

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : *Contrôle Industriel*

THEME

**Etude et réalisation d'un système de détection de
plusieurs fuites d'eau dans un canal prototype**

Proposé et dirigé par:

Mr. BENTOUMI Miloud

Mr. BAKHTI Haddi

Réalisé par :

HANTAZ Salah

N° D'ordre:2016/CI 01/89/385

PROMOTION: JUIN 2016

Remerciement

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

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. Ainsi qu'à ma femme pour sa souplesse et patience pendant toute cette année. Sont oublier de remercier mes enfants et filles.

Mon vifs remerciements, accompagnés de toute mon gratitude, vont tout d'abord à mon encadreur Mr B. Miloud et Co-encadreur Mr B. 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 ont toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de ce mémoire. Les conseils qu'ils m'ont prodigués, 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. En particulier Abdelhamid kherbachi et M^{me} N.Zemouri.

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.

À ma femme Que je dois tous le respect et l'appréciation ;

À ma petite famille (chaima, ikram, khouloud, A/eldjalil, A/sammed, A/errahim ;

À mon frère unique et sa famille ;

À mes sœurs ;

À alla et sa petite famille ;

À toute la famille HANTAZ et AOUJERAI;

Àu personnel du hall technologique sans exception.

Àu personnel du faculté en particulier département d'électronique ;

À mes amis ;

Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail.

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION	
GENERALE	12
CHAPITRE.I. GENERALITES SUR LES RESEAUX DE DISTRIBUTION D’EAU	
I.1 INTRODUCTION.....	15
I.2 DÉFINITION.....	15
I.3 INSTALLATION.....	16
I.3.1 Captage ou prise.....	16
I.3.2 Captage des eaux surfaciques	16
I.3.3 Captage des eaux souterraines	18
I.4 CONDUITE D’AMENEE :	19
I.5 RESERVOIR DE STOCKAGE :	19
I.6 RESEAU DE DISTRIBUTION :	20
I.7 CLASSEMENT DES RESEAUX :	20
I.8 USAGES DE L’EAU	21
I.9 PRINCIPE D’INSTALLATION DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION	21
I.10 EQUIPEMENT DU RÉSEAU DE DISTRIBUTION	23
I.10.1 Nature De La Canalisation	23
I.10.2 Les Accessories de Réseau	23
I.11 PROBLEMES RENCONTRÉS DANS UN RÉSEAU D’ALIMENTATION EN EAU POTABLE (A.E.P)	24
I.12 LA MAINTENANCE DES RÉSEAUX	25
I.13 LES PERTES D’EAU	25
I.13.1 Définition d’une fuite.....	25
I.13.2 Cause des fuites	26
I.13.3 Débits de fuites	26
I.13.4 Détection des fuites.....	26
I.14 APPAREILS DE DÉTECTION	27
I.15 TECHNIQUE ACOUSTIQUE	28
I.15.1 Corrélation acoustique	28
I.15.1.1 Le Principe de la corrélation acoustique	28
I.15.2 Détection par immersion.....	28
I.15.3 Détection par enregistrement	29
I.15.4 Détection d’émission fugitive par nez acoustique	30
I.15.5 Comparaison des differentes methodes acoustiques.....	31

I.16 LES TECHNIQUES NON ACOUSTIQUES	33
I.16.1 La technique du gaz traceur	33
I.16.2 La thermographie	34
I.16.3 Le geo radar	34
I.16.4 Chute de pression	35
I.17 LES DETECTEURS DES FUITES ACTUELLES	35
CONCLUSION	36
CHAPITRE.II. PROPAGATION DES ONDES SONORES	
II.1 INTRODUCTION.....	38
II.2 DEFINITION DE SON.....	38
II.2.1 Emission, propagation, reception.....	39
II.3 CARACTERISTIQUES DU SON.....	39
II.3.1 L'amplitude.....	39
II.3.2 Fréquence.....	40
II.4 CELERITE DU SON.....	41
II.4.1 Sons et ultrasons.....	41
II.4.2 Description de l'expérience.....	41
II.5 DE L'ANALOGIQUE AU NUMERIQUE.....	43
II.5.1 Le son analogique	43
II.5.2 Le son en numérique.....	43
II.5.2.1 La fréquence d'échantillonnage.....	44
II.5.2.2 Quantification	45
CONCLUSION	46
CHAPITRE.III. LA METHODE EMD	
III.1 INTRODUCTION.....	48
III.2 DEFINITIONS	48
III.2.1 Système linéaire et non-linéaire.....	48
III.2.2 Signal stationnaire et non-stationnaire.....	48
III.3 METHODES D'ANALYSE DES SIGNAUX NON STATIONNAIRES	48
III.3.1 Analyse temps-fréquence, temps-échelle, fréquence instantanée	48
III.3.1.1 Transformée de Fourier à fenêtre glissante.....	49
III.3.1.2 Transformée en ondelettes	50
III.3.1.3 Fréquence instantanée.....	51
III.4 DECOMPOSITION MODALE EMPIRIQUE (EMD)	52

III.4.1 Principe de la décomposition.....	53
III.4.2 Processus de tamisage : principe algorithmique.....	54
III.4.3 Critère d'arrêt.....	59
III.4.4 Propriétés de la méthode EMD.....	60
III.4.4.1 Erreur d'estimation.....	60
III.4.4.2 Adaptabilité et localité.....	61
III.4.5 LESDIFFERENTES METHODES D'INTERPOLATION.....	64
III.4.6 DESCRIPTION TEMPS-FREQUENCE.....	65
III.4.6.1 Résolution fréquentielle.....	65
III.4.6.2 Comparaison avec les ondelettes.....	66
III.4.7 DEFAUTS DE LA METHODE EMD.....	69
III.4.7.1 Critères d'arrêt.....	69
III.4.7.2 Effets de bord.....	69
III.4.7.3 Problème de mixage des modes.....	69
III.4.7.4 Absence d'expression analytique.....	71
CONCLUSION.....	72
CHAPITRE.IV.TESTS ET INTERPRETATION DES RESULTATS	
IV.1 INTRODUCTION.....	74
IV.2 Système d'acquisition.....	74
IV.3 LA CHAINE D'ACQUISITION.....	74
IV.3.1 Capteur acoustique	75
IV.3.2 Amplificateur basse fréquence (LF AMPLIFIER).....	76
IV.3.3 ETAGE DE CONDITIONNEMENT DU SIGNAL.....	77
IV.3.4 L'oscilloscope Numérique GDS 1000.....	79
IV.3.5 La Carte STM32F4xx.....	80
IV.4 SCHEMA HYDRAULIQUE	82
IV.5 SIGNAUX ACQUIS	82
IV.5.1 Premier Test	82
IV.5.2 Deuxième test :	87
IV.5.2 Troisième test	91
IV.5.3 Quatrième test.....	94
IV.6 Test à deux fuites	98
CONCLUSION.....	101
CONCLUSION GENERALE.....	103

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE.I. GENERALITES SUR LES RESEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU

Figure I-1 Réseau de distribution.....	16
Figure I-2 Captage en rivière.	17
Figure I-3 Prélèvement à l'amont de la ville.	17
Figure I -4 Cycle de production et distribution de l'eau potable.....	19
Figure I-5 Le réseau ramifié.	20
Figure I-6 Le réseau maillé.	20
Figure I.7 Problèmes rencontrés dans un réseau d'A.E.P.....	24
Figure I. 8 Appareils d'auscultation typiques.	27
Figure I.9 Schéma de la détection par immersion.....	29
Figure I.10 Schéma de la détection par immersion.	30
Figure I. 11 Domaines de sensibilité des principales techniques de détection de fuite.	32

CHAPITRE.II. PROPAGATION DES ONDES SONORES

Figure II.1 Propagation des ondes vibratoire sur la surface.	38
Figure 2.2 Emission, propagation et réception du son.	39
Figure II.3 Evolution de l'amplitude sonore dans le temps.	40
Figure II.4 Types de fréquences.	41
Figure II.5 Distribution des ondes sonres.	41
Figure II.6 Détermination de vitesse.	42
Figure II.7 Exemple d'une chaîne analogique.	43
Figure II.8 Exemple d'une chaîne numérique.	44
Figure II.9 Forme d'un signal échantillonné.	44
Figure II.10 signal échantillonné avant et après quantification.	45

CHAPITRE.III. LA METHODE EMD

Figure. III.1 Deux atomes de Gabor dans le plan temps fréquence [16].....	50
Figure. III.2 Organigramme de la méthode EMD.....	56
Figure III.3 a : signal test $x_1(t)$, b: composante haute fréquence, c:composante basse fréquence.....	57
Figure III.4 Principe de tamisage pour l'estimation de la 1 ^{ère} IMF du signal test $x_1(t)$	58

Figure III.5 Décomposition EMD du signal test $x_1(t)$	59
Figure. III.6 Signal test $x_2(t)$	61
Figure.III.7 Décomposition EMD du signal test $x_2(t)$	62
Figure. III.8 Erreur sur la décomposition EMD du signal $x_2(t)$	63
Figure. III.9 Signal test $x_3(t)$	65
Figure. III.10 Décomposition EMD du signal $x_3(t)$ constitué de deux fréquences très voisines.....	66
Figure. III.11a a : signal test $x_4(t)$, b : agrandissement du signal $x_4(t)$ de l'équation (3.27).....	67
Figure III.11b Décomposition EMD du signal $x_4(t)$	68
Fig. III.11c Décomposition par les ondelettes du signal $x_4(t)$	69
Fig. III.11d Erreur des estimations EMD/Ondelettes.....	69
Fig. III.11 Comparaison des principes de décomposition par l'EMD et par les ondelettes.....	69
Fig. III.12 (a) Le signal $x_5(t)$, (b) le signal $x_6(t)$, (c) le signal $x_7(t)$	70
Fig.III.13 La décomposition par l'EMD du signal $x_5(t)$ (équation III.28).....	71

CHAPITRE.IV.TESTS ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Figure IV.1 Synoptique du système d'acquisition.....	74
Figure IV.2 Capteur acoustique de signaux 03542-00 (Microphone de mesure).....	75
Figure IV. 3 Amplificateur basse fréquence 13625.93.....	77
Figure IV.4 Montage de conditionnement des signaux.....	78
Figure IV.5 Oscilloscope numérique GDS 1000.....	79
Figure IV.6 Carte STM32f 4xx Face affichage.....	80
Figure IV.7 Carte STM32f 4xx face connecteur.....	81
Figure IV.8 Appareillages utilisés.....	82
Figure IV.9 Signal acquis sur la chaine une.....	83
Figure IV.10 Signal acquis sur la chaine deux.....	83
Figure IV.11 Signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_y	84
Figure IV.12 Signaux des quatre IMF_s ainsi que le résidu SR_s	84
Figure IV.13 Signal de corrélation des deux signaux ($IMF_y -1$ et $IMF_s -1$).....	85
Figure IV.14 Spectre du signal CH1.....	86
Figure IV.15 Spectre du signal CH2.....	86

Figure IV.16 Signal acquis par la chaine une.	87
Figure IV.17 Signal acquis par la chaine deux.	87
Figure IV.18 Signaux des quatre IMF_y du signal ainsi que son résidu SR_y	88
Figure IV.19 signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_s	88
Figure IV.20 Signal de corrélation des deux signaux (IMF_{y-1} et IMF_{s-1}).	89
Figure IV.21 FFt du signal CH1.	90
Figure IV.22 FFt du signal CH2.	90
Figure IV.23 Signal acquis sur la chaine une.	91
Figure IV.24 Signal acquis sur la chaine deux.	91
Figure IV.25 Signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_y	92
Figure IV.26 signaux des quatre $IMFs$ ainsi que le résidu SR_s	92
Figure IV.27 signal de corrélation des deux signaux (IMF_{y-3} et IMF_{s-3}).	93
Figure IV.28 FFt du signal CH1.	94
Figure IV.29 FFt du signal CH2.	94
Figure IV.30 Signal acquis sur la chaine CH1.	95
Figure IV.31 Signal acquis sur la chaine CH2.	95
Figure IV.32 signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_y	96
Figure IV.33 signaux des quatre $IMFs$ ainsi que le résidu SR_s	96
Figure IV.34 signal de corrélation des deux signaux (IMF_{y-1} et IMF_{s-1}).	97
Figure IV.35 FFt du signal CH1.	98
Figure IV.36 FFt du signal CH2.	98
Figure IV.37 Signal temporel correspondant à deux fuites. CH1.	99
Figure IV.38 Signal temporel correspondant à deux fuites. CH1.	99
Figure IV.39 FFt du signal CH1.	100
Figure IV.40 FFT du signal CH2.	100

LISTE DES TABLEAUX :

CHAPITRE.I. GENERALITES SUR LES RESEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU

Tableau I. 1:Comparaison des méthodes alternatives en termes de couts et de particularités.....32

CHAPITRE.II. PROPAGATION DES ONDES SONORES

Tableau II.1 quelques exemples de vitesses du son dans des milieux matériels.....42

CHAPITRE.III. LA METHODE EMD

Tableau III.1. Pseudo-code de l'EMD.55

LISETE DES ABRÉVIATIONS

A.E.P : Aliments En Eau Potable.

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 $x(t)$.

N_0 : Nombre de passage à zéro.

N_1 : 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 .

$\omega(t)$: Pulsation

$f(t)$: Fréquence

$\theta(t)$: Phase

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

ϵ : indique le seuil prédéfinie, c'est un critère de condition de la boucle indiquée 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^{eme} 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 l'ieme itération

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le transport ou la distribution de fluides (liquide ou gaz) est devenu dans les dernières décennies 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 à cela les risques sur la santé publique qu'engendre la pénétration des contaminants dans les réseaux des 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 de 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 leurs 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. 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 déterminés 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 tamisage. 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.

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 stationnaires 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 d'autocorrélation aux deux premières IMFs nous paraît indispensable pour la détermination de l'endroit exacte de la fuite. Les performances obtenues jugeront le choix de la méthode proposée.

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 réseaux de distributions d'eau et les différentes techniques utilisées dans ce domaine, suivi d'un panorama des différents détecteurs de fuites actuellement utilisés. Le deuxième chapitre est dédié aux propagations des ondes sonores en éclaircissant la dépendance de la vitesse de propagation avec la température et la nature du milieu où ces ondes se propagent . Dans le troisième chapitre nous présentons une étude détaillée de cette nouvelle technique. En appliquant cette dernière sur des signaux typiques émergés dans le bruit environnant. Enfin le quatrième chapitre est consacré pour l'application de cette technique sur des signaux de fuite réels acquis sur un canal prototype hybride dans le laboratoire. Les résultats obtenus vont être analysés pour voir les performances de la méthode employée [1], [8].

CHAPITRE.I
GENERALITES
SUR LES RESEAUX
DE DISTRIBUTION
D'EAU

I.1 INTRODUCTION

Pour les responsables des réseaux de distributions. L'amélioration du rendement d'un réseau a toujours représenté un souci majeur.

Les réseaux de distribution en eau constituent l'ensemble des canalisations interconnectées entre elles, et qui font suite à la bêche principale. Ils sont utilisés pour permettre le transport et la distribution en eau aux différents consommateurs. Cependant une forte proportion d'eau se perd à cause des fuites durant le transport entre les usines de traitement et les différents points de consommation.

D'après une enquête réalisée en 1991 par l'AIDE (Association Internationale des Distribution d'Eau), la qualité d'eau perdue transportée par ces réseaux, se situerait entre 20 et 30 % de la production totale. Ces faibles rendements sont dus principalement aux fuites, dont les conséquences peuvent être graves. C'est la raison pour laquelle les exploitants ont été poussés à installer différents moyens permettant de détecter les fuites dans des meilleurs délais.

Dans ce chapitre nous présentons quelques généralités sur les réseaux de distribution d'eau. Ainsi que les différentes canalisations d'eau potable utilisées à cet effet. Les méthodes et techniques utilisées pour la localisation de fuite vont être éclaircies. Ces dernières vont être suivies par une étude détaillée sur les différentes techniques de détection et quelques détecteurs de fuites d'eau les plus connues.

I.2 DÉFINITION

Les réseaux de distribution en eau constituent l'ensemble des canalisations interconnectées entre elles qui doivent être entièrement étanches. Les matériaux de construction utilisés ne doivent pas altérer la qualité de l'eau pour cela on utilise de la fonte, de l'acier galvanisé, PVS, du ciment,...etc. [1].

Une canalisation (ou conduite) ne doit donner, ni odeur désagréable, ni couleur à l'eau.

La pose de canalisations exige l'observation de certaines règles en général :

- On doit suivre le profil du terrain la tranchée doit être de 50 à 60 Cm de profondeur (protection contre les dommages dus à la circulation et aux intempéries).
- La vitesse de l'eau dans les canalisations doit être normalement : 1m / seconde, et jamais inférieure à 0.60m/seconde afin d'éviter le dépôt de boue.

- La pression dans le réseau doit être suffisante.

Chaque maison doit être branchée sur la conduite de l'eau. Dans la mesure du possible, il faut prévoir des bornes fontaines (une pour 150 à 200 habitants). La distance entre deux bornes fonctionnes ne doit pas dépasser 300 mètres.

Du réservoir de stockage sort une conduite principale de gros diamètre. Celle-ci, en se prolongeant le long des rues de l'agglomération forme un ensemble de conduites maîtresses. Sur chacune de ces dernières, sont branchées des conduites de diamètres moindres dites conduites secondaires, tertiaires,... etc.

L'ensemble de toutes ces différentes canalisations avec l'ensemble des équipements qui les accompagnent forment le réseau de distribution. C'est l'infrastructure la plus importante du réseau global, car il s'étend sur toute la surface de l'agglomération. En général l'Alimentation en eau potable d'une agglomération quelconque comporte les éléments suivants:

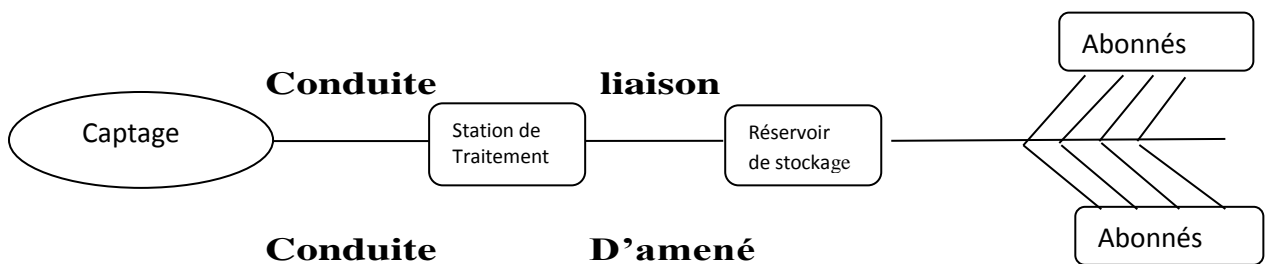


Figure I.1 Réseau de distribution

Les abonnés sont alimentés par un réseau de distribution qui est desservi par un réservoir de stockage dont la côte radier est choisie de façon à ce que les pressions nécessaires à l'alimentation des abonnés soit assurées [2], [3].

I.3 INSTALLATIONS

I.3.1 Captage ou prise

Il permet de recueillir l'eau naturelle, cette eau peut être d'origine superficielle ou bien Souterraine.

I.3.2 Captage des eaux surfaciques

❖ Captage en rivière

La prise doit être effectuée en amont des agglomérations pour éviter la prise des eaux polluées par les habitants.

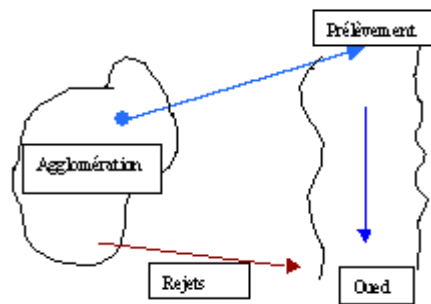


Figure I.2 Captage en rivière

❖ Prélèvement à l'amont de la ville

La prise peut être effectuée dans le fond du lit de la rivière surtout lorsqu'on est en régime torrentiel (forte pente, grandes vitesses) et lorsque le transport solide ne contient pas de matériaux fins, qui risquent de colmater la crépine [2].

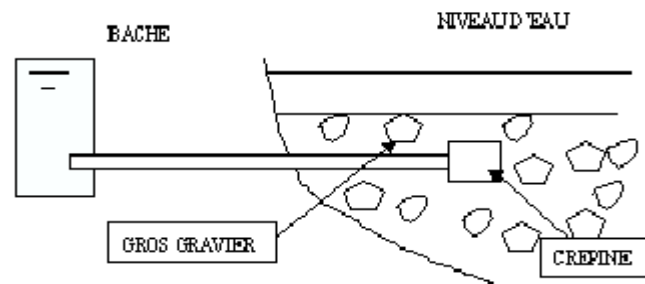


Figure I.3. Prélèvement à l'amont de la ville

Les travaux de réalisation de la prise consistent à draguer le fond de la rivière, puis à remplir les alentours de la crépine de prise par des gros graviers.

On peut aussi procéder à la prise d'eau au milieu de la rivière et là on est obligé d'utiliser une estacade pour éviter la détérioration de la prise.

❖ Captage à partir d'un barrage (ou lac)

On fait recours à la prise à partir d'un barrage lorsque les débits captés deviennent importants. La prise doit se faire à une profondeur où l'eau est de bonne qualité et à une température ne dépassant pas 15°C, car les eaux tièdes favorisent le développement des microbes.

I.3.3 Captage des eaux souterraines

L'accès à la nappe peut s'effectuer comme suit :

Verticalement par des puits.

Horizontalement par des drains.

Par combinaison des 2 procédés en utilisant des puits à drains rayonnants.

❖ Puits & drains horizontaux

Le corps du puits est constitué de buses captâtes perforées ou barbacanes dirigées du bas vers le haut à fin d'éviter les rentrées de sable dans le puits. L'ouverture du puits doit permettre sa protection contre la pollution d'origine superficielle. Lorsque la nappe est peu profonde et peu épaisse, on utilise les drains horizontaux, et lorsque la nappe est très profonde on fait recours à des forages profonds.

❖ Captage des sources

Il n'existe pas de modèle standard de captage des sources. Car chaque source possède ses caractéristiques propres à elle. Néanmoins, le captage d'une source doit comporter les aménagements suivants :

Une chambre de captage permettant de collecter les filets d'eau. Elle doit être en maçonnerie dans le cas d'un captage sur terrains rocheux, et elle doit être constituée d'une cavité propre et isolée par un lit d'argile dans le cas d'un captage sur terrain meuble.

Un tuyau en PVC pour transporter l'eau de la chambre de captage vers l'installation de stockage de l'eau et de distribution.

Traitement des eaux :

L'eau captée nécessite généralement un traitement pour la rendre potable à la consommation.

Le traitement s'effectue généralement dans le cas des eaux de surface. Ce traitement est fait de façon à éliminer les bactéries de l'eau et à lui donner dans certains cas un goût meilleur... [2].

I.4 CONDUITE D'AMENEE

C'est la conduite qui transporte l'eau entre la station de traitement et le réservoir de stockage. Ce transport peut s'effectuer par :

Gravité : si le niveau de la station de traitement (ou de captage) est supérieur à celui du réservoir (conduite d'adduction).

Refolement : si le niveau de la station de traitement (ou de captage) est inférieur au niveau du réservoir (conduite de refolement).

I.5 RESERVOIR DE STOCKAGE

Les réservoirs de stockage ont pour rôle essentiel de :

Se substituer aux adductions et aux ouvrages de captage en cas de pannes ou d'interruption au niveau de la production (**fonction de réserve**).

Faire face aux modulations de la demande par rapport aux débits provenant de l'ouvrage de captage (**fonction de démodulation**).

Assurer la **mise en pression** de réseau de desserte, bornes fontaines, et/ou du réseau de distribution (cas de branchements particuliers).

Assurer la régulation du fonctionnement du groupe de pompage équipant l'ouvrage de captage, cas d'une adduction de refolement (**fonction de régulation**). Permettre une sécurité en matière de **protection contre l'incendie** (cas des centres et agglomérations urbaines, équipés de bouches d'incendie) [3].

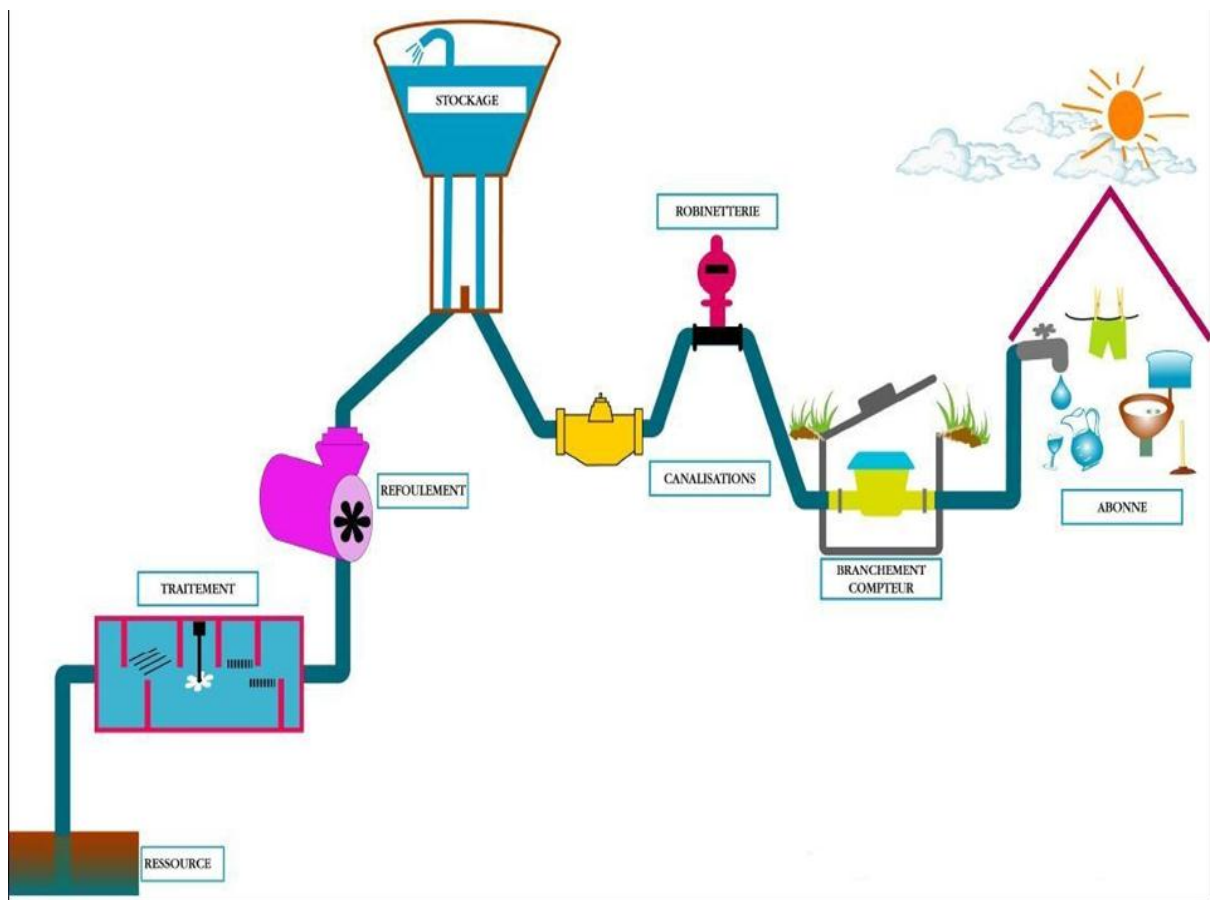


Figure I.4 Cycle de production et distribution de l'eau potable.

I.6 RESEAU DE DISTRIBUTION

Il est constitué par une série de conduites desservant les différents consommateurs l'écoulement de l'eau dans ces conduites se fait le plus souvent par gravité.

Le système doit assurer la fonction " Transport " du point d'eau mobilisée jusqu'aux points de distribution, ainsi que la fonction " mise en pression " et " stockage ", et ce avec une fiabilité suffisante.

I.7 CLASSEMENT DES RESEAUX

Les réseaux de distribution peuvent être classés comme suit :

Les réseaux ramifiés.

Les réseaux maillés.

Les réseaux à plusieurs alimentations (eau potable, eau industrielle,...). Ces différents types de réseaux peuvent être : étagés. A plusieurs entrées (alimentations).

❖ **Le réseau ramifié** : dans lequel les conditions de desserte ne comportent aucune alimentation de retour, présente l'avantage d'être économique, mais il manque de sécurité et de souplesse en cas de rupture. Un accident sur la conduite principale prive les abonnés en aval.



Figure I.5. Le réseau ramifié

❖ **Le réseau maillé** : permet, au contraire, une alimentation en retour et donc il évite l'inconvénient du réseau ramifié. Une simple manœuvre de vanne permet d'isoler le tronçon endommagé. Il est bien entendu plus coûteux d'établissement, mais en raison de la sécurité qu'il procure, il doit être préféré au réseau ramifié [2].

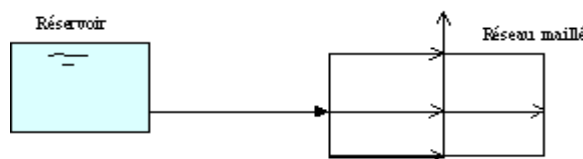


Figure I.6. Le réseau maillé

Dans le cas d'une agglomération présentant des différences de niveau topographiques importantes, une distribution érigée devient parfois nécessaire pour éviter des pressions trop fortes sur le réseau. On peut donc constituer des réseaux indépendants pouvant assurer des pressions limitées aux environs de 60 m environ.

❖ **Les réseaux à alimentation distincte** : distribuent l'un l'eau potable destinée à tous les besoins domestiques et l'autre l'eau non potable réservée aux usages industriels et au lavage et arrosage des rues et des plantations.

Ces réseaux ne se justifient que dans les installations extrêmement importantes. (Paris dispose d'un tel réseau).

1.8 USAGES DE L'EAU

On distingue 4 catégories de consommation de l'eau :

❖ **La consommation domestique**

C'est la consommation en eau de la population branchée au réseau ou non branchée mais qui profite des bornes fontaines pour s'alimenter en eau. à cela s'ajoute la consommation des petites industries (cafés, stations d'essence,...)

❖ **La consommation industrielle**

Elle correspond aux besoins en eau des établissements industriels implantés dans la ville.

❖ **La consommation touristique**

La consommation touristique englobe la consommation de toutes les infrastructures touristiques telles que les hôtels classés, les complexes touristiques, Les villages de vacances et les campings [2].

❖ **La consommation administrative et communale**

C'est la consommation des bureaux, casernes, écoles, souks, abattoirs.

1.9 PRINCIPE D'INSTALLATION DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION

❖ **Pose de canalisation**

Les conduites de distribution sont, généralement, enterrées sous le trottoir (de 1 à 1,5 m de profondeur), pour éviter les conséquences des vibrations dues au trafic routier.

Exceptionnellement, pour les grands diamètres ou pour les petites rues, on peut poser les canalisations au milieu de la chaussée. En vue d'une pose correcte en terre des canalisations

en ville, il faut garder une distance minimale, entre 0,20 et 0,50 m, des autres canalisations éventuelles. Il faut aussi garder une distance minimale de 1,50m des arbres [3].

❖ Les branchements

Les branchements constituent le raccordement des usagers au réseau de distribution. C'est la liaison entre le réseau public et le domaine privé. Les principaux éléments constitutifs du branchement sont [3]:

- le regard de compteur placé en général en limite du domaine public et privé.
- la bouche à clé pour manœuvrer le robinet de prise depuis le domaine public et ainsi ouvrir ou fermer le branchement.
- Le tuyau de branchement généralement en polyéthylène ou en PVC.
- Le collier et le robinet de prise qui permettent de réaliser le piquage sur la conduite principale sans arrêter l'eau.

❖ L'assemblage

L'assemblage il est réalisé :

- À l'aide de joints caoutchouc (fonte, PVC).
- Par soudure (acier).
- Par électro soudage (polyéthylène).

Outre les tuyaux droits, on utilise des pièces de raccord permettant d'adapter la conduite au tracé prévu

- **Les coudes** (Changement de direction).
- **Les té**s (Raccordement d'une conduite sur une autre).
- **Les cônes** (Diminution de diamètre de réseau).

❖ Principe du trace du réseau

Le tracé du réseau exige un certain nombre des conditions qu'il faut respecter.

- Tout d'abord, il faut repérer les endroits où les besoins sont importants, c'est-à-dire les quartiers ayant une forte densité de population.
- Déterminer l'itinéraire (sens) principal pour assurer la distribution aux consommateurs.
- Tracer les conduites principales, parallèlement entre elles et doivent être situées sur les côtes géodésiques les plus élevées pour bien répartir l'eau.
- Les conduites principales doivent être reliées entre elles, par des conduites secondaires pour former des boucles à fin d'alimenter l'intérieur des quartiers [4], [5].

❖ Choix du type des matériaux

Pour choisir convenablement le type de matériaux, on doit tenir compte des paramètres suivants :

- Le diamètre.
- La pression de service a supportée par le matériau.
- Les conditions de pose.
- Le prix et la durée de vie de conduite.
- La disponibilité sur le marché.

I.10 EQUIPEMENT DU RÉSEAU DE DISTRIBUTION

I.10.1 Nature de la canalisation

Le réseau constitué de tuyaux en acier, comme exemple présente de multiples avantages à savoir

- Ils supportent des pressions élevées.
- Une résistance aux contraintes (choc, écrasement, déplacement du terrain) est supérieure à celle des tuyaux en matière plastiques et en fonte.
- Ils peuvent être adaptés à toutes les conditions de service si dures soient – elles.
- Ils offrent une bonne flexibilité.
- Disponible sur le marché.

I.10.2 Les accessoires de réseau

❖ Les vannes

Elles permettent de maîtriser les écoulements dans le réseau, de mieux gérer celui-ci. Il existe plusieurs types de vannes qui satisfont à des besoins variés :

Les vannes d'isolement : On distingue deux types:

- a) les robinets à papillon : Les robinets à papillon Appareils de réglage de débit et de sectionnement utilisés pour les gros diamètres (> 300 mm).
- b) Les robinets-vannes : Les robinets –vannes appareils de sectionnement pour isoler un tronçon de Conduite de petit diamètre.
 - Les vannes de réduction de pression.
 - Les vannes à clapets de non-retour.

❖ Les ventouses

Elles sont placées sur les points les plus hauts. Leur rôle est chasser l'air entraîné par l'eau venant s'accumuler en pointes et qui a tendance à perturber l'écoulement ou à détériorer la conduite.

Trois types de ventouses sont utilisés : ventouses pour petites quantités d'air, ventouses pour grandes quantités d'air et ventouses universelles.

❖ Les joints

Ils ont pour fonction d'assurer l'étanchéité des jointures des tuyaux et faire face aux sollicitations mécaniques et chimiques. Pour cela, ils doivent épouser parfaitement la loge qui leur est destinée.

Il existe trois principaux types de joints:

❖ Mécaniques, emboîtement, a bride

Les joints mécaniques ou à emboîtement sont utilisés pour relier les conduites enfouies dans le sol, alors que les joints à bride sont utilisés pour raccorder des tronçons à l'intérieur des constructions (station de pompage, station de traitement,... etc.).

❖ Les compteurs

Les compteurs servent à mesurer le volume d'eau s'écoulant à travers une conduite ou à contrôler le débit d'un branchement particulier.

I.11 PROBLEMES RENCONTRÉS DANS UN RÉSEAU D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (A.E.P)

Ces différents problèmes illustrés par la figure (I.3) ci-dessus causent le mécontentement des consommateurs qui réagissent en déposant des plaintes sur les différents services (quantité insuffisante, qualité médiocre, interruption de l'alimentation, etc.) au niveau des services concernés [6].

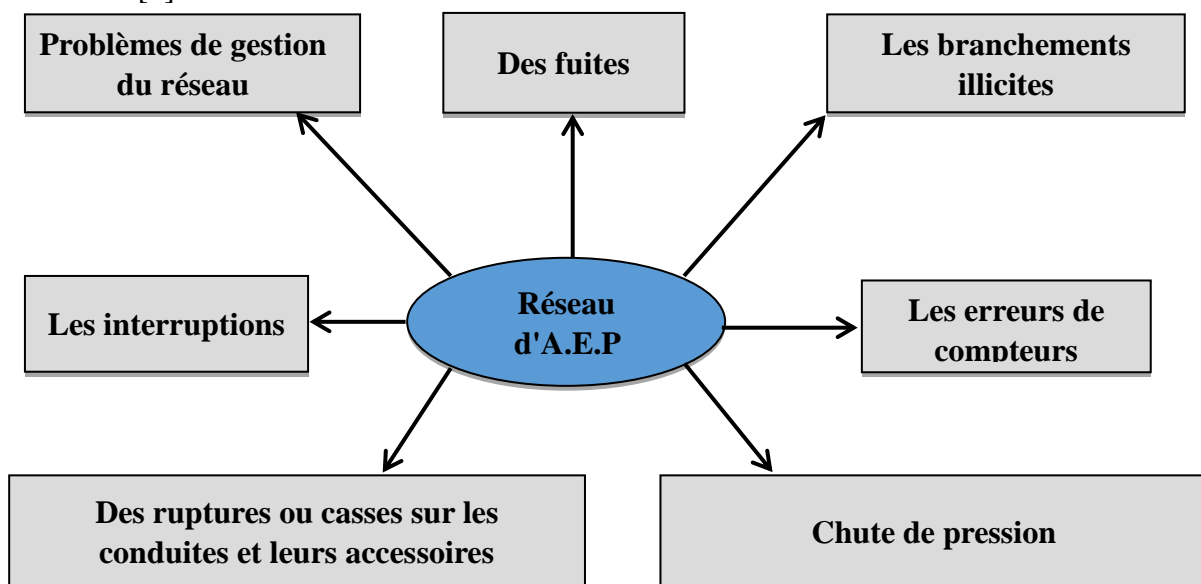


Figure I.7 Problèmes rencontrés dans un réseau d'A.E.P

- Problèmes induisant les ruptures et les casses.
- Problèmes induisant les fuites.
- Problèmes induisant la dégradation de la qualité de l'eau

I.12 LA MAINTENANCE DES RÉSEAUX

Pour garantir un service de qualité soucieux d'une utilisation raisonnée de la ressource et des dépenses publiques il faut donc assurer le contrôle des accessoires de réseau, les appareils de robinetterie – fontainerie placés sur le réseau demandent un entretien périodique destiné à vérifier leur fonctionnement.

La fréquence des opérations de maintenance dépend de chaque appareil de ses conditions d'utilisation ainsi que de la nature de l'eau [3], [8].

I.13 LES PERTES D'EAU

Selon une récente étude faite par IWA (International Water association), les pertes d'eau peuvent atteindre de 20 jusqu'à 50% de l'eau produit : il peut s'agir de fuites (défaut d'étanchéité du réseau) mais aussi de réservoirs qui débordent, de vannes de vidange mal fermées, détournement d'eau...etc.

Le suivi des comptages pour contrôler les débits qui transitent dans le réseau, l'installation d'appareils de comptage aux endroits stratégiques est indispensable. Le suivi de ces instruments de mesure permet à l'exploitant de détecter rapidement toute anomalie sur le réseau.

La réparation des fuites après avoir localisé précisément la fuite, l'exploitant réalise la réparation des éléments défectueux : conduites, branchements, appareils de robinetterie. Ce sont en général des opérations délicates car réalisées souvent dans des conditions difficiles. Il faut donc veiller à la fois à garantir la pérennité de réparation et éviter les risques de contamination de l'eau potable lors de l'intervention.

I.13.1 Définition d'une fuite

L'écoulement de fluide sous pression à travers un orifice est appelée une fuite. Elle engendre des vibrations mécaniques et acoustiques due aux fluctuations de la pression du fluide dans la conduite. Ces vibrations ont une fréquence variable de 100 à 3500 Hz et se propage avec une atténuation plus ou moins rapide le long de la conduite et dans 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).

Elles présentent à la fois des pertes conséquentes pour l'économie nationale, et un danger néfaste sur la santé publique. Ces pertes économiques se concrétisent en partie au niveau du coût de consommation, du traitement et du transport. L'endommagement du réseau (érosion de l'assise des conduites, rupture de canalisation), des routes ou des bâtiments constituent un coût économique supplémentaire. Les effets sur la santé publique sont liés aux contaminants pouvant s'infiltrer dans les conduites par différents endroits où l'eau s'échappe, lorsque la pression baisse dans le réservoir. Ces contraintes économiques, portant sur des questions de santé publique et d'intérêt stratégique, incitent les exploitants de réseau à mettre sur pied des programmes de ces fuites [8], [9].

I.13.2 Cause des fuites

D'une façon générale, pour les réseaux de distribution d'eau, les fuites sont la source essentielle des pertes en eau. Ces fuites proviennent essentiellement d'un défaut d'étanchéité des canalisations et des divers accessoires. Les origines de ces fuites sont diverses :

Conditions initiales de pose, choix des matériaux, technique de raccordement, soin apporté aux travaux [8], [10].

Nature du terrain : la fonte ductile non protégée est sensible à un sol corrosif.

Qualité du remblai : le remblai est à exécuter avec soin lorsqu'on utilise les conduites en PVC.

Qualité de l'eau : le dépôt de fer et de manganèse accélère la corrosion interne.

I.13.3 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'égal étant le mètre cube par seconde (m^3/s)).

I.13.4 Détection des fuites

Dans les zones où l'on sait que des fuites importantes se produisent, celles-ci sont généralement repérées au moyen d'appareils acoustiques. Ces derniers détectent les vibrations ou les bruits produits par l'eau qui s'échappe des canalisations sous pression. Ces bruits se propagent le long de la conduite sur de grandes distances (selon le type et la taille de la conduite) et dans le sol environnant.

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 [8], [11].

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.

I.14 APPAREILS DE DÉTECTION

Il s'agit des tiges d'écoute, des aquaphones et des géophones, ou microphones au sol (figure I.1), ces 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 [11].



Figure I.8 Appareils d'auscultation typiques

I.15 TECHNIQUE ACOUSTIQUE

I.15.1 Corrélation acoustique

I.15.1.1 Le principe de la corrélation acoustique

Le corrélateur utilise comme principe de fonctionnement l'analyse du bruit généré par une fuite. Il détermine alors la différence des temps de propagation de ce bruit au moyen de deux capteurs. Ceux-ci sont positionnés sur la canalisation inspectée de part et d'autre de la fuite supposée.

En déterminant la vitesse de propagation du bruit pour la canalisation testée et en connaissant la distance entre capteurs, la corrélation indique précisément la position de fuite d'après la formule suivante :

$$d=(D-V*t)/2 \quad (I.1)$$

d = Distance de la fuite par rapport à l'un des capteurs.

D = Distance entre les deux capteurs.

V = Vitesse de propagation du bruit de la canalisation.

t = Différence de temps de propagation du bruit de fuite jusqu'aux capteurs

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.

I.15.2. 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. 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 immergent 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 [9].

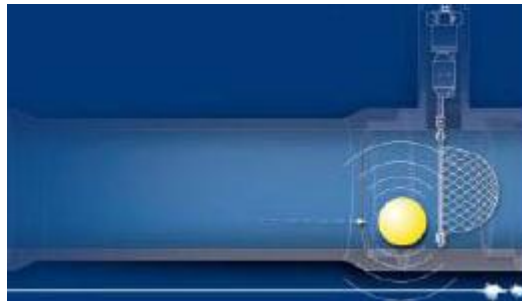


Figure I.9. Schéma de la détection par immersion

I.15.3 Détection par enregistrement

La détection acoustique manuelle à l'aide d'appareils d'écoute ou de corrélateurs de bruits de fuites souffre de plusieurs autres inconvénients. Ce type de détection demande beaucoup de main-d'œuvre et peut devenir inefficace dans la détection de routine, notamment sur les grands réseaux de distribution.

La détection acoustique manuelle demande par ailleurs une formation approfondie et des compétences particulières périodiques. 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 [8], [11].

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. 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.

Les adeptes des enregistreurs acoustiques allèguent souvent leur supériorité en termes de performance et de rendement sur les méthodes de détection acoustique traditionnelles. Les essais en question portaient sur une comparaison directe des enregistreurs acoustiques et des appareils de détection par écoute. La détection acoustique automatique à l'aide d'enregistreurs rapprochés reste néanmoins une alternative intéressante, pratique et efficace à la détection acoustique manuelle dans les centres villes et autres lieux très fréquentés et fortement pollués par les bruits parasites diurnes.



Figure I.10. Schéma de la détection par immersion

I.15.4 Détection d'émission fugitive par nez acoustique

La société (electronic sensor technology) a développé une instrumentation portable, modèle 4100 saw/ gc (surface acoustique wave) constituée d'une chromatographie gazeuse ,

d'un capteur d'onde acoustique de surface et d'une interface programmable, l'ensemble étant agréé par l'EPA (Environmental Protection Agency) pour la recherche, l'analyse et la quantification des composés volatiles. La durée d'analyse serait d'une dizaine de secondes.

[12].analyse au moyen du modèle 4100 saw/gc est constituée de deux séquences (acquisition et analyses).

Étape 1 : acquisition d'air contenant les vapeurs des composés organiques volatiles (voc) est pompé à travers un capillaire de faible section. Les émissions se trouvent ensuite piégées et concentrées dans la vanne. Pendant le prélèvement, de l'hélium circule à travers la colonne de chromatographie gazeuse jusqu'au capteur zNose. La durée du pompage est contrôlée de manière à obtenir des acquisitions reproductibles.

Étape 2 : Analyses Dans cette séquence, l'hélium circule à travers la colonne de piégeage avant de circuler dans la colonne de chromatographie gazeuse jusqu'au capteur zNose. La température initiale de la colonne de chromatographie est maintenue à 40 °c.

Immédiatement après avoir démarré la phase d'analyses, un courant de forte intensité est envoyé dans la colonne de piégeage pendant 10 ms, entraînant son chauffage rapide et la vaporisation des produits piégés. Les vapeurs sont ensuite entraînées par l'hélium sur la colonne de chromatographie gazeuse où elles sont de nouveau piégées par la basse température de la colonne. La température augmente ensuite de façon linéaire pour « dés adsorber » les différentes espèces chimiques qui sont alors entraînées à travers la colonne jusqu'au capteur zNose.

Le capteur zNose est constitué d'un élément piézo-électrique (500 MHz) relié à un élément thermoélectrique permettant le chauffage et le refroidissement du capteur. En sortie de colonne, les espèces chimiques sont absorbées puis réabsorbées de la surface du capteur. Cela entraîne une variation de la fréquence de vibration du capteur en proportion avec la quantité d'espèces chimiques adsorbées. La dérivée de la fréquence donne une valeur assimilée au temps de rétention du produit.

I.15.5 Comparaison des différentes méthodes acoustiques

La figure (I.11) présente sur un même schéma les sensibilités en détection de fuite des différentes méthodes depuis la bulle de savon jusqu'au spectromètre de masse à hélium, en passant par les techniques acoustiques [12].

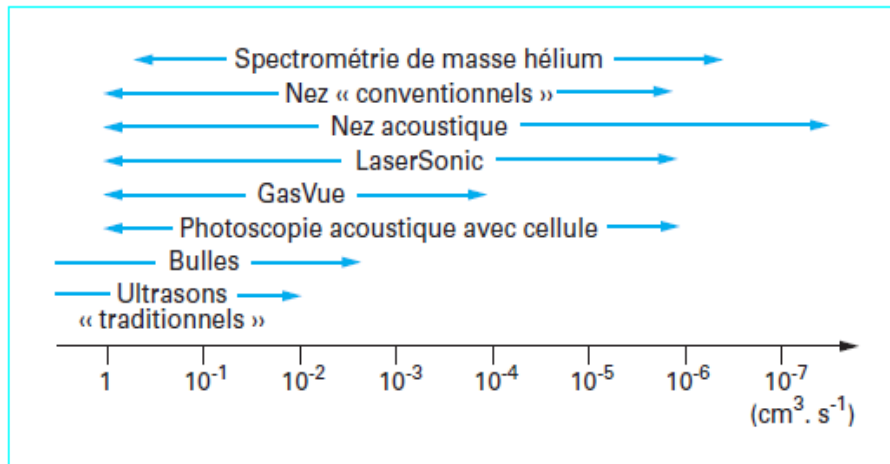


Figure I.11. Domaines de sensibilité des principales techniques de détection de fuite.

Cette figure montre clairement que les méthodes acoustiques les plus connus ne à même d’être une alternative à la spectrométrie de masse à hélium pour la recherche des émissions fugitives sont le nez acoustique ou les méthodes phot acoustiques.

Les principales limitations du nez acoustique ou de l’instrumentation photo acoustique avec cellule sont que ces méthodes sont limitées quand les mesures sont faites sous le vent et qu’ils ne permettent pas de localiser les fuites, tableau (I.1).

Tableau I. 1: Comparaison des méthodes alternatives en termes de couts et de particularités

Méthodes	particularités			Coût D’achat En dollars
	Difficultés pour les mesures sous le vent	Localisation des fuites	Utilisable sur site	
Nez acoustique	Oui	Non	Oui	De 30 à 52.5
Photo- acoustique avec cellule	Oui	Non	Oui	30
Laser sonic	Non	Oui	Non	50

Les méthodes photo acoustiques sans cellule (procédé laser) ne présentent pas ces limitations. En revanche, leur prix est beaucoup plus élevé. Par ailleurs, l'instrumentation Laser Sonique ne trouve d'application qu'en qualification de matériels.

I.16. LES TECHNIQUES NON ACOUSTIQUES

Parmi les techniques non acoustiques utilisées pour la détection des fuites, on cite :

I.16.1. 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 [8], [11].

❖ Application

Le tracer trouve ses forces là où d'autres méthodes de détection de fuite ne fonctionnent pas du fait de leur sensibilité à d'autres gaz. Une telle sélectivité est obligatoire sur des sites utilisant ou produisant des substances extrêmement toxiques. Ces sites ont toujours une politique « d'émission zéro ». Dans ces cas une grande sensibilité ainsi qu'une bonne sélectivité sont exigées [30].

❖ Technologie du capteur

Une cellule électrochimique peut être très sélective et avoir une grande sensibilité en même temps en faisant le bon choix des matériaux utilisés pour la conception des électrodes et de l'électrolyte. Ces capteurs ne répondent pas aux substances moins dangereuses qui sont présentes sur les sites comme des hydrocarbures, le monoxyde de carbone, l'hydrogène ou l'humidité. Une limite de détection pour le phosgène au niveau de 2 n'est pas un problème pour cette technologie [11].

L'inconvénient des cellules électrochimiques par rapport aux méthodes physiques a longtemps été la lenteur de leur temps de réponse. L'électrode doit transformer les ions pour donner une réponse, et cela prend un certain temps.

Des tests dans les laboratoires ont montré que la réaction électrochimique qui a lieu au niveau de l'électrode peut être accélérée en augmentant la quantité de réactif au niveau de la surface de la cellule par rapport au gaz acheminé par diffusion. Suite à cette découverte, le développement d'un instrument muni d'une pompe et d'une chambre de mesure spécifique avec un débit optimisé a été l'étape la plus courte. Avec ces caractéristiques le temps de

réponse de l'instrument est quasiment aussi court que celui obtenu avec des méthodes physiques de détection.

❖ Les gaz détectables avec le traceur

Le traceur est disponible pour les gaz suivant:

ClO₂, COCl₂, Cl₂, HCl, HCN, H₂S et NO₂.

Le TRACER est capable de mesurer des traces de gaz toxiques. La limite de détection se situe au niveau de quelques, et dépend de la substance toxique à analyser. Puisque un détecteur de fuite peut être exposé à des concentrations très importantes, il ne doit pas être utilisé comme un détecteur personnel de sécurité. Afin de prévenir une telle utilisation, l'appareil n'affiche pas de concentration, mais seulement une valeur de 0 à 100% ou un bar graph [8], [11].

I.16.2. 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 [11].

I.16.3. Le géo radar

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.

I.16.4. 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.

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 [13].

I.17. LES DETECTEURS DES FUTES ACTUELLES

La majorité des détecteurs actuels se basent dans leurs principes de fonctionnement sur la méthode de corrélation acoustique. Parmi ces détecteurs on peut citer :

- détecteur **AQUAPHON-F** (à base d'écoute).
- détecteur **DFJUNIOR**.
- détecteur **SeCorr** (utilisant la technique de corrélation acoustique entre deux signaux provenant de deux capteurs placés de part et d'autre de la fuite).
- détecteur **PERMALOG**.
- détecteur **DF3000G**.
- détecteur **L'hydro lux HL5**.
- détecteur **DETEK-100**.
- détecteur **VARIOTEC 460 Tracergas** (non acoustique).

CONCLUSION

Dans ce chapitre, après avoir décrit les réseaux de distribution, les fuites et leurs causes principales. Ainsi une brève description sur l'ensemble des techniques existantes actuellement suivi d'un panorama des différents détecteurs utilisés. Nous avons montré qu'il existe plusieurs méthodes de détection. La plus utilisée est celle de la méthode acoustique. Cette dernière fera l'objet de notre travail. Avant de décrire la méthode un passage sur la propagation des ondes sonores fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE.II
PROPAGATION
DES ONDES
SONORES

II.1. INTRODUCTION

Le son est un phénomène familier dans notre vie quotidienne que l'on en oublie souvent la signification physique qui est loin d'être facile à comprendre. Du point de vue physique, un son est une énergie qui se propage sous forme de vibrations dans un milieu compressible (dans l'eau, dans l'air, dans les matériaux solides). Le traitement du son est la branche du traitement du signal qui s'applique aux signaux audio, dans le but notamment d'améliorer leur qualité, de les compresser ou d'extraire les informations utiles emmagasinées.

Le traitement du signal est la discipline qui développe et étudie les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation des signaux. Parmi les types d'opérations possibles sur ces signaux, on peut noter le filtrage, la compression de données, la numérisation, le codage, la quantification et la transmission de données.

L'acoustique est la science qui étudie les sons ou les phénomènes sonores généralement. La psychoacoustique combine l'acoustique avec la physiologie et la psychologie, pour déterminer la manière dont les sons sont perçus et interprétés par le cerveau.

Dans ce chapitre, nous présentons les notions de base de traitement du son.

II.2. DEFINITION DE SON

Le son est une onde produite par la vibration mécanique d'un support fluide ou solide et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant sous forme d'ondes longitudinales. Par extension physiologique, le son désigne la sensation auditive à laquelle cette vibration est susceptible de donner naissance. Lorsqu'on jette une pierre dans l'eau, on peut facilement observer le phénomène de propagation des ondes à la surface [35], [36]:



Figure II.1 : Propagation des ondes vibratoire sur la surface

Lors de la diffusion d'un son dans un concert, c'est l'air qui permet sa transmission jusqu'à nos oreilles. De même que l'exemple de l'eau illustrée ci-dessus, les molécules d'air (milieu matériel) transmettent l'énergie et sont donc un support pour le son [7], [35].

II.2.1. Emission, Propagation, Réception

Pour qu'un son soit émis, une énergie doit avant tout mettre en mouvement un corps pour produire une vibration. Ainsi, le muscle du larynx, la chute d'un objet sur le sol, ou la tension électrique dans un haut-parleur, provoqueront l'énergie nécessaire pour produire cette vibration. Ensuite, pour que ce son puisse se propager, il faut un milieu élastique favorable à la transmission de la vibration. En créant des surpressions ou des dépressions, l'air permet la propagation de l'onde. Les matériaux solides ont aussi cette capacité de transmettre le son. Dans le vide par contre, aucun son ne peut se propager, car il n'y a aucun de support. Enfin, pour être perçue, il doit y avoir un récepteur sensible. Chez l'homme, l'oreille possède une membrane (le tympan) capable de transmettre les informations de vibration en signaux nerveux jusqu'au cerveau, grâce au nerf auditif. De même, le microphone possède également une membrane permettant de transformer les déplacements de l'air en signaux électriques.

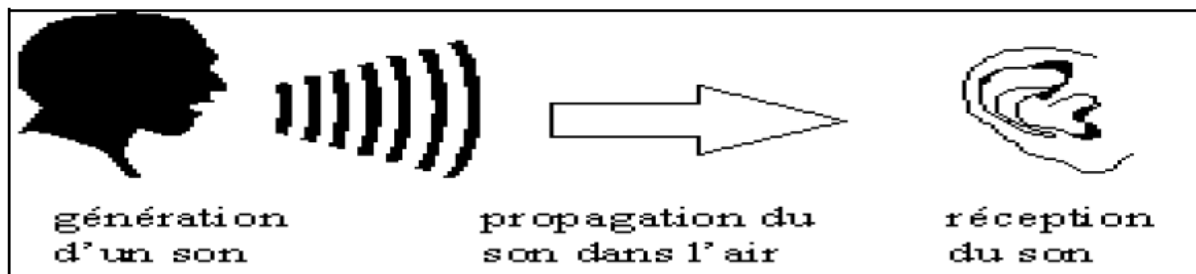


Figure 2.2 : Emission, propagation et réception du son

II.3. CARACTERISTIQUES DU SON

Comme tout phénomène vibratoire, le son peut être analysé comme un signal qui varie dans le temps. Les caractéristiques essentielles sont l'amplitude et la fréquence.

II.3.1. L'amplitude

La première caractéristique d'un son est son amplitude. Appelée aussi intensité ou volume sonore, c'est l'expression de la pression de l'air qui se mesure en décibels (dB). 0 dB correspond au minimum que l'oreille humaine puisse percevoir (seuil d'audibilité). Attention, une augmentation de 3db multiplie la puissance par deux !

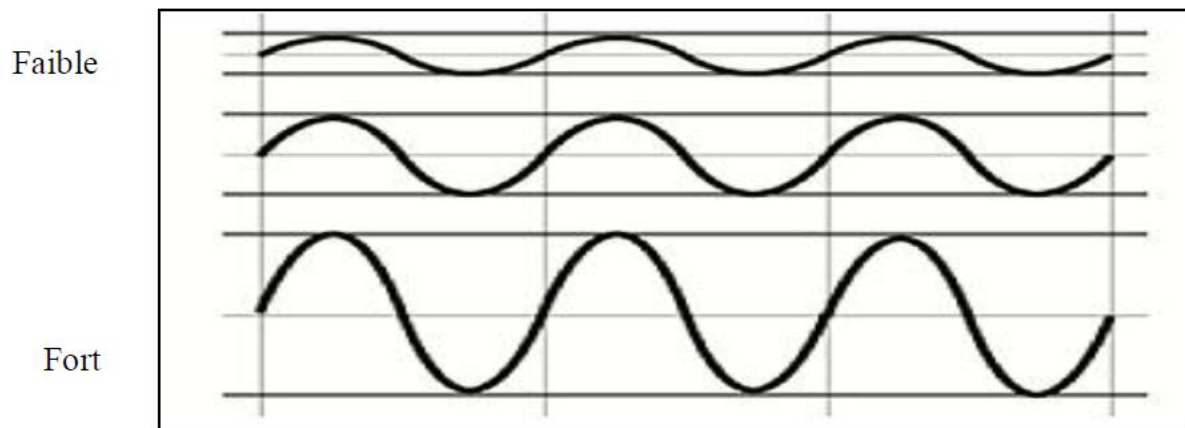


Figure II.3 Evolution de l'amplitude sonore dans le temps.

Exemple

- De 0 à 10 dB : Seuil d'audibilité, Désert
- De 30 à 40 dB : forêt

- De 60 à 70 dB : sonnerie de téléphone
- De 80 à 90 dB : tondeuse à gazon, klaxon de voiture
- 120 dB : seuil de la douleur, avion au décollage
- 180 dB : décollage de la fusée Ariane, lancement d'une roquette

II.3.2. Fréquence

La fréquence, exprimée en Hertz (Hz), est le nombre de répétition d'une période par seconde. Plus elle est élevée et plus le son paraîtra « aiguë », à l'inverse, il paraîtra « grave ». En musique, la fréquence définit donc la hauteur d'un son, soit, la note. (Ex: la note « LA » correspond à 440Hz, soit 440 vibration en uLa fréquence, exprimée en Hertz (Hz), est le nombre de répétition d'une période par seconde. Plus elle est élevée et plus le son paraîtra « aiguë », à l'inverse, il paraîtra « grave ». En musique, la fréquence définit donc la hauteur d'un son, soit, la note. (Ex: la note « LA » correspond à 440Hz, soit 440 vibration en une seconde) [35], [36].

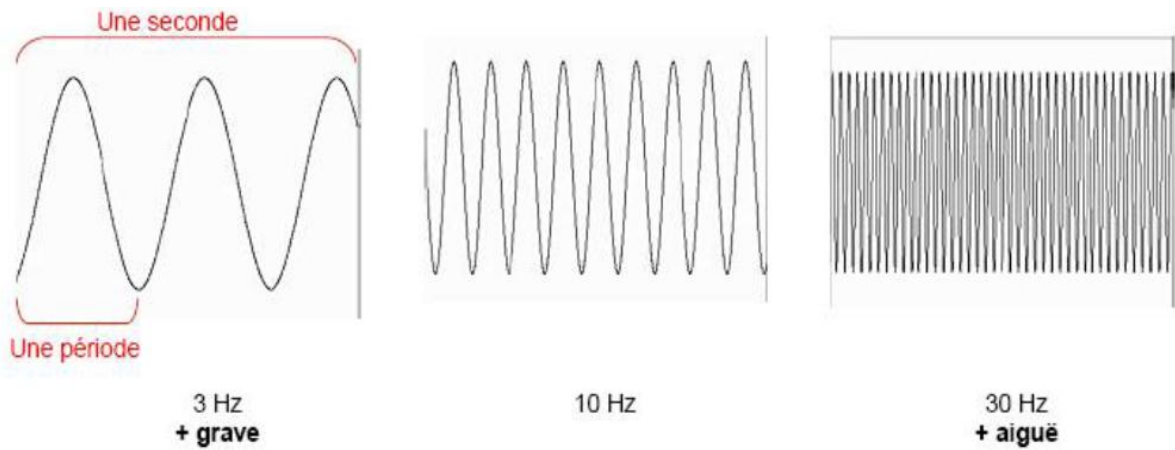


Figure II.4. Types de fréquences

II.4. CELERITE DU SON

II.4.1. Sons et ultrasons

Dans un milieu matériel homogène (ici l'air à température ambiante), les sons et ultrasons se propagent à vitesse constante identique, c'est-à-dire que cette célérité dépend de la nature du milieu et pas de la fréquence de l'onde sonore.

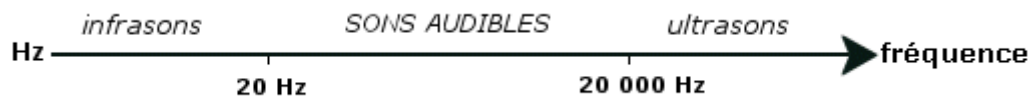


Figure II.5. Distribution des ondes sonores

II.4.2. Description de l'expérience

On relie un émetteur E d'ultrasons (pour éviter les nuisances des sons audibles) sur la voie A d'un oscilloscope et un récepteur R sur la voie B. L'émetteur et le récepteur sont placés l'un en face de l'autre à une distance d fixée par l'expérimentateur. Des salves d'ultrasons périodiques sont émises par l'émetteur et réceptionnées par le récepteur avec un décalage temporel visible à l'oscilloscope.

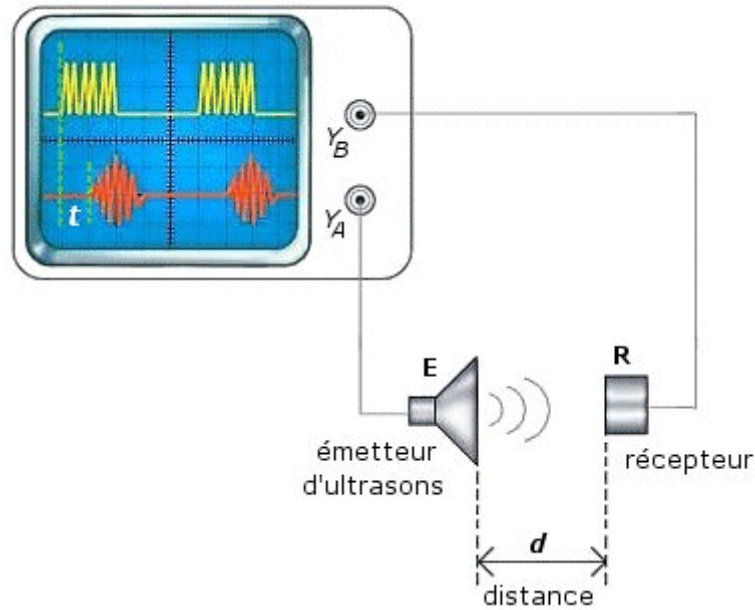


Figure II.6. Détermination de vitesse

Le décalage, c'est-à-dire la durée t de propagation de l'onde ultrasonore de E à R, est lu sur l'oscillogramme grâce au balayage, ce qui permet la détermination de la célérité du son :

$$v = \frac{d}{t} \quad (555)$$

La vitesse de propagation du son dépend de certaines propriétés physiques du milieu dans lequel il se propage :

- ❖ la pression,
- ❖ la chaleur
- ❖ la compressibilité.

Plus le milieu est élastique (moins il est rigide), plus la célérité de l'onde sera faible. Il en va de même si le milieu a une grande inertie. L'inertie d'un milieu ou d'un système représente la résistance que ce milieu ou ce système oppose lorsqu'on cherche à le mettre en mouvement.

Le tableau II.1 ci-dessous donne quelques exemples de vitesses du son dans des milieux matériels

Matériau	Air	Hélium	Hydrogène	Eau	Glycérine	Cuivre	Brique	Bois	Acier	Aluminium	Granit
Célérité(e n m.s ⁻¹)	340	970	1320	1500	2000	3600	3700	3800	5000	5100	6000

Tableau II-1 Exemples de vitesses

II.5. DE L'ANALOGIQUE AU NUMERIQUE

II.5.1. Le son analogique

Le son est un signal analogique continu. Lorsqu'on capte un son à partir d'un microphone, ce dernier transforme l'énergie mécanique (la pression de l'air exercée sur sa membrane), en une variation de tension électrique continue. Ce signal électrique dit « analogique » pourra ensuite être amplifié, et envoyé vers un haut-parleur dont la fonction est inverse: transformer à nouveau le signal électrique en une énergie mécanique (on peut observer le déplacement de la membrane d'un haut-parleur en marche).

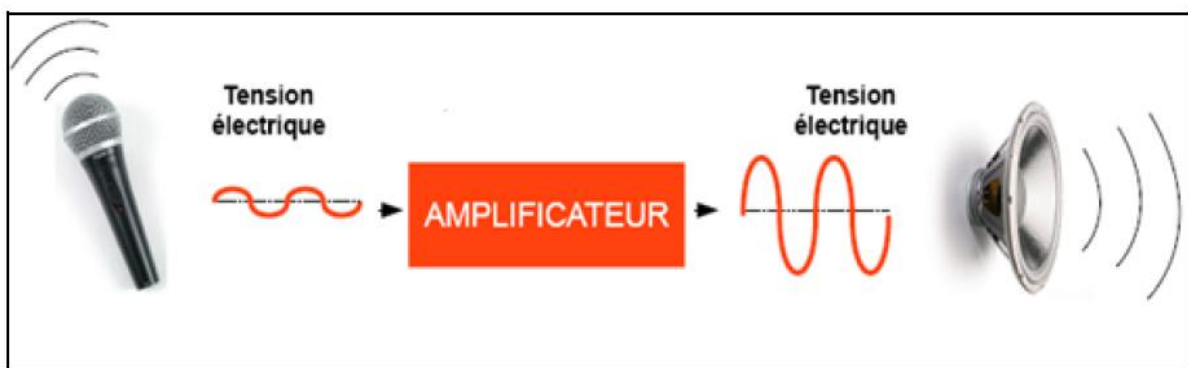


Figure II.7. Exemple d'une chaîne analogique.

Le son analogique est généralement fixé sur des supports comme les bandes magnétiques, disques vinyles etc. Le problème rencontré par ces supports réside dans l'usure physique des informations au cours de leur utilisation (lecture/écriture). A terme, le signal est affaibli et peut disparaître [35].

II.5.2. Le son en numérique

Avec l'informatique, lorsque ce même signal électrique est capturé à partir d'un microphone, il est converti en une suite de nombre (binaire), on parle alors de numérisation du signal. C'est la carte son qui s'en charge, elle contient des entrées (convertisseurs analogique vers numérique) et des sorties (convertisseurs numérique vers analogique). La première phase appelée numérisation consiste donc à passer d'un signal continu (une variation de tension électrique) en une suite de valeurs mesurées à intervalles réguliers, donc discontinu.

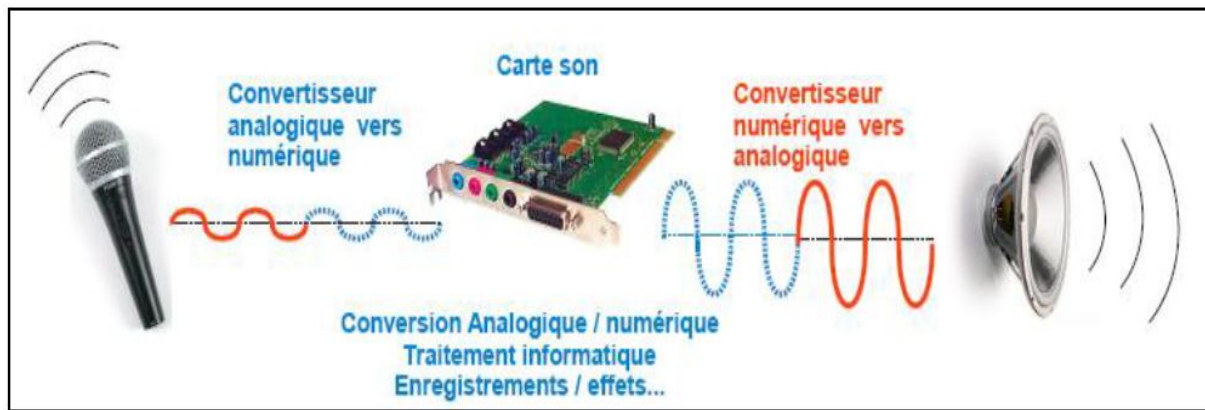


Figure II.8 : Exemple d'une chaîne numérique

L'avantage de la numérisation, est la possibilité de lire et de dupliquer autant de fois ce signal sans aucune détérioration, puisqu'il a été réduit en une suite de nombres stockée dans un fichier informatique. Cela dit, la compression audio comme le MP3 peut provoquer une perte volontaire du signal afin d'économiser de l'espace de stockage.

II.5.2.1. La fréquence d'échantillonnage

L'échantillonnage d'un signal audio analogique revient à prélever ses valeurs de tension électrique un certain nombre de fois par seconde. La fréquence de ces prélèvements est appelée fréquence d'échantillonnage. La fréquence d'échantillonnage est fixée avant l'opération de numérisation et ne varie pas pendant la numérisation. Les fréquences d'échantillonnage couramment utilisées en audio sont 44100Hz et 48000Hz. Elles sont souvent imposées par des contraintes technologiques. Par exemple, la norme du disque compact audio (CD audio) impose une fréquence d'échantillonnage de 44100Hz. L'échantillonnage en terme traitement est l'opération du produit du signal sonore par le peigne de Dirac en respectant le théorème de Shannon. L'échantillonnage est effectué par découpage temporel du signal audio analogique. Ce découpage temporel permet de reconstruire en données chiffrées la forme d'onde du signal numérisé. La numérisation ne repose que sur des séries de 0 et de 1 : il s'agit d'un codage binaire [35].

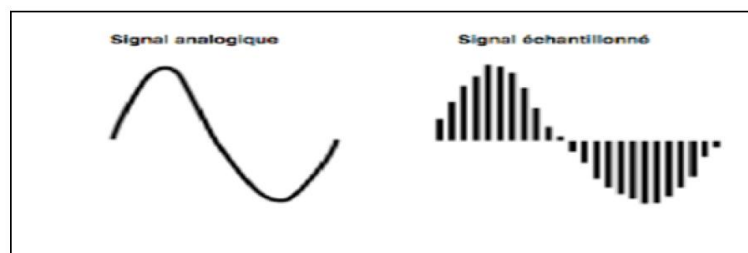


Figure II.9. Forme d'un signal échantillonné

II.5.2.2. Quantification

Alors que l'échantillonnage opère un découpage temporel, l'opération de quantification crée une échelle de valeurs discrètes permettant d'attribuer à chaque échantillon une valeur d'amplitude. La quantification s'exprime en « bit » (un acronyme de binary digit). Les valeurs couramment utilisées en audio sont 16bit et 24bit. L'amplitude de chaque échantillon doit impérativement prendre l'une des valeurs définies par l'échelle de quantification. Si la valeur d'amplitude de l'échantillon se situe entre deux paliers de l'échelle de quantification, elle est approximée au palier le plus proche. Cette approximation induit une erreur que l'on nomme « erreur de quantification ». Par suite, plus le nombre de bits n est élevé, plus le nombre de paliers est important et l'erreur de quantification faible. Autrement dit, les petites variations d'amplitude du signal échantillonné sont d'autant mieux approximées que la résolution de la quantification est élevée. La fidélité de la forme d'onde numérisée à la forme d'onde du signal analogique dépend donc de la résolution (exprimée en bit) et de la fréquence d'échantillonnage (exprimée en kHz). De même que pour la fréquence d'échantillonnage, le choix de la résolution de la quantification est soumis à des contraintes techniques.

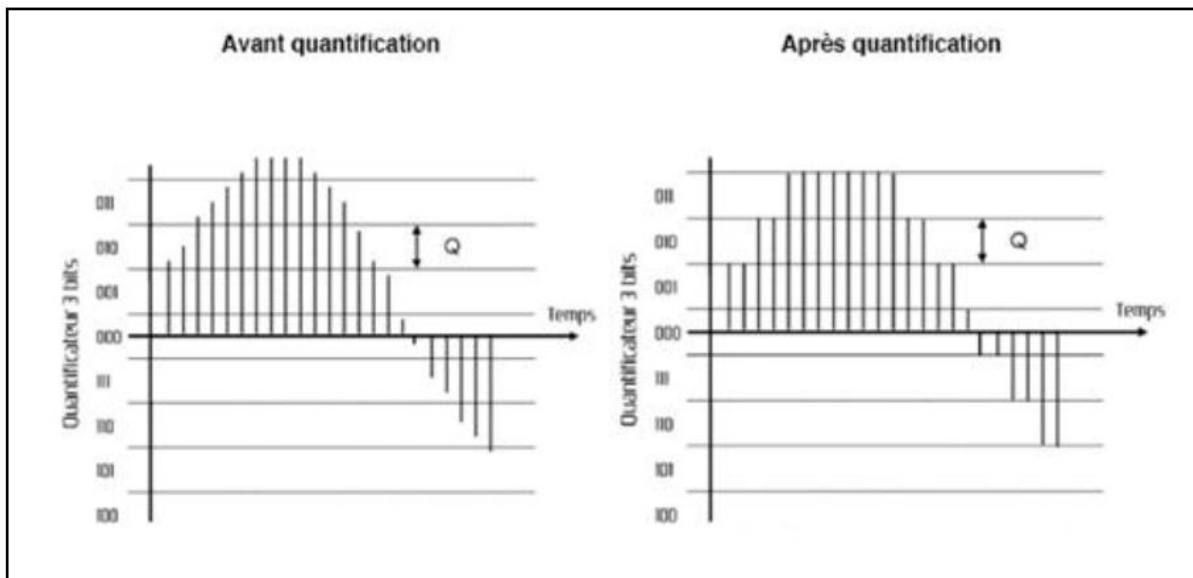


Figure II.10. signal échantillonné avant et après quantification

II.6. CONCLUSION

Depuis la découverte de la synthèse numérique des sons, et avec l'arrivée d'ordinateurs personnels équipés en standard d'une carte son, il est devenu à la portée de tous d'enregistrer et de traiter les sons. De nombreux professionnels se tournent vers des solutions numériques, de moins en moins onéreuses, qui offrent, avec la progression de la capacité des ordinateurs, une très grande étendue de possibilités.

Les techniques de traitement de signal utilisées pour la détection de fuites feront l'objet du chapitre suivant, et une étude bien détaillée de la méthode utilisée celle qui va être appliquée sur nos signaux acquis.

CHAPITRE.III

LA METHODE EMD

III.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente la décomposition des signaux par la méthode EMD (Empirical Mode Decomposition) qui décompose d'une façon adaptative un signal en une somme de composantes oscillantes ou modes (en anglais intrinsic mode functions IMFs). Contrairement à la transformée de Fourier (TF) ou la transformée en ondelettes, la base de décomposition de l'EMD est intrinsèque au signal. La méthode EMD a été également comparée avec la méthode de décomposition multi-échelles (transformée en ondelettes).

Les résultats théoriques de la méthode EMD ont été validés par des simulations numériques, ses avantages et ses inconvénients ont été également examinés.

III.2 DEFINITIONS

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 [17], [18], [19].

III.3 METHODES 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 a de nombreuses limitations quand les signaux à analyser sont non stationnaires. Par conséquent, de nombreux outils ont été développés pour analyser de tels signaux. Les principaux sont les représentations temps-fréquence (la transformée de Fourier à court

terme ou fenêtre glissante [18], et temps échelle (la transformée en ondelettes [17], [19]). Ces outils sont rappelés brièvement dans ce paragraphe

III.3.1.1 Transformée de Fourier à fenêtre glissante

La transformée de Fourier d'un signal est définie par :

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

Grâce à ses bonnes propriétés, ainsi qu'à l'existence de la transformée de Fourier rapide (FFT), cet outil est devenu omniprésent dans de nombreux domaines. Cependant, la transformée de Fourier n'est utile que pour des signaux stationnaires : dès lors que l'on veut analyser des signaux non stationnaires, on doit recourir à d'autres méthodes. En 1946, Gabor avait introduit la transformée de Fourier à fenêtre glissante [18], [19], [20] pour partager les signaux non stationnaires en segments supposés stationnaires. Il avait construit des "atomes" temps-fréquence à partir d'une fenêtre, en la translatant en temps et en fréquence :

$$g_{u,\xi}(t) = g(t-u)e^{j\xi t} \quad (\text{III.2})$$

La transformée de Fourier de ces atomes est donnée par :

$$g_{u,\xi}(w) = g(w-\xi)e^{-ju(w-\xi)} \quad (\text{III.3})$$

La durée utile et la largeur de bande utile et T_u et B_u d'un signal réel $s(t)$ [21] sont définies respectivement par :

$$T_u^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (t-t_0)^2 s(t)^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} s(t)^2 dt} \quad (\text{III.4})$$

t_0 est la position moyenne du signal sur l'axe des temps $t_0 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} ts(t)^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} s(t)^2 dt}$

$$B_u^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f^2 |s(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} |s(f)|^2 df} \quad (\text{III.5})$$

Alors, d'après le principe d'incertitude d'Heisenberg, ces valeurs vérifient [22] :

$$T_u B_u \geq \frac{1}{4\pi} \quad (\text{III.6})$$

Ce produit atteint son minimum si et seulement si g est une Gaussienne [18]. La figure [1.1] représente deux atomes de Gabor dans le plan temps fréquence [18], [19].

La transformée de Gabor d'un signal $s(t)$ s'écrit :

$$G_s(u, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) g_{u,\xi}(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) g(t - u) e^{j\xi t} dt \quad (III.7)$$

Un spectrogramme d'un signal $s(t)$ est le graphe du module au carré de sa transformée de Fourier à fenêtre glissante [18],[19] :

$$SG: (t, f) \rightarrow |G_{s(t,f)}|^2 \quad (III.8)$$

Ce résultat est généralement exprimé en décibel (dB). La transformée de Fourier à fenêtre glissante permet une localisation dans le plan temps fréquence des signaux linéaires et localement stationnaires.

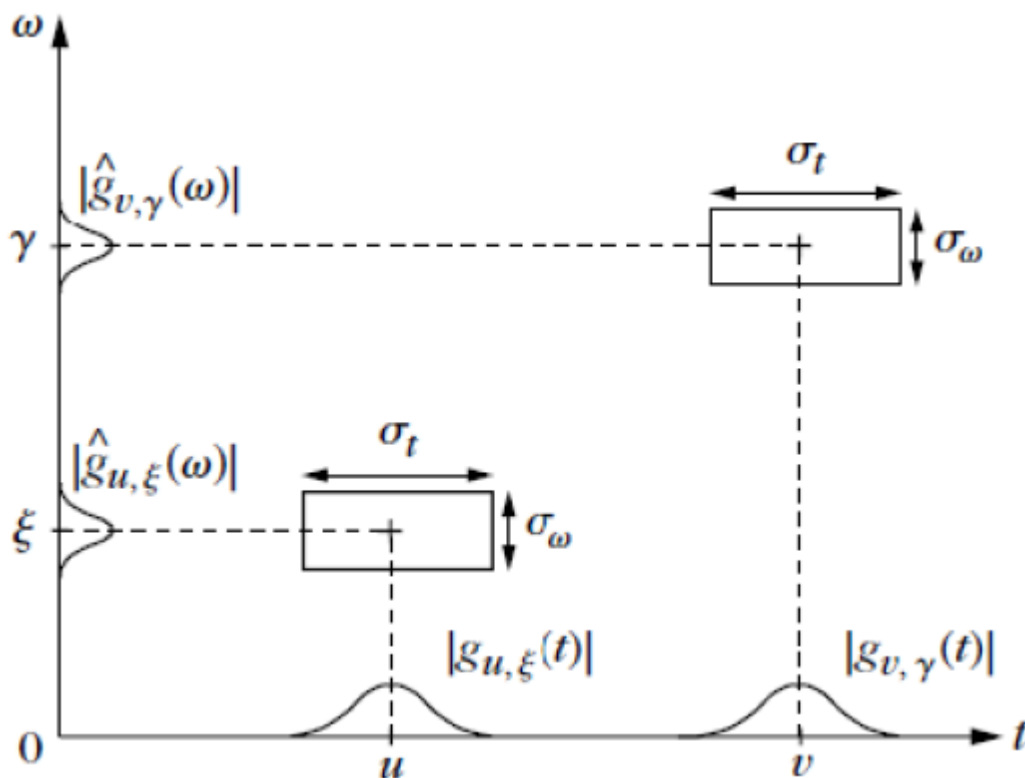


Figure III.1 Deux atomes de Gabor dans le plan temps fréquence [25].

III.3.1.2 Transformée en ondelettes

Si la transformée de Fourier à fenêtre glissante est utile dans certaines applications en offrant un compromis entre localisation en temps et en fréquence. Elle ne permet cependant pas d'analyser convenablement certains signaux transitoires comprenant de

fortes singularités à cause de la durée constante de la fenêtre glissante. La théorie des ondelettes, en introduisant la notion d'échelle dans la décomposition, y remédie. Dans le cas réel, la transformée en ondelettes continue d'une fonction $s(t)$ de $L^2(\mathbb{R})$ définie [18], [20] :

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi \frac{(t-b)}{a} dt \quad (\text{III.9})$$

Où ψ est une fonction de $L^2(\mathbb{R}) \cap L^1(\mathbb{R})$ appelée ondelette mère et vérifiant la condition d'admissibilité :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{|f|} df < \infty \quad (\text{III.10})$$

Grâce au paramètre d'échelle a , la décomposition en ondelettes est une méthode d'analyse fondamentalement multi-échelles. Elle permet le traitement des signaux comportant de fortes singularités et a été notamment adaptée pour l'analyse fractale. Des algorithmes rapides et une théorie pour les signaux discrets ont contribué au succès des ondelettes dans de nombreux domaines [18], [19].

III. 3.1.3 Fréquence instantanée

Le principe d'incertitude ne permet pas la localisation simultanée en temps et en fréquence : la notion de fréquence instantanée paraît donc peu pertinente. Cependant, c'est une notion intuitive : ainsi le musicien entend-t-il les notes dans une pièce musicale, c'est-à-dire des fréquences précises, qui évoluent dans le temps. De plus, c'est un concept qui est primordial dans certaines applications physiques. Considérons le signal $s(t) = a(t) \cos(\omega(t)t + \phi)$. On suppose que sa fréquence oscille autour d'une valeur. On peut alors écrire

$\omega = \omega_0 + \Delta\omega(t)$. Pour caractériser facilement la fréquence instantanée de $s(t)$. Les variations de a et $\Delta\omega$ doivent être faibles sur des intervalles de temps de l'ordre de la période central $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

Autrement dit, les spectres de a et de $\Delta\omega$ sont inclus dans des supports $[-B, B]$ avec a

$$B \ll f_0 = \frac{1}{T_0}$$

De tels signaux sont dits quasi-monochromatiques, ou encore à bande étroite.

Pour les signaux fortement non-monochromatiques, plusieurs propositions parfois complémentaires ont été faites pour définir la fréquence instantanée. Nous allons ici présenter la plus commune, celle dite du signal analytique, qui offre rigueur et cohérence.

Le problème revient à trouver un signal analytique qui se décomposera de manière unique sous sa forme polaire :

$$s_a(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (\text{III.11})$$

Ce signal analytique devra vérifier les propriétés suivantes [17], [18], [19] :

- Le signal analytique de $s(t) = \cos(\omega t)$ est $s_a(t) = e^{j\omega t}$, $\forall \omega > 0$.
- L'opération qui transforme $s(t)$ en $s_a(t)$ doit être homogène. Par extension, il est naturel d'imposer que cette opération soit un filtrage linéaire.

Le signal analytique $s_a(t)$ d'un signal réel $s(t)$ est :

$$s_a(t) = s(t) + j\hat{s}(t) \quad (\text{III.12})$$

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

VP désigne la valeur principale au sens de Cauchy. Avec $x(t) = s(t)$, $y(t) = \hat{s}(t)$

L'amplitude instantanée et la phase instantanée sont définies respectivement par [17], [18], [19]:

$$a_s(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (\text{III.14})$$

$$\phi_s(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)} \quad (\text{III.15})$$

La fréquence instantanée est la dérivée de la phase instantanée ϕ_s et s'écrit :

$$\omega = \frac{sy' - sy'}{a_s^2} \quad (\text{III.16})$$

Cette méthode permet de construire une fréquence instantanée (FI) unique. Mais, pour que le résultat ait un sens physiquement, le signal doit vérifier certaines hypothèses. Le théorème suivant donne une condition importante.

Théorème 1.1.1 (identité de Bedrosian) [17], [18] : Soit $a > 0$ et $f, g \in L^2(\mathbb{R})$.

Si $\text{Supp}(\hat{f}) \subset (-a, a)$ et $\text{Supp}(\hat{g}) \subset (-\infty, -a) \cup (a, \infty)$, alors la transformée de Hilbert de la fonction $f * g$ satisfait l'identité de Bedrosian :

$$H\{fg\} = f H\{g\} \quad (\text{III.17})$$

En écrivant $g(t) = \cos(\phi(t))$, on peut de plus trouver des conditions sur ϕ , de telle sorte que :

$$H\{a(t)\cos(\phi(t))\} = a(t)\sin(\phi(t)) \quad (\text{III.18})$$

La méthode EMD s'inspire directement de ces conditions [27]. Elle décompose un signal quelconque en "modes" qui se comporteront bien avec la transformée de Hilbert (TH).

III.4 DECOMPOSITION MODALE EMPIRIQUE (EMD)

La méthode EMD est définie par un processus appelé tamisage (sifting) permettant de décomposer un signal en contributions de base appelées modes empiriques ou IMF (Intrinsic mode functions) qui sont des signaux de type AM-FM mono-composante (au sens large),

chacune de moyenne nulle [26]. L'extraction des IMFs est non-linéaire, mais leur recombinaison pour la reconstruction exacte du signal est linéaire. En se basant essentiellement sur les variations ou oscillations naturelles du signal, l'EMD permet une interprétation des phénomènes physiques présents.

En plus de sa simplicité de mise en oeuvre et de sa capacité à décrire ponctuellement et de manière instantanée les phénomènes fréquentiels non résolus par l'analyse de Fourier, l'EMD est bien adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires et/ou générés par des systèmes non-linéaires.

III.4.1 Principe de la décomposition

Le principe de l'EMD repose sur une décomposition adaptée en décrivant localement le signal comme une succession de contributions d'oscillations rapides (hautes fréquences) sur des oscillations plus lentes (basses fréquences). Pour illustrer la décomposition, nous considérons l'exemple simple d'un signal $x(t)$ formé de deux contributions : une oscillation rapide et une autre lente :

$$x(t) = d(t) + m(t) \quad (\text{III.19})$$

Signal oscillation (a) tendance(b)

L'oscillation (a) est une oscillation rapide et la tendance (b) est une oscillation lente. La reconstruction du signal $x(t)$ est réalisée en sommant les deux courbes point par point il s'agit d'une décomposition géométrique. La tendance du signal contient localement des oscillations de plus basse fréquence que celle de l'oscillation rapide. Ce résultat peut être généralisé à toutes les contributions comme suit : chacune contient localement des oscillations de plus basse fréquence que celle extraite précédemment. Conceptuellement, la mise en place de la méthode permettant de décrire cette décomposition est assez simple. Il suffit de considérer le signal à l'échelle de ses oscillations locales, de soustraire l'oscillation la plus rapide du signal et de réitérer le processus sur le résidu de manière à écrire le signal $x(t)$ comme une combinaison finie d'oscillations. Le signal $x(t)$ peut alors s'écrire :

$$x(t) = \sum_{j=1}^n IMF_j(t) + r(t) \quad (\text{III.20})$$

Où $IMF_j(t)$ est la $j^{\text{ème}}$ 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 :

$$IMF: \begin{cases} R \rightarrow R \\ t \rightarrow IMF_j(t) \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

qui vérifie les conditions suivantes [27] :

- a) Elle est 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 successif, une IMF passe par zéro).
- c) Elle suit une loi de modulation en amplitude et en fréquence (comportement oscillant) naturellement de type mono-composante.

La condition (a) est lié à la contrainte d'estimation de la fréquence instantanée (FI) d'un signal mono-composante avec la transformée de Hilbert (TH). La condition (b) repose sur la définition de la bande étroite d'un signal mono-composante. La dernière condition (c) est une conséquence due au processus d'estimation de l'IMF. Ainsi, même si la notion d'IMF repose essentiellement sur un concept, celle-ci présente des caractéristiques très strictes et peut être formalisée par le modèle suivant :

$$IMF_j(t) \approx \Re\{a_j(t)e^{i\phi_j(t)}\} \quad (\text{III.22})$$

avec $a_j(t)$ est l'amplitude de l'enveloppe du $j^{\text{ème}}$ IMF et $\phi_j(t)$ est sa phase. \Re : La partie réelle. Les contraintes imposées reposent sur la volonté d'estimer la FI et l'amplitude instantanée (AI) d'une IMF en utilisant la transformée de Hilbert. En effet, l'objectif initial de l'EMD est de réaliser une décomposition temporelle en signaux mono-composante pour calculer leurs fréquences instantanées. Ces fréquences instantanées sont définies comme étant la dérivée de la phase du signal analytique. La connaissance des fréquences instantanées permet d'aboutir à une représentation temps-fréquence.

III.4.2 Processus de tamisage : principe algorithmique

Les différentes étapes du procédé de tamisage peuvent s'écrire sous la forme du pseudo-code développé dans le tableau III.1. L'organigramme de la méthode EMD est représenté dans la figure III.2. Il est important de mentionner que le tamisage est répété plusieurs fois (i) jusqu'à ce que $h_{j,i}(t)$ vérifie les conditions nécessaires d'une IMF.

Nous commentons les différentes étapes du pseudo-code (Tableau III.1) en analysant la décomposition du signal suivant :

$$x_1(t) = \cos(20\pi t) + \cos(2\pi t) \quad (\text{III.23})$$

où t varie de 0 à 2 s (période d'échantillonnage de 10^{-3} s). Le signal est constitué de deux oscillations distinctes, l'une rapide et l'autre plus lente figure III.3.

De manière plus littérale, l'extraction des IMFs suit le schéma général suivant (Tab. III.1)

- Trouver les extrema locaux (maximum et minimum) du signal (étape : 3b). Ceux-ci sont symbolisés par des points sur la figure III.4(b).
- Estimer les enveloppes supérieures et inférieures par interpolation respective des maxima et minima locaux (étape : 3c). Ceux-ci sont indiqués par les courbes de la figure III.4(c). L'interpolation utilisée dans ce cas est basée sur les splines cubiques [27], [28].
- Estimer l'enveloppe moyenne locale à partir des enveloppes supérieures et inférieures (étape : 3d). Celle-ci est représentée sur la figure III.4(d).

Tableau III.1. Pseudo-code de l'EMD [27].

Etape 1) Fixer ε , $j \leftarrow 1$ ($j^{\text{ème}}$ IMF) $\varepsilon = 0.3$

Etape 2) $r_{j-1}(t) \leftarrow x(t)$ (résidu)

Etape 3) Extraire la $j^{\text{ème}}$ IMF :

(a) $h_{j,i-1}(t) \leftarrow r_{j-1}(t)$, $i \leftarrow 1$, (i , itération de la boucle de sifting)

(b) Extraire les maxima et minima locaux de $h_{j,i-1}(t)$

(c) Calculer les enveloppes supérieure et inférieure : $U_{j,i-1}(t)$ et $L_{j,i-1}(t)$

(d) Calculer l'enveloppe moyenne :

$$\mu_{j,i}(t) \leftarrow \frac{U_{j,i-1}(t) + L_{j,i-1}(t)}{2}$$

(e) Mettre à jour : $h_{j,i}(t) \leftarrow h_{j,i-1}(t) - \mu_{j,i-1}(t)$, $i \leftarrow i + 1$.

(f) Calculer le critère d'arrêt (par exemple) :

$$SD(i) = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{j,i-1}(t) - h_{j,i}(t)|^2}{h_{j,i-1}(t)^2},$$

où T représente le nombre d'échantillons du signal.

(g) Décider : répéter l'étape (b)-(f) tant que $SD(i) < \varepsilon$

et alors mettre : $IMF_j(t) \leftarrow h_{j,i}(t)$ ($j^{\text{ème}}$ IMF).

Etape 4) Mettre à jour le résidu : $r_j(t) \leftarrow r_{j-1}(t) - IMF_j(t)$.

Etape 5) Répéter l'étape 3 avec $j \leftarrow j + 1$ jusqu'à ce que le nombre d'extrema dans $r_j(t)$ soit inférieur à 2.

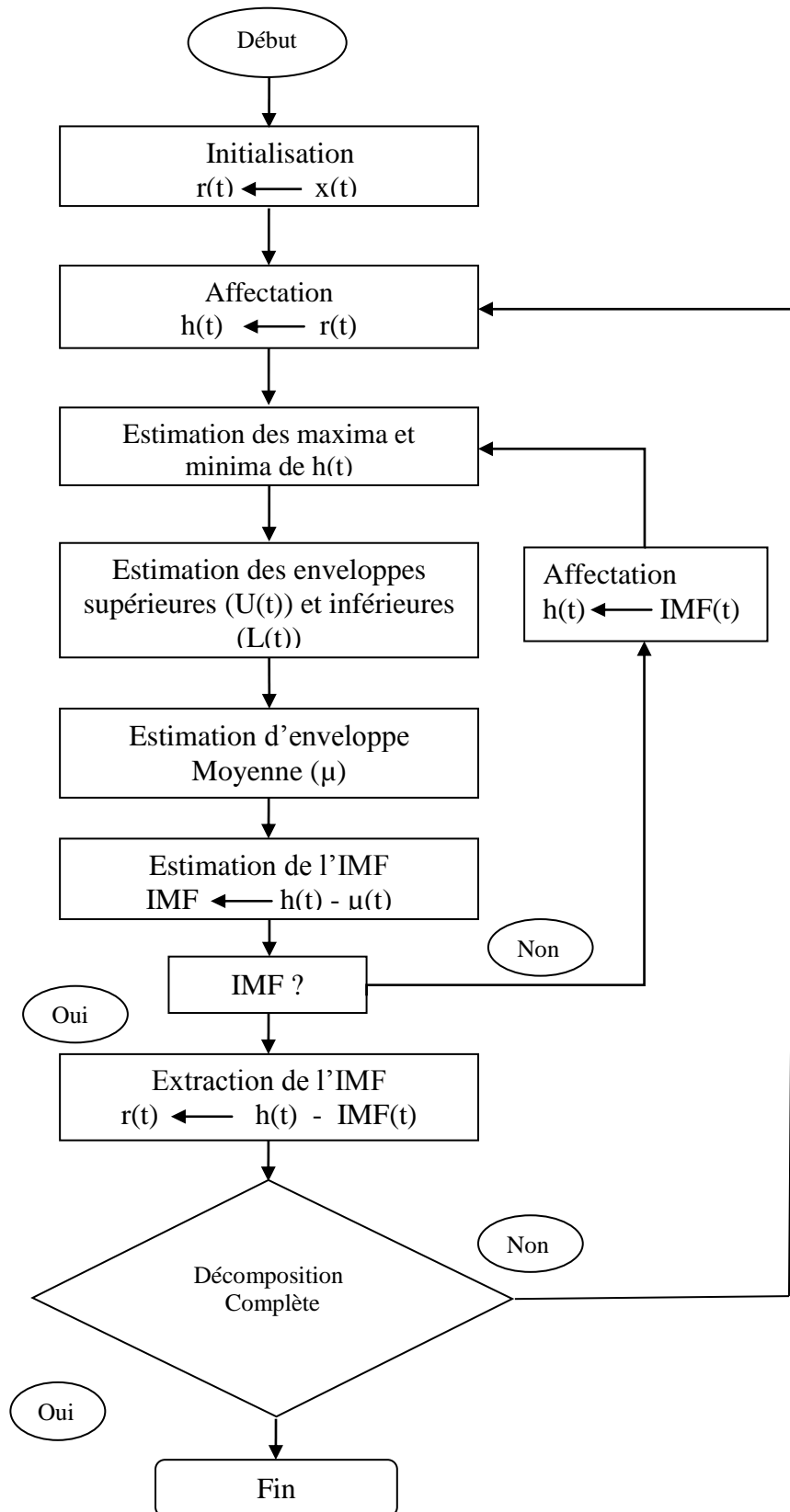


Figure III.2 Organigramme de la méthode EMD.

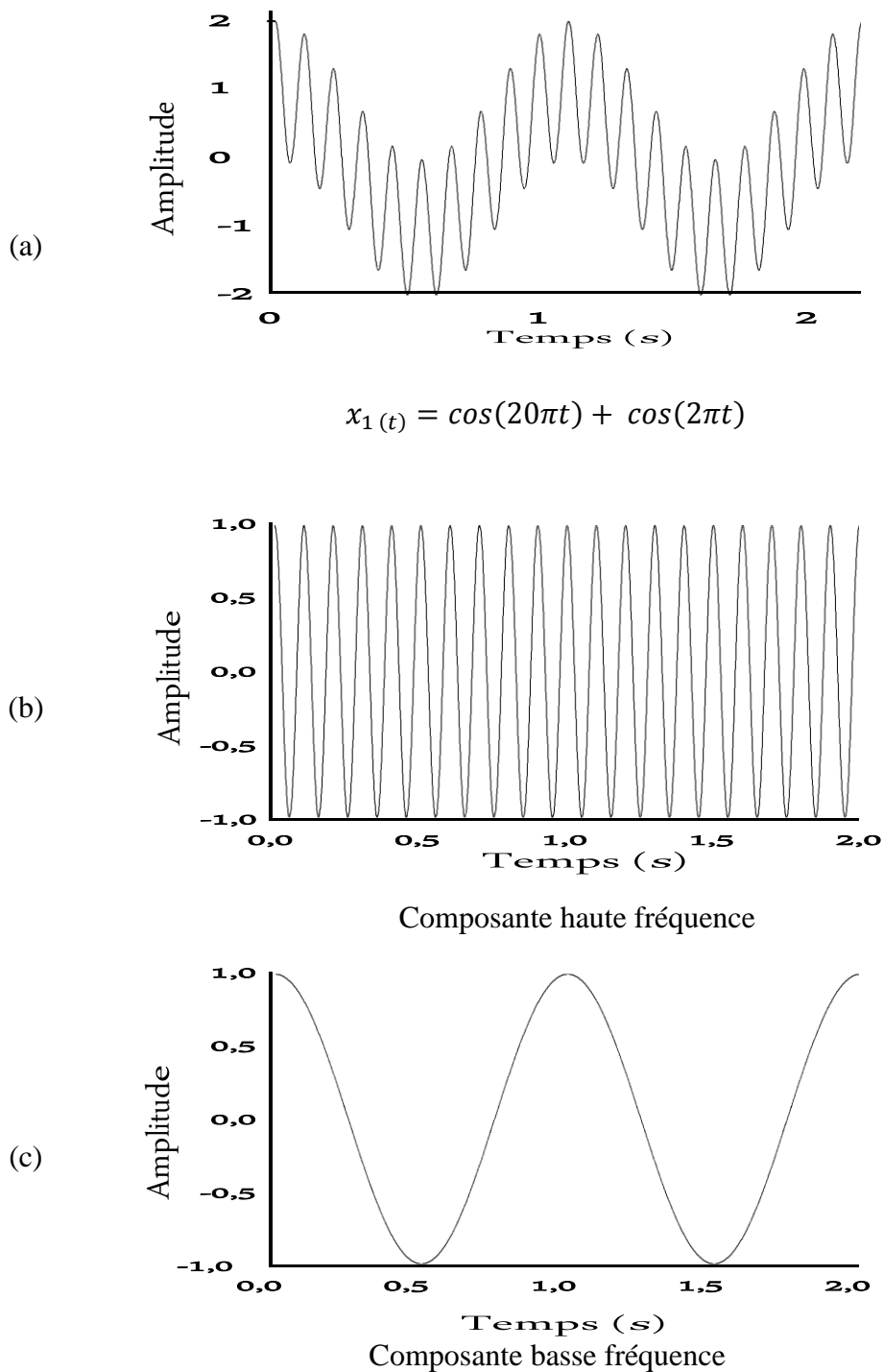


Figure III.3 , a : signal test $x_1(t)$, b: composante haute fréquence, c:composante basse fréquence.

- Soustraire l'enveloppe moyenne du signal d'entrée (étape : 3e). Cela correspond alors à la première itération du tamisage. On calcule le critère d'arrêt (étape : 3f) et on vérifie alors que le signal remplit les critères d'une IMF (étape : 3g). Ici le critère décrit

est celui proposé par Huang et al. [19], [27].

- Vérifier si le résidu présente un nombre suffisant d'extrema (supérieur à deux) et réitérer sur le signal résultant le processus d'extraction de l'IMF (étape : 3) ; sinon, le résidu est considéré comme étant le résidu final $r(t)$ de l'équation (III.20). Idéalement, le processus d'extraction des IMFs est terminé lorsque le résidu ne contient plus d'extrema. Le résidu est une fonction monotone qui correspond au dérivé du signal initial $x_1(t)$.

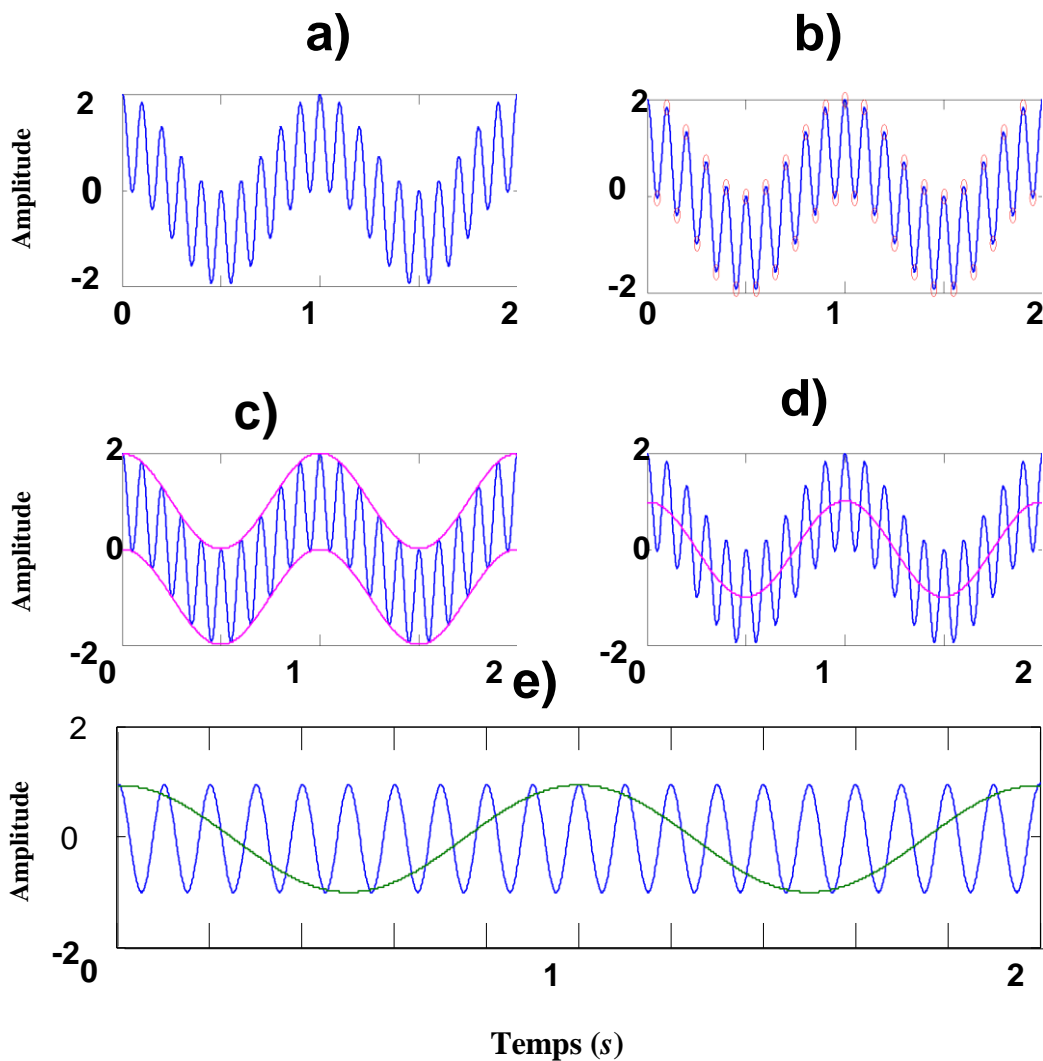
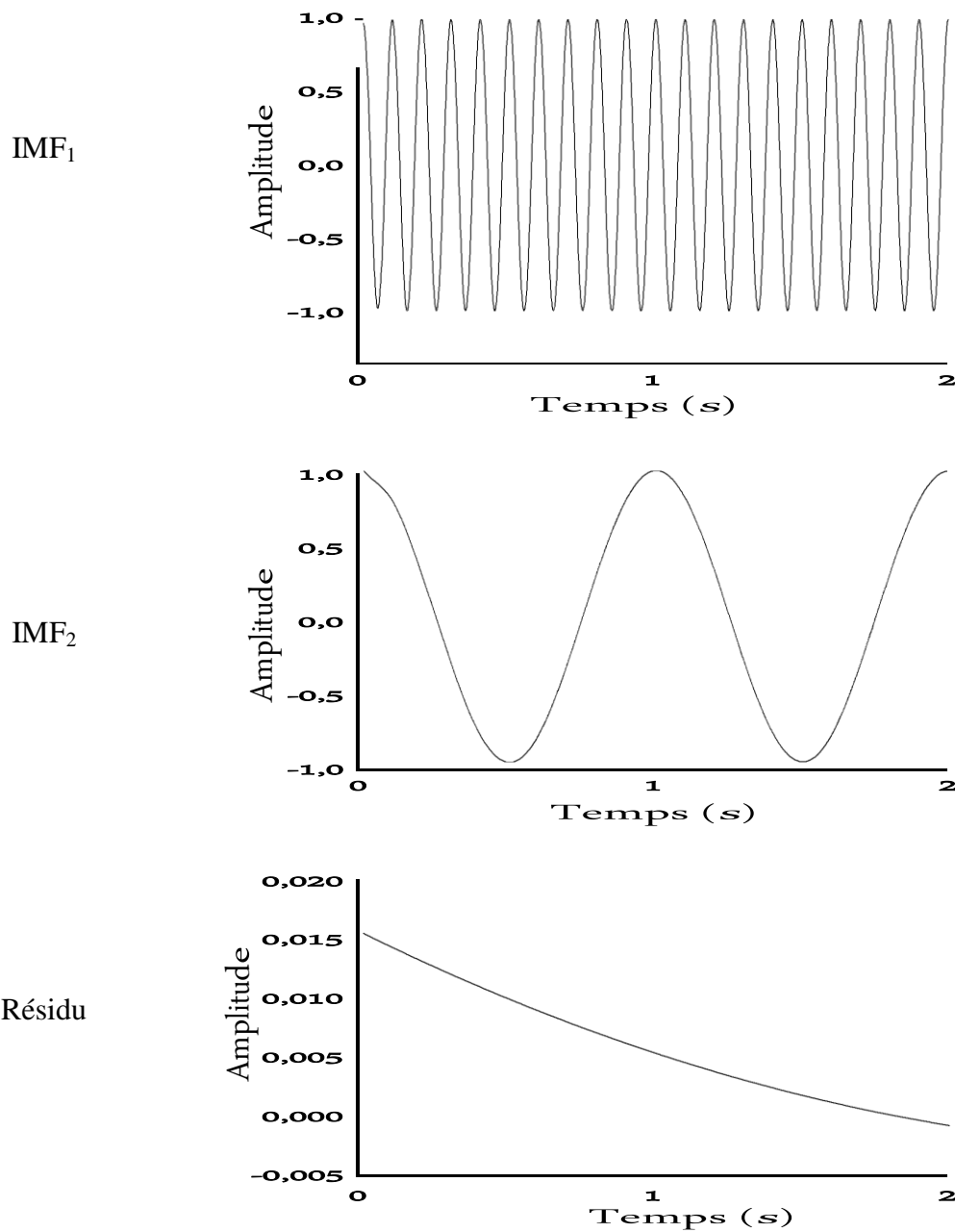


Figure III.4 Principe de tamisage pour l'estimation de la 1^{ère} IMF du signal test $x_1(t)$.

La (figure III.5) illustre le résultat du processus de tamisage sur le signal $x_1(t)$ l'équation (III.23). La décomposition, réalisée sans aucune connaissance préalable des caractéristiques du signal, permet d'extraire correctement les deux contributions sinusoïdales ainsi que le résidu du signal (figure III.5).

Figure III.5 Décomposition EMD du signal test $x_1(t)$

III.4.3 Critère d'arrêt

La méthode est composée de deux boucles : l'une permet d'extraire l'IMF (qui détermine le niveau de profondeur de la décomposition) et l'autre conditionne la fonction $IMF_j(t)$ de manière à valider la définition d'une IMF. Dans la pratique (Tab. III.1), la boucle de tamisage qui permet d'extraire des IMFs est pilotée par un critère d'arrêt (étape : 3g), noté $SD(i)$ [26]

D'une manière générale, les définitions du critère d'arrêt du tamisage reposent toutes sur le même principe : $h_{j,i}(t)$ est de moyenne nulle et symétrique. D'après la définition, c'est une des conditions d'existence d'une IMF. Dans [26], les auteurs proposent un critère d'arrêt

$SD(i)$ reposant sur la déviation standard et est définie par :

$$SD(i) = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{i-1}(t) - h_i(t)|^2}{[h_{i-1}(t)]^2} \quad (\text{III.24})$$

où $h_i(t)$, $h_{i-1}(t)$ et T sont définies dans (Tab. III.1). Le test d'arrêt est validé lorsque la différence entre deux tamisages consécutifs est inférieure à un seuil prédéfini ε : $SD(i) < \varepsilon$ (étape : 3g). Typiquement, la valeur de SD_{stop} notée ε dans (Tab. III.1) permettant de stopper le tamisage est comprise entre 0, 2 et 0, 3 [27], [29].

Cette valeur est un compromis et est définie de manière empirique. Si ε est trop grand, alors la méthode ne permet pas de séparer correctement les différents modes présents dans le signal. Inversement, si ε est trop petit, alors le principe risque d'aboutir à des composantes d'amplitudes quasi constantes et modulées par une unique fréquence (phénomène de sur-décomposition du signal). En d'autres termes, SD permet de limiter l'écart-type entre deux étapes consécutives de tamisage [27], [29].

III.4.4 Propriétés de la méthode EMD

III.4.4.1 Erreur d'estimation

La première cause principale de l'erreur provient de l'interpolation (étape : 3c) [19], [27]. En effet, cette dernière permet d'estimer les enveloppes supérieure et inférieure du signal puis d'en déduire l'enveloppe moyenne (étape : 3d). Un phénomène de Gibbs apparaît alors, caractéristique des problèmes d'interpolation par des polynômes, notamment aux bornes des intervalles de définition du signal $x(t)$.

Nous pouvons souligner que plus ce phénomène de divergence (Gibbs) n'est présent sur les bornes d'existence du signal et moins les estimations des IMFs suivantes seront précises. Ce phénomène est d'autant plus amplifié que le tamisage est par essence récursif.

La deuxième cause découle de la remarque précédente et est liée à la récursivité du tamisage [30]. En effet, cette récursivité introduit une erreur cumulée sur l'estimation des IMFs. L'une des conséquences de cette erreur est le risque d'avoir un résidu non monotone ou du moins différent de la théorie initialement escomptée.

Par exemple dans la figure III.3, le signal $x_1(t)$ (Eq. III.23) est par construction de moyenne nulle et en théorie le résidu $r(t)$ doit être également nul. Ce n'est malheureusement pas le cas si l'on observe le résidu estimé par la méthode EMD (figure III.5) : il est non nul et de faible amplitude. Ces erreurs d'estimation permettent de souligner l'importance du choix de la méthode d'interpolation et de la problématique de la propagation des erreurs de proche en proche. Cette propagation est due à la structure récursive et séquentielle de l'EMD.

III.4.4.2 Adaptabilité et localité

La gamme des oscillations contenues dans une IMF change sur l'échelle temporelle, mais la première IMF contient localement celles qui sont les plus rapides par rapport aux autres IMFs pour un même instant t considéré.

Cette propriété d'oscillations locales reste d'ailleurs toujours vérifiée entre IMFs successives. Ce phénomène est illustré avec le signal $x_2(t)$ suivant composé de quatre oscillations distinctes (Figure. III.6) :

$$x_2(t) = \begin{cases} \cos(4\pi t) + \cos(16\pi t) & 0 \leq t < 2 \\ \cos(4\pi t) + \cos(12\pi t) + \cos(24\pi t) & 2 \leq t < 4 \\ \cos(4\pi t) + \cos(12\pi t) & 4 \leq t < 6 \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

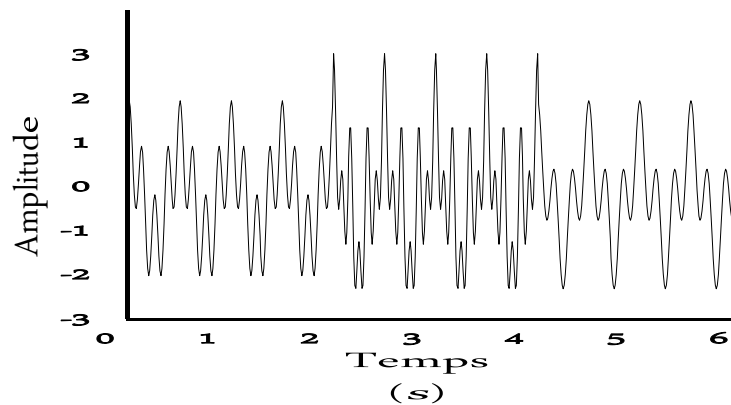


Figure. III.6 Signal test $x_2(t)$.

Les différentes sinusoïdes n'étant pas raccordées de façon continue aux instants $t = 2$ s et $t = 4$ s. La figure III.7 montre la décomposition EMD du signal qui illustre clairement le phénomène d'oscillations Figure. III.7

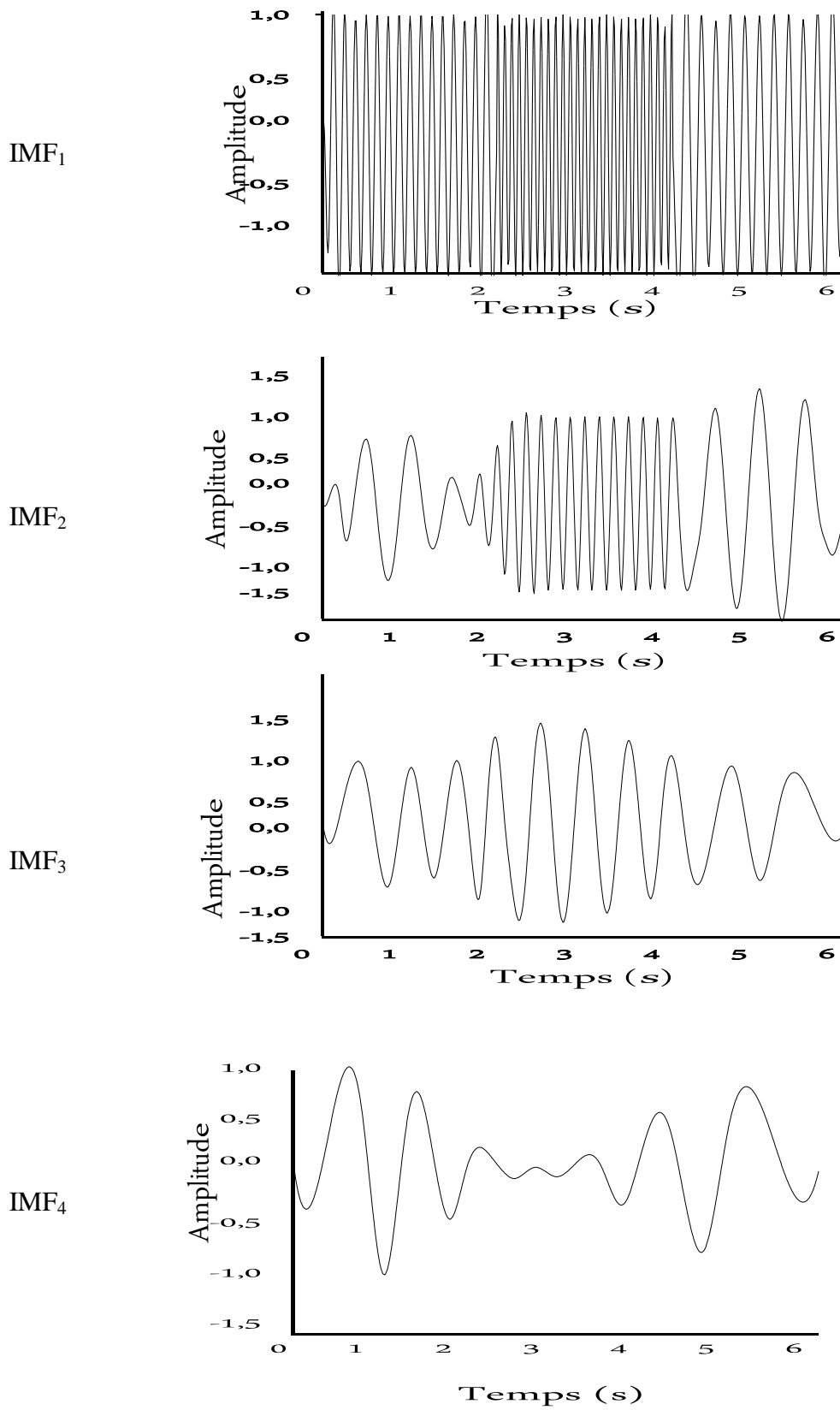
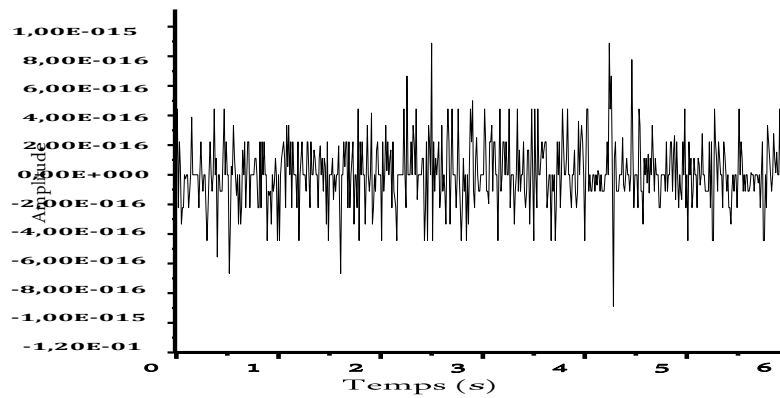


Fig. III.7 Décomposition EMD du signal test $x_2(t)$.

Fig. III.8 Erreur sur la décomposition EMD du signal $x_2(t)$

Nous observons en effet que les quatre IMFs présentent des oscillations extraites des plus hautes fréquences aux plus basses et cela localement.

Les IMFs extraite peuvent s'écrire :

$$IMF_1 = \begin{cases} \cos(16\pi t) & 0 \leq t < 2 \\ \cos(24\pi t) & 2 \leq t < 4 \\ \cos(12\pi t) & 4 \leq t < 6 \end{cases} \quad (\text{III.25a})$$

$$IMF_2 = \begin{cases} \cos(04\pi t) & 0 \leq t < 2 \\ \cos(12\pi t) & 2 \leq t < 4 \\ \cos(04\pi t) & 4 \leq t < 6 \end{cases} \quad (\text{III.25b})$$

$$IMF_3 = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 2 \\ \cos(24\pi t) & 2 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 6 \end{cases} \quad (\text{III.25c})$$

Il est à noter que les composantes de la décomposition EMD sont similaires aux composantes du signal. Néanmoins, il existe des singularités à $t = 2$ s, 4 s et $t = 6$ s, les instants où le signal présente des ruptures de pente.

L'erreur de la figure III.8 est obtenue par la soustraction entre le signal original et la somme de toutes les IMFs plus résidu, et est due essentiellement au processus de tamisage. L'estimation des enveloppes repose sur l'interpolation à l'aide de splines cubiques. Le fait d'utiliser les splines au voisinage des singularités introduit un lissage de celles-ci. L'accumulation des erreurs se traduit alors par l'apparition d'un composant artefact noté $IMF_4(t)$. En effet, cette IMF_4 n'a pas lieu d'exister théoriquement.

Mais la présence des singularités fait apparaître une composante supplémentaire représentative des erreurs cumulées lors de l'extraction des IMFs. Nous pouvons d'ailleurs noter que ces erreurs proviennent essentiellement de l'IMF₃ entre les intervalles $t = [0, 2s]$ et $t = [4, 6s]$ où théoriquement celle-ci est nulle équation(III.25c).

D'autre part, nous pouvons constater que cette description se comporte comme un banc de filtres auto-adaptatifs. L'EMD permet de sélectionner localement les oscillations correspondant aux hautes fréquences, pour tendre progressivement vers celles correspondant aux plus basses fréquences.

III.4.5 Les différentes méthodes d'interpolation

Plusieurs approches d'interpolation [31] existent. Mais les plus couramment font partie des méthodes dites par collocation.

- La collocation: la fonction approximée passera que par les points qui sont définis initialement.
- Les courbes osculatrices: la fonction approximée passera par les points qui sont définis initialement en prenant en compte les nièmes dérivées premières.
- Les méthodes à base des moindre carrés : dans cette approche, on ne s'intéresse pas à faire passer la fonction d'approximation par tous les points qui sont définis initialement mais à définir des polynômes qui prennent en considération les Min-Max de ces points et à assurer la moindre erreur avec les majorités des points de départs.

Les plus utilisées sont basées sur la méthode de collocation qui est [24], [32] :

a) **La linéaire** : cette méthode permet de relier deux points par une droite.

b) **La Cubique** : cette méthode permet de relier deux points avec une courbe ondulatoire.

Dans cette méthode, la monotonie entre les points successifs qui sont sur une même ligne n'est pas respectée ainsi que le critère tangentiel n'est pas respecté c.-à-d. si la courbe approximée passe par un extrema (max ou min), cette courbe ne change pas son sens (critère tangentiel) mais continue dans sa direction jusqu'à un niveau précis et ensuite change de sens.

c) **La spline** : ce nom provient de l'interpolation par la considération de conditions tangentielles avec l'utilisation des fonctions cubiques.

III.4.6 Description temps-fréquence

Nous avons jusqu'à présent décrit la méthode EMD essentiellement dans le domaine temporel. Nous allons, dans ce qui suit, étudier ses propriétés dans le domaine fréquentiel. Nous allons d'abord examiner sa capacité à séparer deux composantes sinusoïdales. Ensuite, nous allons la comparer avec des approches standards comme la transformée en ondelettes pour illustrer la capacité de la méthode EMD à s'organiser spontanément en une structure de banc de filtres.

III.4.6.1 Résolution fréquentielle

Dans ce paragraphe, nous avons étudié la capacité de la méthode EMD à séparer deux composantes sinusoïdales. Cette étude a été inspirée des travaux de Rilling et al. [29], [30].

Considérons un signal composé de deux sinusoïdes (Fig. III.9):

$$x_3(t) = \cos(2\pi \times 60t) + \cos(2\pi \times 66t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (\text{III.26})$$

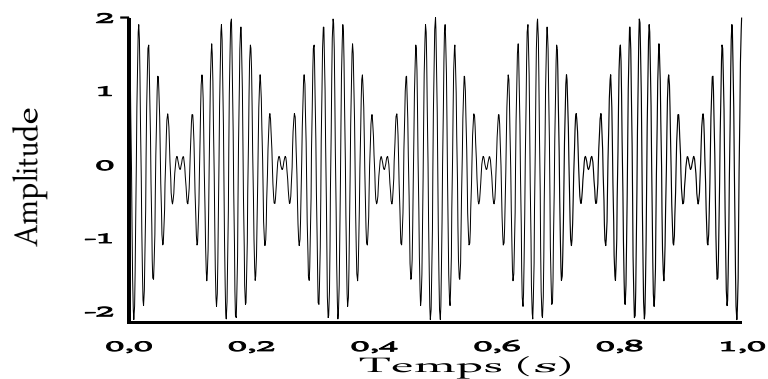
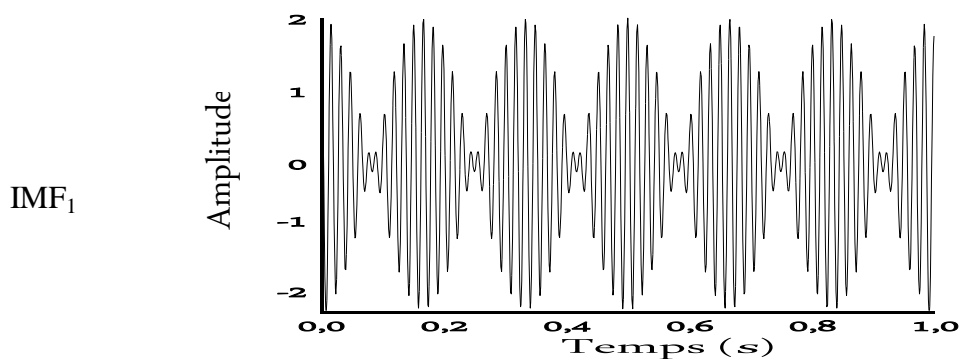


Fig. III.9 Signal test $x_3(t)$.



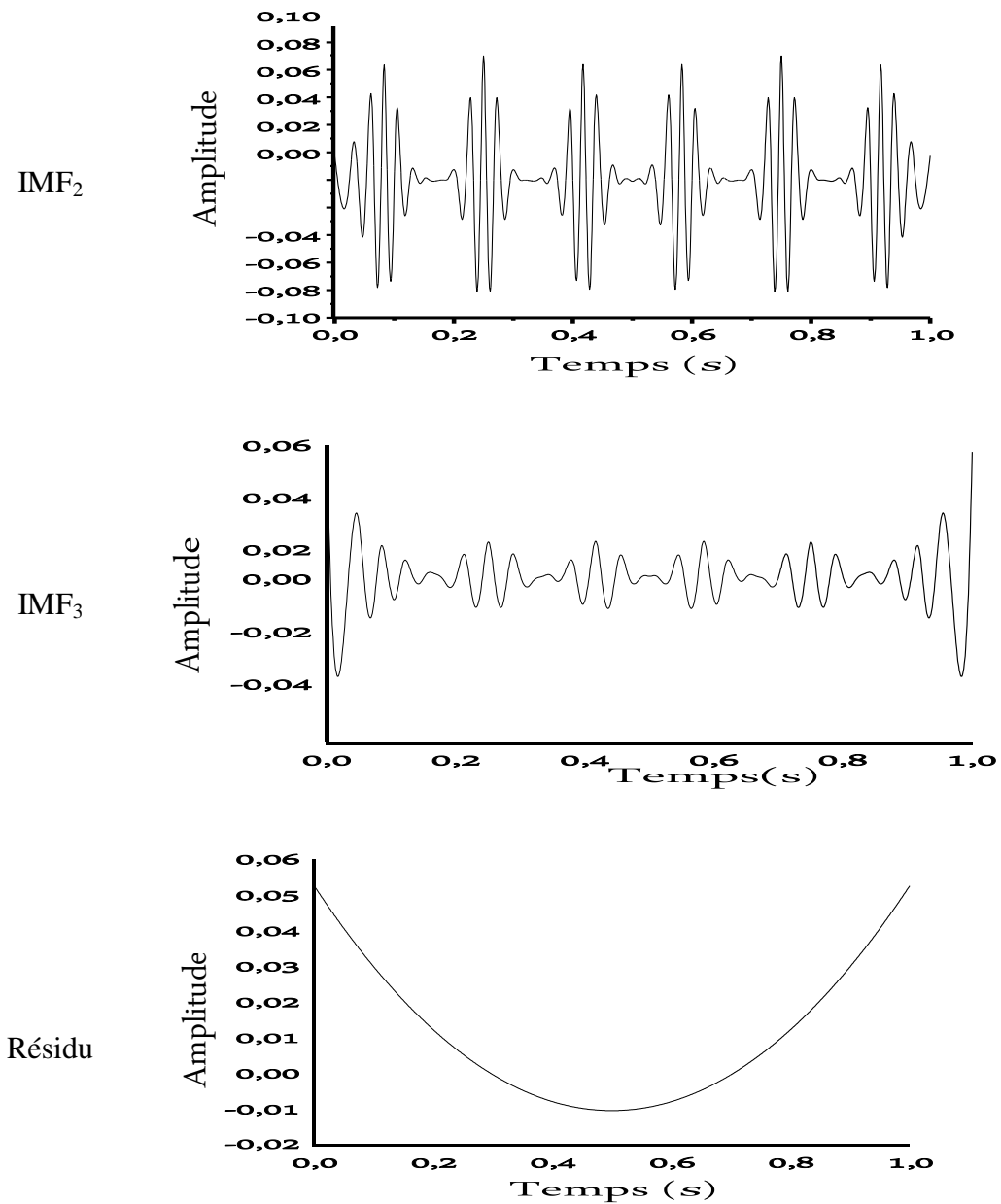


Fig. III.10 Décomposition EMD du signal $x_3(t)$ constitué de deux fréquences très voisines.

Nous nous attendions à ce que l'EMD produise au moins deux IMFs : L'une est associée à la plus haute fréquence et l'autre à la plus basse. Nous observons que l'EMD considère le signal $x_3(t)$ comme une composante unique modulée en amplitude (Fig. III.10). On conclut que la méthode EMD est affectée par les fréquences très proches.

III.4.6.2 Comparaison avec les ondelettes

Pour comparer la méthode EMD et la transformée en ondelettes, nous avons analysé un signal

constitué de trois sinusoïdes : rapide ($\sin(3\pi t)$), moyenne ($\sin(0,3\pi t)$) et lente ($\sin(0,03\pi t)$).

$$x_4(t) = \sin(3\pi t) + \sin(0,3\pi t) + \sin(0,03\pi t) \quad (\text{III.27})$$

Pour la comparaison, nous avons utilisé les ondelettes orthogonales de Daubechies (db3) sur cinq niveaux (Fig. III.11). La décomposition EMD permet d'estimer correctement les différentes oscillations constituant le signal $x_4(t)$ de la plus rapide (IMF1) à la plus lente (IMF3) Fig. III.11b.

La décomposition par la transformée en ondelettes est illustrée dans la figure III.11c où les

a_p

et d_p représentent les Approximations et les Détails du signal respectivement. Cette figure montre que la sinusoïde rapide est présentée dans d_1 , celle de fréquence moyenne est représentée dans d_4 et la sinusoïde lente est donnée dans a_4 .

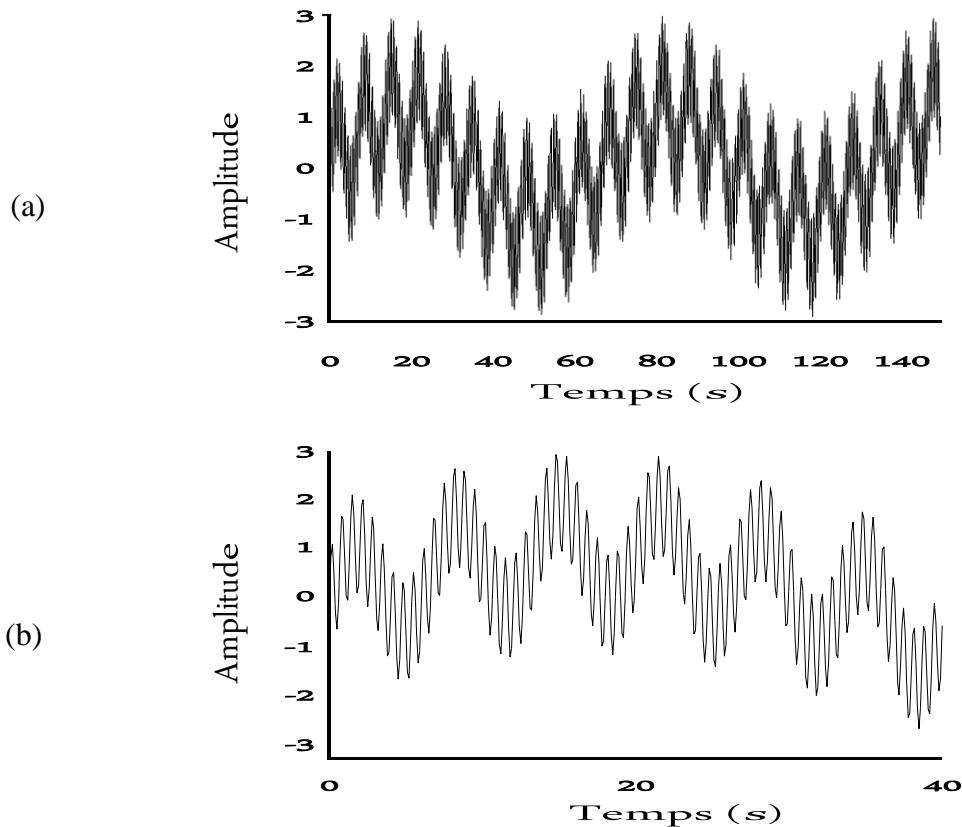


Fig. III.11a , a : signal test $x_4(t)$, b : agrandissement du signal $x_4(t)$ de l'équation (3.27).

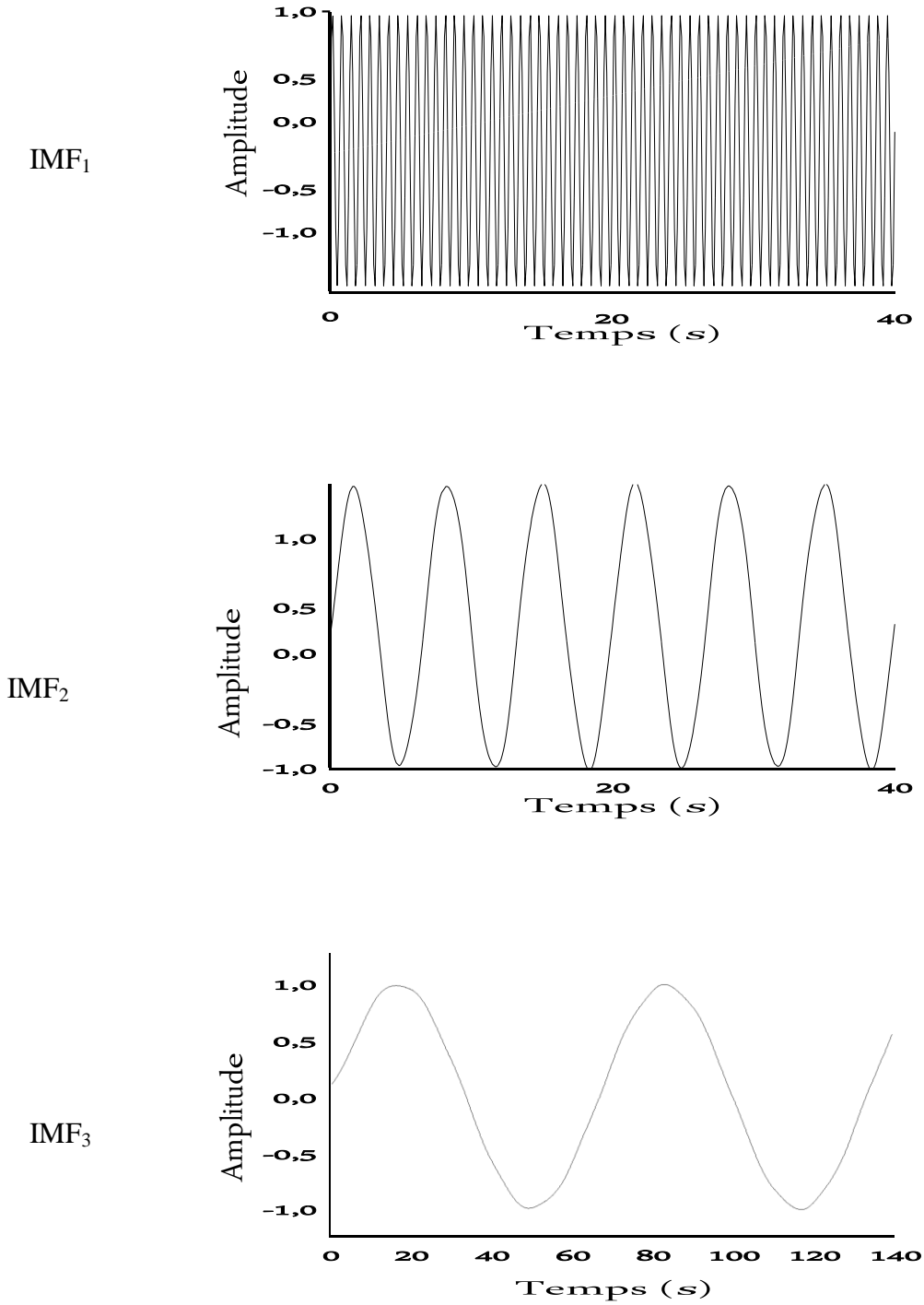


Figure III.11b Décomposition EMD du signal $x_4(t)$.

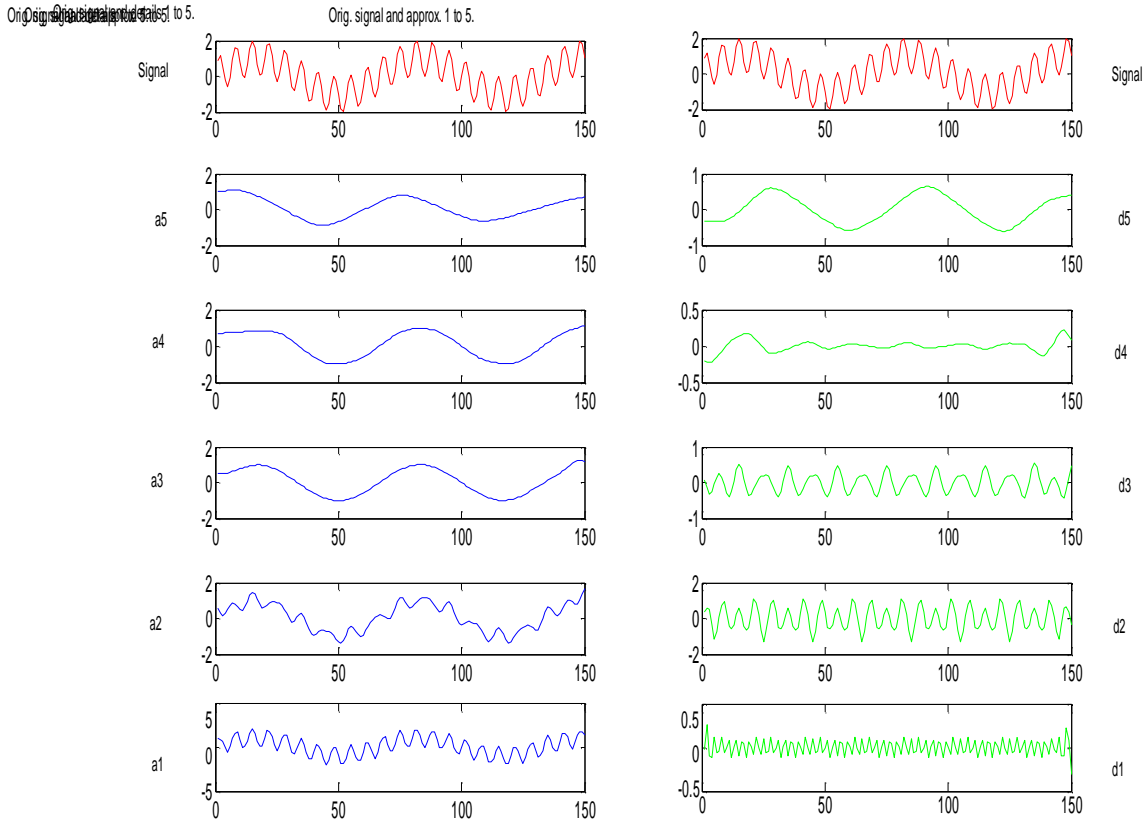


Figure. III.11c. Décomposition par les ondelettes du signal $x_4(t)$.

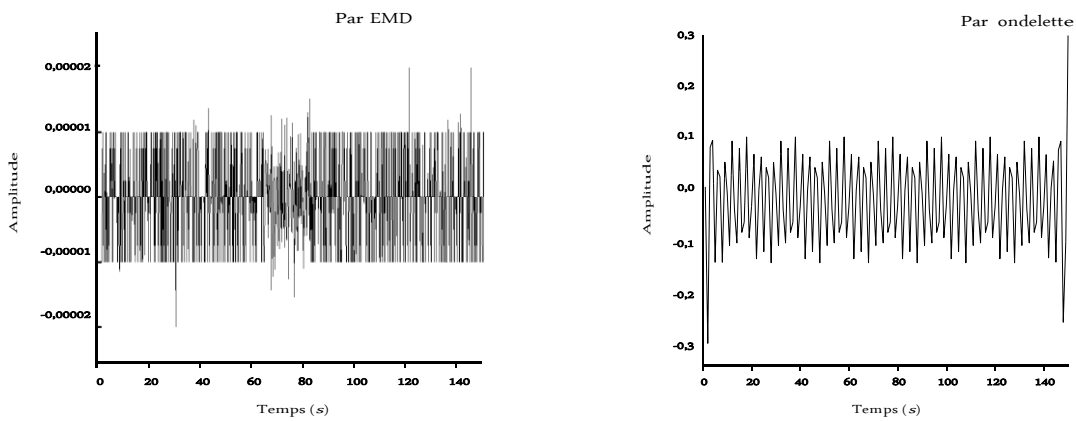


Fig. III.11d Erreur des estimations EMD/Ondelettes

Fig. III.11. Comparaison des principes de décomposition par l'EMD et par les ondelettes

Nous remarquons que les erreurs d'estimation des différentes composantes sont globalement plus importantes pour l'approche basée sur les ondelettes que celle basée sur l'EMD

(Figure III.11d). La transformée en ondelettes apparaît plus comme une approche paramétrique qui nécessite l'élaboration préalable de la base de projection. Tandis que l'EMD se classe plutôt dans la famille des approches non-paramétriques. Ces deux méthodes décomposent un signal de manière différente. En effet, la méthode des ondelettes décompose un signal des plus basses fréquences vers les plus hautes. Par contre la méthode EMD aborde la décomposition de façon diamétralement différente en débutant par les hautes fréquences pour terminer vers les plus basses.

III.4.7 Défauts de la méthode EMD

III.4.7.1 Critères d'arrêt

L'implémentation de l'EMD nécessite de faire des choix. Notamment en ce qui concerne le critère d'arrêt du processus de tamisage qui est profondément lié à la libre interprétation de la moyenne locale nulle dans la définition d'une IMF. Ce choix fausse donc en partie la légitimité de la méthode car il est basé uniquement sur des constatations empiriques et non pas sur des preuves mathématiques. Le critère d'arrêt est cependant nécessaire pour que l'algorithme termine en un nombre fini d'étapes.

III.4.7.2 Effets de bord

Un autre point négatif de la méthode EMD est sa très grande sensibilité aux effets de bord. Cela est en partie lié au choix usuel des splines cubiques. Mais il n'existe pas de méthode systématique pour diminuer ces effets de bord. Des tentatives classiques de symétrisations, d'effet miroir, d'extrapolation ont été effectuées et ont été développés [26], [27], [32].

III.4.7.3 Problème de mixage des modes

La méthode EMD a été largement appliquée à l'analyse des signaux non-stationnaires et/ou non-linéaires. Cependant, les résultats de décomposition souffrent souvent du mélange de modes. Le mélange de modes consiste d'une part à l'apparition de plus d'une IMF de la même oscillation locale et d'autre part à la disparition dramatique des oscillations de faible amplitude [33] causée par la non identification de leurs extrema et par conséquent l'IMF résultant se présente comme un mélange de plus d'une fréquence sur une durée d'analyse ce qui lui fait perdre sa signification physique. Pour illustrer un tel phénomène, nous avons considéré le signal $x_5(t)$ composé de deux composantes ($x_6(t)$, $x_7(t)$):

$$x_5(t) = x_6(t) = x_7(t); \quad (\text{III.38})$$

$$x_6(t) = \sin(2\pi f_1 t) \quad (\text{III.29})$$

Et

$$x_7 = \lambda \sin(2\pi f_2 t) \left[e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\sigma}} \right] \quad (\text{III.30})$$

$x_6(t)$ représente une composante sinusoïdale basse fréquence tandis que $x_7(t)$ représente une composante de haute fréquence (Fig. III.12). Pour illustrer, nous avons utilisé les valeurs

numériques suivantes : $t_0 = 0.005s$, $\sigma = 10^{-6}$, $\lambda = 0.06$, $f_1 = 100Hz$ et $f_2 = 1500Hz$.

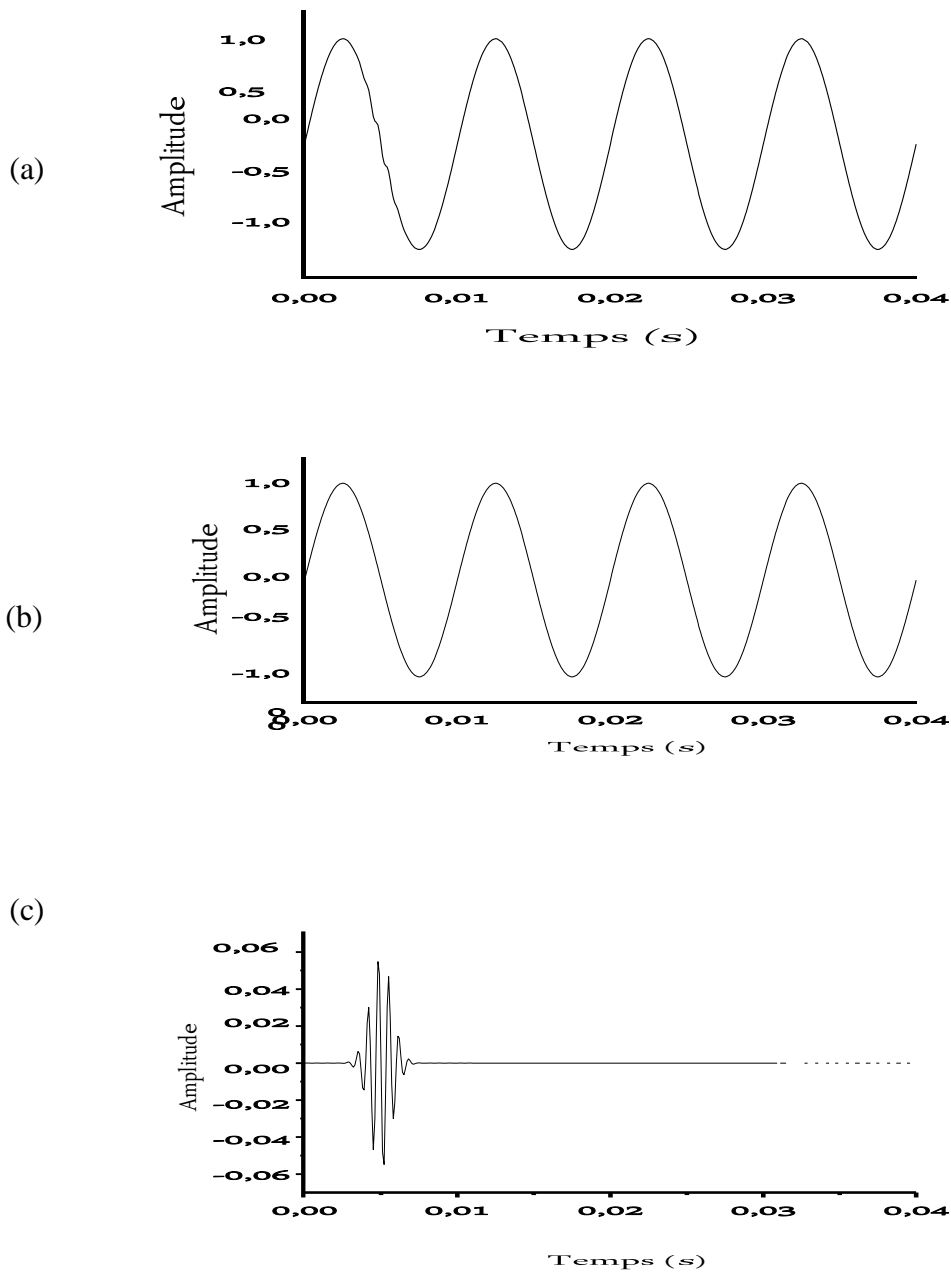


Fig. III.12 (a) Le signal $x_5(t)$, (b) le signal $x_6(t)$, (c) le signal $x_7(t)$

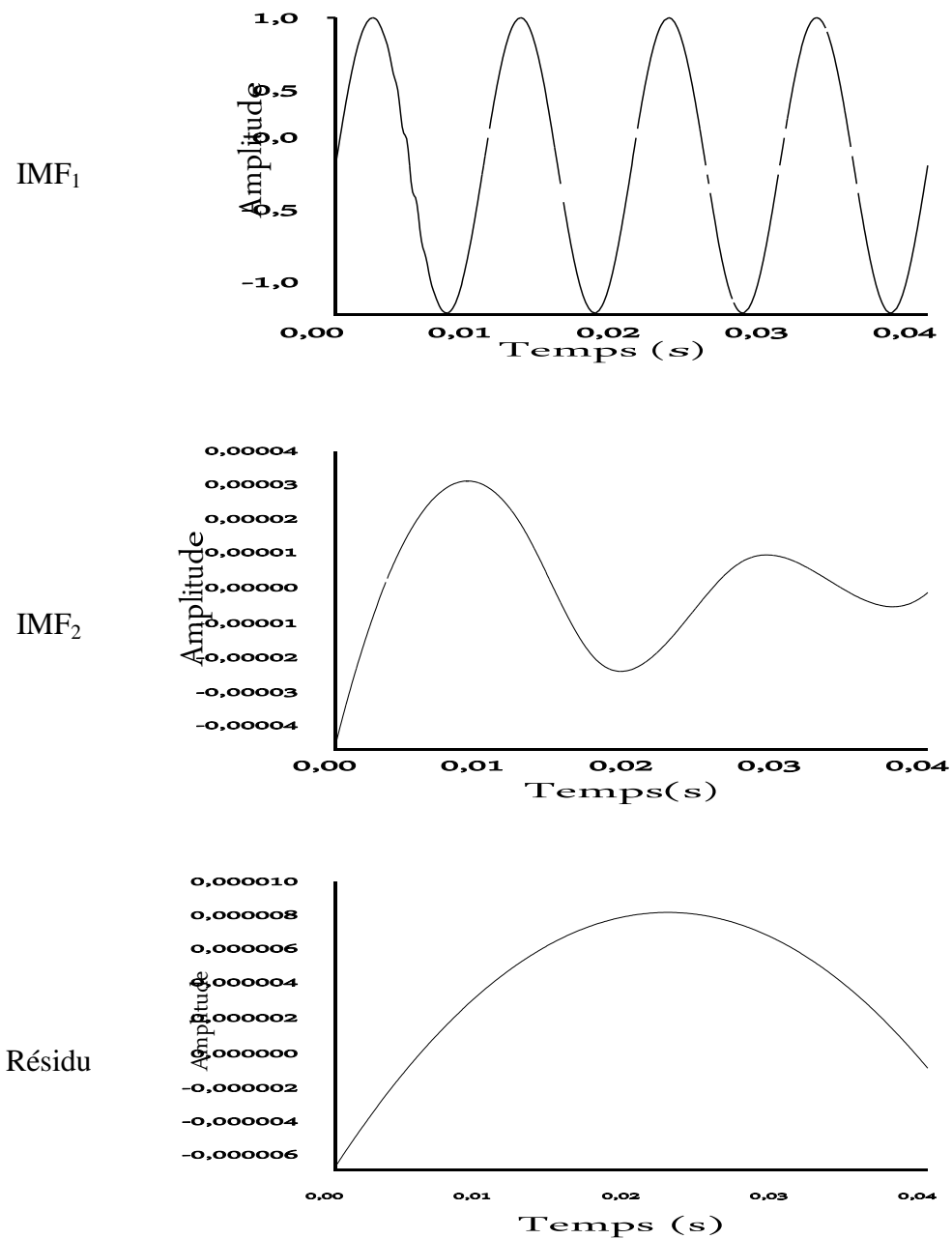


Fig.III.13 La décomposition par l'EMD du signal $x_5(t)$ (équation III.28).

Le mélange de mode arrive quand la méthode EMD est appliquée pour décomposer un signal composé de deux composantes de fréquences très éloignées. Le principe est montré dans la (figure III.13) où les deux composantes sont mélangées ensemble dans une seule IMF (IMF₁).

III.4.7.4 Absence d'expression analytique Le dernier défaut de l'EMD est son absence d'expression analytique. L'EMD étant un algorithme, il n'y a pas de fondements mathématiques sous-jacents à cette décomposition.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié le principe de la décomposition par la méthode EMD et notamment le processus de tamisage permettant d'imposer des contraintes sur les IMFs. Lors de cette étude des problématiques ont été identifiées comme par exemple l'interpolation de la décomposition.

La décomposition par la méthode EMD a été comparée à la transformée en ondelettes. La transformée en ondelettes apparait comme une méthode paramétrique tandis que l'EMD est plutôt une approche non-paramétrique. La transformée en ondelettes décompose un signal en partant des plus basses fréquences vers les plus hautes. Par contre la méthode EMD aborde la décomposition en débutant par les hautes fréquences pour terminer vers les plus basses. Les erreurs d'estimation des différentes composantes sont globalement plus importantes pour l'approche basée sur les ondelettes que celle basée sur l'EMD.

Dans le prochain chapitre on va appliquer cette technique sur des signaux provenant d'une ou deux fuites d'eau, voir leurs spectres de fréquences. Décomposé les signaux en plusieurs IMFs ensuite appliquée la technique d'auto- corrélation la plus connue pour la détermination de la position exacte de la fuite. Cette technique a montrée son efficacité pour la détection des défauts des roulements en se basant sur la vitesse de rotation qui est connue.

CHAPITRE.IV

TESTS ET

INTERPRETATION

DES RESULTATS

IV.1 INTRODUCTION

Dans le cadre de la détection de fuites, dans les réseaux de distribution nous avons pensé à utiliser des capteurs acoustiques au lieu des capteurs vibratoires. Nous avons exploité une carte très récente fonctionnant autour d'un microcontrôleur ARM Cortex-M4 32-bit pour l'acquisition de nos signaux de fuite provenant de ces deux capteurs. On a aussi appliqué une technique récente utilisée en traitement de signal appelée EMD me permettant de décomposer le signal en plusieurs composantes stationnaires afin de débruité ce signal et n'exploité que le signal utile. Les signaux acquis sont stockés dans un PC sous forme de fichiers Excel. La numérisation de ces signaux, nous permet d'appliquer les différents algorithmes pour les traiter afin de confirmer la présence des fuites et éventuellement de déterminer leurs endroits exacts sur le canal. Des tests de validation de cette technique vont être présentés.

IV.2 SYSTÈME D'ACQUISITION

Notre système de détection de fuites est basé principalement sur le kit acoustique (microphone de mesure et amplificateur) pour le captage et le conditionnement des signaux analogiques sonores, ainsi sur la carte STM32F4xx pour l'acquisition et la numérisation des données avant la phase de traitement dans un PC sous Matlab.

IV.3 La Chaîne d'acquisition

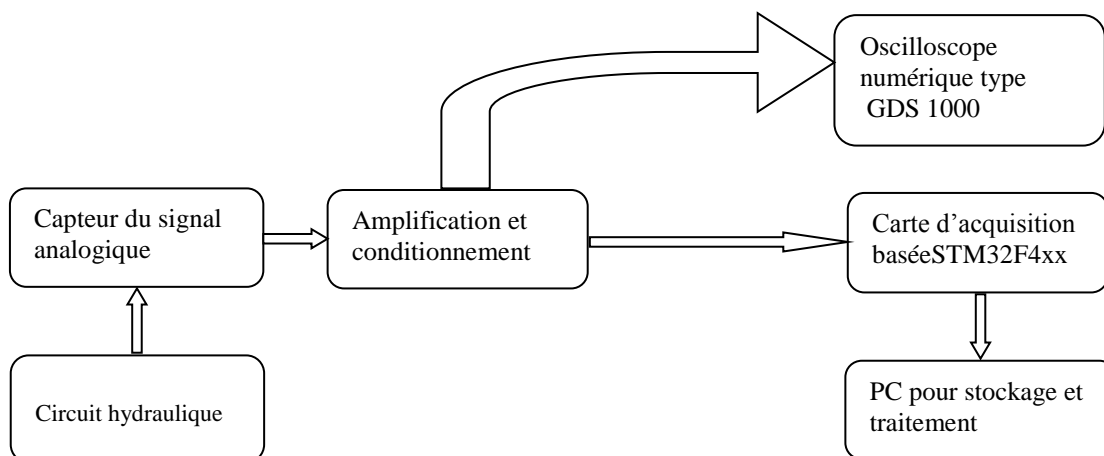


Figure IV.1 Synoptique du système d'acquisition

Dans ce schéma nous avons présentés les différents blocs opératoires utilisés pour l'acquisition des signaux de fuite.

IV.3.1 Capteur acoustique

Le microphone de mesure est adapté pour les sondages acoustiques spéciaux, par exemple tracé en forme de point de champs sonores. Ses trois modes de sortie sélectionnables (Signal ~, niveau, Trigger), amplificateur intégré et le libre choix de l'alimentation, à savoir la batterie ou sur secteur d'unité, lui permettent d'être utilisé de manière universelle.

Ce dernier est constitué comme est indiqué sur la figure IV.2.

1. entrée acoustique avec micro capsule.
2. Tube de sonde \varnothing 8 mm, 25 cm de longueur, peut être serré dans une douille.
3. Switch sur le bouton bref pression sur les commutateurs de boutons sur l'amplificateur intégré pour environ 1,5 heure. Chaque fois que le bouton est enfoncé, même pendant le fonctionnement, le temps restant est prolongé à nouveau d'environ 1,5 heure. Après le temps est écoulé, arrêt se produit automatiquement.
4. Compartiment à piles pour une batterie de type bloc 9 V (IEC 6F 22), avec couvercle en plastique.
5. Sortie : câble coaxial, ayant 2 m de longueur, avec connecteur BNC.
6. diode Signal qui indique par un clignotement (environ toutes les 4 secondes) que le microphone de mesure est en fonctionnement.
7. paramètre Gain continuellement réglable de 50 à 5000.
8. Sélecteur pour mode de sortie.
9. boîtier du capteur.

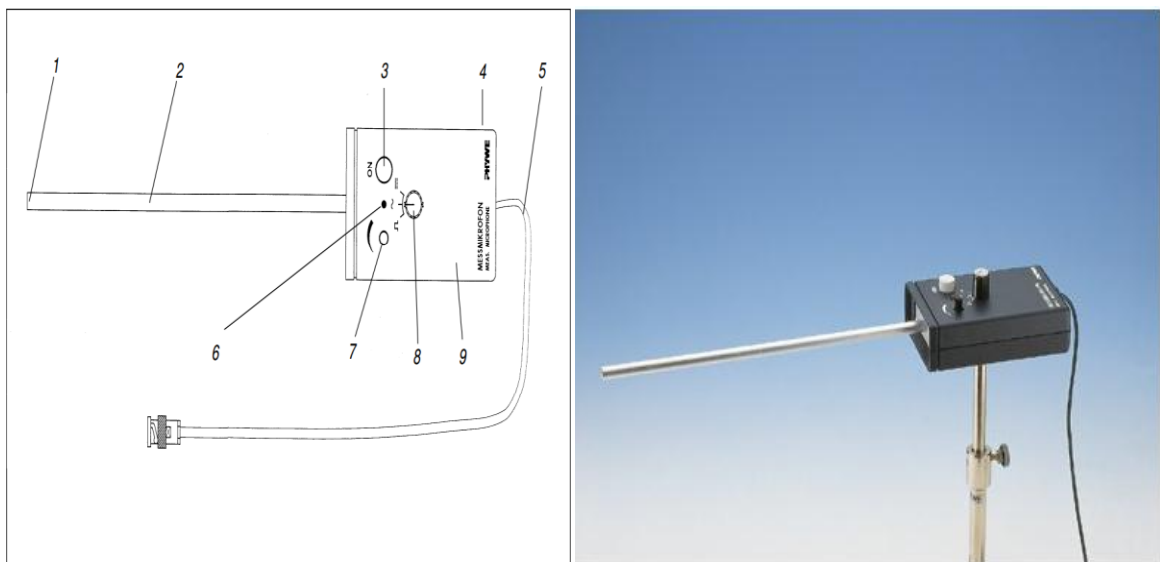


Figure IV.2 Capteur acoustique de signaux (Microphone de mesure)

IV.3.2 Amplificateur basse fréquence

L'amplificateur de basse fréquence est une unité polyvalente utilisée pour les applications suivantes :

- Un amplificateur de puissance de tension alternative à $U_{\text{eff}} = 10 \text{ V}$, avec une puissance maximale de 15 W à l'amplification de tension qui peut être réglée dans une plage de 0,1 ... 1000 pour une tension de sortie maximale de 10 V.

-Un amplificateur de puissance de tension continu DC peut aller jusqu'à 10 V; valeurs maximales de sortie $\pm 10 \text{ V} / 2 \text{ A}$ (20 W).L'instrument peut être utilisé entre autres pour amplifier les tensions provenant de la DA .Des sorties de conversion de l'interface cobra de d'ordinateur.

L'ajustement de la tension d'amplification est réalisé de la même manière que dans le cas de tensions alternatives.

❖ Utiliser comme un amplificateur de puissance

En fonction de la gamme de fréquence requise, la tension à amplifier est donnée dans l'unité sur un câble BNC, soit à entrée en courant alternatif (1) ou à entrée en courant continu (2). Si l'entrée AC est utilisée, la clé (7) ne doit pas être déprimée, si l'entrée DC est utilisée, la clé (7) doit être déprimée. Les tensions jusqu'à 10 V peuvent être amplifiées.

❖ Utiliser comme un amplificateur de mesure

La tension à amplifier est entrée de la même manière comme décrit dans la section précédente destiné à être utilisé comme un amplificateur de puissance. Le signal amplifié est prélevé sur l'efficacité sortie de valeur (4), soit à partir de la paire de douilles de 4 mm ou de la prise BNC parallèle. Amplification peut être réglée avec le commutateur multipoint (8), le bouton de réglage (5) étant réglé sur la position "CAL". Tension UE d'entrée peut être calculée à partir de la tension continue mesurée à la sortie en fonction de l'endroit où V est le facteur d'amplification serti (8). Si l'entrée AC (1)est utilisée, UE est la valeur effective de la tension d'entrée. Si l'entrée DC (2) est utilisée, UE est la valeur instantanée de la tension continue appliquée qui doit être prise.

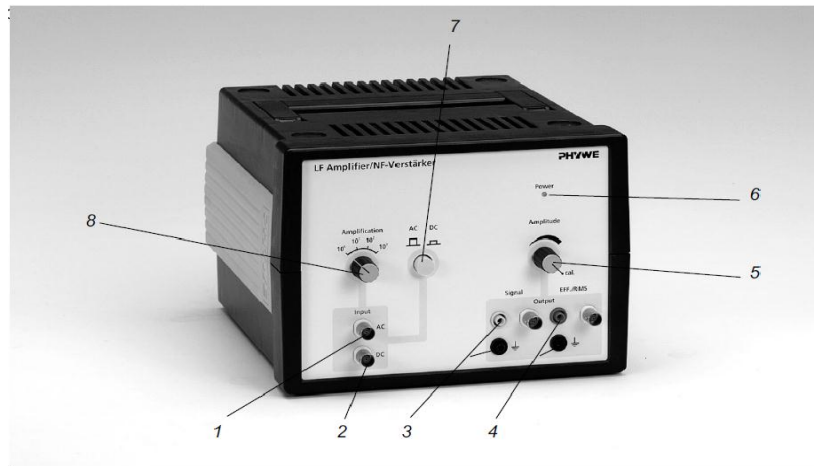


Figure IV. 3 Amplificateur basse fréquence.

❖ Éléments fonctionnels et opérationnelles

1. L'entrée de tension alternative.
2. Entrée de tension directe.
3. Puissance.
4. Sortie de mesure.
5. Bouton de réglage d'amplification.
6. Unité sur la lumière de commande.
7. Touche de mode de fonctionnement ".
8. Amplification "commutateur multipoint.

IV.3 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 quatre et cinq (4-5) de la carte STM32F4xx.

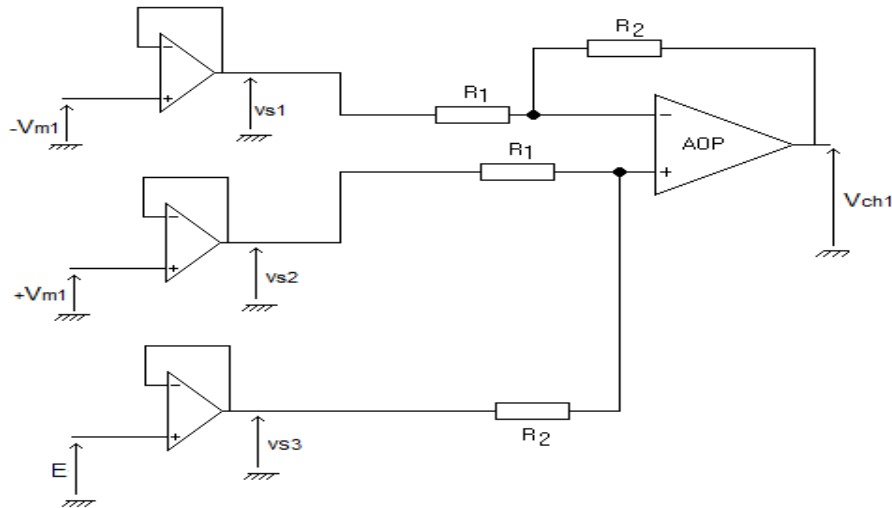


Figure IV.4 Montage de conditionnement des signaux

- **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 :

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

$$\begin{cases} Vs1 = -Vm1 \\ Vs2 = +Vm1 \\ Vs3 = E \end{cases} \quad (IV.2)$$

- **L'étage (2)** est un montage soustracteur des signaux appliqués aux deux entrées. -Vm1 et +Vm1 en plus, on a ajouté une composante continu (E) pour avoir un signal purement positif pour qu'il soit utilisable par la carte STM32F4xx qui n'accepte que des tensions comprises entre 0 et 3V. alors:

$$V^- = \frac{\frac{E}{R2} + \frac{Vs2}{R1}}{\frac{1}{R2} + \frac{1}{R1}} \quad (IV.3)$$

$$V^+ = \frac{\frac{Vs1}{R1} + \frac{Vch1}{R2}}{\frac{1}{R2} + \frac{1}{R1}} \quad (IV.4)$$

$$V^- = V^+$$

$$E.R1 + Vs2.R2 = Vs1.R2 + Vch1.R1$$

$$V_{ch1} = \frac{E.R1 + Vs2.R2 - Vs1.R2}{R1}$$

$$V_{ch1} = \frac{R2}{R1} (Vs2 - Vs1) + E \quad (IV.5)$$

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

$$R2 = 10 \text{ k}\Omega, R1 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$G = \frac{R2}{R1} = 0,5$$

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

IV.3.4 L'oscilloscope numérique GDS 1000

L'oscilloscope GDS 1000 est utilisé pour la visualisation des signaux sortants de l'amplificateur avant de les envoyer vers la carte STM32F4xx pour les convertir à des signaux numériques exploitables.

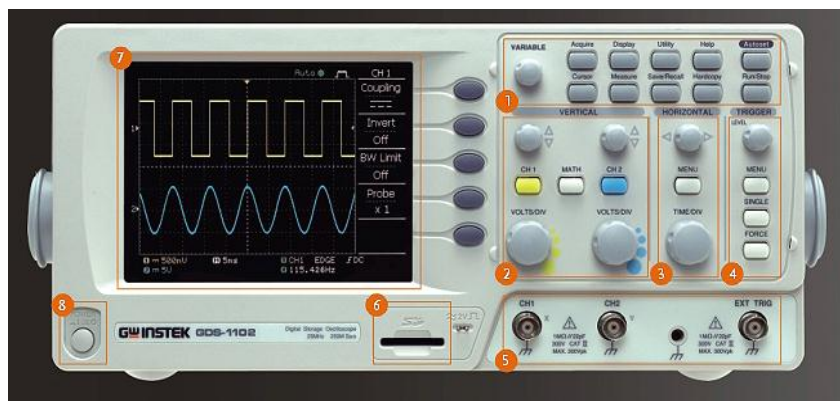


figure IV.5 Oscilloscope numérique GDS 1000

Fonctionnalité d'oscilloscope GDS 1000

1. Les touches de fonction
2. système vertical
3. système horizontal
4. Système de déclenchement
5. Chaîne d'entrée
6. Fente pour carte SD
7. écran couleur TFT
8. interrupteur
9. périphérique USB et sortie cal

Caractéristiques

- Deux canaux, plein bande passante 25MHz_100MHz
- Le taux d'échantillonnage en temps réel 250Msa / s ,25GSA/s et Le taux d'échantillonnage

- 4k longueurs de mémoire par canal
- détection de crête aussi vite que 10ns
- sauvegarder / rappel des 15 paramètres et des formes d'onde de la face avant
- 5.6 " écran couleur TFT pour tous les modèles
- 19 mesures automatiques
- temps 1ns gamme de base ~ 10s / div.
- connexion PC avec USB
- opérateurs arithmétiques additionner, soustraire, FFT
- 6 chiffres en temps réel compteur de fréquence
- menu de fonctionnement de plusieurs langues

IV.3.5 La carte STM32F4xx

Le kit STM32F4xx DISCOVERY permet aux utilisateurs de développer facilement des applications avec une haute performance à partir des microcontrôleurs embarqués dans le module STM32F4xx à 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.



Figure IV.6 Carte STM32F 4xx face affichage

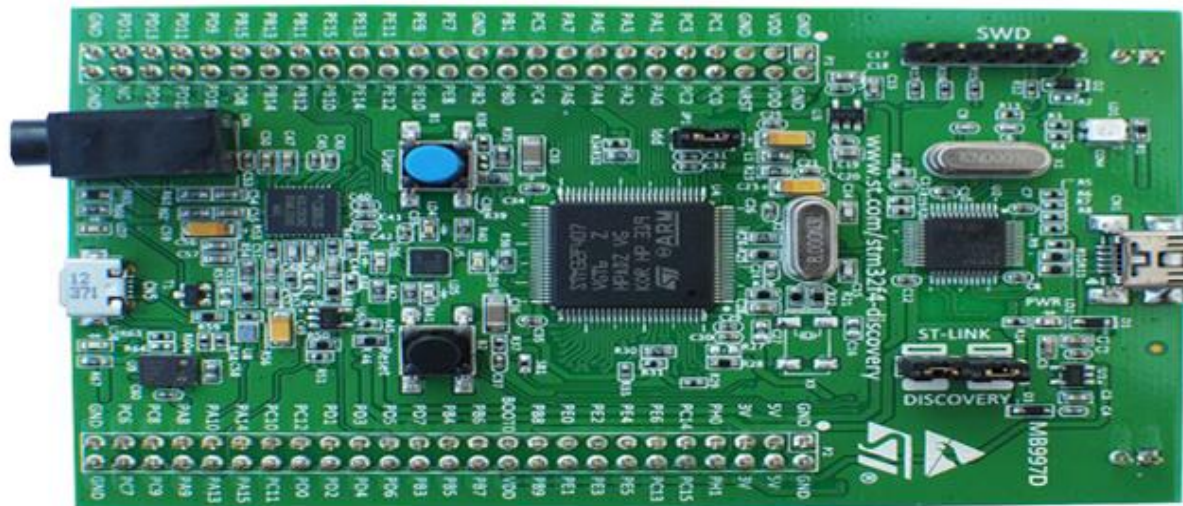


Figure IV.7 Carte STM32F4xx face connecteur

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 STM32F4xx DISCOVERY est implanté un ST-LINK/V2 ou un STM32F407G-DISC1 est implanté sur 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

IV.4 SCHEMA HYDRAULIQUE

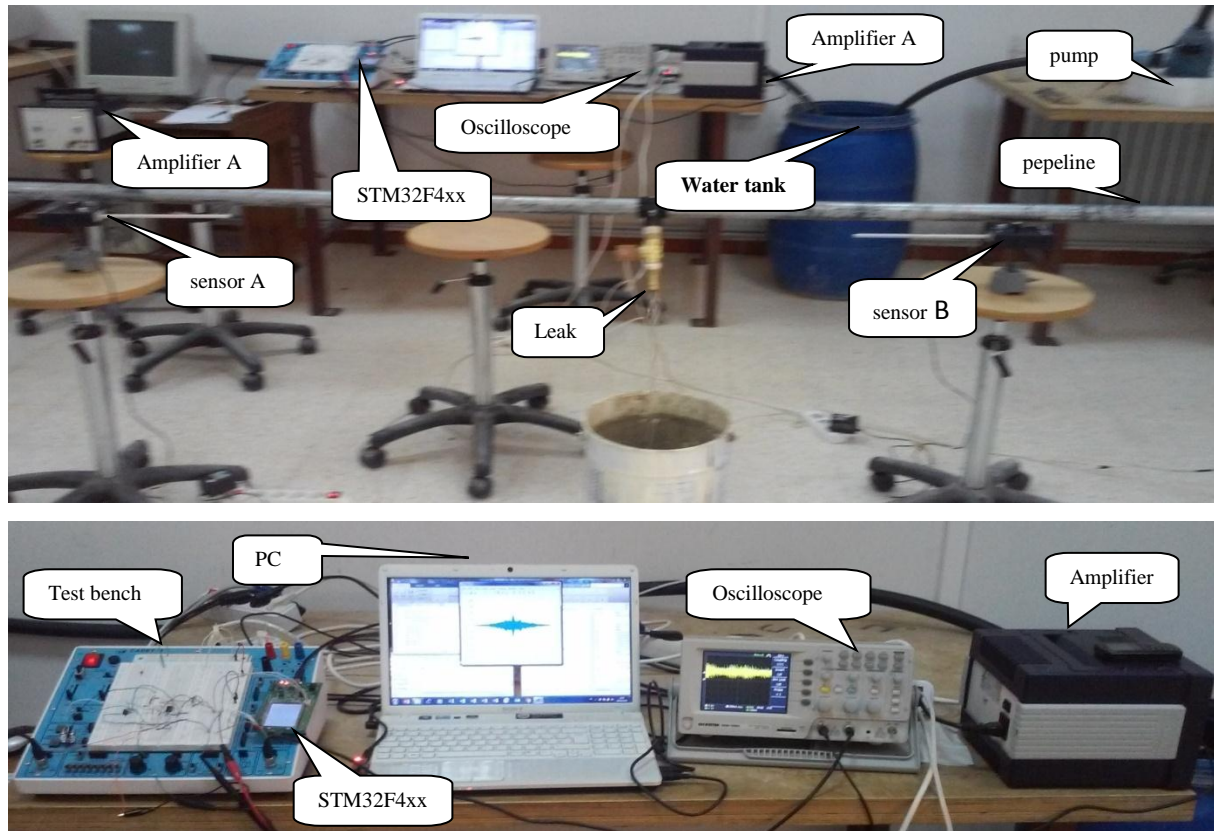


Figure IV.8 Appareillages utilisés

IV.5 SIGNAUX ACQUIS

Avant d'entamer l'acquisition de nos signaux un étalonnage de l'appareillage est indispensable.

IV.5.1 Premier Test (étalonnage)

Les deux capteurs sont installés à une distance de 1 mètre de la fuite. Normalement avec cette disposition l'application de l'algorithme de corrélation me ramène à une distance de 1 m. Dans ce test nous avons installés les deux capteurs au préalable à une distance de 100 cm de part et d'autre de la fuite pour s'assurer que la distance après l'application de l'algorithme me donne la distance exacte. Alors après le test pratique les deux capteurs nous ont montrés que les résultats obtenus sont similaires aux distances choisies.

❖ **Signal de la chaîne une** : Comme il est représenté sur la figure IV.9. Le signal temporel est composé de deux parties l'une sans fuite prenant une durée de 10s et l'autre avec fuite, déclenchée au milieu du temps d'acquisition de signal (CH1) prenant la même période.

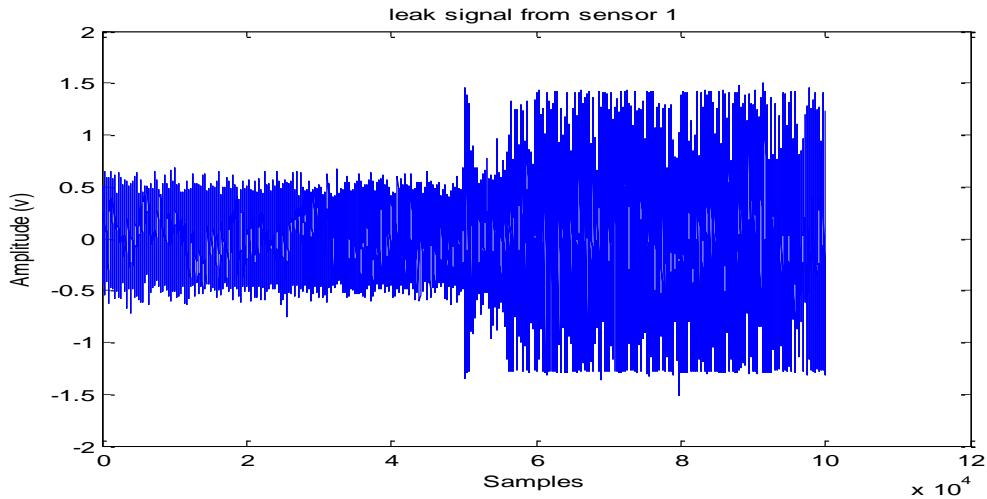
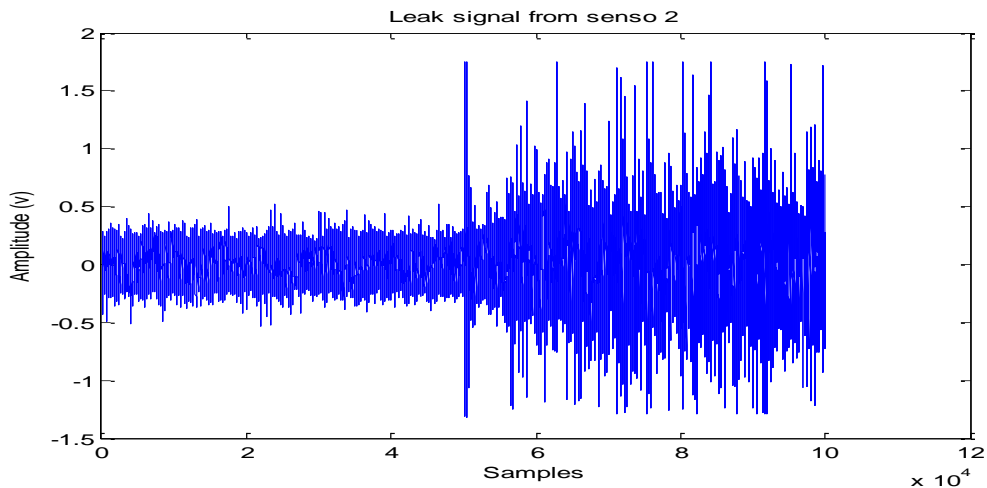


Figure IV.9 Signal acquis sur la chaîne une

❖ **Signal de la chaîne deux** : Même condition appliquée pour l'acquisition du deuxième signal (CH2), et dire aussi que les deux signaux sont acquis en même temps.



❖ Figure IV.10 Signal acquis sur la chaîne deux

❖ **Signaux de différents IMF_y** : Après application de la méthode EMD (décomposition modale empirique) sur le signal chaîne une on a obtenu les signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_y , ou on voit que la première IMF_{y-1} est très proche du signal d'origine ainsi que l' IMF_{y-3} par contre les deux IMF_{y-2} et IMF_{y-4} ne correspondent pas au signal d'origine.

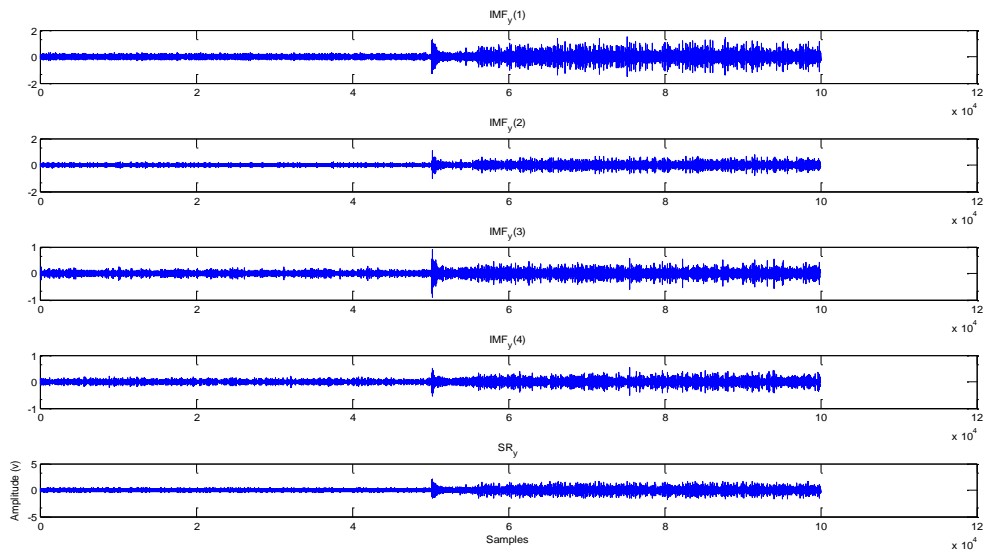


Figure IV.11 Signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_y

❖ **Signaux de différents IMF_s** : Après application de méthode EMD (décomposition modale empirique) sur le signal chaîne deux, on a obtenu les signaux des quatre IMF_s ainsi que le résidu SR_s et même interprétation que les signaux des IMF_y vu au-dessous.

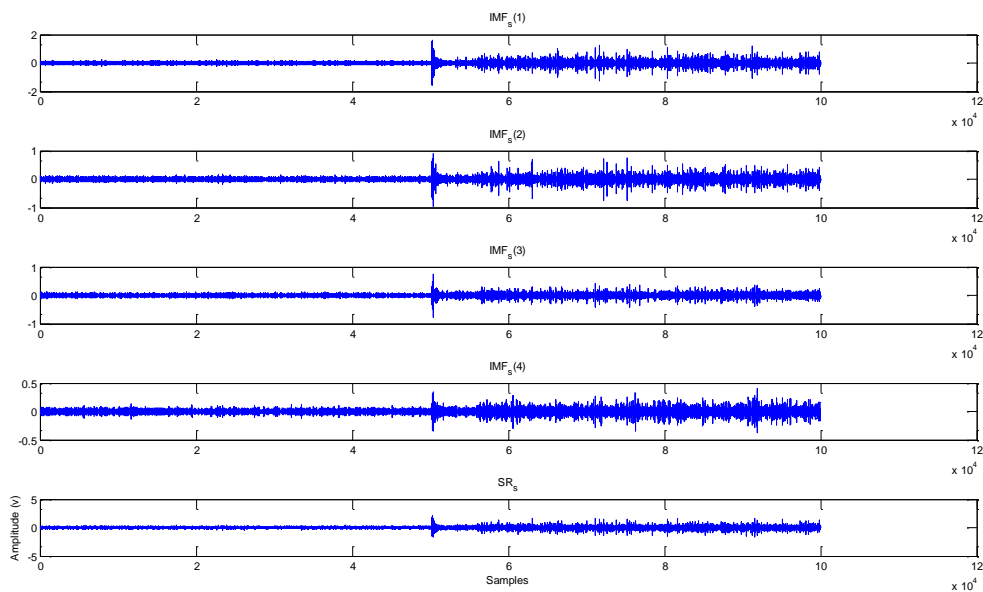


Figure IV.12. Signaux des quatre IMF_s ainsi que le résidu SR_s

❖ **Signal de corrélation des deux signaux ($IMF_y -1$ et $IMF_s -1$)** : L'exécution de la corrélation par l'outil de traitement Matlab sur les deux signaux des premières IMF s des deux signaux montre le résultat suivant qui confirme la distance exacte de l'un des deux capteurs par rapport à la fuite.

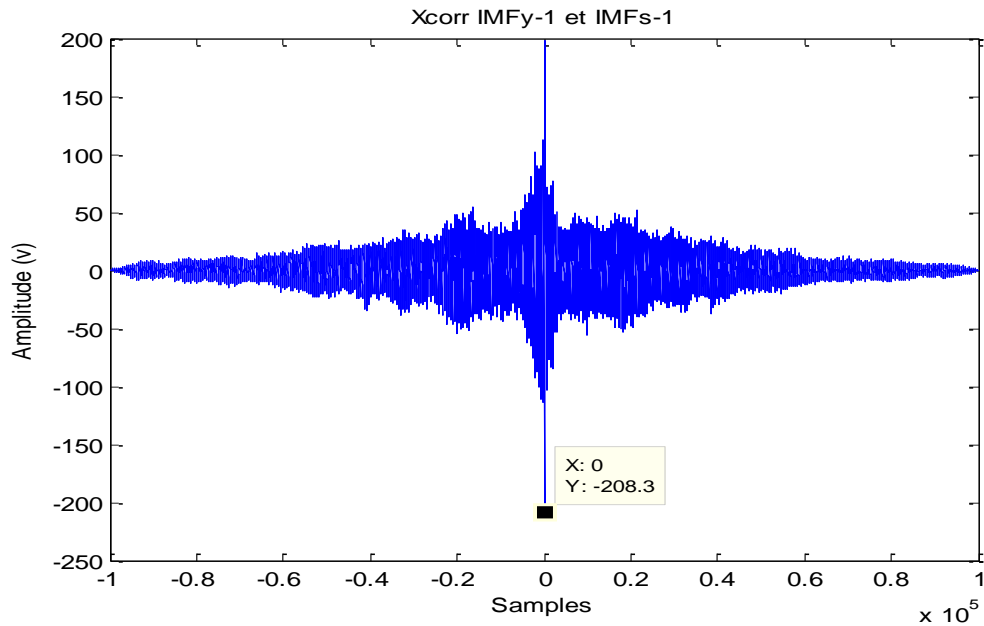


Figure IV.13 Signal de corrélation des deux signaux (IMF_y-1 et IMF_s-1)

La figure IV.13 Montre la position exacte de l'un des deux capteurs par rapport à la fuite ($x=0$) c'est-à-dire que le capteur est à (1m) un mètre de la fuite.

❖ Résultats données par commande Windows

Après exécution du programme élaboré sous Matlab pour la détermination du décalage temporel indispensable pour le calcul de la distance de la fuite par rapport à l'un des capteurs on a trouvé le résultat ci-dessous :

```

Columns 99991 through 99999
    -0.1392    -0.1080    -0.1573     0.3805    -0.0995     0.1484     0.2069     0.0488     0.2387

Columns 100000 through 100001
    0.1337    -0.0294

lagDiff =
     0

timeDiff =
     0

d =
     1

```

Les résultats de la commande Windows montre que la différence du temps entre les deux signaux est égale à zéro, ($\Delta t = 0$) donc la distance par rapport a l'un des deux capteurs égal à 100 cm ($d=1$ mètre).

❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaîne une (CH1).**

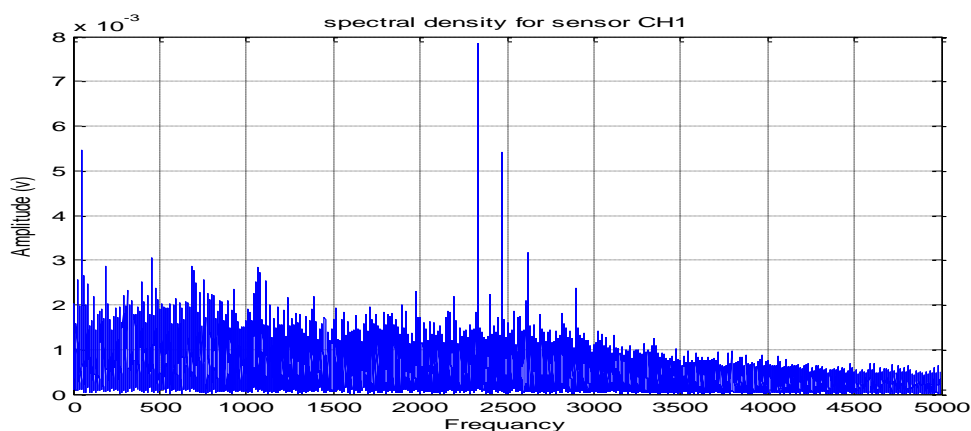


Figure IV.14 Spectre du signal CH1

L'analyse spectrale de la courbe Figure IV.14 montre qu'à partir de la fréquence 3500 Hz le signal est pratiquement invariable montrant qu'il n'y a pas d'informations dans cette zone. Par contre la zone entre 2000 Hz et 3000 Hz présente des pics porteurs de quelques informations. Le pic ayant l'amplitude maximale correspond au bruit créé lors de l'activation du relais. Et dans cette zone on peut considérer la fréquence de la fuite.

❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaîne deux (CH2).**

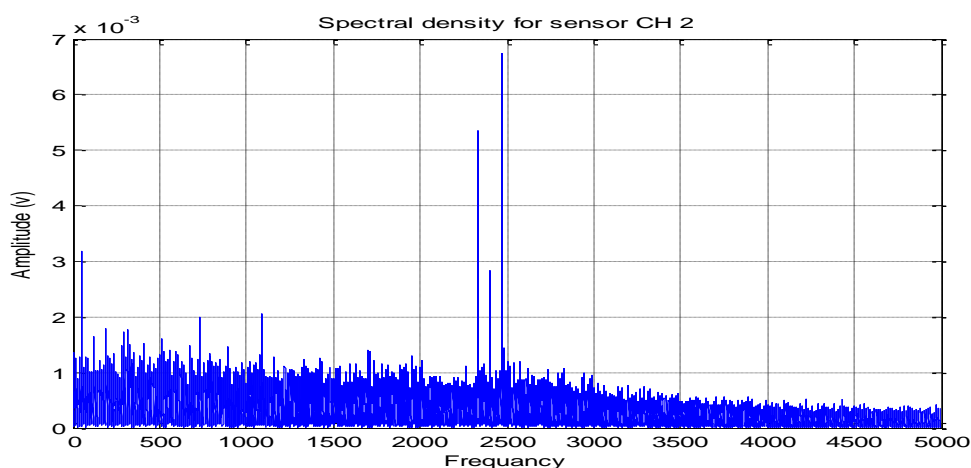


Figure IV.15 Spectre du signal CH2

On constate en analysant le signal de la deuxième chaîne CH2 que les pics trouvés sont pratiquement identiques à la chaîne CH1.

IV.5.2 Deuxième test

Capteur (1) à une distance de 20Cm et le deuxième capteur (2) à 30Cm de la fuite.

Dans ce test on a placés le premier capteur à 20Cm et le deuxième à 30Cm de la fuite. Les directions des capteurs sont orientées vers la fuite.

❖ **Signal de la chaîne une** : comme il est représenté sur la Figure IV.16 on voit un signal composé de deux partie l'une sans fuite et l'autre avec fuite. Avec une fuite déclenchée au milieu du temps d'acquisition du signal (CH1).

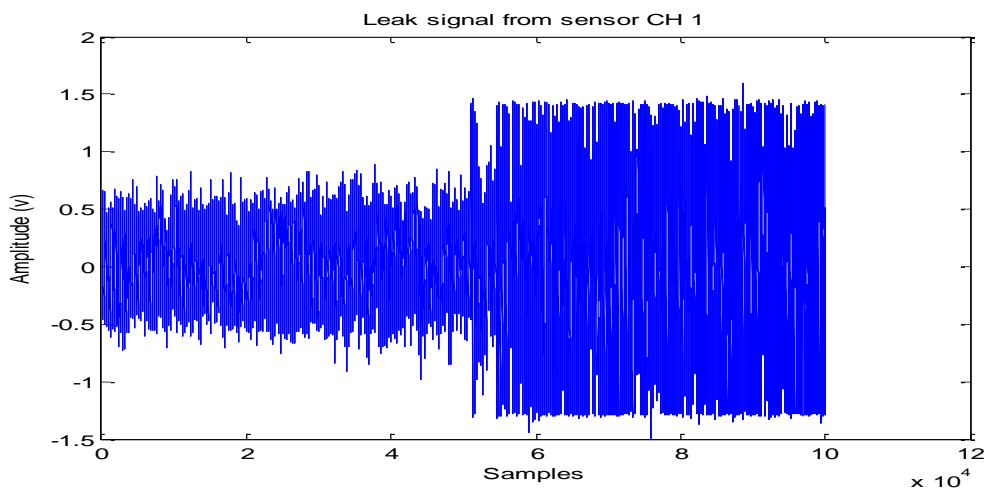


Figure IV.16 Signal acquis par la chaîne une CH1

❖ **Signal de la deuxième chaîne** : Même condition appliquée pour l'acquisition du deuxième signal (CH2)

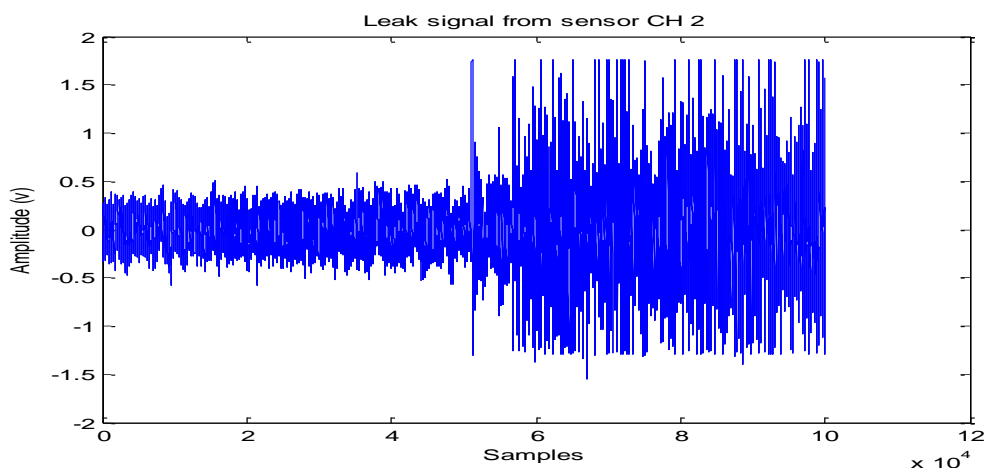


Figure IV.17 Signal acquis par la chaîne deux CH2

❖ **Signaux de différents IMF_y** : Après exécution du programme de la méthode EMD (décomposition modale empirique) sur le signal chaîne une on a gardé uniquement les quatre premiers signaux des IMF_y ainsi que le résidu SR_y .

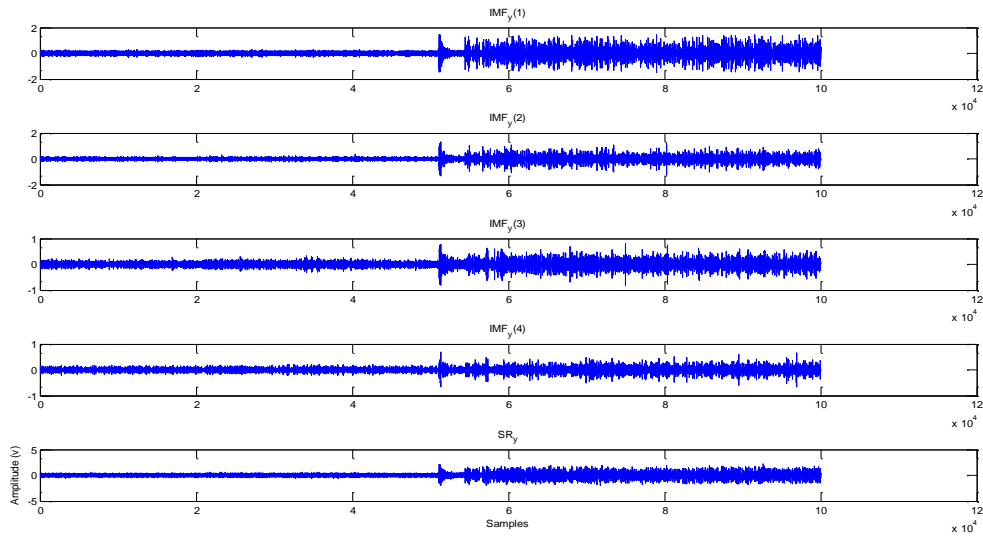


Figure IV.18 Signaux des quatre IMF_y du signal ainsi que son résidu SR_y

❖ **Signaux de différents IMF_s de la deuxième chaîne** : Après application de méthode EMD (décomposition modale empirique) sur le signal de la chaîne deux on a obtenu les signaux des quatre IMF_s ainsi que le résidu SR_s

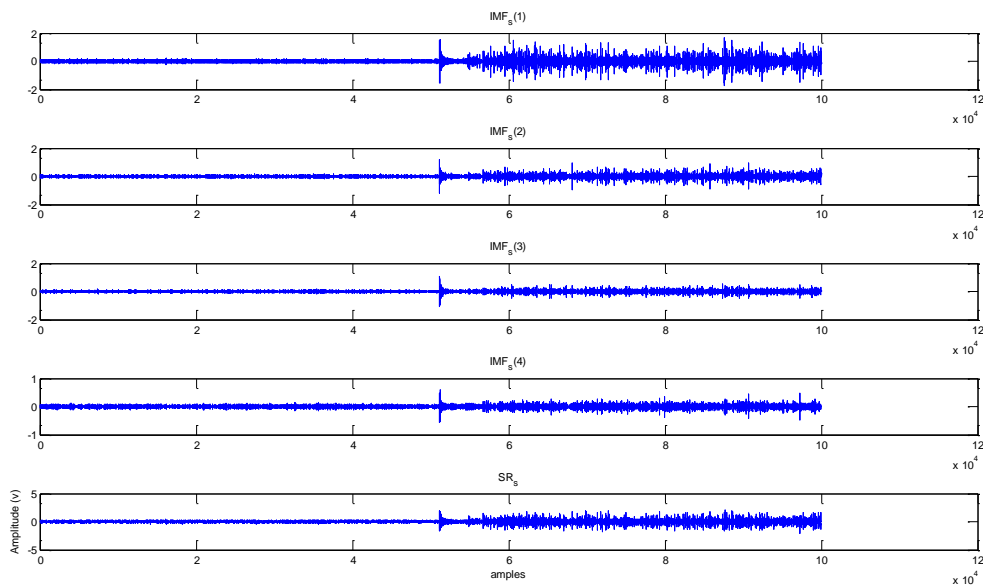


Figure IV.19 Signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_s

❖ **Signal de corrélation des deux signaux ($IMF_y -1$ et $IMF_s -1$)** : L'exécution du programme de traitement sous Matlab de la corrélation appliquée sur les premières IMF's porteuse d'informations appliqué sur les deux signaux donne le résultat suivant qui confirme la distance exacte de l'un des deux capteurs par rapport a la fuite.

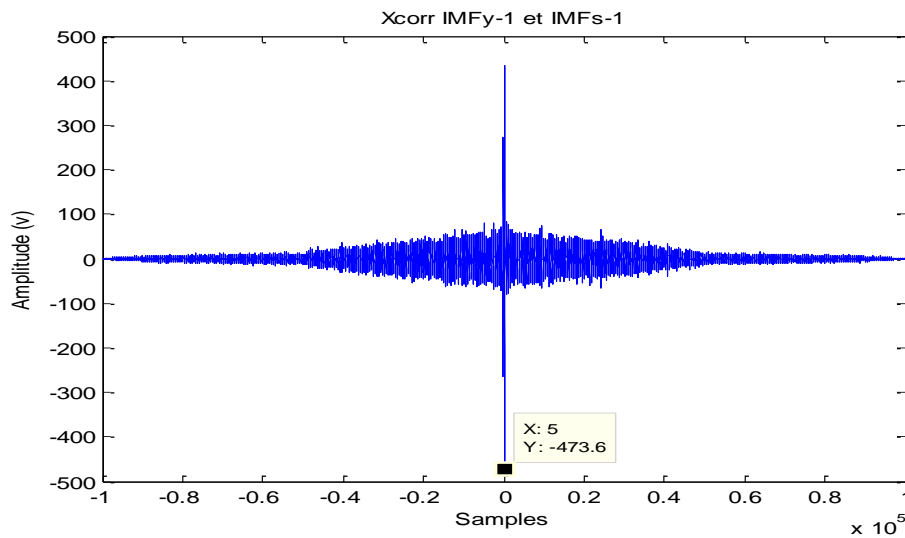


Figure IV.20 Signal de corrélation des deux signaux (IMF_y-1 et IMF_z-1)

La figure 4. montre la position exacte de l'un des deux capteurs par rapport à la fuite (x=5) c'est-à-dire que le capteur est à (0.33 m) de la fuite.

❖ Résultats données par commande Windows

```
Columns 99991 through 99999
-0.1166 -0.0441 -0.1796 0.0309 0.1030 0.1994 0.0708 -0.3741 0.1113

Columns 100000 through 100001
0.0922 0.0505

lagDiff =
5

timeDiff =
5.0000e-004

d =
0.3351
```

Les résultats de la commande Windows montre que la différence du temps entre les deux signaux est égale à, ($\Delta t = 5 * 10^{-4}$) donc la distance par rapport à l'un des deux capteurs égal à 33Cm (d=0.33mètre).

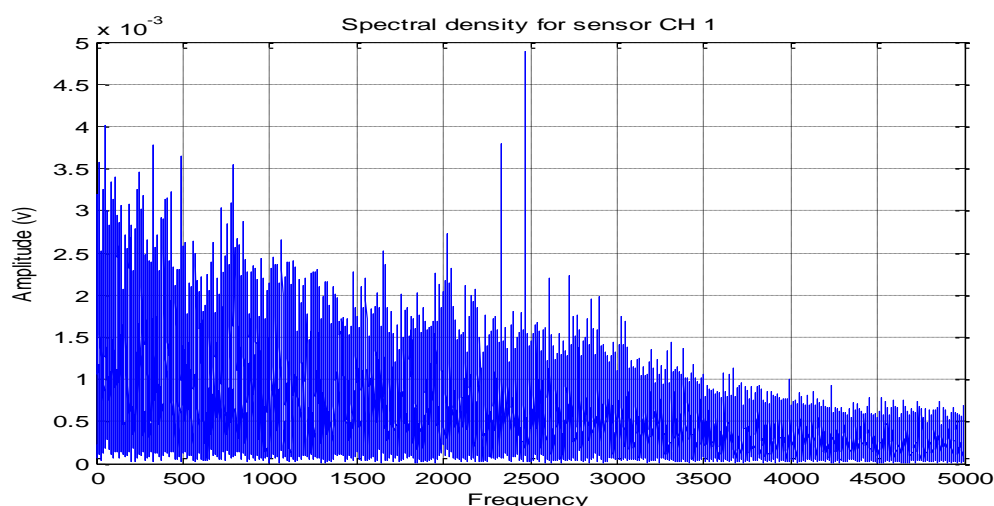
❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaîne une (CH1).**

Figure IV.21 FFT du signal CH1

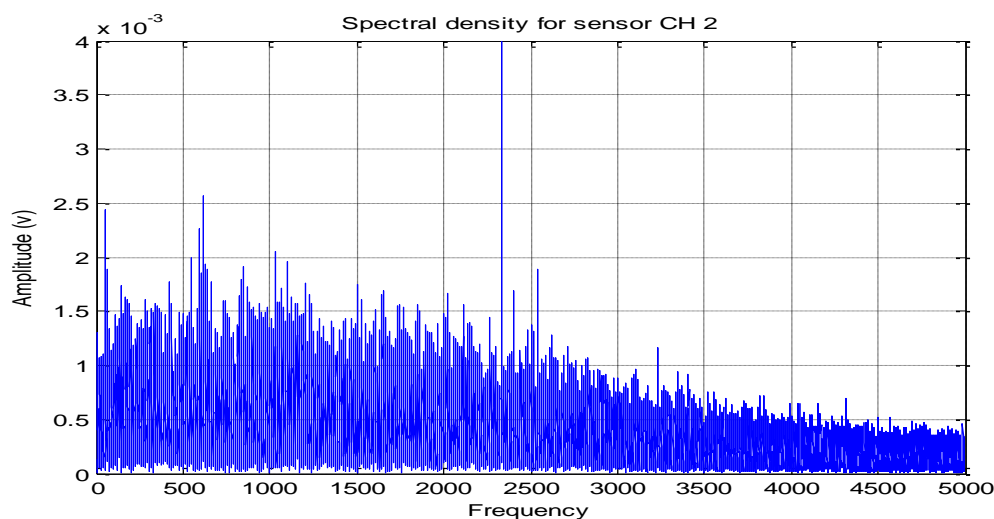
❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaîne deux (CH2).**

Figure IV.22 FFT du signal CH2

On remarque en analysant les spectres des deux IMF's des deux signaux que l'information est comprise entre 2000 et 3000HZ.

IV.5.2 Troisième test

Capteur (1) à une distance de 50Cm et le deuxième capteur (2) à 90Cm de la fuite.

❖ **Signal de la chaîne une :** Comme il est représenté sur cette figure on voit un signal composé deux partie l'une sans fuite et l'autre avec fuite. Avec une fuite déclenchée au milieu du temps d'acquisition de signal (CH1).

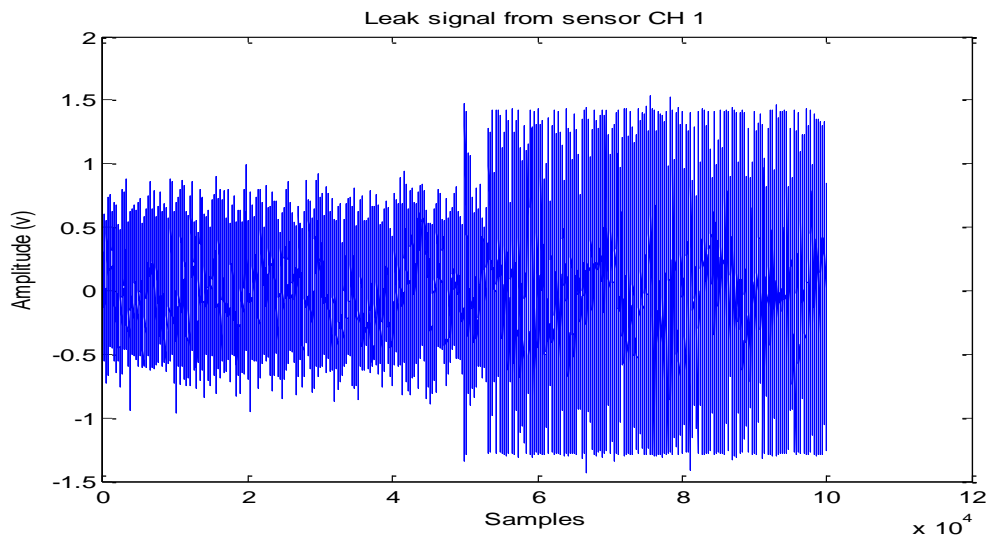


Figure IV.23 Signal acquis sur la chaine une

❖ **Signal de la chaine deux :** Même condition appliquée pour l'acquisition du deuxième signal (CH2)

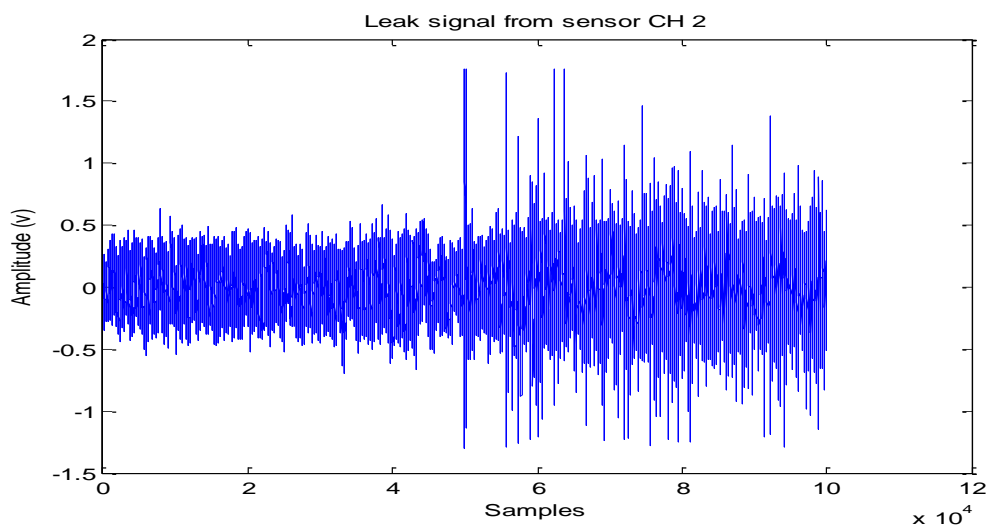


Figure IV.24 Signal acquis sur la chaine deux

❖ **Signaux de différents IMF_y :** Après application de méthode EMD (décomposition modale empirique) sur le signal chaine une on a obtenu les signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_y

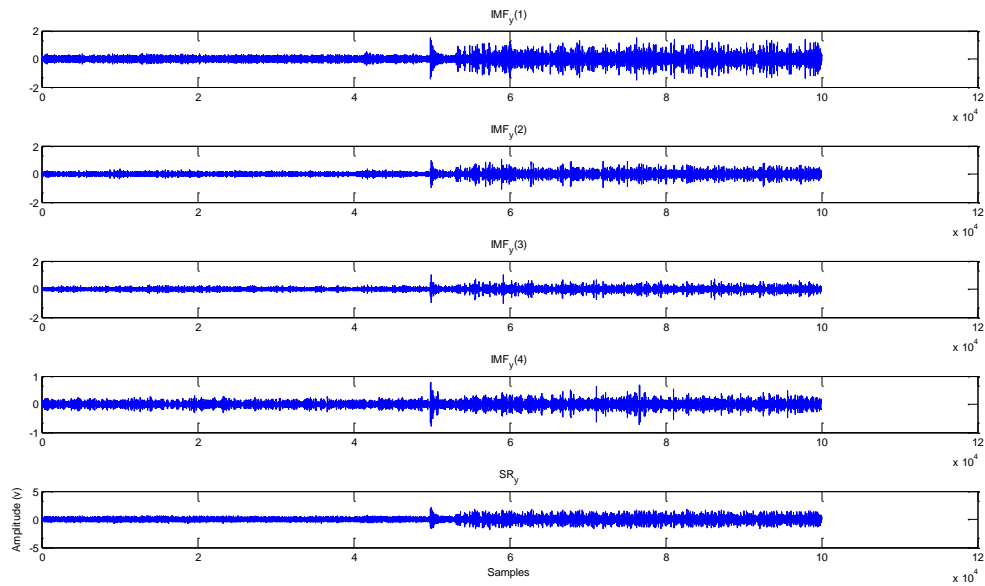


Figure IV.25 Signaux des quatre IMFy ainsi que le résidu SRy

❖ **Signaux de différents IMF_s** : Après application de méthode EMD (décomposition modale empirique) sur le signal chaîne une on a obtenu les signaux des quatre IMF_s ainsi que le résidu SR_s

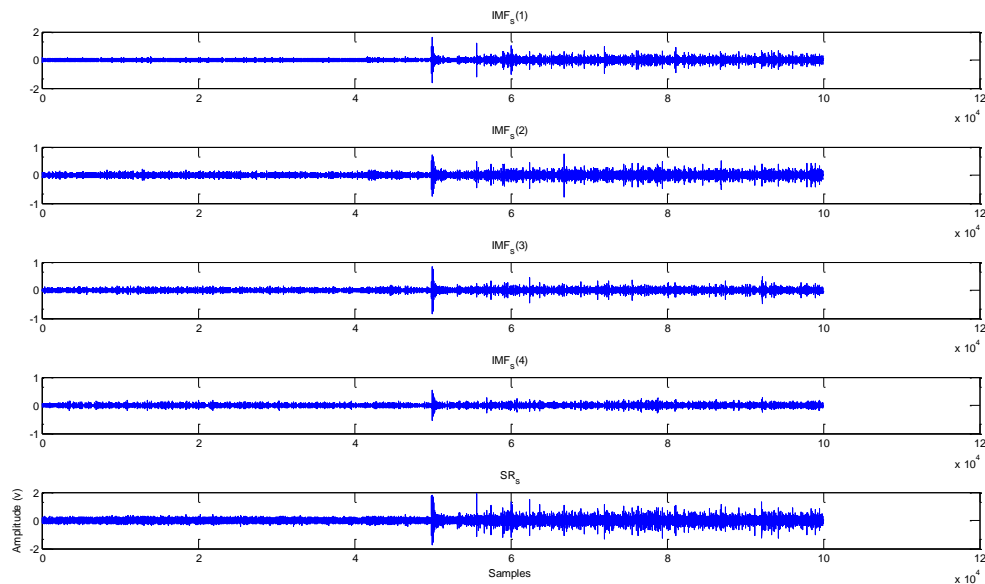


Figure IV.26 signaux des quatre IMFs ainsi que le résidu SRs

❖ **Signal de corrélation des deux signaux (IMF_y -1 et IMF_s -1)** : L'exécution de la corrélation par l'outil de traitement Matlab sur les deux signaux donne le résultat suivant qui confirme la distance exacte de l'un des deux capteurs par rapport à la fuite.

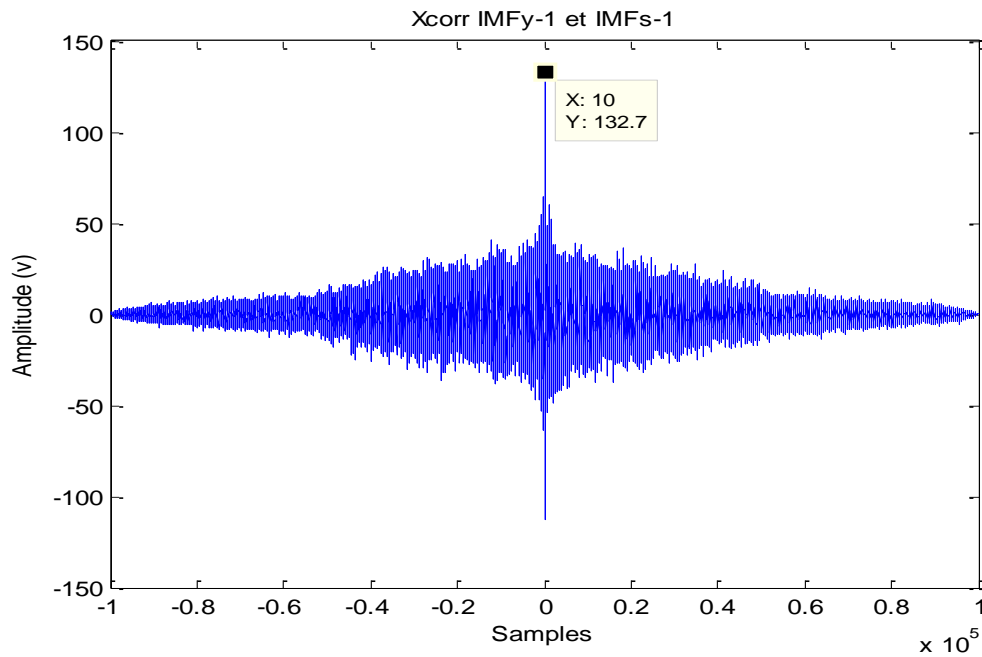


Figure IV.27 signal de corrélation des deux signaux (IMF_y-3 et IMF_s-3)

La figure IV.27 démontre la position exacte de l'un des deux capteurs par rapport au fuite ($x=10$) c'est-à-dire que le capteur est a (87Cm) 0.87 mètre de la fuite (proche au capteur 1 qui est égal 90Cm).

❖ Résultats données par commande Windows

```
Columns 99991 through 99999
    0.1698    -0.2103    -0.0764     0.0655     0.0197     0.1450     0.0424     0.0434    -0.2494

Columns 100000 through 100001
    0.0395     0.0704

lagDiff =
    10

timeDiff =
    1.0000e-003

d =
    0.8701
```

❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaine une (CH1).**

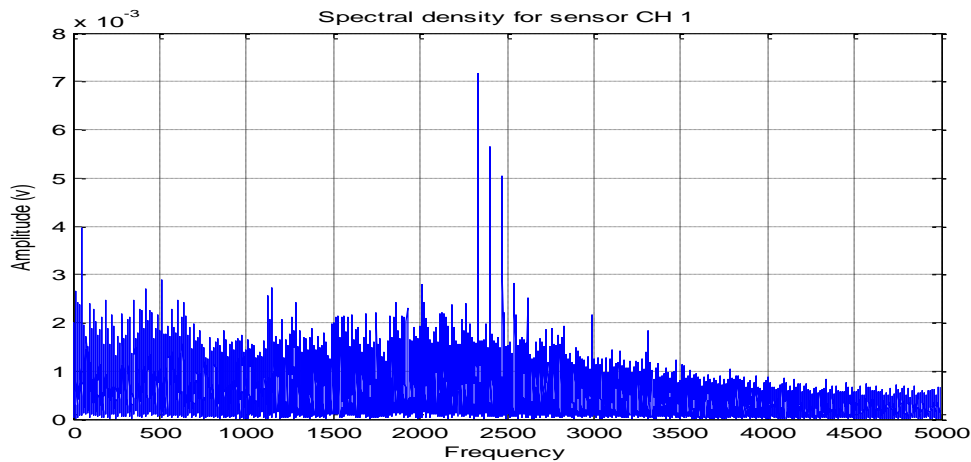


Figure IV.28 FFT du signal CH1

❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaine deux (CH2).**

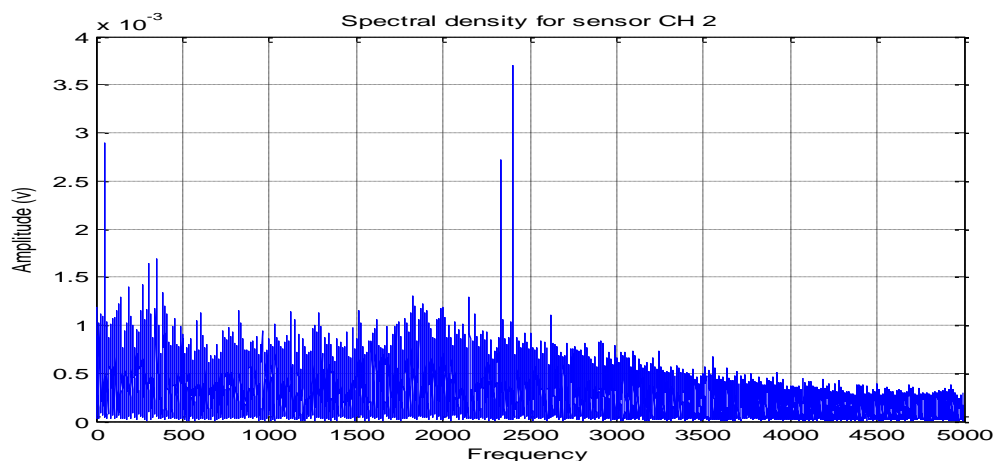


Figure IV.29 FFT du signal CH2

On constate en faisant l'analyse spectrale des deux IMF's pour les deux signaux des capteurs que l'information est toujours située dans la zone 2000 jusqu'à 3000 Hz.

IV.5.3 Quatrième test

Capteur (1) à 280Cm et capteur (2) à 100Cm de la fuite.

❖ **Signal de la chaine une :** Comme il est présenté sur la figure IV.30 on voit un signal composé de deux parties l'une sans fuite et l'autre avec fuite. Avec une fuite déclenchée au milieu du temps d'acquisition du signal (CH1).

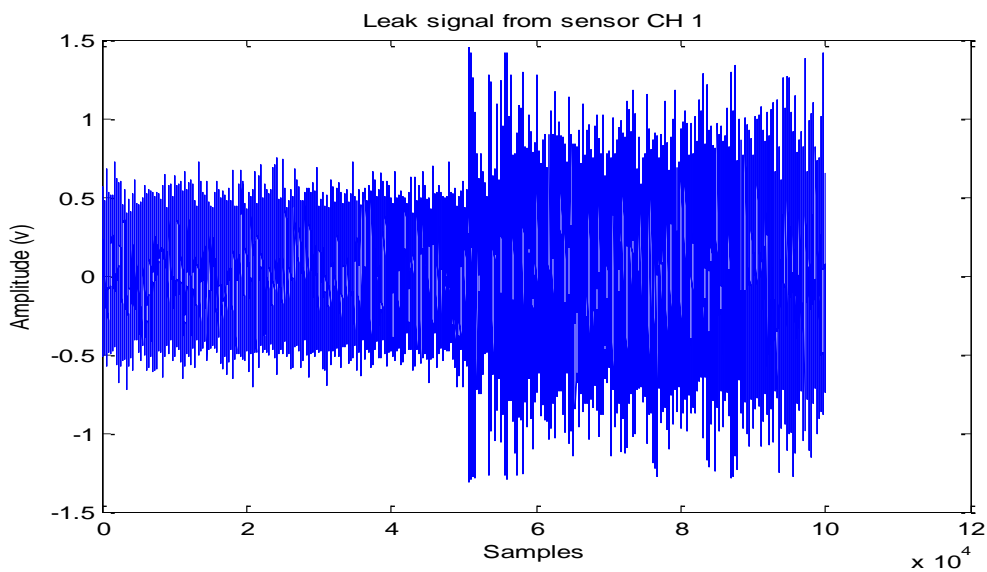


Figure IV.30 Signal acquis sur la chaine CH1

❖ **Signal de la chaine deux :** Même condition appliquée pour l'acquisition du deuxième signal (CH2).

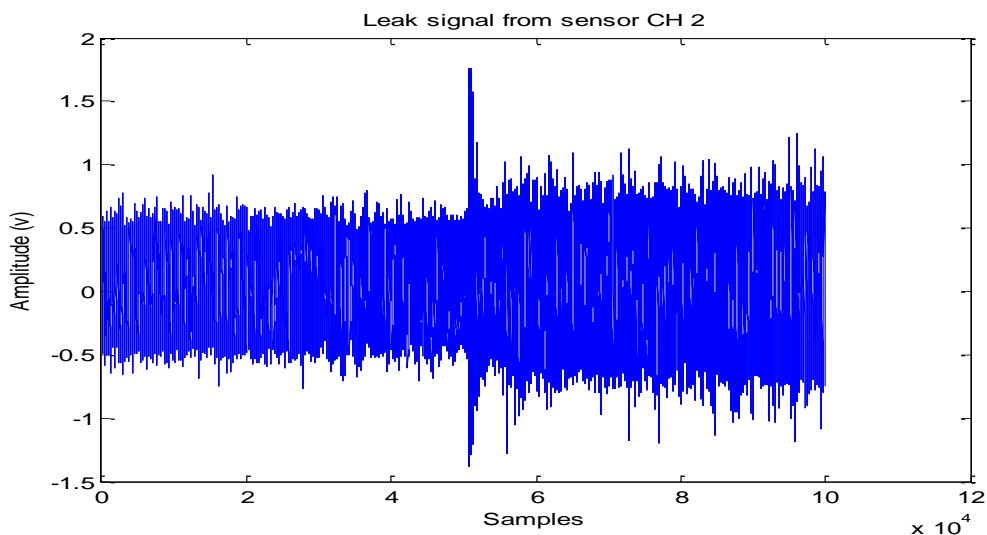


Figure IV.31 Signal acquis sur la chaine CH2

❖ **Signaux de différents IMF_y :** Après application de la méthode EMD (décomposition modale empirique) sur le signal de la chaine une on a obtenu les signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_y .

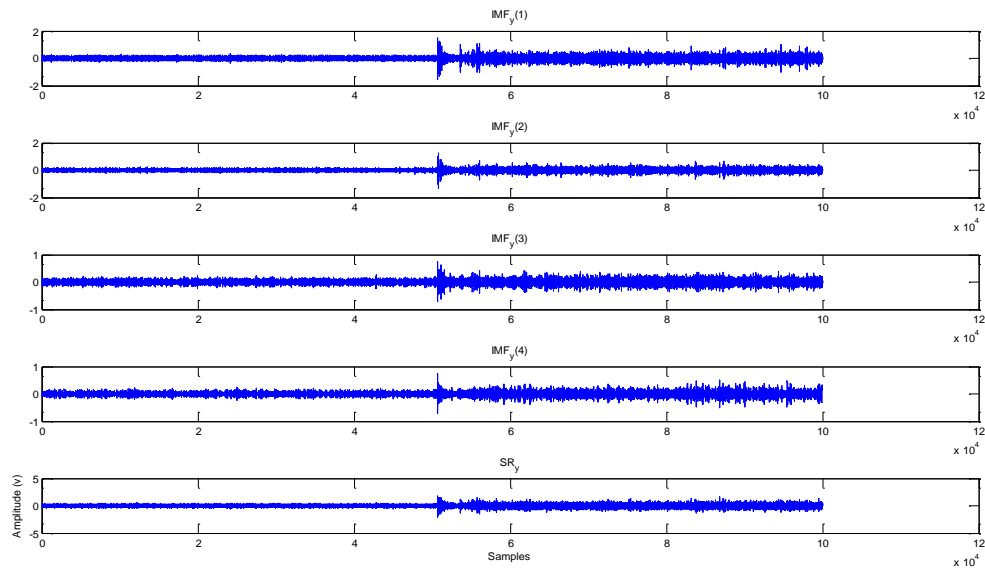


Figure IV.32 signaux des quatre IMF_y ainsi que le résidu SR_y

❖ **Signaux de différents IMF_s** : Après application de méthode EMD (décomposition modale empirique) sur le signal chaîne une on a obtenu les signaux des quatre IMF_s ainsi que le résidu SR_s et même interprétation que les signaux des IMF_y vu au dessus.

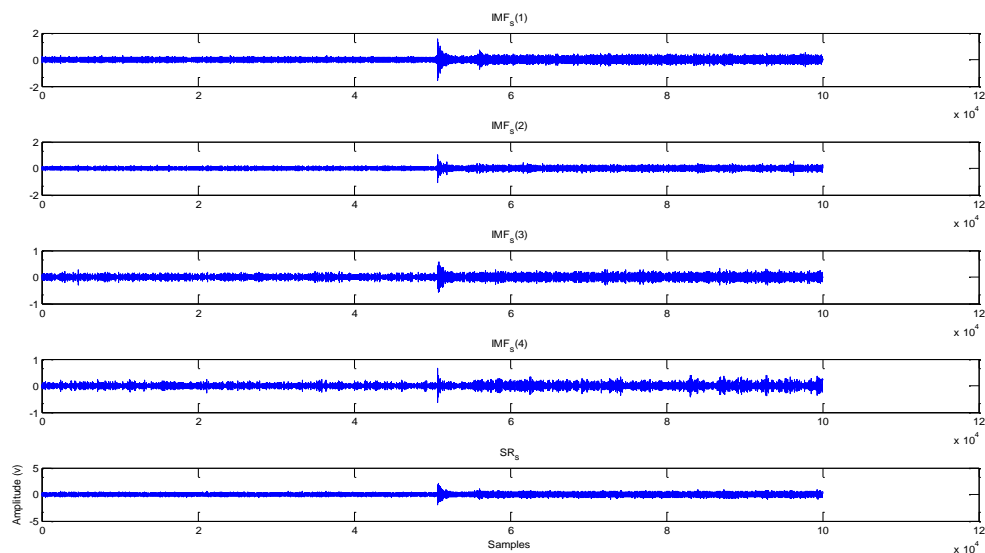


Figure IV.33 Signaux des quatre IMFs ainsi que le résidu SR_s

❖ **Signal de corrélation des deux signaux (IMF_y -1 et IMF_s -1)** : L'exécution de la corrélation par l'outil de traitement Matlab sur les deux signaux donne le résultat suivant qui confirme la distance exacte de l'un des deux capteurs par rapport à la fuite.

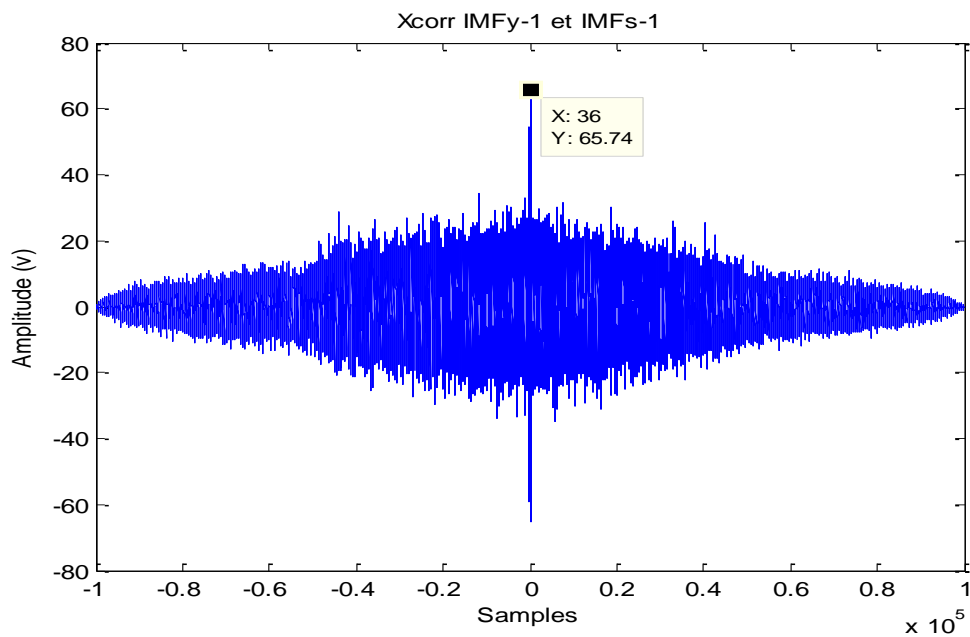


Figure IV.34 Signal de corrélation des deux signaux (IMF_y-1 et IMF_s-1)

La figure IV.34. Montre la position exacte de l'un des deux capteurs par rapport à la fuite ($x=36$, donc $\Delta t = 0.0036$ s c'est-à-dire que le capteur est à (251Cm) 2.51 mètre de la fuite (proche au capteur 2 qui est égal 280Cm).

❖ Résultats données par commande Windows

```
Columns 99996 through 100001
-0.1779    0.1948    0.4982    0.5692    0.5078    0.1342

lagDiff =
    36

timeDiff =
    0.0036

d =
    2.5125|
..
```

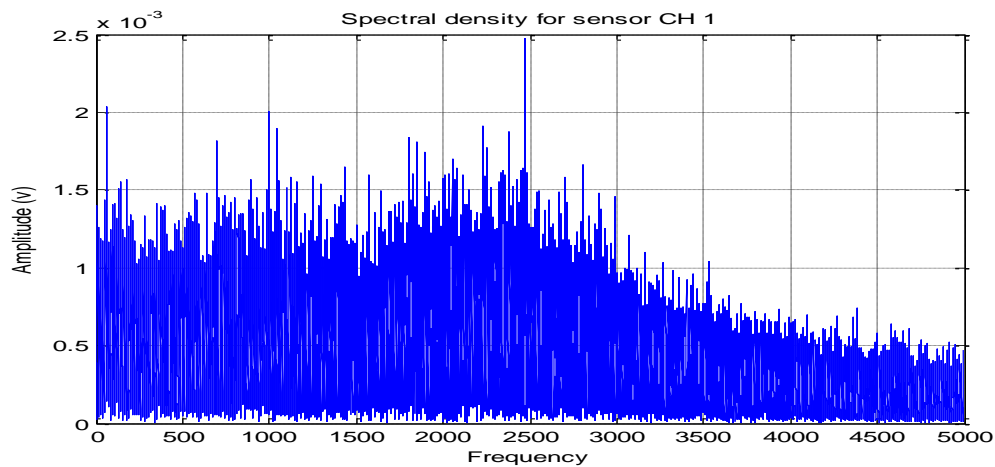
❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaine une (CH1).**

Figure IV.35 FFT du signal CH1

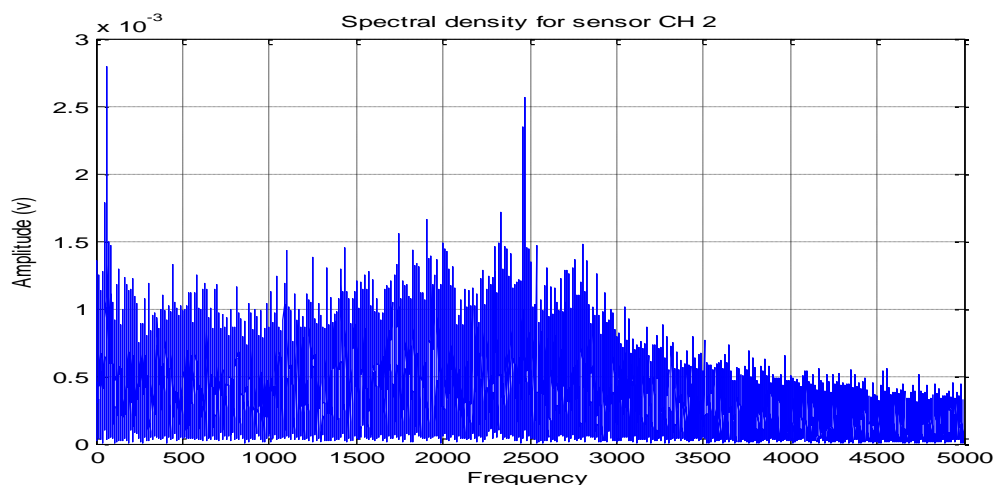
❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaine deux (CH2).**

Figure IV.36 FFT du signal CH2

L'analyse a montré que le spectre fréquentiel est pratiquement identique.

IV.6 TEST A DEUX FUTES

Dans ce cas-là on a créé une deuxième fuite sur le canal d'analyse et on a essayé de faire une acquisition des deux signaux provenant des deux capteurs, suivi d'une analyse spectrale

Le capteur A est placé à 280cm de la fuite 2 et 50cm de la fuite 1 et le capteur B est placé à 330 cm et 70cm respectivement.

❖ **Signal de la chaine une** : La fuite est toujours déclenché au milieu de notre période temporelle. La figure IV.37, présente le signal acquis par le premier capteur CH1.

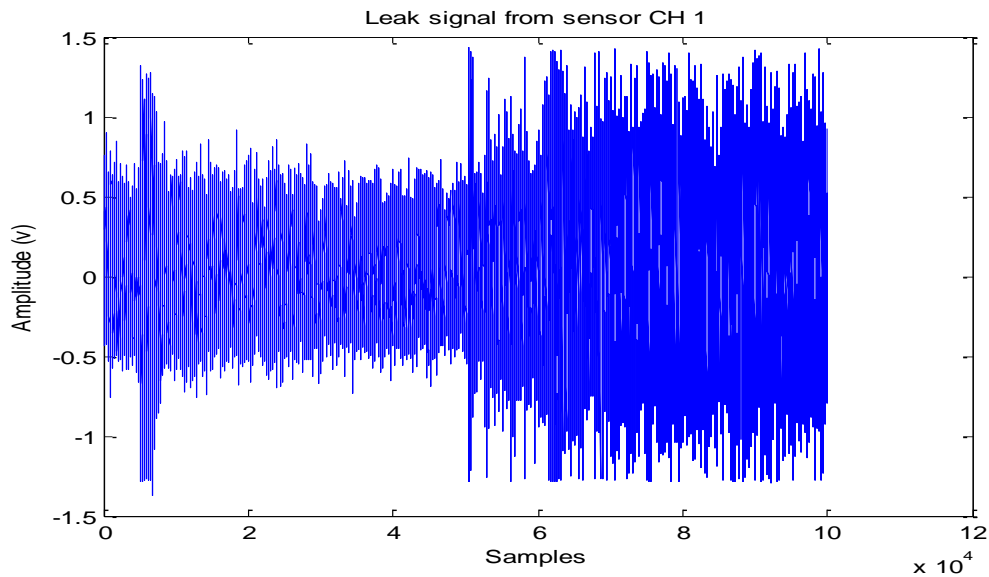


Figure IV.37 Signal temporel correspondant à deux fuites. CH1

En analysant le signal on constate qu'il existe une augmentation d'amplitude dans deux zones différentes. Le premier est au voisinage 1s et l'autre est situé à 10s.

❖ **Signal de la chaine deux CH2**

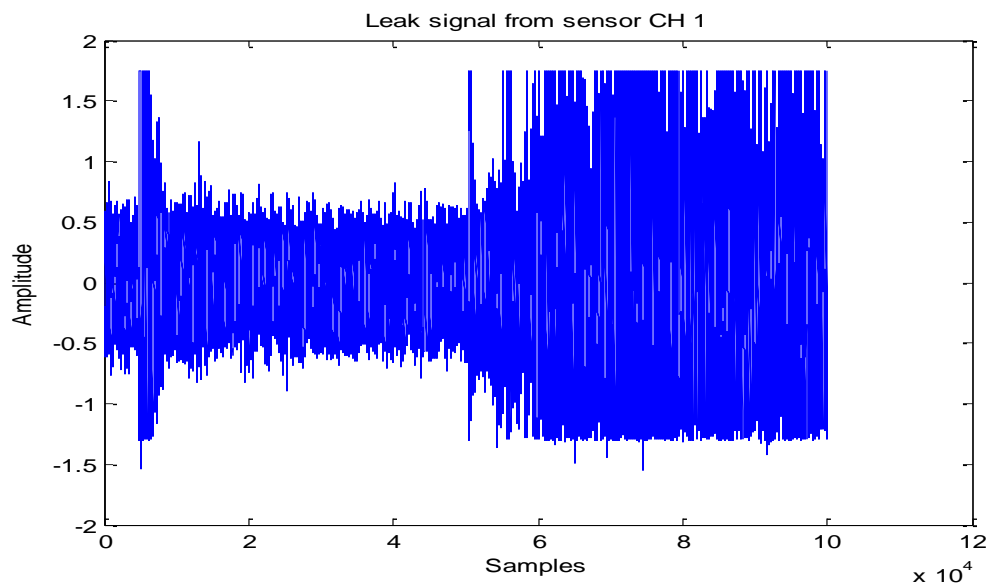


Figure IV.38 Signal temporel correspondant à deux fuites. CH2

La même constatation est faite pour le deuxième canal CH2.

❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaine une (CH1).**

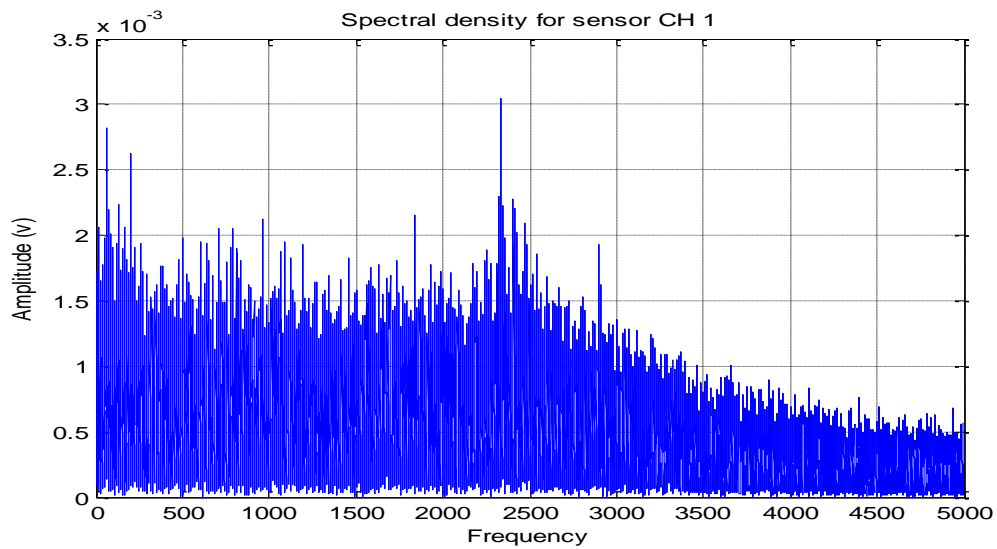


Figure IV.39 FFT du signal CH1

❖ **Application de la FFT sur le signal de la chaine deux (CH2).**

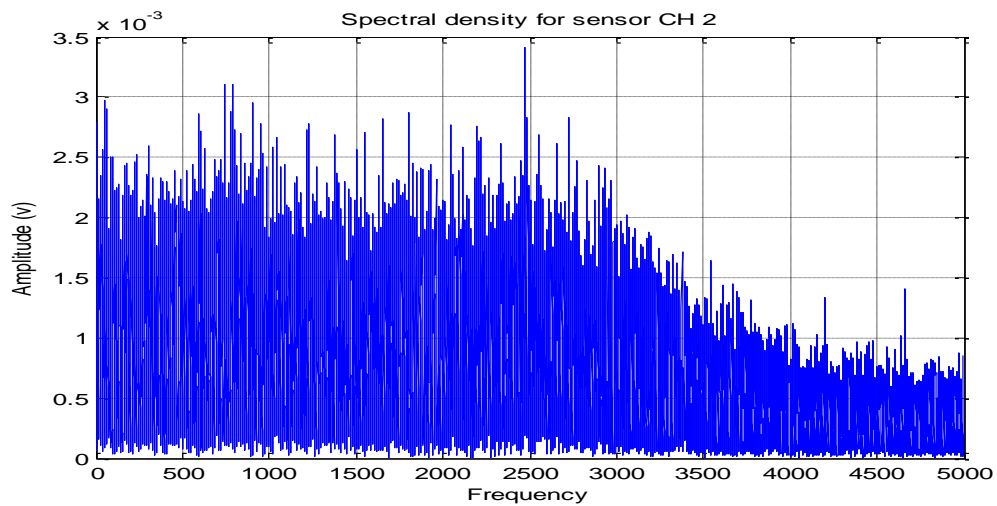


Figure IV.40 FFT du signal CH2

L'analyse fréquentielle des deux canaux montre que l'information est localisée dans la zone de 500Hz jusqu'à 3500Hz. A partir de 4700Hz, les deux signaux montrent une similitude spectrale.

CONCLUSION

La décomposition modale empirique est une technique très récente spécialisée pour l'analyse des signaux non linéaires et non stationnaires. Au début de son apparition elle a été appliquée sur les signaux sonars, puis elle a trouvée d'autres applications telles que la détection prématurée des défauts des roulements et l'analyse des signaux ECG. Dans notre travail cette technique a été appliquée sur les réseaux de distribution pour pouvoir analyser les défauts qui survient sur ces derniers. L'analyse a montré que l'application de la première IMF pour la détermination de la position de la fuite montre une bonne efficacité, cela est dû que l'information est localisée dans la première IMF. Les tests qui ont été fait ont prouvé l'efficacité de la méthode utilisée du choix de l'IMF pour la localisation de la fuite.

CONCLUSION GENERALE

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 qui est la décomposition modale empirique.

Cette méthode 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. 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, WF...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 des informations concernant la propagation des ondes sonores et leurs dépendances du milieu environnant. Dans le troisième chapitre une étude détaillée de cette nouvelle technique (**EMD**) a été présentée. En appliquant cette dernière sur des signaux typiques émergés dans le bruit.

Enfin le quatrième chapitre est réservé 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.

Comme perspective, nous pensons aux travaux suivants :

1. Détection temps réel
2. Détection à distance via un réseau sans fils
3. Penser a utilisé d'autres nouvelles techniques de traitement de signal
4. Penser à introduire des algorithmes pour la détermination de l'importance de la fuite

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **C.GOMILA, H.GUERREE**, La distribution d'eau dans les agglomérations urbaines et rurales, 2eme édition paris, 19.
- [2] **H. AAYA** cours d'alimentation en eau potable aaya@mail.com
- [3] L'alimentation en eau potable-cahier technique n°19-office international de l'eau couverture aep 420*210(PDF).
- [4] **M.ESCAND.L** ; Hydraulique générale, Tome II Edition, Paris 1971.
- [5] **LAVOISIER.I** ;Mémento du gestionnaire d'AEP et de l'assainissement.
- [6] Conception des réseaux de distribution d'eau-administration de la gestion de l'eau-Philippe. Colbach (at) eau.etat.lu (PDF).
- [7] **HAOUASSI AMINA**, mémoire de master, université de m'sila, Promotion juin2011.
- [8]**LAKHAL Oussama**, mémoire de master, université de m'sila, Promotion juin2014.
- [9] [www.Cereso.com/presentation détection électromagnétique .html](http://www.Cereso.com/presentation%20d%C3%A9tection%20%C3%A9lectromagn%C3%A9tique%20.html).
- [10] **J-M.MARTIN. All**, connaissances et maîtrise des pertes dans les réseaux d'eaux.
- [11] **Osama Hunaidi**," La détection des fuites dans les conduites de distribution d'eau " CANADA 10/2012, p 3-5.
- [12] **Didier Caron** "déteabilité des fuites par émission acoustique", CETIM, ISBN
- [13] **X. Cazauran et J. Pioger**," détection de fuite : méthodes directes et indirectes", CETIM, ISBN 15/10 /2009, p 3.
- [14] **I.U.P. GDP Option GET** Cours d'acoustique et mécanique ondulatoire 2012-2013.
- [15] **Guy Le Parc Philippe Briand**; Notions fondamentales Physique Les Cours Du CNED.
- [16] **Cours traitement du son** ; Chapitre 1.
- [17] **Boashash A.**, Time-Frequency Signal Analysis and Processing, A Comprehensive Reference. Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2003.
- [18] **Flandrin P.**, Temps-Fréquence, Editions Hermes, Paris, 1993.
- [19] **W.Mahgoun et al, laboratoire LMPA**, Institute of optique and precision mechanic University Ferhat Abbas, sétif 19000 Algérie.
- [20] **Torsten Schlurmann** ; The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectra to Analyse Embedded Characteristic Oscillations of Extreme Waves.
- [21] **Shu C., et Boulanger P.**, Triangulating trimmed NURBS surfaces. In International Conference on Curves and Surfaces., pages 381–388, Saint-Malo, France, mai 2000.
- [22] **Bekka R. E.**, Fondements du traitement du signal, OPU, 3ième édition 2005.

- [23] **Rilling G., et Flandrin P.**, Décomposition modale empirique : échantillonnage et résolution. In GdR ISIS, Thème, Marseille, France. Journée : Décompositions adaptatives II, décembre 2004.
- [24] **Rilling G., Flandrin P., et Goncalvès P.**, On empirical mode decomposition and its algorithms. In IEEE-EURASIP, Workshop on Non linear Signal and Image Processing, NSIP '03, Grado (I), juin 2003.
- [25] **Nougier J. P.**, Méthodes de Calcul Numérique Volume 2 Fonctions Équations Aux Dérivées, Editions Hermes, Paris, France, 2001.
- [26] **Chen Q., Huang N., Riemenschneider S., and Xu Y.**, A spline approach for empirical mode decompositions. Advances in Computational Mathematics, 2003.
- [27] **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.
- [28] **Flandrin P., Rilling G., et Gonçalvès P.**, Empirical mode decomposition as a filter bank. IEEE Signal Processing Letters., 11(2):112–114, 2004.
- [29] **Huang N. E., Wu M. L. C., Long S. R., Shen S. S. P., Qu W., Gloersen P. et Fan K.L.**, A confidence limit for the empirical mode decomposition and hilbert spectral analysis. The Royal Society of London, Mathematical, Physical and Engineering Sciences., 459(2037):2317–2345, 2003.
- [30] **Cheong, L.C.**; Unaccounted for water and the economics of leak detection. Proceedings of the 18 the International Water Supply Congress and Exhibition, 15-31 mai 1991, Copenhague, publiédans Water Supply, 9, 3&4, IR1.1, 1991.
- [31] **Mallat S.**, Une Exploration Des Signaux En Ondelettes, Ellipses, Paris, France, 2000.
- [32] **Niang O., Delechelle E., and Lemoine J.**, A spectral approach for sifting process in empirical mode decomposition. IEEE transactions on signal processing, 58(11), November 2010.
- [33] **Zhang J., Yan R., Gao R. X., Feng Z.**, Performance enhancement of ensemble empirical mode decomposition, Mechanical Systems and Signal Processing., 24 (7): 2104-2123, 2010.
- [34] **Awwa.** Water audits and leak detection. Manual of Water Supply Practices No. M36, American Works Association, 1990.
- potable. Les études de l'agence de l'eau Adour-Garonne, aout 2005.p20-38.

[35] Liang Zhang, Yingzi Wu, Longxiang Guo and Ping Cai; Design and Implementation of Leak Acoustic Signal Correlator for Water Pipelines

[36] Laurent DALLOIS ; Propagation Des Ondes Acoustiques Dans les Milieux En Mouvement: Extension Grand Angle De L'approximation Parabolique.

Résumé

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 stationnaires 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 d'autocorrélation aux deux premières IMFs nous paraît indispensable pour la détermination de l'endroit exacte de la fuite. Les performances obtenues jugeront le choix de la méthode proposée.

Mots clés : Fuite d'eau, Détection, décomposition, EMD, Corrélation

ABSTRACT

The aim of our work is to apply the EMD technique on the acoustic signals. Generally in the literature before operating, the signals are decomposed in a sum of stationary components called IMFs, and then we remove a noise attached to each component by applying an adaptive thresholding on each IMFs. Then the signals obtained will be added together and grouped with the residue forming the noise-suppressed signal. The latter represents the useful signal. The decomposition is by high frequency signals and ends with low frequency signals. Relevant information leakage signals is generally within the first component why we thought of directly immersed it and see its effect on the detection and location of leaks in our application. The application of the autocorrelation technique to the first two MFIs seems to us indispensable for determining the exact location of the leak. The performance obtained judge the choice of the method proposed.

Key words: leak water, detection, decomposition, EMD, correlation.

ملخص

الهدف من عملنا هو تطبيق تقنية EMD على الإشارات الصوتية. عموماً فيما سبق قبل تشغيل الإشارات الصوتية يجب تحليلها إلى مجموع مكونات و عناصر ثابتة التي تدعى IMFs ، بعد ذلك الإشارات المحصل عليها تجمع و تضاف مع الباقي مكونة الإشارة الصافية. هذه الأخيرة تمثل الإشارة المرجوة.

التحليل يبدأ بالإشارة العالية و ينتهي بالضعيفة. غالباً المعلومة المرجوة تحويها المكونة الأولى أو العنصر الأول. لذا قررنا صب كل جهود بحثنا في دراسة هذا العنصر الأول و معرفة تأثيره في الوصول إلى اكتشاف موقع التسرب. النتائج المحصل عليها تبين مدا صحة ما قلنا.

كلمات مفتاحية: تسرب المياه، استكشاف، تحليل، ربط.