

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : INSTRUMENTATION ET MAINTENANCE INDUSTRIEL

THÈME

**Application de la technique EMD pour l'analyse des
données des signaux de fuite dans les réseaux de
distribution d'eau**

Proposé et dirigé par :

Mr. BENTOUMI Miloud

Mr. BAKHTI Haddi

Réalisé par :

HAFSI Lakhdar

N° D'ordre : 2016/IMI05/89/385

PROMOTION: JUIN 2016

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce mémoire.

En second lieu, Je tiens à remercier particulièrement mes parents ; mon succès demeure de loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et de patience.

*Mon vifs remerciements, accompagnés de toute mon gratitude, vont tout d'abord à mon encadreur Mr. **BENTOUMI Miloud** et Co-encadreur Mr. **BAKHITI Haddi**, pour m'avoir proposé ce sujet et dirigé mon travail, pour toute leur aide, Je suis ravi d'avoir travaillé en ses compagnies car outre leur appui scientifique, ils sont toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de ce mémoire. Les conseils qu'ils m'ont prodigué, la patience, la confiance qu'ils m'ont témoignés ont été déterminants dans la réalisation de ce travail de recherche.*

J'exprime ma reconnaissance aux membres de jury pour bien vouloir accepter de présider et examiner ce travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous, nos enseignants durant les années des études.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour Leurs soutiens moraux ou matériels, dans la réalisation de ce projet.

Dédicaces

Je dédie ce modeste et mémorable travail, plus particulièrement à mes aimables et respectueux parents qui m'ont accompagné dans toute ma vie, s'inquiétant énormément pour m'offrir une vie meilleure. Je tiens la parole pour leur dire : « Voilà les fruits de vos sacrifices ! ».

À mes sœurs ; À toute La famille HAFSI et MADJDOUB;

À mes amis, et toute la promotion d'électronique et spécialement le groupe d'option Instrumentation maintenance Industriel ; Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'a aidé à la réalisation de ce travail.

HAFSI Lakhdar

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I Vue générale sur les signaux de fuite	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition	4
I.3 Classification des signaux	4
I.3.1 Classification phénoménologique	4
I.3.1.1 Les signaux déterministes.....	4
I.3.1.2 Signaux aléatoires (stochastiques).....	4
I.3.2. Classification énergétique.....	5
I.4. Les fuites	6
I.4.1. Définition d'une fuite	6
I.4.2. Types de fuite	6
I.4.3 Les cause de fuites.....	6
I.4.4 Conséquences des fuites	6
I.5. Mesure le bruit de fuite	7
I.5.1. Propagation des ondes en pipelines.....	7
I.5.2. Vitesse de propagation des ondes.....	7
I.5.3. Signal acoustique de fuite.....	8
I.5.3.1. Caractéristiques signal acoustique de fuite	8
I.6. Débits de fuites.....	9
I.7. Les capteurs de mesure	9
I.7.1. Définition de capteur	9
I.7.2. Capteur de vibration	9
I.7.2.1. Accéléromètres	10
I.7.2.2 Les propriétés d'accéléromètre (piézo-électrique).....	10
I.7.3. Capteur acoustique	11
I.7.3.1. Les différents types de transducteurs.....	11
I.7.4. Les appareils de la détection des fuites	11
I.7.4.1. Les appareils acoustiques.....	11
I.8. Conclusion.....	12

Chapitre II Techniques de détection des fuites

II.1. Introduction.....	13
II.2. Historique des méthodes de détection de fuite	14
II.3. Recherche de fuite	14
II.4. Techniques de détection de fuite	15
II.4.1. L'observation visuelle	15
II.4.2. Technique acoustique.....	15
II.4.2.1. Localisation par auto-corrélation.....	16
II.4.2.2. Détection par enregistrement.....	17
II.4.2.3. Détection par écoute	18
II.4.2.4. Détection par immersion	19
II.4.3. Les techniques non acoustiques	19
II.4.3.1. La technique du gaz traceur.....	19
II.4.3.2. La Thermographie	20
II.4.3.3. Le géo-radar (GPR)	21
II.4.3.4. Chute de Pression	22
II.5. Conclusion	23

Chapitre III Méthodes d'analyse de signal EMD et Ondelette

III.1. Introduction	24
III.2. Définition.....	24
III.2.1. Système linéaire et non-linéaire.....	24
III.2.2. Signal stationnaire et non-stationnaire.....	24
III.3. Méthodes d'analyse des signaux non stationnaires.....	24
III.3.1. Analyse temps-fréquence, temps-échelle, fréquence instantanée.....	24
III.4. Transformée de Fourier	25
III.4.1. Inconvénient de l'analyse de Fourier	25
III.4.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante.....	25
III.5. L'Analyse en Ondelette	26
III.5.1. Les aspects théoriques de la transformée en ondelette mère	27
III.5.2. Propriétés des Ondelettes	28
III.5.3. Transformée en ondelette continue (TOC)	29
III.5.4. Transformée en ondelettes discrète (DWT).....	29
III.5.5. Avantage de l'analyse par Ondelettes.....	30
III.6. La transformée de Hilbert Huang	31

III.7. Décomposition modale empirique (EMD)	31
III.7.1. Principe de la décomposition.....	32
III.7.2. Tamisage (Sifting Process)	32
III.8. Comparaison de l'EMD avec l'ondelette	36
III.8.1.Comparaison EMD avec autres méthodes	36
III.9.Conclusion.....	37
Chapitre IV Description du système utilisé et analyse des résultats	
IV.1. Introduction	38
IV.2.Système d'acquisition	39
IV.2.1. La chaîne d'acquisition.....	39
IV.2.2. Capteur acoustique (microphone).....	39
IV.2.2. 1. Caractéristiques du microphone de mesure utilisé.....	40
IV.2.3. Amplificateur basse fréquence (LF AMPLIFIER).....	42
IV.2.4. Etage de conditionnement du signal	43
IV.2.5. Carte d'acquisition (STM 32 F4).....	45
IV.2.5.2. Caractéristiques principales	46
IV.3. Circuit hydraulique.....	47
IV.4.Circuit électrique	48
IV.5. Échantillon des signaux acquis	48
IV.5.1. Application de la FFT	50
IV.5.2. Application de la Décomposition Modale Empirique (EMD).....	51
IV.5.3. Application de l'ondelette	52
IV.5.4. Application de l'auto-corrélation.....	55
IV.5.4.1. L'auto-corrélation des signaux débruité par EMD	55
IV.5.4.2. Calcul de la différence temporelle (Δt).....	56
IV.5.4.3. L'auto-corrélation des signaux débruités par ondelette	56
IV.5.4.4. Calcul de la différence temporelle (Δt).....	57
IV.5.4.5. Localisation de la fuite	57
IV.6. Etude comparative entre EMD et ondelette	58
IV.7.Conclusion.....	61
Conclusion générale	62

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I. 1. Les sous catégories des signaux déterministes	4
Fig. I. 2. Signaux aléatoire stationnaires et non-stationnaires	5
Fig. I. 3. Les ondes du bruit de fuite.....	7
Fig. I. 4. Représentation temporelle d'un signal type.....	8
Fig. I. 5. La fonction essentielle du capteur	9
Fig. I. 6. Accéléromètres	10
Fig. I. 7. Quelque appareils acoustiques.....	12

Chapitre II

Fig. II. 1. L'emplacement chronologie de la technologie de détection de fuites.	14
Fig. II. 2. Détecteur par auto-corrélation acoustique.....	16
Fig. II. 3. Principe de localisation par auto-corrélation acoustique.....	16
Fig. II. 4. Enregistreur acoustique	18
Fig. II. 5. Personne effectuant une détection par écoute	18
Fig. II. 6. Schéma de la détection par immersion.....	19
Fig. II. 7. Une détection par gaz traceur	20
Fig. II. 8. La détection thermographie par caméra infrarouge.....	21
Fig. II. 9. Les données GPR avant (a) et après (b) l'interprétation de l'image.....	21
Fig. II. 10. Mesure de pression	22

Chapitre III

Fig. III.1. La transformée de Fourier	25
Fig. III.2. La transformée de Fourier à fenêtre glissante	26
Fig. III.3. Représentation d'analyse par ondelette	27
Fig. III.4. La différence entre une onde sinusoïdale et une ondelette	27
Fig. III.5. Illustration de la variation du facteur d'échelle	28
Fig. III.6. Processus de tamisage pour l'extraction de la première IMF	34
Fig. III.7. L'algorithme de la méthode EMD	35

Chapitre IV

Fig. IV.1. Acquisition et visualisation du signal	39
Fig. IV.2. Microphone utilisé	40
Fig. IV.3. Measuring microphone	40
Fig. IV.4. Amplificateur basse fréquence.....	42

Fig. IV.5. Montage de conditionnement des signaux.....	43
Fig. IV.6. Montage conditionneur expérimental.	45
Fig. IV.7. La carte STM32 F4	45
Fig. IV.8. Circuit hydraulique	47
Fig. IV.9. Le circuit électrique du système d'acquisition réalisé.....	48
Fig. IV.10. Signal avec fuite pour une distance de 90 cm du capteur (SignA)	49
Fig. IV.11. Signal avec fuite pour une distance de 50 cm du capteur (SignB)	49
Fig. IV.12. Spectre de fréquence du signal SignA à une distance de 90 cm.....	50
Fig. IV.13. Spectre de fréquence du signal SignB à une distance de 50 cm	50
Fig. IV.14. L'EMD du signal SignA à une distance de 90 cm.....	51
Fig. IV.15. L'EMD du signal SignB à une distance de 50 cm	52
Fig. IV.16. Le signal SignA avant et après le débruitage.....	53
Fig. IV.17. Le signal SignB avant et après le débruitage	54
Fig. IV.18. L'auto-corrélation des deux IMF1des deux signaux (SignA, SignB).....	55
Fig. IV.19. Représentation de différence d'échantillonnage.....	56
Fig. IV.20. L'auto-corrélation entre les deux signaux (signA, signB)	56
Fig. IV.21. Représentation de la différence d'échantillons.....	57

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau. III.1. Comparaison EMD avec autres méthodes.....	36
---	----

Chapitre IV

Tableau. IV. 1. Etude comparative de l'EMD et l'ondelette.....	58
Tableau. IV. 2. Etude comparative de l'EMD et l'ondelette.....	59
Tableau. IV. 3. Etude comparative de l'EMD et l'ondelette pour les distances < 100cm	60
Tableau. IV. 4. Etude comparative de l'EMD et l'ondelette pour les distances > 100cm	60

Liste des abréviations

TF : Transformée de Fourier.

EMD : Décomposition Modale Empirique.

STFT: Short Time Fourier Transform.

WT :WaveletTransform.

IMF:Intrinsic Mode Function.

TH : Transformée d'Hilbert.

THH: Transformation de Huang-Hilbert.

m_x : Moyenne statistique de $x(t)$.

E[x(t)]: Moment d'ordre 1 de $x(t)$.

N₀: Nombre de passage à zéro.

N₁: Nombre d'extrema.

AM : Modulation d'amplitude.

FM: Modulation de fréquence.

b(t): Bruit.

f_{ik}(t): Fréquence Instantanée *FI*.

a_k(t) : Amplitude instantanée *AI*.

ω(t): Pulsation

f(t): Fréquence

θ(t): Phase

X(f): Transformée de Fourier de $x(t)$.

ε : indique le seuil prédéfinie, c'est un critère de condition de la boucle indicée par i.

j: représente l'indice de l'IMF.

i : constitue l'indice de l'itération appliquée sur le résidu pour vérifier le critère d'une IMF.

r_j : désigne le résidu après l'obtention de la **j^{ème}IMF**

h_{j,i}: c'est une variable intermédiaire de calcul qui prend la valeur du nouveau résidu à la première itération, puis, elle prend la différence entre le résidu et la valeur de l'enveloppe moyenne aux itérations suivantes.

m_{j,i}: désigne l'enveloppe moyenne, obtenu à partir des deux enveloppes de **h_{j,i}**.

SD(i) : indique le critère d'arrêt à la **i^{ème}** itération

Introduction générale

Introduction générale

Dans les dernières décennies le transport ou la distribution de fluides (liquide ou gaz) est devenu d'une importance particulière. Pour les responsables des réseaux de distribution, l'amélioration du rendement d'un réseau a toujours été un souci majeur. L'installation de réseaux de transport ou de distribution se trouve confrontée à de nombreux problèmes d'exploitation notamment les fuites comme étant la première cause aux problèmes d'environnement et aux pertes économiques liées aux fuites, s'ajoutant les risques pour la santé publique qu'engendre la pénétration des contaminants dans les réseaux dès qu'une chute de pression se produise. La détection de fuite et sa localisation précise est parmi les facteurs déterminants pour atteindre un bon rendement du réseau. Pour localiser précisément les fuites, différentes méthodes sont mises en œuvre, en général, par étapes successives. A partir d'un secteur jugé douteux, on essaye d'identifier le tronçon fuyard (pré localisation) puis on détermine la position précise de la fuite (localisation). Les méthodes conventionnelles (FFT, corrélation) basées sur la transformée de Fourier très utilisées dans le domaine de détection des fuites sont assez limitées et leur sensibilité est aléatoire et dépend de nombreux facteurs (nature de fluide, géométrie de défaut, bruit environnant...etc.). La transformée en ondelettes permet de pallier ces difficultés mais son interprétation reste encore difficile pour caractériser précisément les signaux. L'EMD est une nouvelle technique utilisée pour la décomposition des signaux à des fins exploitables dans différents domaines. Cette dernière peut traiter efficacement des données non linéaires et non stationnaires. La décomposition en modes empiriques appelée EMD (Empirical Mode Decomposition) a été introduite en 1998 par Huang et al [1]. Pour décomposer de manière adaptative les signaux non linéaires et non stationnaires à un ensemble de signaux appelés IMFs, dans le but de proposer une méthode simple d'emploi. Contrairement à la transformée de Fourier classique et la transformée en ondelettes qui utilisent des fonctions de base déterminées a priori, la méthode EMD construit directement les fonctions de base à partir du signal lui-même. Pour chaque signal étudié une nouvelle base de fonctions est construite. Son principe est de décomposer un signal en une collection de fonctions oscillantes ou modes appelés en anglais IMFs (Intrinsic Mode Functions) par un processus de tamissage. Elle a été appliquée immédiatement dans divers domaines du traitement du signal tels que le génie biomédical, le diagnostic de pannes mécaniques et les applications géophysiques et le traitement d'image [2].

L'objectif de notre travail est d'appliquer La technique EMD sur les signaux acoustiques. Généralement, dans la littérature avant d'exploiter les signaux on les décompose à une

somme de composantes appelées IMFs, puis on élimine le bruit attaché à chaque composante par application d'un seuillage adaptatif sur chaque IMFs. Ensuite les signaux obtenus vont être additionnés et regroupés avec le résidu formant le signal débruité. Ce dernier représente le signal utile. La décomposition débute par des signaux hautes fréquences et se termine par des signaux basses fréquences. L'information pertinente des signaux de fuite se situe généralement dans la première composante pour cela on a pensé à immerger directement cette dernière et voir son effet concernant la détection et la localisation des fuites dans notre application. L'application de la technique de corrélation aux deux premières IMFs nous paraît indispensable pour la détermination de l'endroit exact de la fuite. Les performances obtenues jugeront le choix de la méthode proposée. Dans notre travail nous allons faire une étude comparative entre la décomposition modale empirique et l'ondelette comme outils de prétraitement et l'efficacité de chaque technique dans le domaine de détection des fuites.

Le travail effectué dans ce mémoire est axé autour de quatre chapitres qui sont présentés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons une généralité sur les fuites et les signaux de fuite d'eau, suivi d'un panorama des différents détecteurs de fuites actuellement utilisés. Le deuxième chapitre est consacré à différentes techniques de détection de fuites. Dans le troisième chapitre nous présentons les méthodes d'analyse de signal avec une étude détaillée de la nouvelle technique EMD. Enfin le quatrième chapitre est dédié pour l'application de ces techniques sur des signaux de fuite réels acquis sur un canal prototype hybride dans le laboratoire avec une étude comparative. Les résultats obtenus vont être analysés pour voir les performances des méthodes employées.

Chapitre I

Vue générale sur les signaux de fuite

I.1. Introduction

Les réseaux de transport et de distribution d'eau se détériorent naturellement avec le temps et perd leurs étanchéités. L'eau est perdue à cause de fuites dans les différentes composantes des réseaux qui comprennent des tubes de transmission, des tuyaux de distribution, des tuyaux de connexion de service, les articulations, vannes, bouches d'incendie, et les réservoirs de stockage et les réservoirs.

Dans la tuyauterie, les fuites comprennent ceux du service connexions, un joint défectueux, et une canalisation fissurée. Le problème de la détection des fuites peuvent être classés comme une sous-catégorie d'un champ de recherche important nommé Surveillance de l'état. L'objectif n'est cependant pas de prédire les indications de l'échec probable, mais il est de capturer les pistes de défaut existant (fissure) dans le tuyau. Une Sortie de l'eau à partir d'une ouverture sur la paroi de la conduite peut causer plusieurs changements physiques dans le sol, et le tuyau tels que la pression appliquée dans le tuyau, ce qui rend le bruit acoustique audible, l'évolution de l'humidité du sol etc... [3]. Chacun de ces phénomènes peuvent être utilisés comme un symptôme clé pour la surveillance du réseau de distribution d'eau.

Les fuites d'eau des tuyaux enterrés est une préoccupation à travers le monde en raison de l'évolution du régime des précipitations, la détérioration ou des dommages lié au système de distribution, la demande en eau dû a une population sans cesse croissante. Une fuite dans un tuyau d'alimentation en eau génère du bruit, qui peut être utilisé pour détecter et localiser cette dernière. Autrement dit un signal de fuite est causé par la propagation d'onde du fluide dans le réseau de canalisations [4]. Dans ce chapitre nous présentons quelques généralités sur les signaux de fuite d'eau dans les réseaux de distribution.

I.2. Définition

- **Signal :**

Un signal est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à son destinataire.

- **Bruit :**

Un bruit correspond à tout phénomène perturbateur gênant la transmission ou l'interprétation d'un signal.

I.3 Classification des signaux

I.3.1 Classification phénoménologique

I.3.1.1 Les signaux déterministes

Ou signaux certains, leur évolution en fonction du temps peut être parfaitement modélisée par une fonction mathématique. On retrouve dans cette classe les signaux périodiques, les signaux transitoires, les signaux pseudo aléatoires, etc...

- **Sous catégories :**

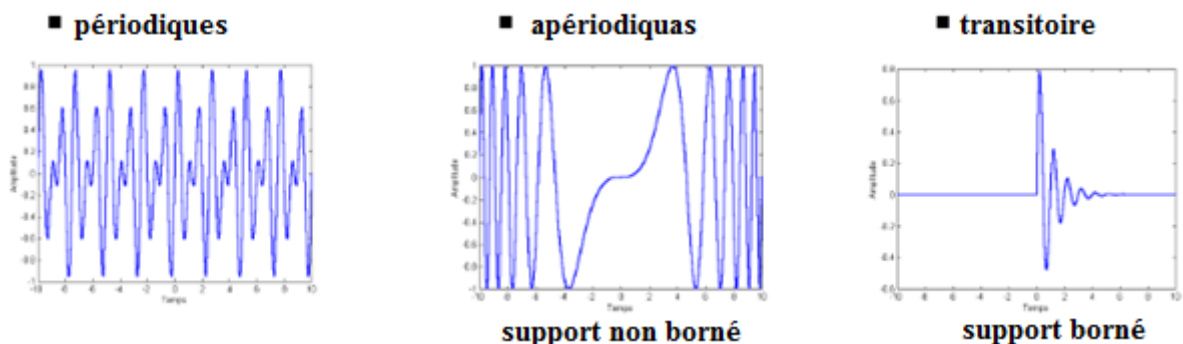


Fig. I. 1. Les sous catégories des signaux déterministes

I.3.1.2 Signaux aléatoires (stochastiques)

Signaux dont l'évolution temporelle est imprévisible et dont on ne peut pas prédire la valeur à un temps t . La description est basée sur les propriétés statistiques des signaux (moyenne, variance, loi de probabilité, ...)

- Signaux aléatoire stationnaires et non-stationnaires

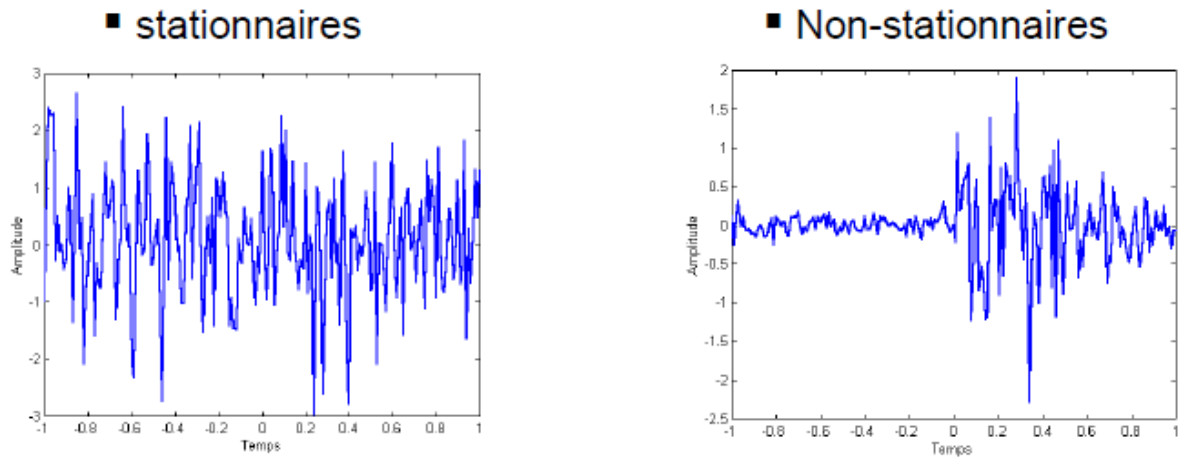


Fig. I. 2. Signaux aléatoire stationnaires et non-stationnaires

I.3.2. Classification énergétique

L'énergie W_x d'un signal $x(t)$ est définie comme suit :

$$W_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt \quad (I.1)$$

On dira que ce signal est à énergie finie si $W_x < \infty$. Dans cette catégorie, on rencontre tous les signaux temporellement éphémères qu'ils soient déterministes ou aléatoires.

La puissance moyenne P_x d'un signal $x(t)$ est définie par :

$$P_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x^2(t) dt = X_{eff}^2 \quad (I.2)$$

On notera que cette définition coïncide avec celle du carré de la valeur efficace du signal $x(t)$.

On dira que celui-ci est à puissance finie si $P_x < \infty$. Cette catégorie englobe les signaux périodiques, quasi-périodiques et les signaux permanents aléatoires ou non, dans le cas où le signal est périodique, la durée d'intégration T est prise égale à une période du signal.

Certains signaux théoriques n'appartiennent à aucune de ces catégories, c'est le cas, par exemple, de l'exponentielle,

$$x(t) = e^{-at} \quad , \quad -\infty < t < +\infty \quad (I.3)$$

I.4. Les fuites

I.4.1. Définition d'une fuite

C'est une source de bruit, qui engendre des vibrations mécaniques et acoustiques due aux fluctuations de la pression du fluide dans la conduite. Ces vibrations se propagent avec une atténuation plus ou moins rapide le long de la conduite et dans le sol. Les fuites se produisent dans différents éléments du réseau de distribution d'eau (conduites de transmission, conduites de distribution, branchements, raccords, vannes, et bouches d'incendie).

I.4.2. Types de fuite

Il existe différents types de fuites, y compris les fuites de la ligne de service, et les fuites de valve, mais dans la plupart des cas, la plus grande partie de l'eau non comptabilisée est perdue par les fuites dans les conduites d'alimentation. Il y a plusieurs façons de classer les fuites, il peut être le diamètre de tuyaux, la pression dans la canalisation, zone du trou, etc., mais le paramètre le plus important est le taux de perte d'écoulement à travers le trou.

Pour la distribution d'eau potable nous pouvons construire deux catégories, en fonction de l'écoulement dans le tuyau et sur l'utilisation de l'eau :

- Petite fuite, où le débit de perte est inférieure à 5 l / min,
- Grande fuite, où le débit de perte représente au moins 5 l / min. [5]

I.4.3 Les cause de fuites

- ♦ La corrosion
- ♦ Les défauts des matériaux
- ♦ Mauvaise installation
- ♦ Pression d'eau excessive
- ♦ Les coups de bélier
- ♦ Les mouvements de terrain attribuables à la sécheresse ou au gel
- ♦ Les vibrations
- ♦ Les charges excessives dues à la circulation

I.4.4 Conséquences des fuites

Financièrement, les fuites constituent une perte puisque de l'eau traitée et pompée pour être acheminée vers le consommateur n'est jamais distribuée ni facturée. Les fuites, en accroissant le débit transité, contribuent à l'augmentation des pertes de charge et donc de la consommation d'énergie. Cette problématique a particulièrement été étudiée par Colombo et

Karney (2002), qui calculent les coûts énergétiques supplémentaires induits par une fuite, mais aussi par Pelli et Hitz (2000) qui proposent des indicateurs pour évaluer l'énergie consommée sur un réseau. De plus, les réseaux très fuyards peuvent causer un déficit d'image du gestionnaire. Les fuites contribuent également à accentuer les prélèvements dans les ressources naturelles. En effet, il n'est pas rare qu'elles soient à l'origine de pertes de 20 à 30% du volume total mis en distribution. Cette quantité d'eau, puisée dans des réserves souvent limitées, n'arrive jamais au consommateur [6].

I.5. Mesure le bruit de fuite

Les signaux de fuite sont mesurés en utilisant soit des capteurs de vibrations soit des capteurs acoustiques. Qui détectent l'accélération de la vibration induite par les signaux de fuite dans la paroi du tuyau ou des raccords, normalement sont utilisés pour mesurer les signaux de fuite dans les tuyaux métalliques. Ces capteurs sont fixés au tuyau directement, si accessible; sinon ils peuvent être attachés aux bornes d'incendie ou de vannes sur terrains de feu. Un support magnétique est monté sur la base de ces capteurs, et donc ils sont faciles à installer sur les surfaces métalliques. Les accéléromètres peuvent également être utilisés pour mesurer les fuites dans les tuyaux en plastique, mais ils ne sont efficaces que pour les grandes fuites.

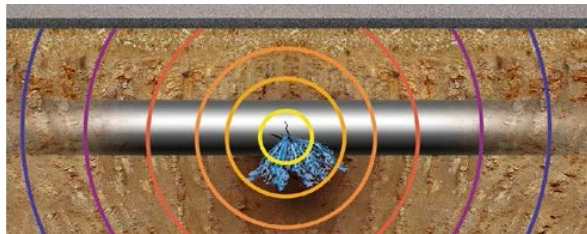


Fig. I. 3. Les ondes du bruit de fuite

I.5.1. Propagation des ondes en pipelines

La propagation de l'onde du bruit dans le réseau de canalisations du fluide est produite en raison de la perturbation dans l'écoulement du fluide. Généralement la perturbation peut être définie comme tout ce qui effete, prévénir, détenir ou inhiber l'onde à l'intérieur du fluide. Cela va créer la dynamique entre les molécules du fluide et entraîner la propagation des ondes.

I.5.2. Vitesse de propagation des ondes

La vitesse de propagation des ondes à l'intérieur des canalisations est l'une des valeurs importantes dans le fonctionnement de la détection des fuites. Il est l'un des principaux défis pour les travailleurs, car pour analyser avec succès le signal de la fuite, la valeur est

nécessaire. Mais, dans les pipelines, la valeur de la vitesse est différente en fonction du diamètre de la conduite, la rigidité du tuyau et le matériau de la conduite. Théoriquement, la vitesse de propagation des ondes peut être obtenir à partir l'équation (I.5).

$$V = v_0 \sqrt{\frac{1}{[1+(D/e)(K_{water}/E_{pipe})]}} \quad (I.5)$$

Par laquelle :

V = vitesse de propagation du bruit de la fuite dans la conduite

v_0 = vitesse de propagation du son dans une étendue d'eau infinie

D = diamètre intérieur de la conduite

e = épaisseur de la paroi de la conduite

K_{water} = volume d'élasticité volumique de l'eau

E_{pipe} = module d'élasticité de Young du matériau de la conduite

I.5.3. Signal acoustique de fuite

Le signal acoustique de fuite d'un pipeline peut être utilisé pour le diagnostic et la localisation de la fuite. Dans un pipeline de grande distance, la collecte du signal acoustique causée par la vibration due à la fuite revêt une grande importance pour sa détection. L'émission acoustique est créée par les fluctuations locales du champ de pression associées à divers phénomènes dans le fluide. La source de signal acoustique est créée par les fluctuations locales du champ de pression associées à divers phénomènes dans le fluide, qui engendre une onde acoustique de forme impulsionnelle.

I.5.3.1. Caractéristiques signal acoustique de fuite

Les systèmes de traitement actuels utilisent l'émission discontinue, correspondant à un signal caractérisé par un temps de début et de fin. Le signal peut se présenter sous la forme suivante :

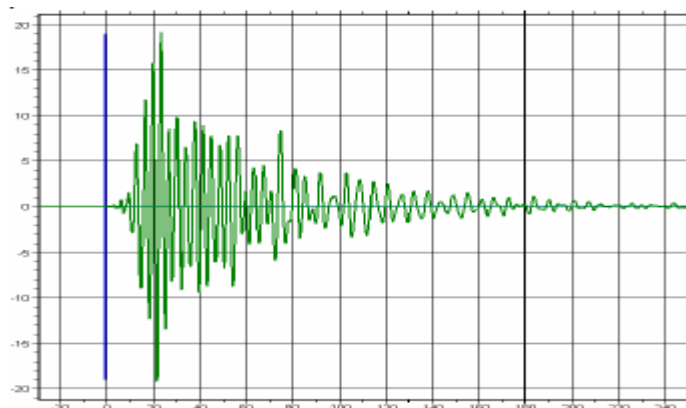


Fig. I. 4. Représentation temporelle d'un signal type

Les principales caractéristiques déterminées par le système de mesure sont la durée, le temps de montée, l'amplitude maximum, le nombre d'alternance et l'énergie. Le temps d'arrivée de l'onde sur un capteur est également enregistré afin de permettre une localisation précise. La représentation donnée en figure (Fig. I. 4) est idéale, en pratique les signaux enregistrés lors des contrôles, sont très complexes et très divers. Un algorithme de localisation permet de réaliser une cartographie des sources émissives détectées à l'aide d'un module dédié du logiciel adapté à l'instrumentation utilisée.

I.6. Débits de fuites

Les fuites sont caractérisées quantitativement par le débit du fluide qui s'échappe du confinement. Il s'exprime par le volume qui circule à travers les fuites par unité de temps (l'unité l'égale étant le mètre cube par seconde (m^3/s)).

I.7. Les capteurs de mesure

I.7.1. Définition de capteur

Un capteur est un transducteur capable de transformer une grandeur physique en une autre grandeur généralement électrique (tension, courant, charge) utilisable par l'homme ou par le biais d'un instrument approprié

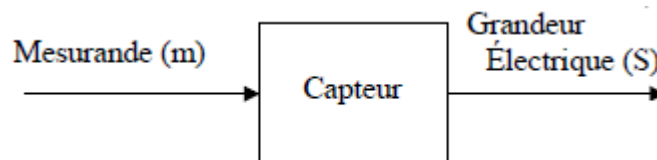


Fig. I. 5. La fonction essentielle du capteur

I.7.2. Capteur de vibration

Un capteur de vibration est un transducteur capable de convertir en signal électrique le niveau de vibrations qu'il subit à une instante donné. La sensibilité des capteurs représente la proportionnalité de la sortie électrique exploitable (tension, charge, courant) par rapport au paramètre de vibration (accélération, vitesse, déplacement) [7].

Il existe plusieurs types de capteurs pour apprécier les mouvements vibratoires.

- Sonde de proximité à Courant de Foucault
- Sonde capacitive
- Potentiomètre de position
- Bobine mobile
- Vélocimètre laser à effet doppler

- Capteur piézorésistif
- L'accéléromètre piézo-électrique
- L'accéléromètre à électronique intégrée

I.7.2.1. Accéléromètres

Un accéléromètre est un appareil qui mesure la vibration ou l'accélération du mouvement d'une structure. La force provoquée par les vibrations ou un changement de mouvement (accélération) pousse la masse à « serrer » le matériau piézoélectrique qui produit une charge électrique proportionnelle à la force qui lui est exercée. Étant donné que la charge est proportionnelle à la force, et que la masse est une constante, la charge est donc également proportionnelle à l'accélération [8].

I.7.2.2 Les propriétés d'accéléromètre (piézo-électrique)

- Utilisable sur de très grandes gammes fréquentielles
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB, soit 1 à 108).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Les mesures de vibration peuvent être faites sous large éventail de conditions environnementales tout en conservant une excellente précision (typiquement 250°C ; 400 °C à 700°C pour des modèles spéciaux).
- Etant lui-même générateur de charges, il est donc indépendant de toute alimentation externe.
- Nécessite malgré tout un conditionnement de sa sortie charge (appelé conditionneur de charge ou préamplificateur de charge) plus coûteux que pour les autres types de capteur.
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.
- Extrêmement compact et d'un grand rapport qualité/prix.



Fig. I. 6. Accéléromètres

I.7.3. Capteur acoustique

Les capteurs acoustiques sont des transducteurs électroacoustiques transformant l'énergie des ondes acoustiques en énergie électrique. Ils comportent un élément sensible à l'un des paramètres du champ acoustique (pression ou vitesse) et un transducteur produisant un signal électrique. Ils existent plusieurs types de transducteur pour apprécier les ondes acoustiques.

I.7.3.1. Les différents types de transducteurs

Les grandes classes de transducteurs électroacoustiques sont au nombre de trois :

- **les transducteurs électrodynamiques** : une pression ou un gradient de pression met en mouvement une membrane placée dans un champ magnétique. Les effets cumulés du déplacement et du champ magnétique engendrent un courant induit correspondant au signal de sortie du capteur.
- **les transducteurs électrostatiques** : une pression ou un gradient de pression met en mouvement une membrane dont le déplacement induit une variation de capacité du condensateur placé derrière.
- **les transducteurs piézo-électriques** : Une capsule comprenant un composé piézo-électrique agit comme un condensateur variable qui traduit la pression par une variation de tension aux bornes d'une résistance de charge.

I.7.4. Les appareils de la détection des fuites

Les appareils sont soit mécaniques, soit électroniques. Ils utilisent des mécanismes ou des matériaux sensibles (comme les éléments piézoélectriques) pour capter les vibrations ou les bruits émis par les fuites. Les appareils électroniques modernes sont munis d'amplificateurs de signaux et de filtres antiparasites pour mettre en relief le signal produit par la fuite. Le mode d'emploi des appareils d'auscultation est généralement simple mais leur efficacité dépend de l'expérience de l'opérateur.

I.7.4.1. Les appareils acoustiques

- aquaphone
- géophone
- microphones au sol
- Hydrophone
- Hydrosol
- Tiges d'écoute



Fig. I. 7. Quelques appareils acoustiques

I.8. Conclusion

La plus part des fuites sur le réseau d'eau potable sont invisibles, Ceci est un grande problème, car il élimine la certitude liée à la sélection de lieu de fuite. L'utilisation commode des capteurs de vibrations soit des accéléromètres ou des hydrophones pour localiser les fuites dans les tuyaux est indispensable. De nos jours L'enregistrement et l'analyse des signaux de fuite se fait de façon continue. Par conséquent, les signaux de fuite ont un potentiel prometteur en ce qui concerne leur apport à aider tous les services d'eau à réduire les pertes d'eau dans les réseaux de distribution. La convivialité des nouveaux systèmes de détection encouragera leurs utilisations par le personnel des services publics, et les placera à la portée des services d'eau dans les pays en développement qui ne peuvent pas éliminer entièrement les problèmes dues aux fuites complètement. Les différentes techniques utilisées dans ce domaine vont être éclairci dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Techniques de détection des fuites

II.1. Introduction

Les contraintes économiques, les questions de santé publique et le besoin d'économiser l'eau incitent les exploitants de réseaux à mettre sur pied des programmes de contrôle des fuites. Les programmes de contrôle systématique des fuites comportent deux grands volets, sont les bilans d'eau et la détection des fuites. Ces dernières années, on a fait des efforts importants pour mettre au point des méthodes visant à établir les bilans d'eau ou à détecter les fuites. Grâce à ces efforts, les exploitants de réseaux disposent maintenant de plusieurs techniques bien établies et d'appareils modernes qui les aident à limiter les pertes d'eau.

La détection des fuites sur les conduites de distribution d'eau est l'un des aspects essentiels des programmes de gestion des fuites. La gestion des fuites d'eau comprend généralement quatre éléments majeurs, sont les vérifications de consommation d'eau, la détection ou la surveillance des fuites, le contrôle de la pression et la localisation et la réparation des fuites. Dans ce chapitre nous allons présentés les différentes techniques de détection des fuites dans les réseaux de distribution d'eau.

II.2. Historique des méthodes de détection de fuite

Avec le croissement de la demande d'eau potable et industrielle, les compagnies de l'eau ont besoin d'augmenter l'efficacité de leurs systèmes de distribution. Pour l'amélioration de leur rendement les responsables essayent toujours de développer des méthodes et des techniques. Comme nous savons durant les siècles passés, les ingénieurs et les chercheurs ont développé un grand nombre des techniques pour découvrir et résoudre le problème de fuite. L'apparence historique de méthodologies de la fuite adaptées est donnée dans la figure (Fig. II.1) [9].

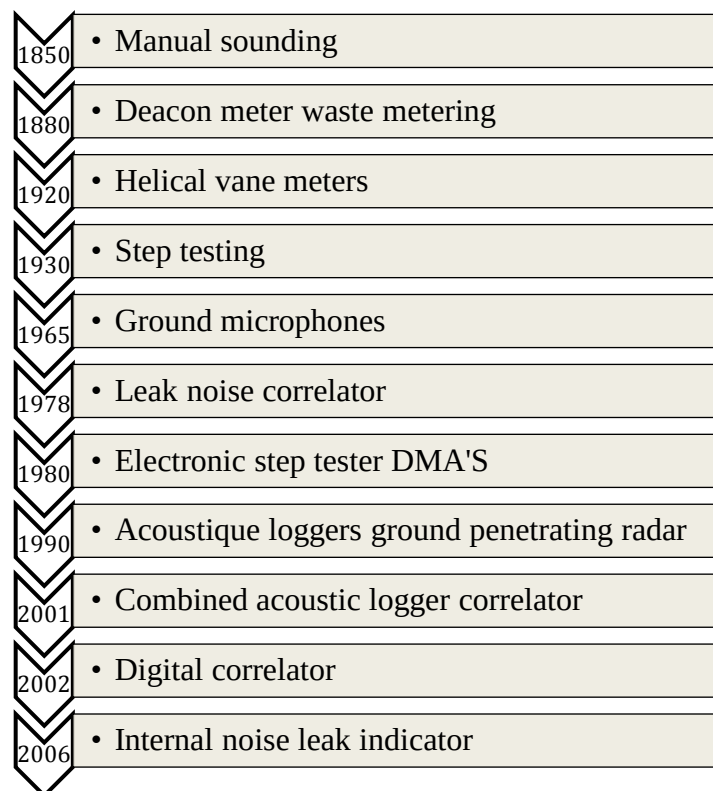


Fig. II. 2. L'emplacement chronologie de la technologie de détection de fuites.

II.3. Recherche de fuite

Dans certains contextes, quelques fuites représentent une part importante du volume perdu. Il est donc souvent opportun d'entreprendre une campagne de recherche de fuite ciblée sur une partie restreinte du réseau, avant d'avoir défini une stratégie d'ensemble. Les efforts de recherche peuvent être accentués sur des zones du réseau connues pour leur proportion à avoir une fuite.

Dans un premier temps, les équipes de détection des fuites déterminent grossièrement l'emplacement des fuites dans le réseau de distribution en observant tous les points accessibles du réseau (p. ex. les bouches d'incendie et les vannes).

Ensuite on repère plus précisément les zones suspectes en auscultant la surface du sol, directement au-dessus de la conduite et à intervalles rapprochés (environ 1 m). Une autre méthode de repérage exact et automatique des fuites consiste à utiliser des appareils modernes de corrélation des bruits de fuites. Ces appareils sont employés couramment depuis quelques années. Ils sont normalement plus précis que les appareils d'auscultation [10].

Les fuites peuvent également être détectées à l'aide de techniques non acoustiques (p. ex. gaz traceur, imagerie infrarouge et géo radar), mais celles-ci sont encore très peu utilisées et leur efficacité n'est pas aussi bien établie que celle des méthodes acoustiques classiques.

II.4. Techniques de détection de fuite

II.4.1. L'observation visuelle

L'observation visuelle est une traditionnelle et aussi la méthode la plus simple pour détecter les fuites. Cela peut être fait par un personnel expérimenté qui détectent et localisent les fuites soit en volant, conduisant ou en marchant le long du pipeline, la recherche de modèles anormaux à proximité du pipeline ou en écoutant les bruits générés par la fuite. L'efficacité de cette technique dépend de l'expérience de l'opérateur, la taille de la fuite et de la fréquence d'inspection. Pour certains produits, cette technique peut également impliquer l'utilisation de chiens formés, qui sont sensibles aux substances d'odeur qui pourraient être libérés du pipeline [11].

II.4.2. Technique acoustique

Les techniques de détection et de localisation utilisées actuellement sont en majorité basées sur le bruit émis par les fuites [12]. À mesure que l'eau sort de la conduite pressurisée, elle perd et transmet de l'énergie à la paroi de la conduite et au sol environnant. Ce transfert d'énergie se traduit alors par la génération d'ondes sonores pouvant être captées par des appareils électroniques et parfois même par l'oreille humaine.

Différents facteurs peuvent influencer la propagation des ondes sonores dont la pression à l'intérieur de la conduite, le type de matériel et le diamètre de la conduite, le type de sol et le type de surface [13]. Depuis plusieurs années, pour limiter ce problème, des amplificateurs ont été ajoutés aux équipements de détection. En plus du problème de transmission des ondes s'ajoute celui causé par les bruits parasites. Puisque ces bruits proviennent en grande partie de la circulation routière, du vent et de la pluie, la détection est généralement plus fructueuse de nuit. Dans le but d'optimiser les différents équipements, des filtres permettant de sélectionner la plage sonore sont aussi disponibles.

II.4.2.1. Localisation par auto-corrélation

La détection par auto-corrélation acoustique peut favorablement remplacer la détection par écoute sur les conduites non métalliques et les conduites de grand diamètre, car les corrélateurs de bruits de fuites sont moins sensibles aux bruits parasites et à la capacité d'écoute des inspecteurs. La détection par auto-corrélation acoustique consiste à mesurer les bruits émis par une conduite aux deux points qui délimitent l'emplacement d'une fuite suspectée [14]. Le point de fuite est calculé par une relation mathématique simple et facile à calculer qui comprend le décalage temporel entre les signaux mesurés, la distance entre les points de mesure et la vitesse de propagation du son dans la conduite.



Fig. II. 3. Détecteur par auto-corrélation acoustique

- Principe de localisation par auto-corrélation acoustique

La figure ci-dessous représente les différentes distances qui permettent la localisation de la fuite après le calcul du décalage temporel (Δt) par auto-corrélation des signaux.

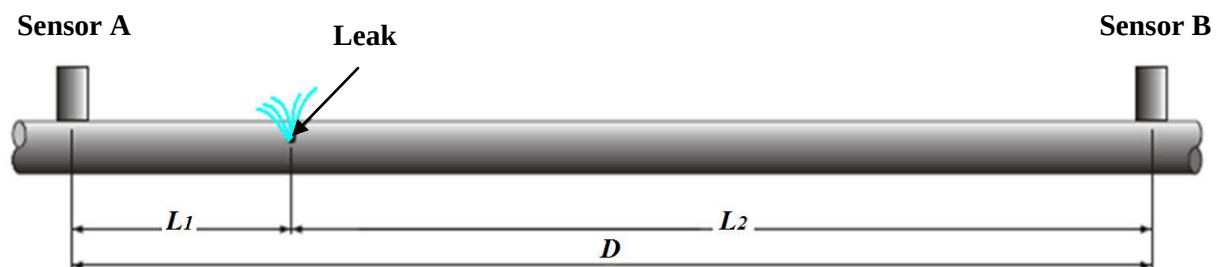


Fig. II. 3. Principe de localisation par auto-corrélation acoustique

D : distance entre les deux capteurs (m)

V : Vitesse de propagation d'onde acoustique (m/s)

L1, L2: distance entre la fuite et les capteurs

Temps mis par le signal (1) pour arriver : $T_1 = L_1 / V$

Temps mis par le signal (2) pour arriver : $T_2 = L_2 / V$

Décalage de temps du signal (2) par rapport au signal (1) : $\Delta T = T_1 - T_2 = (L_2 - L_1) / V$

$L_2 = D - L_1 \rightarrow \Delta T = (D - 2L_1) / V \rightarrow L_1 = (D - V\Delta T) / 2$

Paramètres nécessaires à une corrélation précise :

- Le diamètre de la conduite et ces facteurs de fabrication déterminent la vitesse.
- La nature de propagation du son dans la conduite
- La longueur réelle entre les deux capteurs.
- l'homogénéité de la conduite entre les deux capteurs

La technique de détection de corrélation présente, par rapport aux méthodes acoustiques traditionnelles les avantages suivants :

- les bruits parasites du sol et du milieu ambiant sont quasiment sans influence sur le résultat.
- le signal restitué n'est pas influencé par l'effet d'atténuation des bruits dans le sol mais seulement par une atténuation de la propagation du bruit de fuite sur la conduite.
- le résultat est obtenu directement et non par approches successives (cas des écoutes sur les points d'accès et des écoutes au sol).
- La précision du résultat est excellente ($\approx 0,5$ m), dans la mesure où les données de saisie sont conformes à la réalité du terrain.

II.4.2.2. Détection par enregistrement

La détection acoustique manuelle, peut surtout occulter des fuites et des pertes d'eau importantes, vu l'importance du temps qui peut séparer l'occurrence d'une fuite et sa détection. Pour pallier les limites de la détection acoustique manuelle, les gestionnaires des fuites peuvent aujourd'hui recourir à la détection acoustique automatique, et plus particulièrement aux enregistreurs acoustiques. Les enregistreurs acoustiques sont des appareils compacts composés d'un capteur de vibrations (ou hydrophone), d'un module d'enregistrement de données programmable et d'un module de communication. Déployés en grand nombre, temporairement ou en permanence, sur les vannes souterraines, à une distance qui varie entre 200 et 500 mètres, ces enregistreurs sont programmés pour écouter les bruits des conduites pendant les périodes les plus calmes de la nuit, normalement entre 2 heures et 4 heures. Ils fonctionnent toutes les nuits et transmettent, sans fil, une alerte à un récepteur, mobile ou fixe, dès qu'ils suspectent une fuite.



Fig. II. 4. Enregistreur acoustique

Sur les réseaux d'eau équipés de lecture automatique des compteurs (LAC), il est possible aujourd'hui de fixer les enregistreurs de bruits sur la conduite de branchement du compteur d'eau des particuliers et de profiter de l'infrastructure de communication sans fil de la LAC pour transmettre les alertes de fuite. De même, la « corrélation des enregistreurs de bruits » permet désormais d'enregistrer un court échantillon du bruit produit par une fuite, de le stocker et de le télécharger sur un ordinateur, via un récepteur fixe ou mobile, où il est corrélé au bruit pour localiser la fuite suspectée [14].

II.4.2.3. Détection par écoute

La détection par écoute s'effectue à l'aide d'appareils manuels simples, comme l'aquaphone ou le géophone. Malgré leur simplicité, ces appareils sont plus efficaces dans les mains d'inspecteurs expérimentés. La détection par écoute peut également s'effectuer à l'aide de dispositifs électroniques modernes souvent équipés d'amplificateurs de signaux et de filtres de bruits qui permettent aux bruits de fuites de se démarquer dans des environnements bruyants.



Fig. II. 5. Personne effectuant une détection par écoute

II.4.2.4. Détection par immersion

Pour les conduites de grand diamètre, les problèmes posés par la détection par écoute peuvent être résolus par l'immersion d'hydrophones dans les conduites [15]. Dans une application de ce type, des inspecteurs ont immergé un hydrophone captif dans une conduite de grand diamètre, au niveau d'un robinet spécial, pour l'y tracter ensuite à l'aide d'un appareil en forme de parachute, afin de se rapprocher le plus possible des fuites. L'hydrophone mesure les niveaux sonores des fuites tout au long de son parcours, tandis que les inspecteurs suivent sa position à la surface. Les points de fuite potentiels correspondent alors aux pics sonores enregistrés. Dans une autre application de détection par immersion, les inspecteurs ont immergé une sphère en aluminium enveloppée de mousse flottante contenant un hydrophone et ses accessoires électroniques, dans une conduite de grand diamètre, au niveau d'un robinet spécial. La sphère non captive est ensuite poussée dans la conduite par l'écoulement de l'eau puis repêchée à une vanne en aval. Les systèmes de détection par immersion sont très spécialisés et très sophistiqués et conviennent plus particulièrement aux conduites de grand diamètre

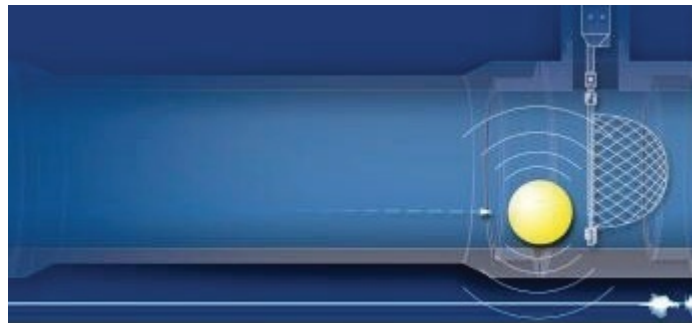


Fig. II. 6. Schéma de la détection par immersion

II.4.3. Les techniques non acoustiques

II.4.3.1. La technique du gaz traceur

Cette technique consiste à injecter dans une partie isolée d'une conduite un gaz non toxique, plus léger que l'air et insoluble dans l'eau (p. ex. l'hélium ou l'hydrogène). Le gaz s'échappe par l'ouverture de la fuite, puis atteint la surface en s'infiltrant à travers le sol et la chaussée. On repère la fuite en balayant la surface du sol située juste au-dessus de la conduite au moyen d'un détecteur de gaz très sensible [10].



Fig. II. 7. Une détection par gaz traceur

❖ **Les avantages de la technique du gaz traceur**

- ♦ La technique du traçage à gaz (hélium) est polyvalente, fiable et économique.
- ♦ Elle est indépendante de la nature des réseaux (métallique ou plastique) et de leur diamètre.
- ♦ Son efficacité n'est pas perturbée par les bruits environnants.
- ♦ Elle permet de déceler des fuites « silencieuses ».
- ♦ Le gestionnaire du réseau sait immédiatement s'il s'agit d'une grosse fuite à réparer d'urgence, d'une fuite mineure à traiter ultérieurement ou d'un simple suintement.
- ♦ L'inspection est rapide, avec environ 4 km parcourus par jour.
- ♦ Aucune manœuvre préalable n'est requise.

II.4.3.2. La Thermographie

Le principe d'utilisation de la thermographie pour la détection des fuites est le suivant : l'eau s'échappant d'une conduite souterraine modifie les caractéristiques thermiques du sol environnant (p. ex. elle crée une zone d'absorption thermique plus efficace que le sol sec environnant). Les anomalies thermiques produites au-dessus de la conduite sont décelées par des caméras infrarouges portatives ou embarquées dans un véhicule terrestre ou un avion [10].

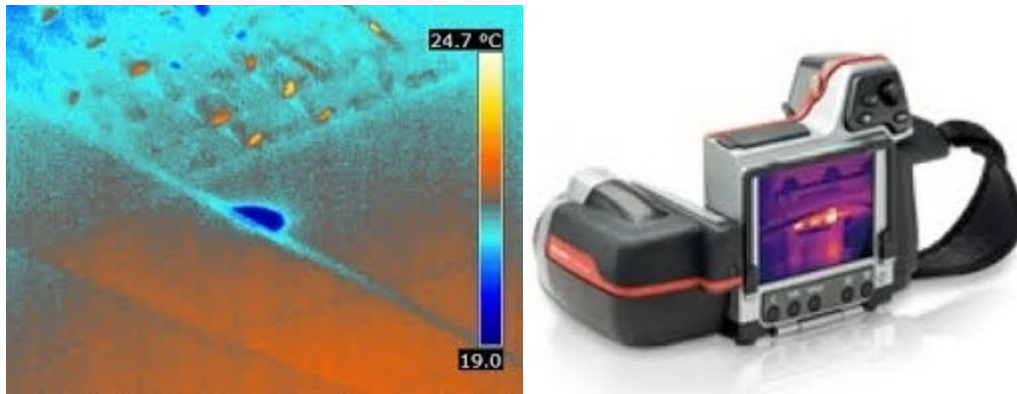


Fig. II. 8. La détection thermographie par caméra infrarouge

II.4.3.3. Le géo-radar (GPR)

Les radars permettent de repérer de deux façons les fuites dans les conduites d'eau enfouies : ils détectent les vides créés dans le sol par l'eau qui fuit et circule autour de la conduite, ou bien les segments de canalisations qui semblent plus profonds qu'ils ne le sont en réalité à cause de l'augmentation de la valeur de la constante diélectrique du sol gorgé d'eau, aux alentours de la fuite. Les ondes sont partiellement réfléchies vers la surface du sol lorsqu'elles rencontrent une anomalie dans les propriétés diélectriques (p. ex. un vide ou une conduite). En balayant la surface du sol, on obtient la taille et la forme de l'objet sur l'écran du radar. Le décalage entre le moment où l'onde est émise et le moment où elle est réfléchi détermine la profondeur de l'objet qui réfléchit l'onde [16].

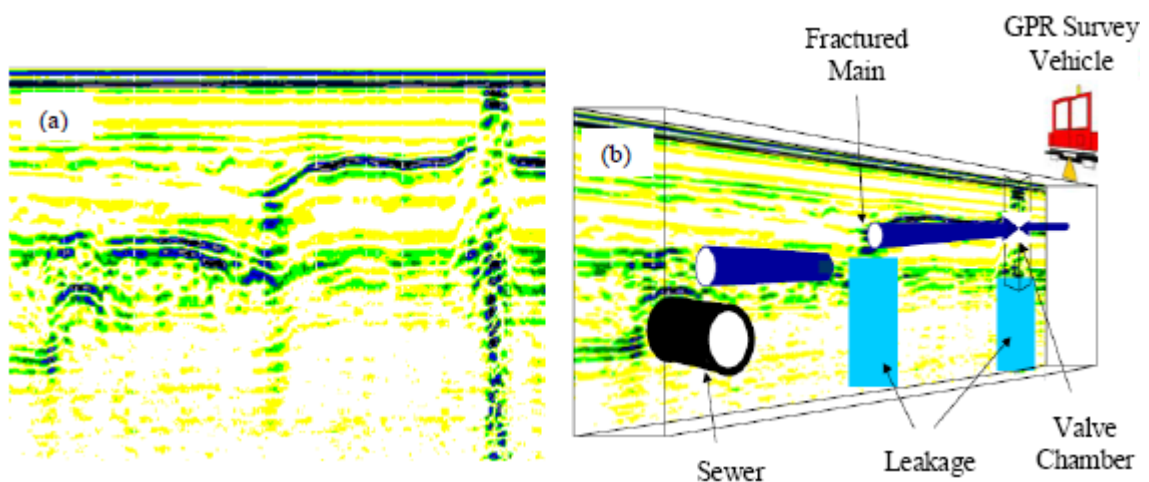


Fig. II. 9. Les données GPR avant (a) et après (b) l'interprétation de l'image.

II.4.3.4. Chute de Pression

Le contrôle d'étanchéité par la méthode de chute de pression est une méthode qui consiste à charger l'installation en gaz (azote ou fluide frigorigène) jusqu'à la pression maximale de service. Ensuite, la variation de pression est mesurée pendant une durée définie dépendant du volume de l'installation. La température doit être enregistrée, car la pression de l'installation varie avec la température alors que le but du contrôle est de mesurer d'éventuelles variations de pression dues à des fuites[17].

Cette méthode de détection de fuites est le plus souvent utilisée sur le terrain, lors de l'installation comme en fin de production et avant la charge en fluide frigorigène. Ce contrôle permet d'obtenir une connaissance de l'état global de l'étanchéité du système.



Fig. II. 10. Mesure de pression

II.5. Conclusion

Les fuites dans les réseaux de distribution d'eau potable représentent un problème réel. Dans ce chapitre, Nous avons fait un panorama des différentes techniques utilisées dans le domaine de détection des fuites. Ces méthodes sont divisées en deux catégories principales acoustique et non acoustique. Les techniques acoustiques ont été utilisés largement dans l'industrie de l'eau et peut donner des résultats efficaces surtout dans le cas des conduites métalliques. Dans les méthodes acoustiques, la technique la plus courante consiste à la corrélation afin de détecter et de localiser les fuites. Généralement, la technique utilisée des capteurs acoustiques qui sont basées sur la détection du bruit qui se produit par une fuite existante dans la conduite. Les fuites dans les conduites en métal et dans les tubes en plastique peuvent aussi être repérées à l'aide de techniques non acoustiques comme celles du gaz traceur, de l'imagerie infrarouge et du géo-radar. Cependant, l'utilisation de ces techniques est encore très limitée et leur efficacité n'est pas aussi bien établie que dans le cas des méthodes acoustiques. Les techniques utilisées dans notre étude sont basées autour de l'EMD et l'ondelette. Leur description fera l'objet du chapitre prochain.

Chapitre III

Méthodes d'analyse de signal EMD et Ondelette

III.1. Introduction

Ce chapitre présente les méthodes de traitement du signal les plus utilisées dans la détection des fuites sur les conduites de distribution d'eau tels que les méthodes statistiques, la moyenne synchrone, le signal résiduel et l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier. Il est également consacré à introduire les bases théoriques des méthodes d'analyse temps-fréquence les plus connues telles que : La transformée de Fourier à fenêtre glissante (Short Fourier transformation STFT), la version discrète est obtenue en échantillonnant la version continue. La transformée en ondelettes (TO) et ses versions continues et discrètes sont expliquées par des algorithmes de décomposition et d'analyse.

La transformation de Hilbert-Huang (THH) qui est la version continue de la décomposition en modes empiriques (EMD). Contrairement à la représentation temps – fréquence (RTF) ou aux ondelettes, la base de décomposition de l'EMD est intrinsèque au signal. L'extraction des composantes oscillantes appelées modes empiriques (IMF pour Intrinsic Mode Functions).

III.2. Définition

III.2.1. Système linéaire et non-linéaire

Un système linéaire est un système pour lequel à une combinaison linéaire appliquée à son entrée fait correspondre la même combinaison linéaire à sa sortie. Un système non-linéaire est un système pour lequel le principe de superposition précédent ne s'applique pas.

III.2.2. Signal stationnaire et non-stationnaire

Un signal est dit stationnaire si ses composantes de fréquences ne changent pas avec le temps. Par contre, un signal non stationnaire est celui dont les composantes de fréquences changent avec le temps (le contenu de fréquences change d'un intervalle à un autre). Il existe en pratique quelques phénomènes physiques qui ne vérifient l'hypothèse de stationnarité et par conséquent l'analyse de Fourier devient inefficace [18-19].

III.3. Méthodes d'analyse des signaux non stationnaires

III.3.1. Analyse temps-fréquence, temps-échelle, fréquence instantanée

L'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier permet une bonne description des signaux stationnaires et pseudo - stationnaires. Malheureusement, cette analyse de Fourier de nombreuses limitations quand les signaux à analyser sont non stationnaires. Par conséquent, de nombreux outils ont été développés pour analyser de tels signaux.

III.4. Transformée de Fourier

La plus célèbre et la plus ancienne des transformations est la TF. Lors de cette transformation, le signal est décomposé sur un ensemble de fonctions de base qui sont le cosinus, le sinus ou l'exponentielle imaginaire [20,21].

La transformée de Fourier d'un signal $s(t)$ est définie par :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.1})$$

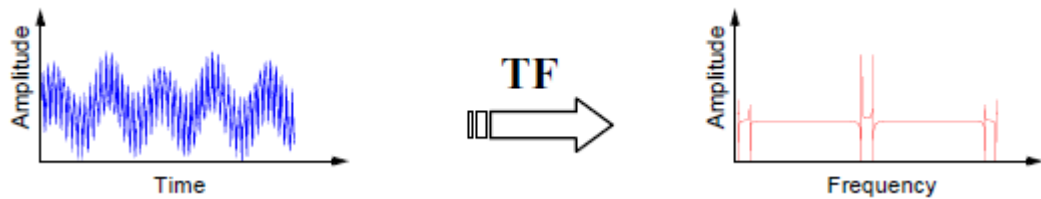


Fig. III.1. La transformée de Fourier

III.4.1. Inconvénient de l'analyse de Fourier

Malgré son immense succès, cette technique présente deux inconvénients majeurs :

- Manque de localisation temporelle. En effet, l'analyse de Fourier permet de connaître les différentes fréquences existant dans un signal, c'est à dire son spectre, mais ne permet pas de savoir à quels instants ces fréquences ont été émises. Cette analyse donne une information globale et non locale, car les fonctions d'analyse utilisées sont des sinusoides qui oscillent indéfiniment sans s'amortir. Cette perte de localité n'est pas un inconvénient pour analyser des signaux stationnaires, mais le devient pour des signaux non stationnaires.
- La TF n'est pas l'outil adapté à l'étude de signaux dont la fréquence varie dans le temps. De tels signaux nécessitent la mise en place d'une analyse temps-fréquence qui permettra une localisation des périodicités dans le temps et indiquera donc si la période varie d'une façon continue.

III.4.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante

Il s'agit de la TF à fenêtre glissante (Short Time Fourier Transform, STFT). Cette méthode, pouvant être adaptée aux signaux non-stationnaires, est très proche de l'analyse spectrale. On définit une fenêtre qui sera utilisée comme masque sur le signal et dans laquelle on considère le signal comme localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin de l'analyser entièrement [20,21]. La STFT est exprimée par :

$$X_{s,f}(s, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g^*(t - s)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.2})$$

$x(t)$ est le signal lui-même, $g(t)$ est la fonction fenêtre et g^* son complexe conjugué, et f joue le rôle d'une fréquence localisée autour de l'abscisse s du signal temporel.

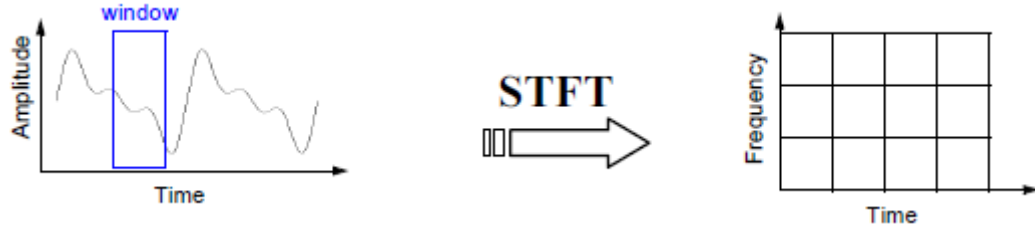


Fig. III.2. La transformée de Fourier à fenêtre glissante

D'après (Figure III.2), on calcule un nouveau coefficient de la STFT pour chaque valeur de f et de s . On constate que la fenêtre g est indépendante de l'abscisse s ce qui signifie que l'enveloppe de la fenêtre glissante sera constante: on aura donc une résolution fixe sur toute la durée du signal.

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, 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 la récente analyse en ondelettes.

III.5. L'Analyse en Ondelette

L'analyse en ondelette représente la prochaine étape logique: une technique de fenêtrage avec des régions de taille variable. L'analyse par ondelettes permet l'utilisation de longs intervalles de temps où nous voulons plus précis des informations de basse fréquence, et des régions plus courtes où nous voulons des informations de haute fréquence[22].

Voici à quoi cela ressemble en contraste avec les basés sur le temps, sur la base des vues fréquence et STFT d'un signal:

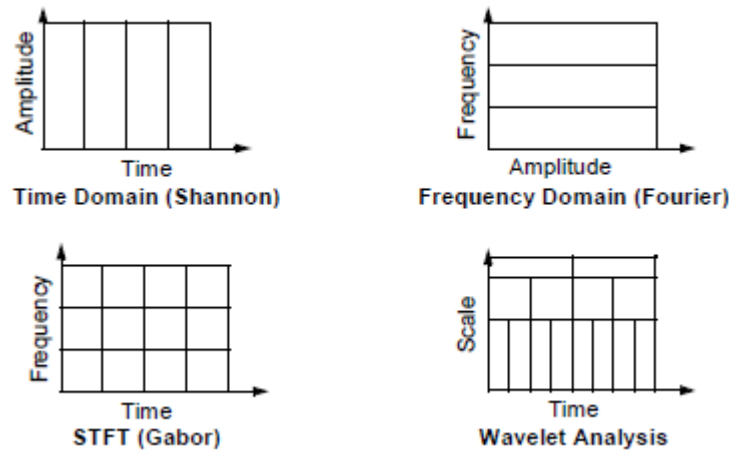


Fig. III.3. Représentation d'analyse par ondelette

Une ondelette est une forme d'onde qui a une valeur moyenne nulle et une durée limitée. En regardant des images des ondelettes et des ondes sinusoïdales (Figure III.4), on voit intuitivement que des signaux avec les changements pointus pourraient être mieux analysés avec une ondelette irrégulière qu'avec une sinusoïde douce [23].



Fig. III.4. La différence entre une onde sinusoïdale et une ondelette

La transformée en ondelette (TO) (Wavelet Transform, WT) est un outil mathématique qui décompose un signal en fréquences en conservant une localisation temporelle. Le signal de départ est projeté sur un ensemble de fonctions de base qui varient en fréquence et en temps. Ces fonctions de base s'adaptent aux fréquences du signal à analyser.

III.5.1. Les aspects théoriques de la transformée en ondelette mère

L'analyse en ondelette adopte une fonction prototype d'ondelettes connue sous le nom d'ondelette mère. On aboutira à représenter n'importe quel signal de $L^2(\mathbb{R})$ par une base d'ondelettes qui ne sont que des versions dilatées et translatées de l'ondelette mère. La représentation d'un signal continu $x(t)$ par une base d'ondelettes est donnée par :

$$x(t) = \sum C(a, b) \psi_{ab}(t) \quad (\text{III.3})$$

Où : $C(a, b)$ est le poids de la contribution de l'ondelette ψ_{ab} liée à l'ondelette mère par :

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ Avec } a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (\text{III.4})$$

Où

a : facteur d'échelle pour la dilatation ψ

b : le coefficient de translation.

ψ : Ondelette mère. $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$: Facteur de normalisation.

La TO a la capacité de changer la taille de la fenêtre à différentes résolutions de temps fréquence. Grâce au changement d'échelle (Fig. III.5), les fonctions de base d'ondelette peuvent être étirées ou comprimées dans la fenêtre d'analyse. Ceci aide à isoler des discontinuités du signal parce que de courtes fonctions de base sont employées pour obtenir l'information détaillée de fréquence tandis que de longues fonctions de base sont employées pour rechercher l'information approximative de fréquence du signal.

La translation est l'opération de glissement de l'ondelette tout au long du signal. C'est la technique similaire à celle de la STFT de GABOR.

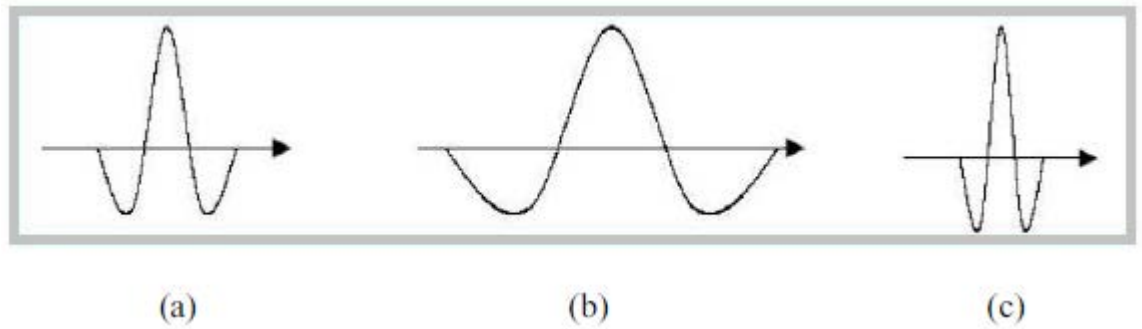


Fig. III.5. Illustration de la variation du facteur d'échelle

(a) L'ondelette mère. (b) L'ondelette pour $0 < a < 1$. (c) L'ondelette pour $a > 1$.

III.5.2. Propriétés des Ondelettes

La transformée en ondelettes a les propriétés suivantes [24] :

➤ **Linéarité :**

La transformée en ondelettes est linéaire, c'est-à-dire :

$$C_{\alpha s_1 + \beta s_2}(a, b) = \alpha C_{s_1}(a, b) + \beta C_{s_2}(a, b) \quad \alpha, \beta \in \mathbb{R} \quad (\text{III.5})$$

➤ **Translation :**

Une des propriétés importante de la transformée en ondelettes est l'invariance en translation :

$$C_{\tau_{b_0} s}(a, b) = C_s(a, b - b_0) \quad (\text{III.6})$$

Où $\tau_{b_0} s$ désigne la translation de s par le vecteur b_0 , c'est-à-dire $(\tau_{b_0} s)(t) = s(t - b_0)$

➤ **Dilatation :**

La transformée en ondelettes a également une propriété de dilatation :

$$C_{\delta_k s}(a, b) = C_s(ka, kb), \text{ avec } \delta_k s(t) = s(kt) \quad (\text{III.7})$$

III.5.3. Transformée en ondelette continue (TOC)

La transformée en ondelette continue (TOC) utilise des translations et des dilatations de la fonction ondelette mère durant tout l'intervalle temporel de manière continue [23,25,26]. Elle est définie par :

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dx \quad (\text{III.8})$$

$C(a,b)$: qu'il conviendrait d'appeler également analyse temps-échelle.

'b': est un paramètre de translation, 'a': représente l'échelle de cette transformée.

Ainsi donc, la pondération $C(a,b)$, appelée aussi coefficients en ondelette et définie par (III.3), n'est autre que la transformée en ondelette de la fonction $x(t)$. Cette transformation est en théorie infiniment redondante puisque l'ondelette est traduite de manière continue.

Si l'ondelette ψ satisfait la condition d'admissibilité [26,27] :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(w)|^2}{w} dw < +\infty \quad (\text{III.9})$$

Donc on peut dire que l'ondelette mère est une fonction moyenne nulle

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (\text{III.10})$$

En accord avec l'équation CWT, le signal est multiplié par une ondelette, puis intégré dans le temps; mathématiquement, cette opération est appelée convolution. De plus, tel que rapporté par Daubechies [28] les différents types ondelettes disponibles tels que chapeau mexicain, vague gaussien, Haar et Morlet.

L'avantage de la transformée en ondelette par rapport à la transformée de Fourier est qu'elle ne donne pas seulement une information sur le type de singularité mais aussi sa localisation dans le temps [29].

III.5.4. Transformée en ondelettes discrète (DWT)

Comme mentionné précédemment, dans le CWT, l'échelle et les facteurs déplacés varient de façon continue sur tous les domaines de fréquence temporelle du signal analysé. Par conséquent, cela rend très CWT redondant et sa mise en œuvre peut consommer des quantités

importantes de temps et de ressources [30]. Afin de remédier à cette lacune et à accélérer la transformation en ondelettes la transformée en ondelettes discrète (DWT) a été introduit.

La principale différence réside dans une analyse en ondelettes discrète est que le paramètre d'échelle (a) et le paramètre de traduction (b) dans l'équation (III.8) ne sont plus continus, mais au contraire sont des entiers. Elle est appelée l'ondelette discrète parce que les fonctions ondelettes utilisées dans DWT ne peuvent être redimensionnées et traduits par étapes discrètes. Les paramètres a et b peuvent être échantillonnées en utilisant une puissance de deux discrétisation logarithmique dans lequel le paramètre d'échelle d'une discrétisation sur une base logarithmique et le paramètre de traduction b est alors lié au paramètre d'échelle. En conséquence, a et b sont réécrites en tant que:

$$a = 2^m, b = n \times 2^m$$

Cette puissance de deux échelles logarithmiques est la discrétisation la plus simple et la plus efficace Procédé pour des applications pratiques et l'on sait que l'échantillonnage dyadique sur une grille. Finalement, la transformée en ondelettes discrète d'un signal $X(t)$ en temps continu est obtenue comme suit:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi(2^{-m}t - n) dt \quad (\text{III.11})$$

Relatif à l'analyse multi-résolution, le DWT agit comme un filtre dyadique et le signal peut être décomposé en une structure arborescente avec des détails ondelettes et approximation ondelettes à divers processus niveaux. La décomposition est itérée avec des composants d'approximation successifs étant décomposés à son tour, tandis que les détails sont enregistrées chaque temps. Généralement, rapprochement des soi $x_m(t)$, à l'arbitraire indice d'échelle m_0 et une sommation des ondelettes coefficients de détail $d_m(t)$ de l'indice de l'échelle m_0 vers le bas à $-\infty$ sont les suivantes:

$$x(t) = x_m(t) + \sum_{m=-\infty}^{m_0} d_m(t) \quad (\text{III.12})$$

III.5.5. Avantage de l'analyse par Ondelettes

Le fait que la transformée utilise des fonctions bien localisées dans le plan Temps-Fréquence lui donne beaucoup d'avantages :

- La Résolution en fréquence de la transformée dépend du facteur de dilatation a par le principe d'Heisenberg, on peut donc choisir arbitrairement celle-ci suivant ce que l'on désire analyser.

- Pour les signaux physiques présentant des variations très rapides, des sauts, des marches, bref des discontinuités ; l'analyse en Ondelettes est adaptée car l'Ondelette va détecter ces variations et analyser celle-ci cette particularité rend l'analyse en Ondelettes complémentaire à l'analyse de Fourier. En effet, avec l'analyse de Fourier, les discontinuités d'un signal ne sont pas facilement analysables, car les coefficients des fréquences correspondances sont étalés dans toute la transformée.
- La localisation en temps est précieuse pour nombre d'application.
- La transformée en Ondelette peut représenter complètement et efficacement un signal quelconque en peu de coefficients.

III.6. La transformée de Hilbert Huang

La transformée de Hilbert Huang est une méthode d'analyse temps-fréquence introduite pour la première fois en 1998 par Huang et al [Huang1998]. Cette méthode consiste à décomposer de façon adaptative un signal en une somme de composantes oscillantes qui possède une seule fréquence à chaque échantillon. Elle calcule ensuite la fréquence et l'amplitude instantanée de chacune de ces composantes en utilisant la transformée de Hilbert. La décomposition du signal en composantes monomodales est appelée la décomposition en mode empirique (EMD), acronyme d'Empirical Mode Decomposition [31].

La transformée de Hilbert d'un signal s est définie par :

$$H\{s\} = y(t) = \frac{1}{\pi} VP \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau \right) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{|t-\tau| > \epsilon} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (\text{III. 13})$$

VP désignant la valeur principale au sens de Cauchy. On peut aussi voir la transformée de Hilbert comme la convolution par le noyau $h(t) = \frac{1}{\pi t}$.

III.7. Décomposition modale empirique (EMD)

L'EMD décompose d'une façon adaptative un signal en une somme de composantes oscillantes par l'utilisation d'un processus de tamisage. Chaque composante est une forme d'onde de moyenne nulle, modulée en amplitude et en fréquence nommée IMFs (Intrinsic Mode Function) traduite par la fonction modale intrinsèque (Sifting Process) (Fig.III.7). Contrairement aux représentations temps-fréquence précédentes, la décomposition EMD est locale, itérative et entièrement pilotée par les données (Data driven approach) intrinsèque au signal. L'extraction des IMFs est non linéaire, mais leur recombinaison pour la reconstruction exacte du signal est linéaire. L'EMD a montré ses capacités comme outil d'analyse adaptative multi-échelles des signaux non-stationnaires [32].

III.7.1. Principe de la décomposition

Le signal $x(t)$ peut alors s'écrire :

$$x(t) = \sum_{j=1}^N IMF_j(t) + r(t) \quad (\text{III.14})$$

Où $IMF_j(t)$ est la j ème oscillation, $r(t)$ est le résidu de la décomposition et N est le nombre d'IMFs. Même si la notion d'IMFs repose plus sur une intuition que sur une définition très rigoureuse, cette fonction doit respecter certains critères comme précisé ci-dessous. Une IMF (ou mode empirique) est une fonction telle que :

$$IMF: \begin{cases} R \rightarrow R \\ t \rightarrow IMF_j(t) \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Qui vérifie les conditions suivantes :

- a) De moyenne nulle.
- b) Les nombres d'extrema et de passages à zéro diffèrent au plus de un (en d'autres termes, cela signifie qu'entre un minimum et un maximum successifs, une IMF passe par zéro). Cette condition est nécessaire pour que la fréquence instantanée n'ait pas de fluctuations indésirables dues à l'asymétrie du signal. Les deux conditions précédentes assurent l'unicité du mode oscillatoire de l'IMF à chaque instant.
- c) Une IMF suit une loi de modulation en amplitude et en fréquence (comportement oscillant) naturellement de type mono-composante.

III.7.2. Tamisage (Sifting Process)

Pour calculer les IMFs d'un signal nous suivons l'algorithme suivant :

Le premier pas de la décomposition consiste à identifier les maxima et minima locaux du signal, ceux-ci sont symbolisés par des points sur la figure (Fig. III.6).

Les enveloppes supérieures et inférieures sont calculées par interpolation. L'interpolation utilisée dans ce travail est basée sur les splines cubiques.

L'enveloppe moyenne locale $m(t)$ est déterminée à partir des enveloppes supérieure et inférieure.

L'enveloppe moyenne est soustraite du signal d'entrée $h(t) = x(t) - m(t)$.

Ce processus correspond alors à la première itération du tamisage.

La première IMF contient la composante haute fréquence du signal.

Un critère d'arrêt doit être défini pour assurer que le signal obtenu vérifie bien les propriétés d'une fonction modale intrinsèque tout en limitant le nombre d'itérations. Le critère proposé

par Huang est basé sur le calcul de la variation relative du signal entre 2 itérations consécutives de l'algorithme [33].

$$SD = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{l(k-1)}(t) - h_{lk}(t)|^2}{h_{l(k-1)}^2(t)} \quad (\text{III. 16})$$

Cependant, ce critère ne tient pas compte des pics de grande amplitude et de courte durée dans le signal. Pour éviter ce genre de problèmes, Rilling et al. [3] ont proposé un autre critère qui consiste à calculer l'enveloppe moyenne normalisée :

$$m_{\text{norm}}(n) = 2 \frac{|m(n)|}{|\text{Envmax}(n) - \text{Envmin}(n)|} \quad (\text{III. 17})$$

Les itérations sont arrêtées quand l'une de ces deux conditions est remplie :

- ♦ Le pourcentage de points de l'enveloppe moyenne normalisée supérieur à une valeur stop1 qui est supérieure à une valeur tol1.
- ♦ Aucun point de l'enveloppe moyenne normalisée n'est supérieur à stop2.

Si $h(t)$ est une IMF, le résidu est $r(t) = x(t) - h(t)$, alors il faut vérifier si le résidu a un nombre suffisant d'extrema (supérieur à deux). Si cette condition est vérifiée, alors le nouveau signal sera $x(t) = r(t)$, Si $h(t)$ n'est pas une IMF le nouveau signal sera $x(t) = h(t)$.

Le processus d'extraction des IMF est terminé lorsque le résidu ne contient plus d'extrema.

Cela signifie que le résidu est une fonction monotone qui correspond à la dérivé où tendance du signal initial $h(t)$.

L'organigramme de l'algorithme de l'EMD est illustré dans la figure (Fig.III.7). Cet algorithme comporte deux boucles imbriquées. La boucle principale qui correspond au concept même. Elle s'arrête lorsqu'il n'est plus possible d'extraire de résidu. Cela permet de définir le niveau N de profondeur de la décomposition. D'après la deuxième condition de la définition de l'IMF, les deux enveloppes EnvMin et EnvMax doivent être symétriques par rapport à zéro. D'où la nécessité d'ajouter une boucle supplémentaire qui correspond à une opération appelée processus de tamisage (ou sifting). L'arrêt de cette boucle est lié à un critère qu'il convient de définir précisément.

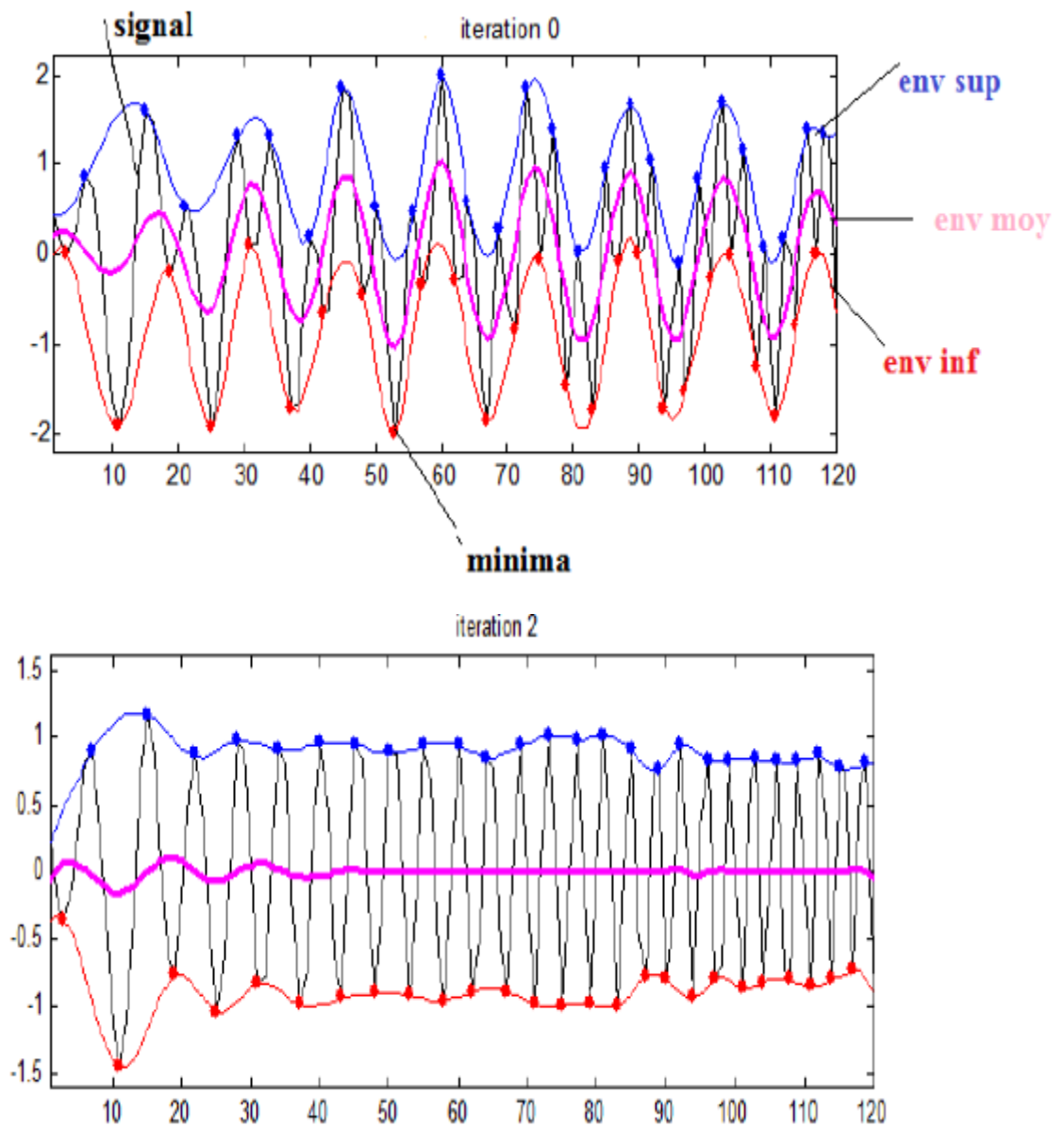


Fig. III.6. Processus de tamisage pour l'extraction de la première IMF.

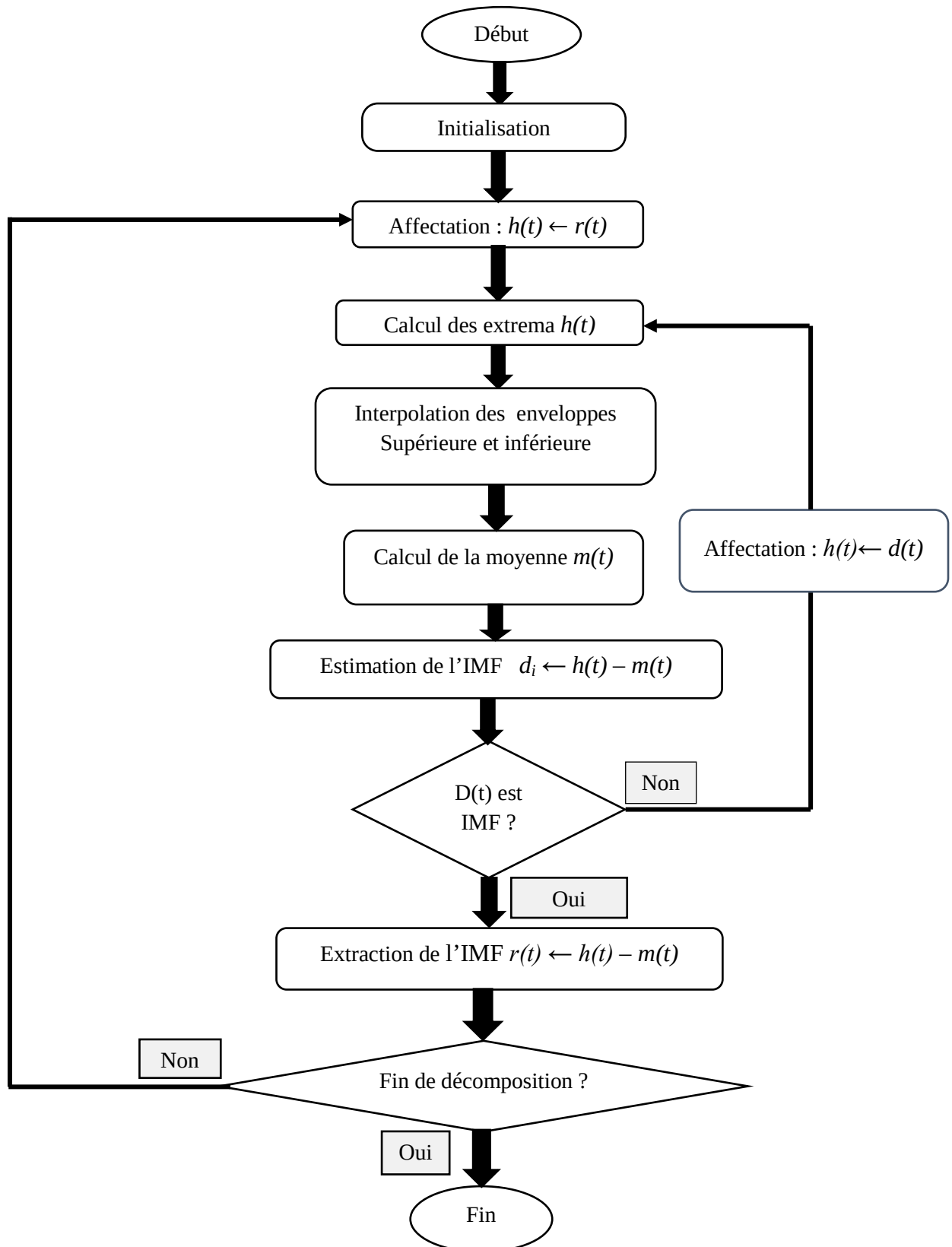


Fig. III.7. L'algorithme de la méthode EMD

III.8. Comparaison de l'EMD avec l'ondelette

Le cadre général de l'EMD qui vient d'être présenté n'est pas le cadre de la transformée en ondelettes discrète. Cette dernière est en fait également réalisée en pratique de manière récursive : le signal est d'abord décomposé en détail et approximation, correspondant respectivement à une partie haute fréquence et une partie basse fréquence, puis la même décomposition est appliquée à la partie approximation. La différence entre transformée en ondelettes discrète et l'EMD se trouve en fait dans la manière dont est calculée la décomposition élémentaire en détail plus approximation ou oscillations rapides plus oscillations lentes. Pour la transformée en ondelettes discrète, les deux composantes sont calculées par une opération prédéfinie de filtrage linéaire invariante dans le temps dont la réponse en fréquence est simplement contractée d'un facteur 2 lorsque la décomposition est ensuite appliquée à la partie approximation. Les caractéristiques de la décomposition pour l'EMD sont à l'inverse déterminées par le signal et de manière locale. De plus, la transformée en ondelettes discrète est fondée sur une base mathématique bien établie alors que l'EMD n'est définie que par la sortie d'un algorithme [35]. La notion d'échelle dans l'EMD est associée à l'espacement entre les extrema. Cette notion diffère fortement de la notion d'échelle dans le cadre de la transformée en ondelettes où l'échelle est définie de manière relative par comparaison avec une forme d'onde donnée, à savoir l'ondelette.

III.8.1. Comparaison EMD avec autres méthodes

Le tableau (II.2) résume les propriétés de l'EMD par rapport les autres méthodes [22].

Tableau. III.1. Comparaison EMD avec autres méthodes

	Fourier	STFT	Wavelet	HHT (EMD)
Basis	Non-adaptive	Non-adaptive	Non-adaptive	adaptive
Fréquence	Convolution: Global	Convolution: Régionale	Convolution: Régionale	Différentiation: Locale
Présentation	Energie - fréquence	Energie –temps -fréquence	Energie –temps - fréquence	Energie –temps -fréquence
Non-linéaire	Non	Non	Non	Oui
Non stationnaire	Non	Non	Oui	Oui
Feature Extraction	Non	Discrète: Non Continue: Oui	Discrète: Non Continue: Oui	Oui

III.9. Conclusion

Les principales méthodes utilisées dans l'analyse des signaux vibratoires ont fait l'objet de ce chapitre. Ces méthodes peuvent être classées en trois catégories : les méthodes de prétraitement, les méthodes de traitement et les méthodes de décision. L'accent a été mis sur les méthodes de traitement tout en donnant un aperçu sur quelques méthodes de prétraitement et de décision qui ont été utilisées dans ce travail. L'outil usuel du traitement est la transformée de Fourier. Elle est très bien adaptée à l'étude des signaux stationnaires. Par contre, elle a montré ses limites dans l'étude des signaux non-stationnaires. L'analyse temps-fréquence d'un signal a permis de combler les lacunes de la transformée de Fourier.

Parmi les méthodes temps-fréquences les plus utilisées dans l'analyse des signaux vibratoires on trouve la Transformée de Fourier à Court Terme, la Transformée en ondelettes et la décomposition en modes empiriques. Chacune de ces méthodes a été illustrée par un exemple qui montre ses avantages et ses limitations. Il n'existe pas à priori une méthode d'analyse universelle adaptée à tous les signaux. L'analyse des signaux impose un choix judicieux de la méthode de prétraitement, la méthode de traitement et la méthode de décision. Les résultats des deux méthodes utilisées vont être analysés dans le prochain chapitre.

Chapitre IV

Description du système utilisé et
analyse des résultats

IV.1. Introduction

L'EMD est une nouvelle technique développée par Huang et al. Au début elle a été appliquée sur les signaux sonars. Vue ses performances elle a trouvée une vaste application dans les autres domaines. Dans le cadre de notre travail On a voulu exploité cette technique dans le domaine de la détection des fuites dans les réseaux de distribution d'eau. Afin de voir la robustesse de cette technique, une comparaison va être faite avec une autre méthode. On a opté pour l'ondelette car elle a montrée une forte adhésion avec les signaux non stationnaires et non linéaires.

Nous avons conçu et réalisé au niveau du laboratoire un prototype composé de deux parties. Une partie hydraulique pour faire circuler l'eau avec une pression bien définie et une partie électronique pour l'acquisition des données. On a percé la conduite par une mèche pour simuler la fuite. La chaine permettant l'acquisition des signaux de fuite provenant des deux capteurs d'ondes acoustiques travaille autour d'une carte numérique **STM32 F4** associée à un ordinateur. Les signaux qui sont enregistrés dans des fichiers Excel seront par la suite traités et injectés dans des programmes élaboré sous Matlab. Des traitements avec différents programmes telle que EMD et ondelette élaborés sous Matlab vont être appliquée sur les signaux de fuite recueillis pour des différentes distances. Les résultats obtenus des deux techniques seront comparés pour voir l'apport de l'EMD dans le domaine de détection des fuites. La localisation de la position exacte de la fuite est déterminée par l'autocorrélation des deux signaux.

IV.2. Système d'acquisition

IV.2.1. La chaîne d'acquisition

La chaîne de mesure est le maillon indispensable de l'analyse de bruit de fuite, pour l'acquisition des signaux à étudier. Le capteur a pour rôle de transformer les ondes acoustiques générées par la fuite en signaux électriques. Une pré amplification suivie d'un filtrage est indispensable pour la mise à niveau des signaux acquis. La figure (IV.1) représente la chaîne d'acquisition utilisée.

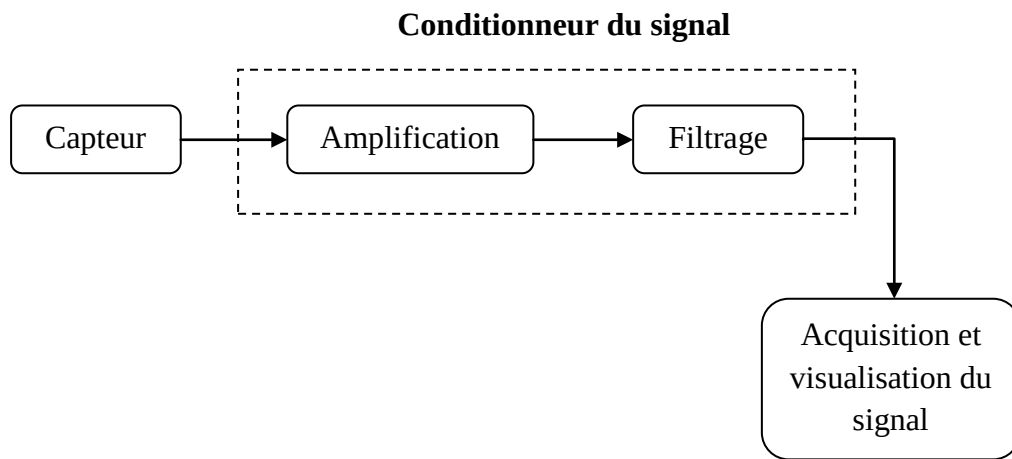


Fig. IV. 1. Acquisition et visualisation du signal

L'élément clé de toute chaîne de mesure est le capteur. Pour avoir des bonnes acquisitions les capteurs doivent être de bonne qualité.

IV.2.2. Capteur acoustique (microphone)

Les capteurs acoustiques sont des transducteurs qui transforment les ondes sonores reçues sous forme vibratoire en ondes électriques exploitable pour un éventuel traitement.

Dans notre étude nous avons utilisé un microphone spécialement conçu pour la recherche adapté pour des acquisitions des signaux acoustiques. Il nous permis par exemple, de tracer en forme de point les signaux des champs sonores. Ce derniers est doté de trois modes de fonctionnement dont la sortie est sélectionnable à l'aide d'un bouton rotacteur (~ Signal, Niveau, Trigger). La figure IV.2 montre le microphone utilisé pour l'acquisition des signaux de fuite étudiés.

Ces détecteurs sont beaucoup plus sensibles que les détecteurs mécaniques et l'amplification importante du signal capté permet des recherches et des localisations plus précises par écoute directe.



Fig. IV.2. Microphone utilisé

IV.2.2. 1. Caractéristiques du microphone de mesure utilisé

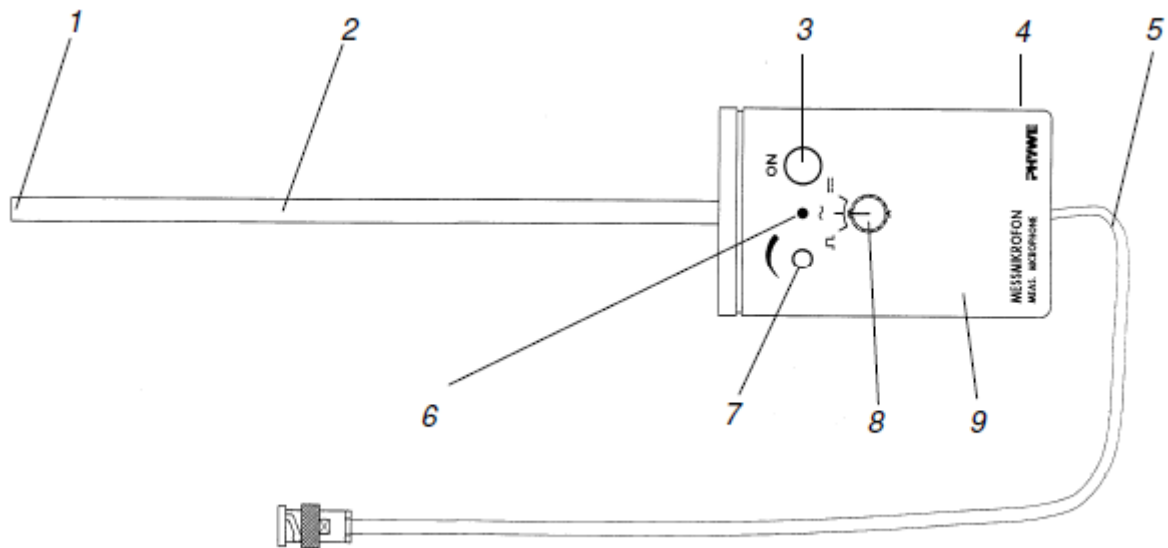


Fig. IV.3. Measuring microphone

➤ Description :

- 1- **Entrée acoustique avec micro capsule.**
- 2- **Tube de la sonde :** Ø 8 mm, 25 cm de long, peut être serré dans une douille.
- 3- **Switch-on bouton :** Une brève pression sur le bouton commutateur de amplificateur intégré est indispensable chaque une environ 1,5 heure. Chaque fois que le bouton est enfoncé, même pendant le fonctionnement, le temps est rafraîchi et il va être prolongé de nouveau à environ 1,5 heure. Après l'écoulement du temps, la coupure se fait automatiquement.
- 4- **Compartiment de la batterie :** Une batterie de type bloc 9 V (IEC 6F22), avec couvercle en plastique. La polarité lors de l'insertion de la batterie doit être vérifiée.

- 5- **Sortie:** Câble coaxial, 2 m de long, avec un connecteur BNC.
- 6- **Signal diode :** Indique par un clignotement (environ toutes les 4 secondes) que le microphone de mesure est en fonctionnement.
- 7- **Paramètre Gain :** Réglable en continu de 50 à 5000, affecte l'amplitude du signal, le niveau d'amplification est lié avec la rotation du potentiomètre.
- 8- **Sélecteur pour mode de sortie :** Signal ~, Niveau, Trigger
 - **Signal ~ :** Le signal reçu par la capsule de microphone est amplifié et amené à la sortie (5) qui peut être raccordé, par exemple, avec un oscilloscope, voltmètre et post-amplificateur.
 - **Niveau:** Le signal de mesure est amplifié, redressé, lissé et il sera tronqué de son offset à la sortie.
 - **Trigger (Signaux TTL rectangulaires) :** Les signaux obtenus à la sortie (5), lors de l'utilisation de ce mode vont être contrôlés par un signal enregistré et peuvent être utilisés pour la mesure des temps et des fréquences. Par exemple, ils peuvent être raccordés à une électronique numérique (compteur), 6 décades, Compteur universel ou un système d'interfaçage.

➤ **Spécifications techniques**

(Typique pour 25 ° C)

- **Plage de température de fonctionnement:** 5 - 40 °C
- **Humidité relative** <80%
- **Convertisseur:** Une capsule électret à la pointe de la sonde
- **Gamme de fréquences:** 125 ... 16 kHz, avec ± 3 dB pour la gamme allant de 15 Hz à 125 Hz et avec une réduction de sensibilité pour la gamme de 16 kHz ... 40 kHz.
- **Sensibilité de la capsule du microphone:** 6,0 mV / Pa à 1 kHz, ± 4 dB
- **Gain:** env. 50 ... 5000, en phase avec le signal sonore
- **Direction :** sphérique.

- **Signal de sortie :**
 - **La capacité de modulation:** 6 V_{SS} lorsqu'il est connecté à des appareils avec une résistance de charge $R_L \geq 10 \text{ k}\Omega$
 - **Impédance de sortie:** 50 Ω
- **Niveau de sortie:**
 - **Amplitude de sortie:** env. 3 V max.
 - **Impédance de sortie:** 50 Ω
- **Sortie Trigger**
 - **Amplitude:** Niveau TTL
 - **Impédance de sortie:** 50 Ω
- **Alimentation:** Pile 9 V
- **Consommation courante :** Approximativement 2 mA. coupure batterie après env. 1,5 heures
- **Dimensions du boîtier :** 72 mm x 114 mm x 34 mm (L, H, D)
- **Poids :** 0,3 kg

IV.2.3. Amplificateur basse fréquence (LF AMPLIFIER)

Les signaux acoustiques recueillis par les capteurs sont généralement de faibles amplitudes et sont immergés dans le bruit. Pour cela un étage d'amplification et de filtrage est indispensable. Ajouté à cela les amplificateurs électroniques sont tributaires d'un bruit de fond.



Fig. IV.4. Amplificateur basse fréquence

Éléments fonctionnels et opérationnels

- 1-Entrée de tension alternative
- 2-Entrée de tension continue
- 3- Sortie de puissance
- 4- Sortie de mesure
- 5- Bouton de réglage d'amplification
- 6- LED de présence de tension
- 7- Touche de sélection de mode "Modes de fonctionnement DC-AC"
- 8- Bouton rotacteur pour changement de calibre d'amplification

IV.2.4. Etage de conditionnement du signal

Les signaux électriques issus de capteurs sont généralement de faible niveau. Si l'on souhaite travailler avec une bonne précision, il est nécessaire de les amplifier. Mais cette amplification ne doit concerner que le signal utile. Or ce dernier côtoie bien souvent une tension parasite (souvent du même ordre de grandeur que le signal utile.). Il faut donc faire une amplification sélective qui élimine ou atténue fortement tout signal ne contenant pas d'information pour ne garder que le signal capteur. Parmi les meilleurs circuits utilisés pour cette tâche est l'amplificateur d'instrumentation. Son inconvénient est qu'il est coûteux donc on a opté pour un montage similaire Fig. IV.5. Le montage adaptation est fait de telle sorte qu'il délivre une tension comprise entre $0 \leq V_{ch1, ch2} \leq 3V$ pour les deux signaux délivrés par l'amplificateur basse fréquence. Ces deux signaux vont attaquer directement les entrées port D8 et D9 de la carte STM32F4.

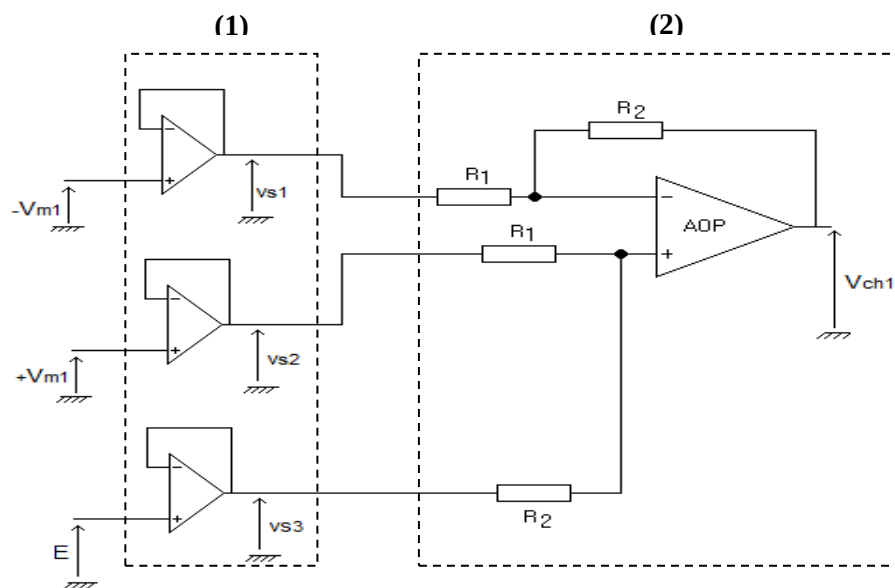


Fig. IV.5. Montage de conditionnement des signaux

- **L'étage (1)** est un montage composé de trois amplificateurs opérationnels montés en suiveurs, ils sont destinés pour l'adaptation d'impédance entre les deux étages, Ils se présentent de la manière suivante :

- Pour un amplificateur opérationnel OP idéal :

$$\begin{cases} V^+ = V^- \\ i^+ = i^- = 0 \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$\begin{cases} V_{S1} = -V_{m1} \\ V_{S2} = +V_{m1} \\ V_{S3} = E \end{cases} \quad (IV.2)$$

- **L'étage (2)** est un montage soustracteur des signaux appliqués aux deux entrées. $-V_{m1}$ et $+V_{m1}$ en plus, on a ajouté une composante continu (E) pour avoir un signal purement positif pour qu'il soit utilisable par la carte STM32F4 qui n'accepte que des tensions comprises entre 0 et 3V. alors:

$$V^- = \frac{\frac{E}{R_2} + \frac{V_{S2}}{R_1}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1}} \quad (IV.3)$$

$$V^+ = \frac{\frac{V_{S1}}{R_1} + \frac{V_{ch1}}{R_2}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1}} \quad (IV.4)$$

$$V^- = V^+$$

$$E.R_1 + V_{S2}.R_2 = V_{S1}.R_2 + V_{ch1}.R_1$$

$$V_{ch1} = \frac{E.R_1 + V_{S2}.R_2 - V_{S1}.R_2}{R_1}$$

$$V_{ch1} = \frac{R_2}{R_1} (V_{S2} - V_{S1}) + E \quad (IV.5)$$

- Après les calculs on a trouvé les valeurs numériques ci-dessous :

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega, R_1 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$G = \frac{R_2}{R_1} = 0,5$$

$$E = 1,5 \text{ V}$$

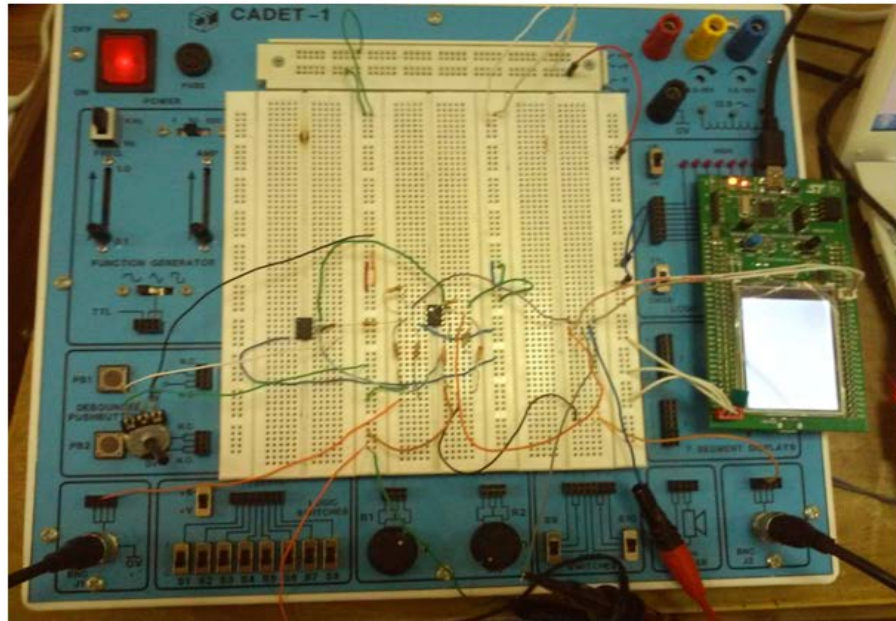


Fig. IV.6. Montage conditionneur expérimental.

IV.2.5. Carte d'acquisition (STM 32 F4)

Le kit STM32F4 DISCOVERY permet aux utilisateurs de développer facilement des applications avec une haute performance à partir des microcontrôleurs embarqués dans le module STM32F407 et ARM® Cortex®-M4 noyau 32 bits. Il conçu pour qu'il soit utilisés par les débutants ou par les utilisateurs expérimentés directement exploitable par l'outil Matlab. Le STM32F407VGT6, comprend un ST-LINK / V2 ou ST-LINK / V2- est un outil intégré de débogage, deux accéléromètres numériques ST MEMS, un microphone numérique, un DAC audio intégré de classe D avec un pilote d'un haut-parleur, des LEDs et des boutons-poussoirs et un connecteur USB pour un micro-AB OTG.



Fig. IV.7. La carte STM32 F4

IV.2.5.2. Caractéristiques principales

- Le microcontrôleur STM32F407VGT6 comporte une ARM Cortex® -M4 de 32 bits avec noyau FPU, 1Mo de mémoire Flash, 192 Ko de RAM dans un paquet LQFP100.
- À bord ST-LINK / V2 STM32F4DISCOVERY ou ST-LINK / V2-A sur STM32F407G-DISC1
- Sur la carte STM32F4DISCOVERY est implanté un ST-LINK/V2 ou un STM32F407G-DISC1 est implanté un ST-LINK/V2-A.
- ARM® mbed™ -permis (<http://mbed.org>) avec ST-LINK / V2-A seulement
- USB ST-LINK avec une capacité ré-énumération et trois interfaces différentes:
 - Port série virtuel (avec ST-LINK / V2-A uniquement)
 - Stockage de masse (avec ST-LINK / V2-A uniquement)
 - Port de débogage
- Alimentation par le bus USB ou à partir d'une tension d'alimentation de 5 V externe.
- puissance d'application externe: 3 V et 5 V.
- LIS302DL ou LIS3DSH ST MEMS accéléromètre de 3 axes.
- MP45DT02 ST MEMS capteur audio omnidirectionnel (microphone numérique).
- DAC audio CS43L22 avec pilote intégré de classe D pour haut-parleur.
- Huit LEDs :
 - LD1 (rouge / vert) pour la communication USB
 - LD2 (rouge) pour indication de la présence de la tension 3,3 V
 - Quatre LED pour utilisateur :
LD3 (orange), LD4 (vert), LD5 (rouge) et LD6 (bleu)
 - 2 USB OTG LED LD7 (vert) VBUS et LD8 (rouge) de surintensité
- Deux boutons-poussoirs (l'un pour la mise en marche et l'autre pour la réinitialisation)
- USB OTG FS avec micro-AB connecteur
- logiciel libre complète, y compris une variété d'exemples.

IV.3. Circuit hydraulique

Le circuit hydraulique réalisé à cet effet au niveau du laboratoire est composé des éléments indiqués par la figure (IV.8)

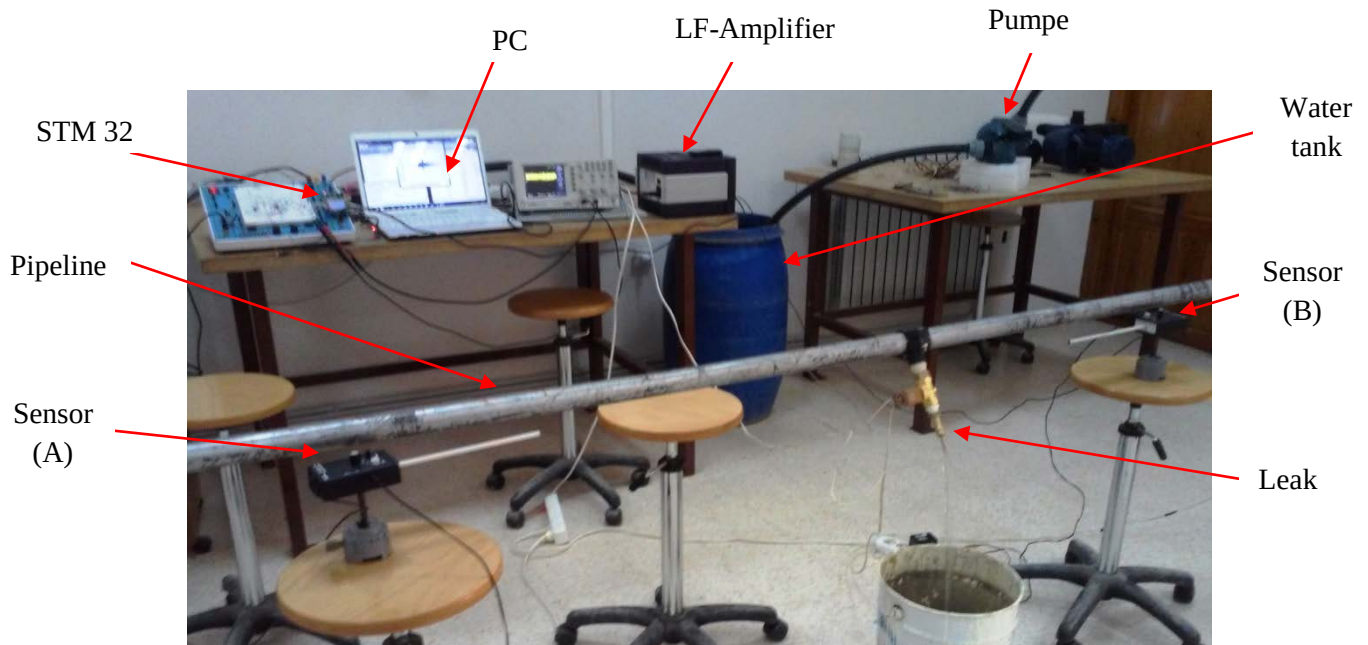


Fig. IV.8. Circuit hydraulique

Réservoir: Un réservoir en plastique de 150 litres.

Pompe: Une pompe d'eau de la marque (CALPEDA), ayant les caractéristiques suivantes :

- 1- Débit : $Q_{\min/\max} = 0,4/2,3 \text{ m}^3/\text{h}$
- 2- Puissance : 0,33 kw
- 3- Vitesse de rotation : 2900 tr/min

Conduite: Un tuyau de 6 mètres de long et 40mm de diamètres fabriqué en acier galvanisé.

Support: Deux supports en acier d'une hauteur de 90 cm, permettant de porter la conduite.

Accessoires : Pour former un circuit hydraulique fermé on a besoin utiliser des coudes et des joints

Fuite d'eau : Nous avons percé un trou d'un diamètre de 3 mm au niveau de la conduite.

Electrovanne : Une électrovanne d'une puissance de 8 watts avec un débit de 0.7 bars fonctionnant sous une tension de 220V a été placée au niveau du trou percé à cet effet. Sa commande se fait à partir d'un bouton poussoir. Pour créer la fuite il suffit d'appuyer sur le bouton poussoir.

Les capteurs : on a utilisé deux capteurs d'onde acoustique appelé microphone de mesure, basé sur un capteur appelé électret.

IV.4.Circuit électrique

Le circuit électrique du système d'acquisition réalisé au laboratoire est donné comme indique par la figure ci-dessous:

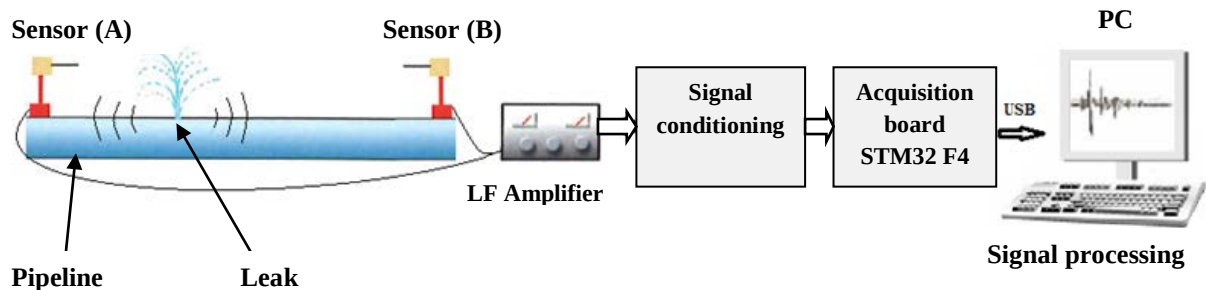


Fig. IV. 9. Le circuit électrique du système d'acquisition réalisé.

La partie électronique fonctionne autour d'une récente carte d'acquisition STM32F4. Les signaux obtenus à partir des deux capteurs acoustiques de mesure sont basés sur des transducteurs de type électret. Ces derniers transforment les ondes acoustiques en signaux électriques. Les signaux générés par les capsules vont passer par une première pré-amplification, ensuite ils sont amenés à un amplificateur basse fréquence. Ces derniers vont subir un conditionnement pour mettre le niveau des tensions entre 0 et 3V pour empêcher la destruction de la carte d'acquisition. La carte STM32F4 est attaquée à ses entrées D8 et D9, ce qui permet de convertir ses signaux en données numériques. La liaison avec le PC (SONY Core i3 - 2.4 Ghz - Ram 4 Go/Windows7, 64 bit) est effectuée via le port USB. Après avoir configuré la carte avec le PC, les données vont être stockées dans le micro sous forme de fichier Excel et ils seront utilisés ultérieurement.

IV.5. Échantillon des signaux acquis

Après avoir percé un trou de 3 mm dans la conduite, nous avons installé une électrovanne sur ce dernier pour commander la fuite. Cette dernière est activée (commandée) par une action sur un bouton poussoir. Nous avons relevé un grand nombre de tests, pour des différentes distances des capteurs par rapport à la fuite et nous avons choisi une acquisition pour des distances de part et d'autre de la fuite égales à 90 cm et 50 cm prise aléatoirement. Les données obtenues à partir de la carte STM32F4 sont enregistrées sous forme d'un tableau format Excel. L'acquisition a été faite sur une fenêtre temporelle de 10s avec une fréquence d'échantillonnage de 10^5 Hz pour un éventuel traitement par la suite sous Matlab. L'exemple

de signaux acquis est représenté par la figure ci-dessous. On note le signal provenant du capteur A : SignA et le signal provenant du capteur B : SignB dans tous ce qui suit.

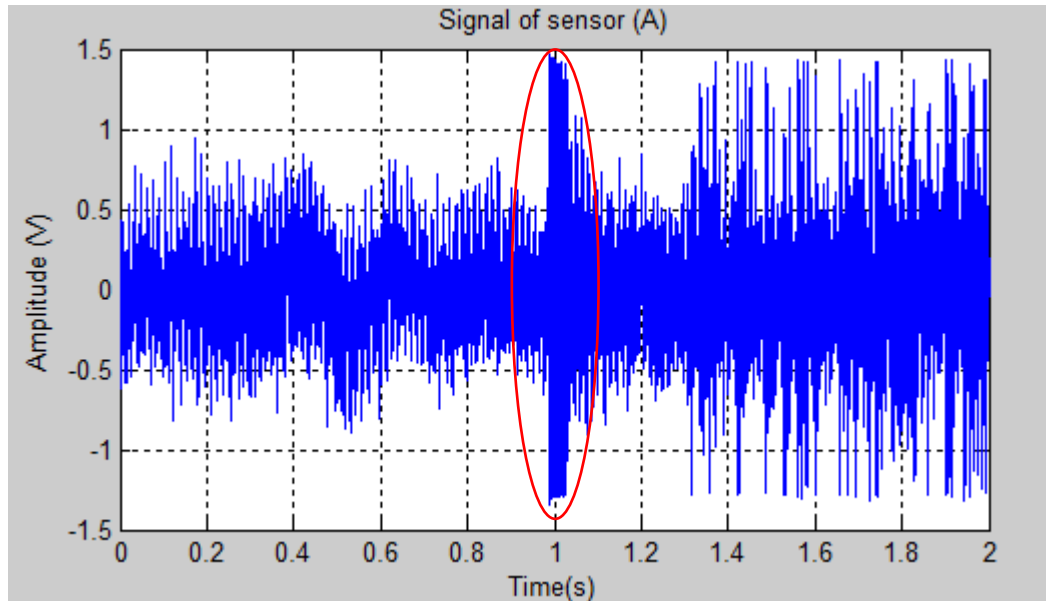


Fig. IV. 10. Signal avec fuite pour une distance de 90 cm du capteur (SignA)

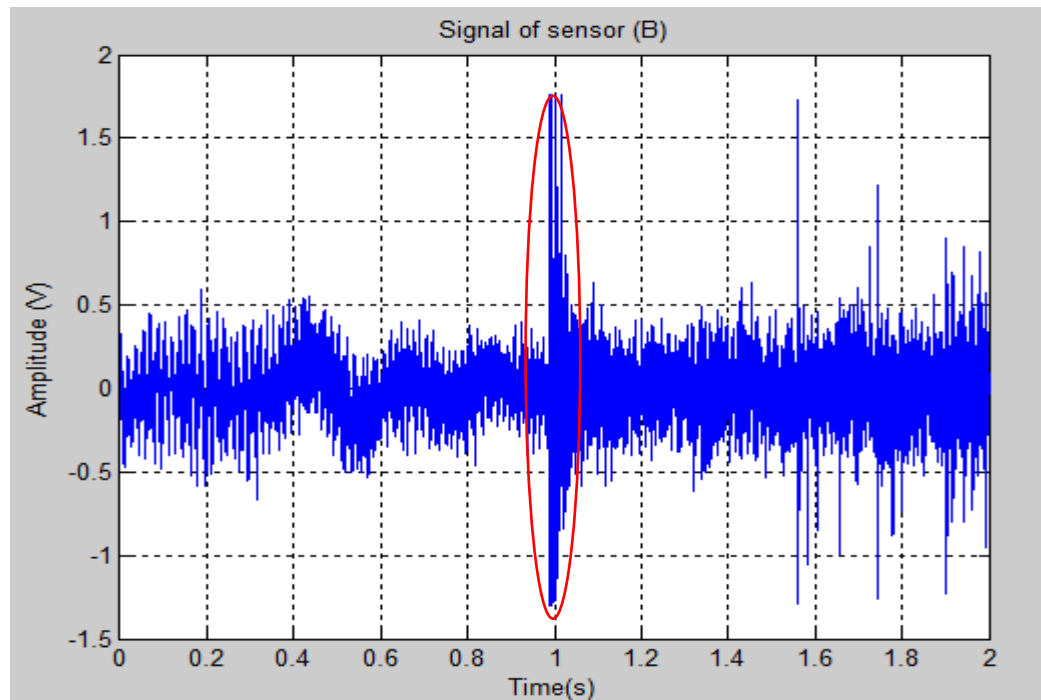


Fig. IV. 11. Signal avec fuite pour une distance de 50 cm du capteur (SignB)

Nous avons pris la fuite au milieu de notre fenêtre temporelle d'acquisition. On constate que l'amplitude des deux signaux de nos capteurs ne dépasse les 1volts sur l'intervalle temporel de 0 à 1s. Une fois la fuite est générée l'amplitude a augmenté de 1.5V sur la partie restante. Tenant compte que les facteurs d'amplification ne sont pas similaires qui nous a mené à avoir

des amplitudes différentes. La partie du signal encerclé en rouge représente le son engendré par la commutation du relais de l'électrovanne. Cette partie est considéré comme un bruit et ne doit pas être considéré comme un signal utile. En plus l'observation temporelle des deux signaux avec fuite, dans toutes les positions du capteur sur la conduite ne donne aucune idée sur l'existence ou sur la position de la fuite par rapport aux capteurs. A vraie dire, on doit penser à d'autres outils de traitement de signal tel que FFT, EMD et WT pour la détection et l'auto-corrélation, permettant de connaître l'endroit ou la position de la fuite.

IV.5.1. Application de la FFT

Après l'application du programme élaboré sous Matlab de FFT sur les deux signaux (SignA, SignB) les résultats sont représentés par les figures (IV.12) et (IV.13) ci-dessous.

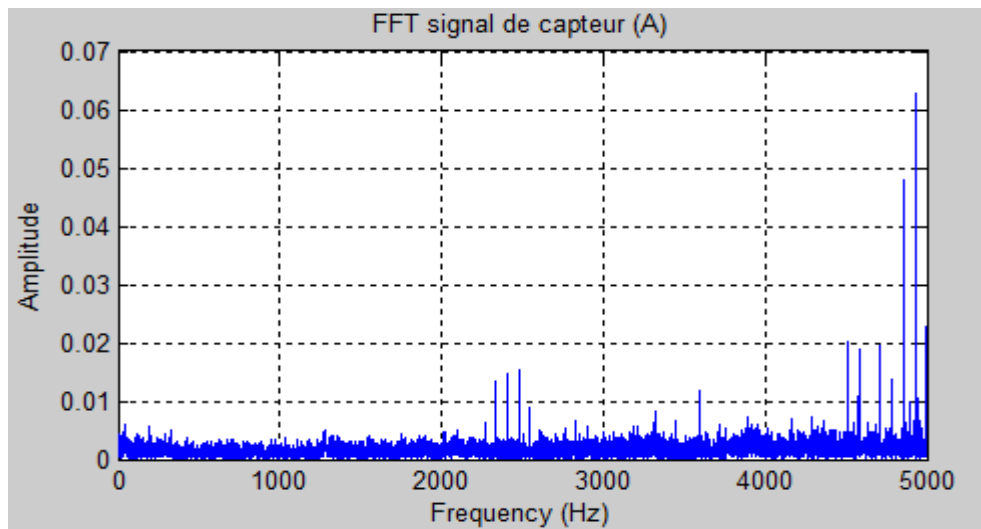


Fig. IV. 12. Spectre de fréquence du signal SignA à une distance de 90 cm

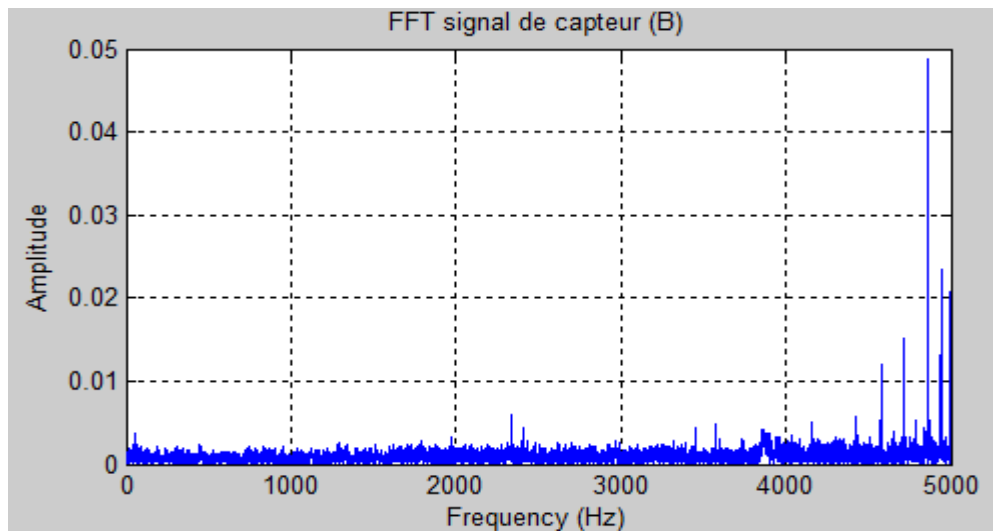


Fig. IV. 13. Spectre de fréquence du signal SignB à une distance de 50 cm

On remarque que pour les spectres des deux signaux signA et signB des singularités apparaissent sous forme de pics dans la bande de 2 à 5KHz. Ces pics peuvent être les signes de présence de la fuite sachant que ces derniers peuvent être engendrés dans notre cas par l'électrovanne et la fréquence de rotation de la pompe et le circuit hydraulique généralement et le bruit environnant. Pour la détection de fuite le spectre ne donne qu'une idée vague sur la présence de fuite donc on a besoin de penser à une autre analyse. Pour cela nous allons appliquer une autre technique dans la section suivante.

IV.5.2. Application de la Décomposition Modale Empirique (EMD)

Après l'application du programme élaboré sous Matlab de l'EMD sur les deux signaux présentés auparavant et l'élimination des IMF's basses fréquences qui sont considérées comme non utile, sachant que la fuite génère des signaux dont la fréquence varie dans la bande de 2 à 5KHz. Nous avons obtenus les résultats représentés par les figures (IV.14) et (IV.15) ci-dessous.

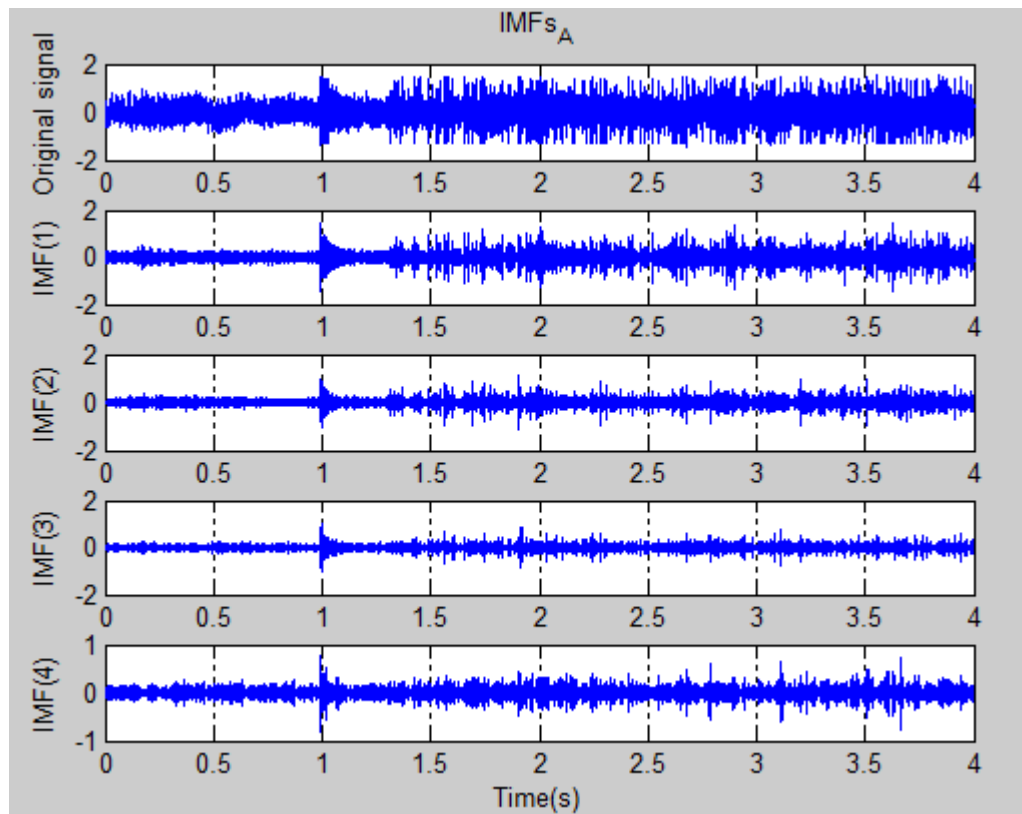


Fig. IV.14. L'EMD du signal SignA à une distance de 90 cm

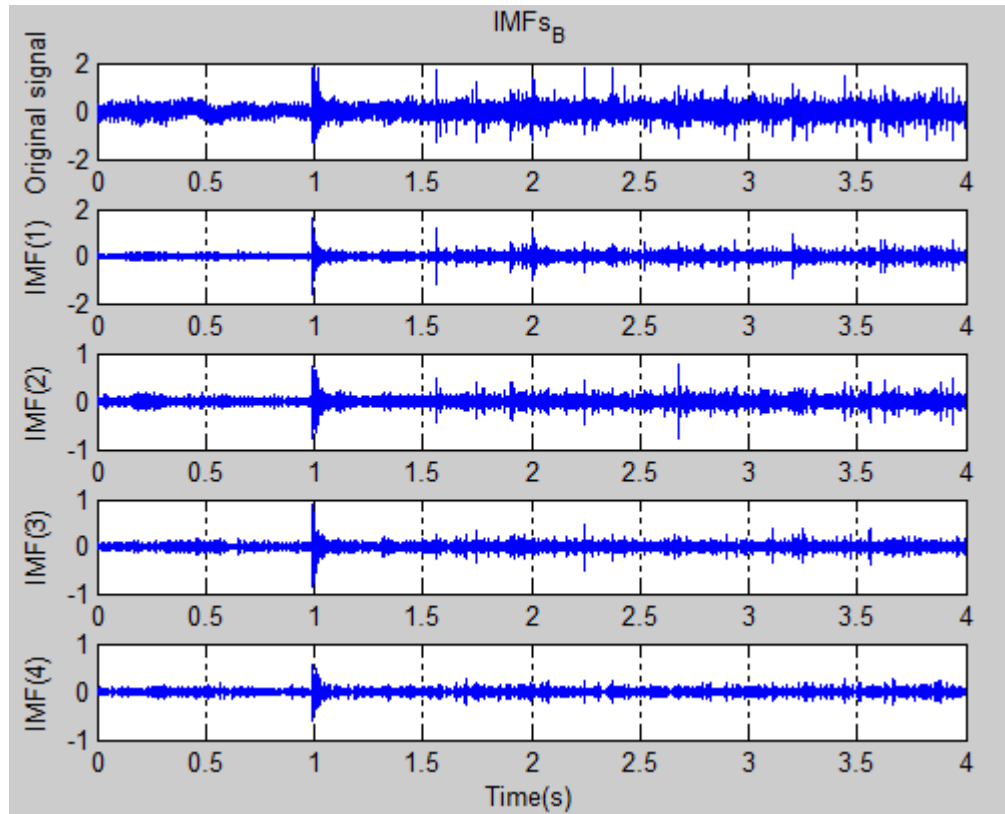
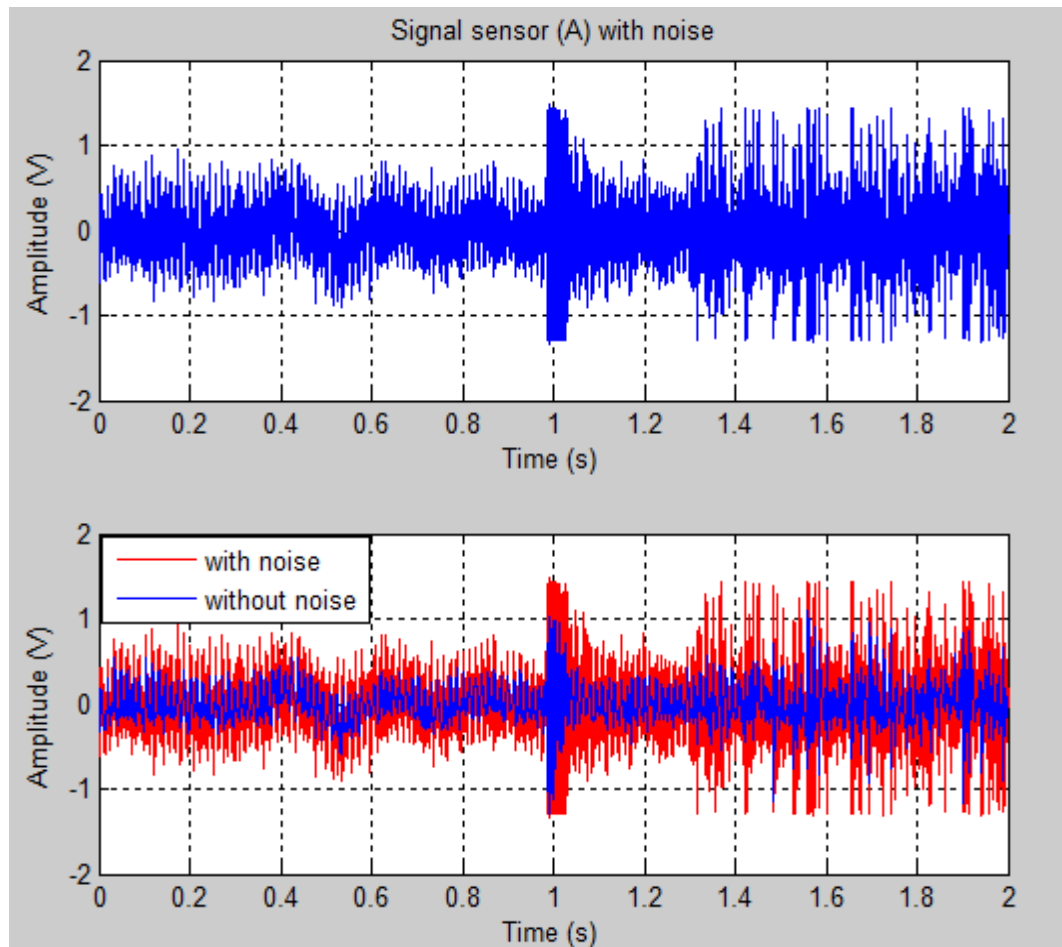


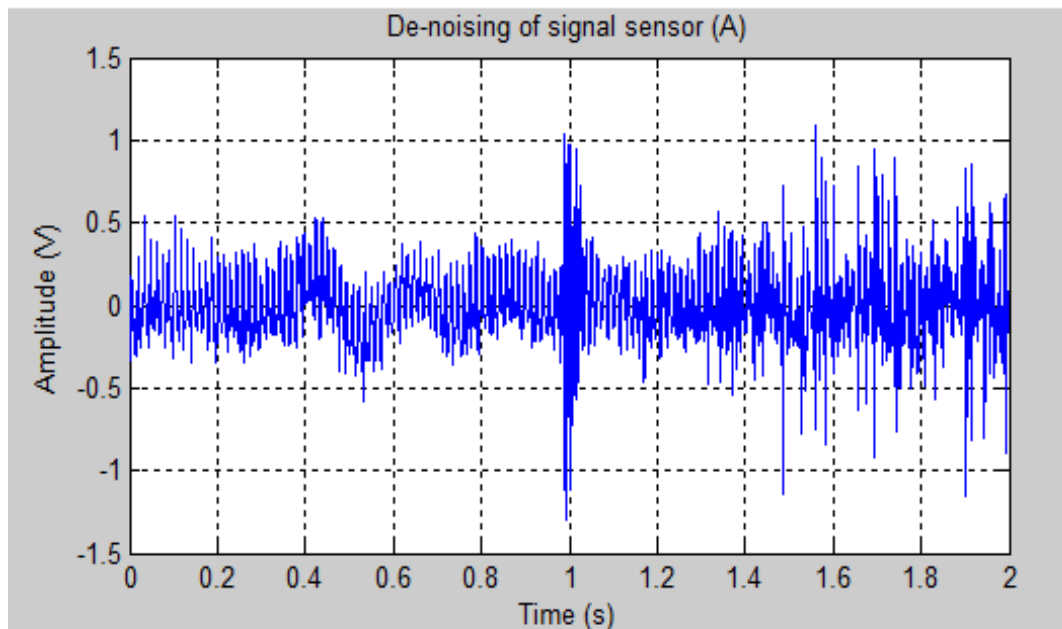
Fig. IV. 15. L'EMD du signal SignB à une distance de 50 cm

IV.5.3. Application de l'ondelette

Dans cette étape, nous avons appliqué l'ondelette discrète (DWT) Daubechies 4 (db4), niveau 4 très utilisée dans la littérature pour le débruitage des signaux. Après l'application de l'ondelette choisie et un choix judicieux du seuil (Threshold) sur les deux signaux $Th_1 = 0.75$ pour SignA et $Th_2 = 0.38$ pour SignB, les résultats obtenus sont présentés par les figures (IV.16) et (IV.17).

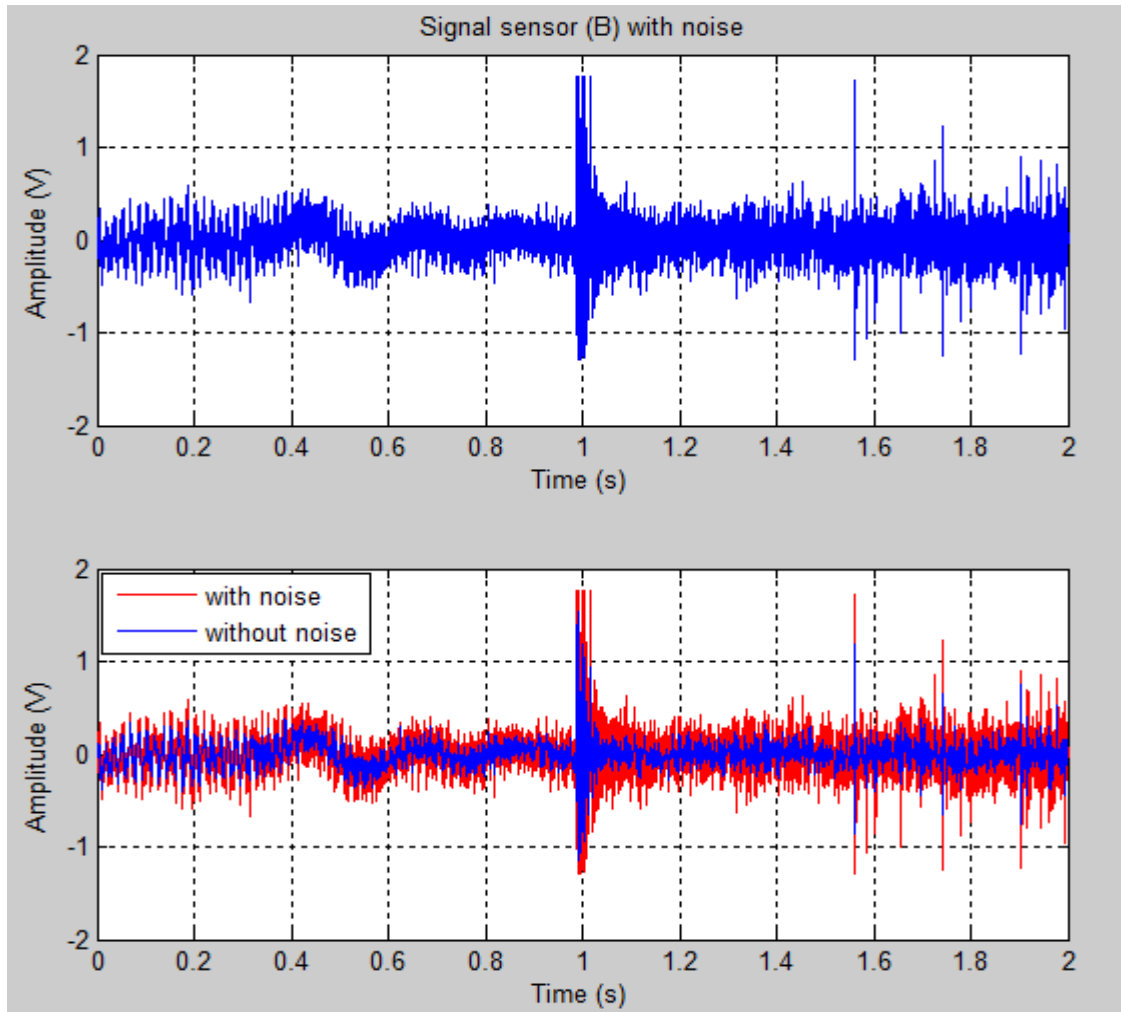


(a) Signal brute SignA avec bruit

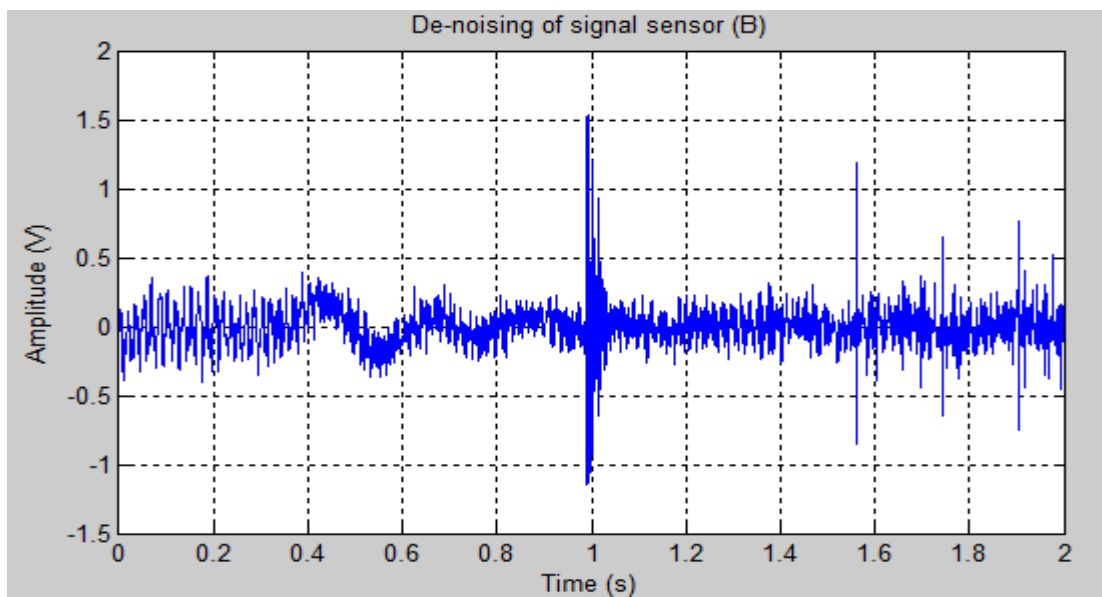


(b) signal d'ébruité par l'ondelette

Fig. IV.16. Le signal SignA avant et après le débruitage



(a) Signal SignB brute avec bruit



(b) Signal SignB débruité par l'ondelette

Fig. IV. 17. Le signal SignB avant et après le débruitage

IV.5.4. Application de l'auto-corrélation

Dans la littérature le débruitage par EMD s'effectue de la manière suivante :

- 1- Appliquer L'EMD au signal
- 2- Choisir les seuils pour chaque IMF
- 3- Additionner les IMF's débruité avec le résidu pour obtenir le signal utile débruité.

Dans notre étude nous avons considéré que le premier IMF porte l'information pertinente relative à la fuite. Cela est confirmé par plusieurs tests effectués.

L'auto-corrélation des deux signaux après le traitement par l'EMD ou l'ondelette, nous permet de connaître la position exacte de la fuite à partir de la différence temporelle (Δt) entre les deux signaux. Ce dernier est obtenu à partir de la formule (IV.6). L'exécution du programme d'auto-corrélation nous a donné les résultats représentés par les figures (IV.14) et (IV.15) ci-dessous.

IV.5.4.1. L'auto-corrélation des signaux débruité par EMD

Dans cet exemple on a appliquée L'auto-corrélation de IMF₁ sur les deux signaux signA et signB. La figure ci-dessous montre le résultat obtenu.

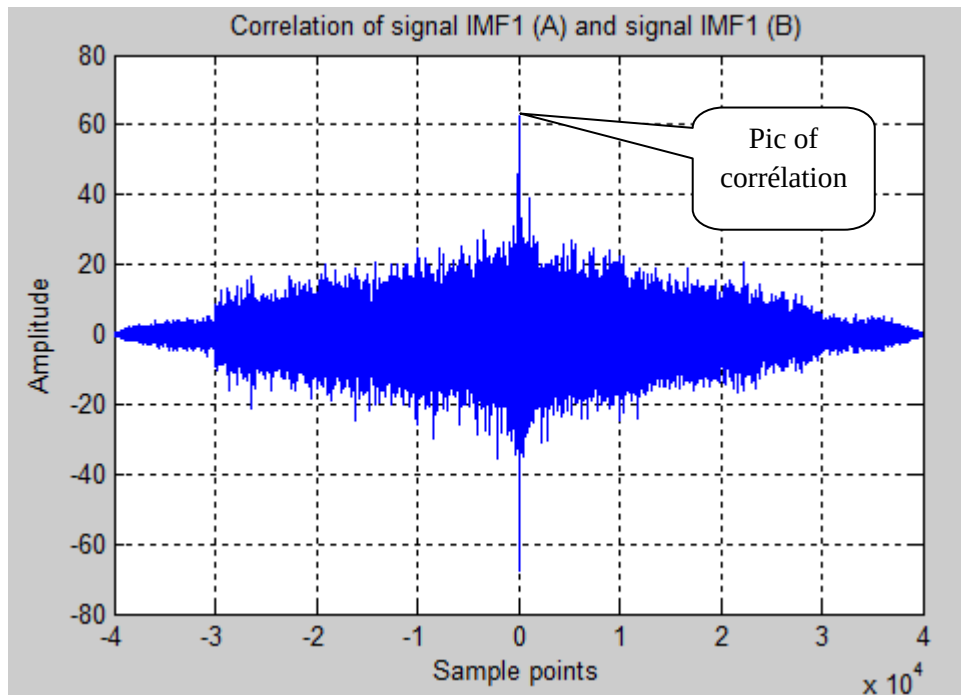


Fig. IV.18. L'auto-corrélation des deux IMF1des deux signaux (SignA, SignB)

Le signal SignB est retardé par rapport au signal SignA, l'auto-corrélation donne la différence d'échantillons (N) entre les deux signaux et à partir de cette différence on calcule la différence temporelle.

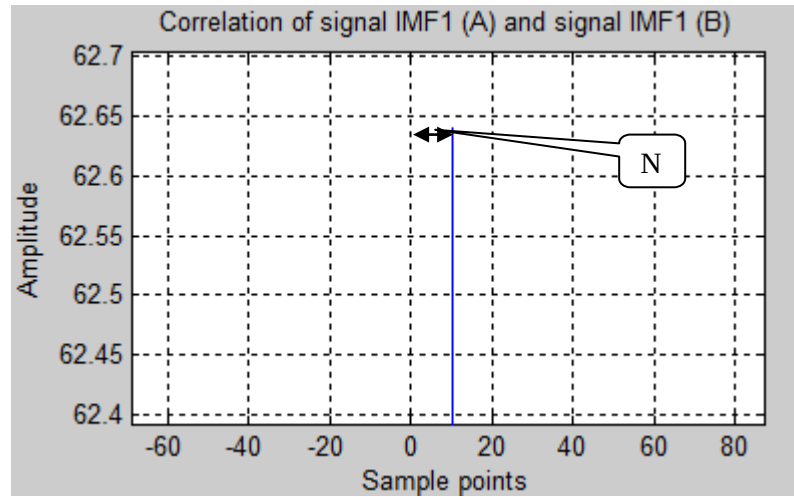


Fig. IV.19. Représentation de différence d'échantillonnage

IV.5.4.2. Calcul de la différence temporelle (Δt)

$$\Delta t = \frac{N}{F_s} \quad (\text{IV.6})$$

N : différence d'échantillonnage.

F_s : fréquence d'échantillonnage.

Application numérique : $N = 12$, $F_s = 10^4$

$$\Delta t = 12 \times 10^{-4} \text{ s}$$

IV.5.4.3. L'auto-corrélation des signaux débruités par ondelette

L'application de l'algorithme d'auto-corrélation sur MATLAB aux signaux débruités par ondelette SignA, SignB est présenté par la figure (IV.20).

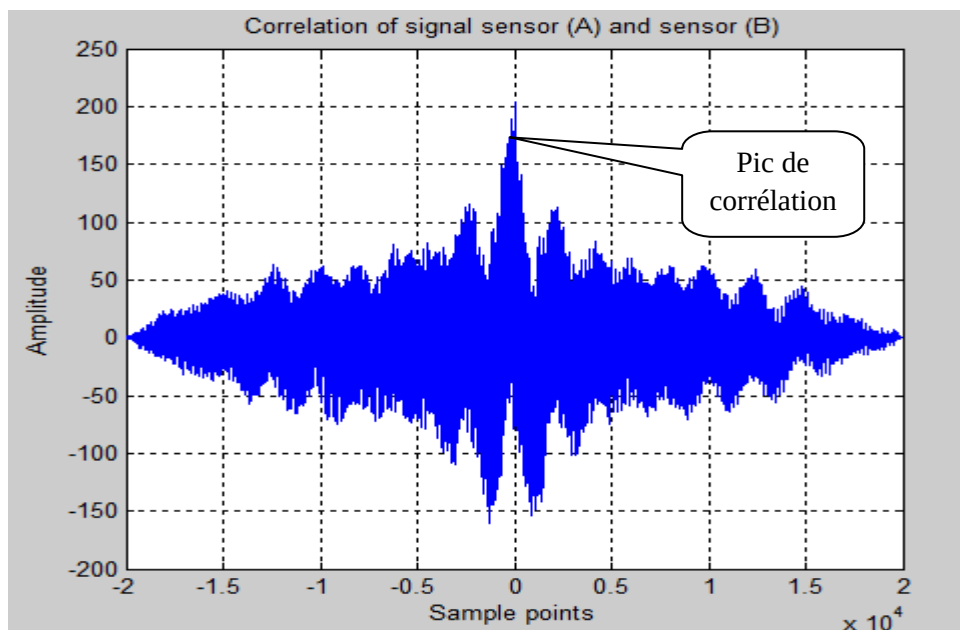


Fig. IV.20. L'auto-corrélation entre les deux signaux (signA, signB)

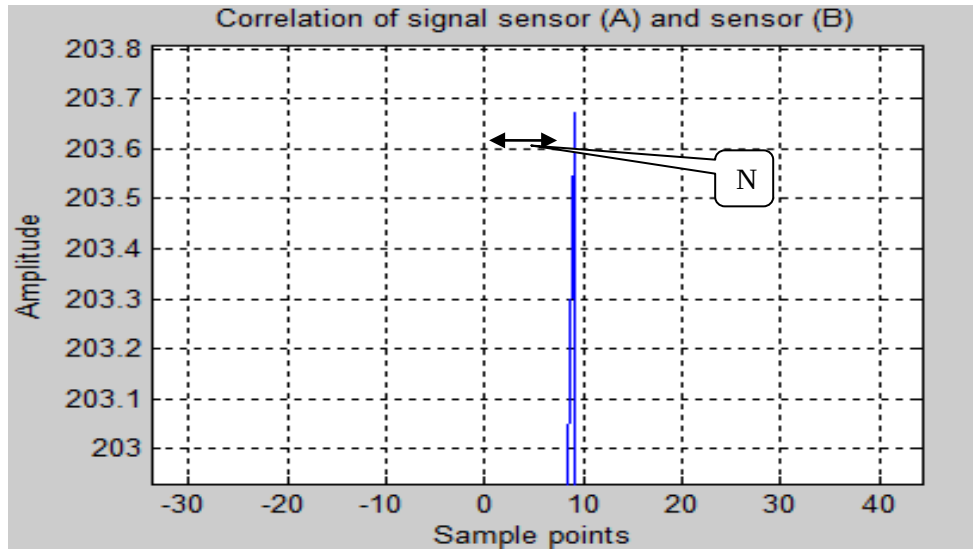


Fig. IV.21. Représentation de la différence d'échantillons

IV.5.4.4. Calcul de la différence temporelle (Δt)

$$\Delta t = \frac{N}{F_s} \quad (\text{IV.6})$$

N : différence d'échantillonnage.

F_s : fréquence d'échantillonnage.

Application numérique : N = 9 , F_s = 10⁴

$$\Delta t = 9 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

IV.5.4.5. Localisation de la fuite

Selon la figure II. 3. on a :

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{(L_2 - L_1)}{V}$$

$$L_2 = D - L_1 \rightarrow \Delta T = \frac{(D - 2L_1)}{V} \rightarrow L_1 = \frac{(D - V\Delta T)}{2} \quad (\text{IV.7})$$

D : distance entre les deux capteurs (m)

Δt : différence de temps entre les deux signaux (s)

V : célérité de l'onde acoustique (m/s), a l'air V = 340,29 m/s

L₁, L₂: distance entre la fuite et le capteur

Temps mis par le signal (1) pour arriver : T₁ = L₁ / V

Temps mis par le signal (2) pour arriver : T₂ = L₂ / V

Dans cet exemple D = 1,4

Pour l'EMD : L₁ = 90,3 cm

Pour l'ondelette : L₁ = 85,3 cm

IV.6. Etude comparative entre EMD et ondelette

Cette partie présente une étude comparative entre la méthode EMD et l'ondelette avec les mêmes critères, chaque fois nous changeons le nombre d'échantillons pour obtenir les meilleures performances. On applique les mêmes étapes précédentes pour calculer la distance afin de localiser la fuite, ensuite nous allons examiner l'erreur de chaque méthode. Les résultats sont donnés par les tableaux IV.1- IV.2.

1^{er} comparaison

- Pour un nombre d'échantillons égale à 20000 allant de [40000-60000] appliqué pour les deux méthodes.
- On a trouvé que la meilleure approximation est obtenue pour l'IMF2

Tableau. IV. 1. Etude comparative de l'EMD et l'ondelette.

Méthode Données	EMD (IMF₂) L_A (cm)	Erreur relative	Ondelette L_A (cm)	Erreur relative	Distance réelle L_A (cm)
D(1)	21,2	26%	29,7	1%	30
D(2)	54	8%	55	10%	50
D(3)	164	3,5%	150	12%	170
Erreur relative moyenne	/	12,5%	/	8%	/

Dans ce tableau nous avons comparé les méthodes EMD et Ondelette en utilisant trois données de test. Cette comparaison est basée sur l'erreur relative moyenne. Nous avons remarqué que l'erreur obtenue par la méthode ondelette 8% est moins que l'erreur obtenue par la méthode EMD 12,5%, alors l'ondelette est plus efficace que l'EMD.

2^{ème} comparaison

- Cette fois nous avons fixé l'intervalle [40000-60000] pour la méthode ondelette et nous avons changé pour la méthode EMD l'intervalle comme suite [75000-100000] l'étude est faite pour sept acquisition.
- On a trouvé que la meilleure approximation est obtenue pour l'IMF1

Tableau. IV. 2. Etude comparative de l'EMD et l'ondelette.

Méthode Données	EMD (IMF₁) L_A (cm)	Erreur relative	Ondelette L_A (cm)	Erreur relative	Distance réelle L_A (cm)
D(1)	16,5	17,5%	23	15%	20
D(2)	45	25%	60	0%	60
D(3)	87	3,3%	85	5,5%	90
D(4)	98	2%	103	3%	100
D(5)	152	10,5%	150	11,7%	170
D(6)	205	6,8%	182	17%	220
D(7)	250	10,7%	210	25%	280
Erreur relative moyenne	/	11%	/	11%	/

Nous avons remarqué que l'erreur obtenue sur la distance par les deux méthodes est égale à 11%. Nous avons remarqué aussi que l'erreur relative sur les résultats obtenue par la méthode ondelette augmente au fur et à mesure que la distance (L_A) augmente et l'inverse est constaté pour l'EMD, nous avons confirmés les remarques par les tableaux (IV.3) et (IV.4) ci-dessous.

Tableau. IV. 3. Etude comparative de l'EMD et l'ondelette pour les distances < 100cm.

Méthode Données	EMD (IMF₁) L_A (cm)	Erreur relative	Ondelette L_A (cm)	Erreur relative	Distance réelle L_A (cm)
D(1)	16,5	17,5%	23	15%	20
D(2)	45	25%	60	0%	60
D(3)	87	3,3%	85	5,5%	90
Erreur relative moyenne	/	15%	/	7%	/

Nous avons remarqué que l'erreur obtenue par la méthode ondelette 7% est moins que l'erreur obtenue par la méthode EMD 15%, alors l'ondelette est plus efficace à l'EMD pour les petits distance (<100cm).

Tableau. IV.4 : Etude comparative de l'EMD et l'ondelette pour les distances > 100cm.

Méthode Donnes	EMD (IMF₁) L_A (cm)	Erreur relative	Ondelette L_A (cm)	Erreur relative	Distance réelle L_A (cm)
D(5)	152	10,5%	150	11,7%	170
D(6)	205	6,8%	182	17%	220
D(7)	250	10,7%	210	25%	280
Erreur relative moyenne	/	9%	/	18%	/

Nous avons remarqué que l'erreur obtenue par la méthode EMD 9% est moins que l'erreur obtenue par la méthode ondelette 18%, alors l'EMD est plus efficace à l'ondelette pour les grands distance (<100cm).

IV.7.CONCLUSION

La décomposition modale empirique est une technique très récente spécialisée pour l'analyse des signaux non linéaires et non stationnaires. Dans notre travail cette technique a été appliquée sur les réseaux de distribution pour pouvoir analyser les fuites qui survient sur ces derniers. Ce chapitre a fait l'explication des différentes étapes d'acquisition des données avec l'étude comparative de la méthode EMD et la méthode Ondelette. Enfin nous avons montré que la méthode EMD est la plus performante pour les grandes distances. L'analyse a montrée l'efficacité de la technique choisis.

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour les grands réseaux de distribution d'eau, la détection de fuite est devenue plus qu'importante et bénéfique. La réduction du temps compris entre la formation d'une fuite et sa localisation précise est parmi les facteurs déterminants pour atteindre un bon rendement de réseau. Divers système de contrôle et de surveillance existent actuellement dans le monde ont pour but d'assurer une surveillance continue de ces réseaux.

Le travail que nous avons réalisé dans le cadre de ce mémoire porte essentiellement sur la détection et la localisation de fuite dans un réseau de distribution basée sur une technique assez récente.

Cette technique qui porte le nom EMD est appelée décomposition modale empirique a été proposée récemment après les ondelettes, comme méthode d'analyse temps fréquence du signal. Elle est liée à une autre transformation dite de Hilbert. Cette association constitue la transformée de Hilbert-Huang (THH). La décomposition modale empirique permet de décomposer un signal non stationnaire et non linéaire en un ensemble de signaux mono-composante dite IMF (Intrinsic Mode Functions). Il permet d'estimer l'amplitude et la fréquence instantanée pour chaque composante. La décomposition modale empirique est une technique innovante et plus avantageuse pour la détection des singularités des signaux par rapport aux autres techniques d'analyse de signaux non linéaires et non stationnaires telles que la transformée en FFT, STFT, WT...etc.

Pour aborder le problème des fuites, il a bien fallu évoquer dans le premier chapitre quelques généralités sur les réseaux de distribution d'eau, suivi des différentes techniques utilisées dans ce domaine, ajouter à cela un panorama des différents détecteurs de fuites actuellement utilisés. On a introduit dans le deuxième chapitre les différentes techniques utilisées dans le domaine de détection de fuites. Dans le troisième chapitre une étude détaillée de la nouvelle technique (EMD) a été présentée ainsi que l'ondelette pour pouvoir faire une étude comparative. En appliquant ces dernières sur des signaux bruités réels.

Enfin le quatrième chapitre est réservé à l'application des deux techniques suivi d'une comparaison pour la validation de la méthode choisie sur des signaux de fuite réels acquis sur un canal prototype hybride réalisé au laboratoire. Les résultats obtenus ont montrés les performances de la technique employée.

Références bibliographiques

- [1] Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N. C., Tung C.C., et Liu H. H., The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis. Proceedings of the Royal Society of London, 454:903–995, 1998.
- [2] MOHGUEN wahiba, Améliorations de la méthode EEMD, Thèse magister en électronique, université FERHAT ABBAS-SETIF-1- UFAS(ALGERIE), 2014, P5
- [3] Babbitt, H.E., The detection of leaks in underground pipes, Journal of AWWA vol. 7, pp 589-595, 1920.
- [4] M.J. Brennan*, P.F. Joseph, J.M. Muggleton and Y. Gao , Some Recent Research Results on the use of Acoustic Methods to Detect Water Leaks in Buried Plastic water Pipes , Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK. *email:mjb@isvr.soton.ac.uk
- [5] A.DAOUDI, M.BENBRAHIM and K.BENJELLOUN An Intelligent System to Classify Leaks in Water Distribution Pipes, proceedings of world academy of science, 2005
- [6] Olivier Chesneau, Un outil d’aide à la maîtrise des pertes dans les réseaux d’eau potable : la modélisation dynamique de différentes composantes du débit de fuite, Thèse de doctorat en Sciences de l’ingénieur, l’Université Louis Pasteur, 2006.
- [7] GHEMARI ZINE, Modélisation Et Simulation D’un Capteur De Vibration (Accéléromètre), Thèse de magister en Electromécanique, Université Badji mokhtar Annaba, 2006, P20-21
- [8] <http://www.omega.fr/prodinfo/accelerometre.html>
- [9] Pilcher, R., Hamilton, S., Chapman, H., Ristovski, B., and Strapely, S., Leak location and repair guidance notes., in International Water Association. Water Loss Task Forces: Specialist Group Efficient Operation and Management. 2007: Bucharest, Romania.

- [10] Osama Hunaidi, " La détection des fuites dans les conduites de distribution d'eau " CANADA 10/2012, p 3-5
- [11] Zhang, J., Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system. Pipes and Pipelines International, 1997. 42(1): p. 20-26.
- [12] Association québécoise des techniques de l'eau, Les fuites dans les réseaux de distribution d'eau: problèmes et solutions, Guide technique. Ministère de l'environnement du Québec, Montréal 1980.
- [13] Heim, P.M. 1979. Conducting a leak detection search. Journal of American Water Works Association, 71(2) : 66–69.
- [14] Osama Hunaidi, "Stratégies de détection acoustique des fuites sur les conduites de distribution d'eau", Solutions constructives N°79, mai 2012
- [15] Pure Technologies Ltd., Sahara and SmartBall Leak Detection and Condition Assessment Systems, Calgary. www.puretechnologiesltd.com (Cité en décembre 2010)
- [16] Hamilton, S., Hartley, D., Misconceptions around acoustic leak detection, in Water21-Magazine of the International Water Association. 2008, IWA Publishing. p. 54-56.
- [17] X. Cazauran et J. Pioger, " détection de fuite : méthodes directes et indirectes", CETIM, ISBN 15/10 /2009, p 3.
- [18] Boashash A., Time-Frequency Signal Analysis and Processing, A Comprehensive Reference, Elsevier Ltd, Oxford, UK 2003.
- [19] Flandrin P., Temps-Fréquence, Editions Hermes, Paris, 1993.
- [20] M. Brucher, « La transformée de Fourier rapide et d'une de ses dérivées », <http://matthieu-brucher.developpez.com/>, Mai, 2007.
- [21] H. Florent : « La transformée de Fourier en traitement d'images », Avril 2007.

- [22] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, Wavelet Toolbox, For Use with MATLAB, 1997.
- [23] A. Graps, « An introduction to Wavelets », IEEE Computational Science and Engineering, vol. 2, no. 2, 1995.
- [24] Meftah LAKEHAL, « Indexation des images dans un environnement distribue (JINI) », Thèse magistère en électronique Université de Msila, 2011.
- [25] A. Boggess, F. J. Narcowich : « A first course in wavelets with fourier analysis Prentice Hall », 2001.
- [26] C. Blatter : « Wavelets a primer, A K Peters », 1998.
- [27] Georges Oppenheim. Et al : « Wavelet and their Applications », ISTE, 2003.
- [28] Daubechies, I., Ten lectures on wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- [29] Abdelwahhab BOUDJELAL : « Méthode de débruitage des images a multicopies bruitées via la transformée en ondelettes », Thèse magistère en électronique Université de M'sila, 2010.
- [30] Mohd Fairusham Ghazali, Leak Detection Using Instantaneous Frequency Analysis, thèse de doctorat en Philosophie, l'Université de Sheffield, mai 2012.
- [31] TOUAFEK Ishak , Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT), thèse magister en Mécanique de Précision, Université FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (Algérie)
- [32] MAHGOUN Hafida, analyse non stationnaire des signaux vibratoires dans la surveillance des machines et la prevention des defaillances., Thèse de doctorat en sciences en Mécanique de Précision, Université FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (Algérie), 2013.

- [33] G. Rilling, Décompositions modales empiriques contributions à la théorie l'algorithmie et l'analyse de performances, thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de Lyon, 2007.
- [34] G. Rilling, P. Flandrin, P. Goncalves, On empirical mode decomposition ans its algorithms. In Proc, IEEE EURASIP Workshop Nonlinear Signal Image Processing, grado, Italiy, 2003.
- [35] M. G. Rilling. Décompositions Modales Empiriques Contributions à la théorie, l'algorithmie et l'analyse de performances. Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2007.

Résumé

Nous avons appliqué une nouvelle méthode appelée la méthode EMD (empirical mode decomposition) pour l'analyse des signaux non stationnaires et non linéaire provenant des fuites au niveau des conduites des réseaux de distribution d'eau. L'application va être faite au niveau du laboratoire d'électronique. A fin de simuler le réseau de distribution on utilisera un court canal prototype hybride. Après l'acquisition des signaux de fuite par deux capteurs acoustiques, on applique les méthodes EMD et Ondelette pour le traitement de ces signaux afin d'éliminer les bruits puis en applique l'auto-corrélation pour connaître la position exacte de la fuite par rapport aux deux capteurs, Enfin les résultats obtenus vont être comparées pour voir les performances des méthodes employées.

Mots clés : Eau, Pipeline, Fuite, EMD, Ondelette, Auto-corrélation, Détection, Localisation, Réseau.

ملخص

طبقتنا طريقة جديدة تسمى طريقة أ.م.د (وضع التحلل التجريبي) لتحليل إشارات غير ثابتة وغير الخطية من تسرب الأنابيب في شبكات توزيع المياه، التطبيق سيتم على مستوى مختبر الإلكترونيك. قصد محاكاة شبكة التوزيع سوف نستخدم قناة قصيرة نموذجية مختلطة. بعد الحصول على إشارات التسرب من قبل اثنين من أجهزة الاستشعار الصوتي، يتم تطبيق طريقة أ.م.د و الموجات لمعالجة هذه الإشارات لأجل القضاء على الضوضاء ثم يطبق الارتباط الذاتي لمعرفة الموقع الدقيق للتسرب بالنسبة لجهاز الاستشعار، وأخيرا تتم مقارنة النتائج لمعرفة أداء الأساليب المستخدمة. الكلمات المفتاحية : المياه، خطوط الأنابيب، تسرب، أ.م.د، الموجات، الارتباط الذاتي، الكشف، موقع، شبكة.

Abstract

we applied a new method called the EMD method (empirical decomposition mode) for the analysis of non-stationary and nonlinear signals from leaking pipes in water distribution networks. The application will be made at the electronics laboratory. At the end of simulating the distribution network we will use a short hybrid prototype channel. After acquiring the leakage signals by two acoustic sensors, EMD methods is applied and the Wavelet for processing these signals to remove noise and then applies the autocorrelation to see the exact position of the leak by compared to them. Finally the results will be compared to see the performance of methods used.

Keywords: Water, Pipeline, Leak, EMD, Wavelet, Auto-correlation, Detection, Tracking, Network.