d'avantage.

Identiquement à la méthode acoustique, la CWTDT trouve des difficultés pour les réseaux à très faible pression. Le trafic routier, ainsi que les vibrations qui sont associés aux activités quotidiennes peuvent engendrés des difficultés à cette méthode.

Comme perspectives, nous attendions a appliqué ce détecteur sur des fuites ayant des tailles différentes. Néanmoins, ces résultats intéressants peuvent motiver la recherche de techniques de seuillage adaptatif. Afin d'éliminer l'effet du bruit et des vibrations environnantes, une autre idée est apparue et celle d'appliquer la méthode que nous l'avons appelée CWTDT avec des capteurs de pression. Ces derniers ne vont pas être influés par les vibrations extérieures, ils sont sensibles uniquement s'il y a une variation de flux.

Nous pensons également a exploité une carte d'acquisition et traitement fonctionnant autour d'un DSP pour l'acquisition et le traitement des programmes de la méthode proposée afin de minimiser considérablement le temps de traitement. Nous pensons également à La modélisation des signaux vibratoire.

REFERENCES

- [1] Tang, X., Liu, Y., L. Zheng, L.: 'Leak detection of water pipeline using wavelet transform and correlation method', *Journal of environmental technology and engineering*, 2010, **3**, (2), pp. 62-67.
- [2] Claudia Deniss, E.A., C .Garza, C., Eduardo, L., Adriana, V.M.: 'Multi-leak detection with Wavelet analysis in water distribution networks', *IEEE Mediterranean conference on control& Automation*, Barcelona, Spain, 3-6, July 2012, pp. 1155-1160.
- [3] Zhang, L., Wu, Y., Guo, L., Cai, P.: 'Design and implementation of leak acoustic signal correlator for water pipelines', *Information Technology Journal*, 2013, **12**, (11), pp. 2195-2200.
- [4] Nasirian, A., Maghrebi, M.F., Yazdani, S.: 'Leakage detection in water distribution network based on a new heuristic genetic algorithm model', *Journal of water resource and protection*, 2013, **5**, (3), pp. 294-303.
- [5] Martini, A., Troncossi, M., Rivola, A.: 'Automatic Leak Detection in Buried Plastic Pipes of Water Supply Networks by Means of Vibration Measurements', *Shock and Vibration*, 2015, Article ID 165304, 13 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/165304>.
- [6] Cataldo, A., Cannazza, G., Benedetto, E.D., Giaquinto, N.: 'A new method for detecting leaks in underground water pipelines', *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**, (6), pp. 1660-1667.
- [7] Yang, J., Yumei, W., Ping, L.: 'Leak acoustic detection in water distribution pipelines', 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, 25-27 June 2008, pp. 3057-3061.
- [8] Gabriel Rilling, 'Décompositions modales empiriques contributions à la théorie, l'algorithmie et l'analyse de performances', Thèse de doctorat. Lyon. December 2007.
- [9] Ekuakille, A.L., Vendramin, G., Trotta, A., Vanderbemden, P.: 'STFT-based spectral analysis of urban waterworks leakage detection', XIX Imeko World Congress Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, Portugal, 6-11 September 2009, pp. 2172-2176.
- [10] Lay-Ekuakille, A., Trotta, A., Vendramin, G.: 'FFT- Based spectral response for smaller pipeline leak detection', *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Singapore 5-7 May 2009, pp. 328-331.
- [11] Lay-Ekuakille, A., Vendramin, G., Trotta, A.: 'Robust spectral leak detection of complex pipelines using filter diagonalization method' *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**, (11), pp. 1605-1614.
- [12] Gao, Y., Brennan, M.J., Joseph, P.F.: 'A comparison of time delay estimators for the detection of leak noise signals in plastic water distribution pipes', *Journal of sound and vibration*, 2006, **292**, (3-5), pp.552-570
- [13] Hunaidi, O., Chu, W., Wang, A., Guan, W.: 'Detecting leaks in plastic pipes', *Journal American Water Works Association*, 2000, **92**, (2), pp. 82-94
- [14] Ahadi, M., Bakhtiar, M.S.: 'Leak detection in water filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals', *Applied Acoustics Journal*, 2010, **71**, (7), pp.634-639.
- [15] Taghvaei, M., Beck, S.B.M., Staszewski, W.J.: 'Leak detection in pipelines using cepstrum analysis', *Journal of Measurement Science and Technology*, 2006, **17**, (2), pp. 367-372.
- [16] Caron, D.: 'Déteçtabilité des fuites par émission acoustique', *Techniques de l'Ingénieur*, 2004, r2057, pp. 1-13.
- [17] Sarrate. R., Blesa, J., Nejari, F., Quevedo, J.: 'Sensor placement for leak detection and location in water distribution networks', 7th IWA International Conference on Efficient Use and Management of Water (Efficient 2013), Paris, France. 22-25 October 2013, pp. 1-10.
- [18] Chuanhu, GE., Hongying, Y., Hao, Y., Guizeng, W.: 'A Fast leak locating method based on wavelet transform', *Journal of Tsinghua Science and Technology*, 2009, **14**, (5), pp. 551-555.

- [19] Addison, PS.: 'Wavelet transforms and the ECG: a review', *Physiological Measurement*, 2005, **26**, (5), pp. 155-199.
- [20] Aggarwal, R., Singh, J.K., Gupta, V.K., Rathore, S., Tiwari, M., Khare, A.: 'Noise reduction of speech Signal using Wavelet transform with modified universal threshold', *International Journal of Computer Applications*, **20**, (5), pp. 14-19.
- [21] Mezache, A., Soltani, F.: 'Threshold optimization of decentralized CFAR detection in Weibull clutter using genetic algorithms', *Signal, Image and Video Processing*, 2008, **2**, (1), pp.1-7.
- [22] Igor Blîndu. 'Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques'. Thèse de doctorat. Ecole normale Supérieure des mines de Saint-Etienne et de l'université Jean Monnet. Mai 2004.
- [23] Maninder Pal. 'Leak detection & location in polyethylene pipes'. Thèse de doctorat .Uk. Juillet 2008.
- [24] Mohd Erman Fairuz Bin Zaidi, 'Leakage detection in pipelines using empirical mode décomposition', Thèse de Bachelor. Malaysia. Juin 2013.
- [25] Osama Hunaidi. ' La détection des fuites dans les conduites de distribution d'eau', ISSN, Octobre 2000, Canada, pp : 1206-1239
- [26] Jin Yang, Yumei Wen, Ping Li. 'Information Processing for Leak Detection on Underground Water Supply Pipelines'. IEEE Third International Workshop on Advanced Computational Intelligence. Suzhou, Jiangsu, China. 25-27 august 2010. pp. 623 – 629.
- [27] HO Jiann chyan. 'Leak detection and localization in water distribution network by acoustic method'. Thèse de Bachelor. Malisia. Avril 2007.
- [28] Mohd FGhazali. 'Leak detection using instantaneous frequency analysis'. Thèse PHD.UK. Mai 2012.
- [29] Détecteur SeCorr 300
www.sewerin.com/secorr.
- [30] N. MIDOUX, 'Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique', Edition Technique et Documentation (Lavoisier), Paris, 1988
- [31] Le détecteur PERMALOG-3
<http://www.hellotrader.com/allied-power-technology/permalog-3-acoustic-leak-noise-logger.html>
- [32] M.F. Ghazali, S.B.M. Beck, J.D. Shucksmith, J.B. Boxall, W.J. 'Staszewski. Comparative study of instantaneous frequency based methods for leak detection in pipeline networks'. *Mechanical Systems and Signal Processing journal*. (29). (2012).pp. 187–200.
- [33] Andrew F. Colombo, Pedro Lee, Bryan W. Karney. 'A selective literature review of transient-based leak detection methods'. *Journal of Hydro-environment Research*.(2). (2009).pp. 212-227
- [34] Noura Abu Al Faraj. 'Improving leak detection in water distribution networks through Hydraulic modeling and pressure management'. thèse de master. Janvier. 2013.
- [35] Alain Boulenger. :'Christian Pachaud. Aide mémoire Surveillance des machines par analyse des vibrations',2009.dunod.pp134-137.
- [36] Application note piézoélectrique accéléromètres.
www.MMF.de.
- [37] Universal indicator 81018.
www.raupenhaus.de

- [36] Sang-Guk Lee, Sun-Ki Lee, Sung-Keun Park, Jong-Hyuck Park.: ‘Study on the Leak Detection for Power Plant Steam Valve Using Acoustic Emission’. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, 10-11May 2007.
- [37] A.L. Souza, S.L.Cruz , J.F.R. Pereira .: ‘Leak detection in pipelines through spectral analysis of pressure signals’. Brazilian Journal of Chemical Engineering. April 06, 2000.
- [38] Brunner, A. J. and Barbezat, M. .: ‘ Acoustic Emission Monitoring of Leaks in Pipes for Transport of Liquid and Gaseous Media: A Model Experiment’. Advanced Materials Research journal Vols. 13-14 (2006) pp. 351-356.
- [39] Wenqing Lu, Laibin Zhang, Wei Liang, Xuchao Yu.: ‘Research on a small-noise reduction method based on EMD and its application in pipeline leakage detection’. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, pp.1-12.
- [40] Paul A. Hwang, Norden E, Huang, David W wang.: ‘ A note analyzing nonlinear and nonstationary ocean wave data. Applied ocean research journal. 25(2003). Pp. 187-193.
- [41] Jyrki Kauppinen, Jari Partanen. : ‘Fourier Transforms in Spectroscopy’. Edition Wiley-Vch.2001
- [42] Barkat, M., Varshney. P. K., ‘Adaptive cell-averaging CFAR detection in distributed sensor networks’, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, **27**, (3), pp. 424-429
- [43] Gini. F, Lombardini. F, Verrazzani. L, ‘Decentralized CFAR Detection with Binary Integration in Weibull Clutter’, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, **33**, (2), pp. 396-407
- [44] Carmen Capilla. ‘Application of the Haar wavelet transform to detect micro seismic signal arrivals’. Journal of Applied Geophysics .59 (2006), pp. 36-46
- [45] D.L. Donoho ‘De-noising by soft Thresholding’, IEEE Transactions on Information Theory, 1995, **41**, (3), pp. 613-627
- [46] R. Aggarwal. J. K. Singh. S. Rathore. M. Tiwari. V. K. Gupta. A. Khare, ‘Noise Reduction of Speech Signal using Wavelet Transform *with* Modified Universal Threshold’ International Journal of computer applications, 2011, **20**, (5), pp.0975-8887
- [47] Z-E. Baarir, A. Ouafi, ‘étude de la transformée en ondelettes dans la compression d’images fixes’, Courrier du savoir – N°05, Juin 2004, pp.69-74
- [48] Albert cohen. ‘Ondelettes, analyses multi résolutions et traitement numérique du signal’. Thèse de doctorat Paris9.1990.
- [49] Gini. F, Lombardini. F, Verrazzani. L, ‘Decentralized CFAR Detection with Binary Integration in Weibull Clutter’, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, **33**, (2), pp. 396-407
- [50] Maninder Pal, Neil Dixon and James Flint, ‘Detecting & Locating Leaks in Water Distribution Polyethylene Pipes’, Proceedings of the World Congress on Engineering, 2010 Vol II, WCE 2010, June 30 - July 2, London, U.K.
- [51] L. Weixian, L. Yilong and S. Jeffrey, “Data fusion of multi-radar system by using genetic algorithm,” IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, April 2002, 38, N° 2, pp. 601-612.
- [52] R. Blum and J. Qiao, “Threshold optimisation for distributed Order-statistic CFAR signal detection,” IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, N°. 1, January 1996, pp. 368-377.
- [53] Sevket Demirci , Enes Yigit , Ismail H. Eskidemir, Caner Ozdemir. ‘Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method ’, NDT&E International journal, (2012),47,pp.35-42.

- [54] Diagnostic Maintenance and Monitoring of Machines. Available <https://fr.scribd.com/document/89744094/Diagnostic-Maintenance-and-Monitoring-of-Machines1>
- [55] André Neubauer. Handbook of DFT– Diskrete Fourier-Transformation. Deutschland: Springer Publications, Inc., 1970.
- [56] William L. Briggs, Van emden Hensen. . Handbook of the DFT An owner’s manual for the discrete Fourier transform. Philadelphia: Siam Publications, Inc., 1995.
- [57] M. BAZI Smail. ‘Contribution à la détection et au diagnostic des défauts dans un système machine à induction-convertisseur. Thèse de doctorat, Batna ,Décembre, 2016
- [58] Frédéric Truchetet. Handbook of ondelettes pour le signal numérique’. Paris: Hermes Publication Inc., 1998.
- [59] M. Bentoumi, D. Chikouche, A. Mezache and Haddi Bakhti , “Wavelet DT method for water leak-detection using a vibration sensor: an experimental analysis”, IET Signal Processing, Vol. 11, Issue 4, June 2017, pp: 396 – 405

Résumé

On propose dans cette thèse de doctorat deux méthodes de détection de fuite dans les réseaux de distributions. La première contribution concerne la conception d'un système de détection de fuite d'eau inspiré des systèmes de détections des défauts prématurés dans les machines tournantes. Dans la deuxième contribution, nous avons apporté des améliorations de la méthode de détection des fuites des réseaux de distribution basée sur la FFT déjà existante, tenant compte que le problème de la non stationnarité des signaux de fuite a été pris en compte en utilisant la segmentation du signal. Sous la base de cette segmentation, la dernière contribution consiste à développer une nouvelle méthode de détection de fuite que nous l'avons appelée CWTDT (Continuous Wavelet Transform and a Double Thresholding) basée sur la transformée en ondelettes continue (CWT) de 'Haar' et un double seuillage (DT). Inspiré de l'idée de la technique d'intégration binaire dans la détection de cible radar, l'algorithme proposé analyse le signal de vibration non stationnaire émis à partir d'un pipeline d'eau à travers lequel on décide s'il y a une fuite ou non lors du transport de ce dernier. Les décisions binaires partielles de chaque segment sont alors obtenues par l'utilisation de deux seuils présélectionnés. La décision finale est obtenue au moyen de la règle de fusion 'K parmi L'. Un certain nombre de positions connues de fuite sur le pipeline d'eau sont considérés pour atteindre les valeurs optimales des seuils. La validation de cette nouvelle approche a été testée sur un système hydraulique (prototype) réalisé pour des distances quelconques inconnues. Les performances de détection de fuite de la méthode CWTDT utilisant les critères de taux de succès et de fausse alarme sont comparées expérimentalement à celles des méthodes de la littérature, la FFT et la CWT. Les résultats obtenus affirment la supériorité de la méthode proposée devant celles existantes.

Mots clés : Détection des fuites d'eau, CWT, Double seuils, capteur de vibration, binarisation d'image, Décisions binaires

Abstract

In this dissertation, two methods are proposed for detecting leakage in distribution networks. The first contribution consist of the design of a system for the detection of water leaks inspired by systems for detecting premature faults in rotating machines. In the second contribution, the improvement of leak detection method based on the existing FFT analysis in the distribution networks is considered. To do this, the segmentation of non-stationarity leakage signals is taken into account. Based of this partition of the outcomes, the last contribution concerns the derivation of a novel leak detection procedure using the 'Haar' wavelet and a double thresholding which we called the CWTDT method (Continuous Wavelet Transform and a Double Thresholding). Inspired by the idea of the binary integration technique in radar target detection, the proposed CWTDT detector analyzes the non-stationary vibration signal obtained from water pipeline in which it decides whether there is a leak or not during the transport of the latter. To this effect, the partial binary decisions of L segments are computed after the application of two preselected thresholds. The final decision is made by means of 'K out of L' fusion rule. After a creation of a number of known leakage positions on the water pipeline, the CWTDT algorithm is finally designed by the adaptation of the two detection thresholds. The validation of the CWTDT approach was tested on a real hydraulic system (prototype) for any arbitrary distances. The leak detection performance of the CWTDT method using the success rate and the false alarm rate is compared experimentally with those of the literature (i.e., the FFT and the CWT based approaches). The obtained leak results confirm the superiority of the proposed CWTDT method against the existing ones.