

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de

**Master**

En

« Télécommunications »

Option :

« Systèmes des Télécommunications »

**Titre :**

**Annulation d'écho acoustique (AEC) par les filtres adaptatifs**

**Réalisé par :**

Ghennam Abderrahim Nabil

Sbaldji Nassim

**Encadré par :**

Dr Bounif Aouda

Année Universitaire : 2022/2023

## DÉDICACE

*Au nom du Dieu, le tout puissant, à qui je dois tout, et surtout d'avoir honoré et éclairé mon chemin par ma très chère maman que j'aime beaucoup, tous les mots n'exprimeront pas ma reconnaissance et mon amour pour elle je lui souhaite santé et satisfaction. A mon cher père pour ses conseils, je lui souhaite santé et satisfaction, que ce travail vous soit le témoignage sincère et affectueux de ma profonde et infinie reconnaissance pour tout ce que vous avez fait pour moi. J'espère que je serai toujours à la hauteur de vos espérances.*

*Aux familles Ghennam et Sbabdji.*

*A Tous mes professeurs, mon encadreur madame Bounif Aouda.*

*A mes très chers frères et mes chères sœurs chacun en son propre nom.*

*À tous mes chers amis, qui m'ont beaucoup aidé et encouragé.*

*À chaque présent dans mon cœur et absent entre ces lignes, qu'il trouve ici mes sincères sentiments de gratitude et de respect et à tous ceux que j'estime.*

*Je le dédie à toutes les personnes qui ont contribué, à un moment de notre travail, au bon déroulement et à l'achèvement de ce mémoire.*

*Ghennam Abderrahim Nabil*

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents.

➤ Pour celui qui l'aimait tant et qui m'a donné  
L'accompagnement tout au long de ce projet.  
À la personne qui s'est toujours sacrifiée pour me  
voir réussir, à Toi papa Que Dieu ait pitié de  
vous et vous accorde le paradis.

Ma chère mère, qui a toujours voulu me voir à ce  
niveau que Dieu m'a permis d'atteindre, sans oublier

Mon partenaire  
Nabil Ghennam

Et a toute la famille SBABDJI. Et à tous  
Ceux qui ont contribué de près ou de loin  
Pour que ce projet soit possible, je vous dis

Merci.

**NASSIM**

## Remerciements

*Nous remercions tout d'abord le grand Dieu pour l'achèvement de ce mémoire.*

*Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le président de jury d'avoir accepté examiné ce mémoire.*

*Nous remercions Messieurs les membres de jury, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont portés à ce travail.*

*Nous remercions Mme Bounif Aouda, notre encadreur, pour ses conseils et suggestions avisés qui nous aidés à mener à bien ce travail, et d'avoir rapporté à ce mémoire ces remarques et conseils.*

# Table des matières

**Dédicace**

**Remerciements**

**ABREVIATIONS**

**INTRODUCTION GENERALE ..... 1**

**CHAPITRE I.....**

**L'ECHO ACOUSTIQUE .....**

I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition .....	5
I.3. Historique.....	6
I.4. Le phénomène d'écho.....	6
I.4.1. Les différents types d'écho .....	6
I.4.2. Les sources d'écho acoustique .....	7
I.4.3. Confort acoustique.....	8
I.4.4. Réponse impulsionnelle acoustique .....	8
I.4.5. Le chemin parcouru par l'écho .....	10
I.4.6. Problème de sous modélisation du chemin d'écho .....	10
I.5. Différence entre l'écho hybride et l'écho acoustique.....	10
I.6. Structure temporelle de la réverbération.....	11
I.7. L'écho acoustique dans les systèmes des télécommunications .....	12
I.8. Le signal de la parole et les systèmes de communications .....	13
I.8.1. Production du signal de la parole.....	14
I.8.2. Transcodage de la parole .....	14
I.8.3. Trajet de la parole dans un système cellulaire .....	15
I.9. La prise du son .....	16
I.9.1. Puissance sonore .....	16
I.9.2. Propagation du son dans un espace libre .....	17
I.10. Niveau sonore .....	17
I.11. L'écho acoustique et les systèmes téléphoniques .....	18
I.11.1. Origine de l'écho dans les systèmes téléphoniques.....	18
I.11.2. Système d'annulation d'écho acoustique .....	19
I.12. Conclusion.....	21

<b>Chapitre II .....</b>	
<b>Filtrage adaptatif.....</b>	
II.1. Introduction .....	23
II.2. Historique du filtrage adaptatif .....	23
II.3. Principe du filtrage adaptatif .....	24
II.4. Algorithme du filtrage adaptatif .....	25
II.5. Formulation des filtres adaptatifs .....	26
II.5.1. Types de formulation.....	26
II.5.2. Exemple de formulation .....	26
II.6. Applications du filtrage adaptatif .....	28
II.6.1. Identification de systèmes .....	29
II.6.2. Modélisation inverse .....	30
II.6.3. Prédiction.....	30
II.6.4. Annulation d'interférences .....	31
II.7. Choix de l'algorithme.....	31
II.7.1. L'Algorithme du gradient stochastique LMS.....	32
II.7.2. Convergence et stabilité de l'algorithme LMS .....	33
II.7.3. L'algorithme NLMS.....	34
- Coût calculatoire élevé.....	35
- Besoin de contrôle de la normalisation.....	35
II.7.4. L'algorithme RLS.....	35
II.7.5. L'algorithme FDAF .....	36
II.8. Conclusion.....	38
<b>Chapitre III.....</b>	
<b>Résultats De Simulations .....</b>	
III .1. Introduction .....	41
III.2. Le logiciel Matlab .....	41
III.3. Base de données utilisées dans la simulation .....	41
III.4. Génération de la réponse impulsionnelle de la pièce .....	42
III.5. Le signal de parole proche .....	43
III.6. Le signal de parole lointain .....	43
III.7. Le signal du microphone .....	44
III.8. Le filtre adaptatif dans le domaine fréquentiel (FDAF).....	45
III.8. Amélioration de la perte de retour d'écho (ERLE).....	46

III.9. Effets de la taille du pas sur l'annulation d'écho.....	47
III.10. Comparaison de l'amélioration de la perte de retour d'écho.....	47
III.11. Annulation d'écho acoustique avec le filtre adaptatif LMS .....	48
III.12. Annulation d'écho acoustique avec le filtre adaptatif NLMS .....	52
III.13. Etude comparative entre les trois algorithmes .....	55
III.14. Conclusion.....	60
<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>63</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>63</b>

## Table des figures

Figure I.1 : Composantes intervenant dans la transmission du signal .	5
Figure I.2 : Trajets acoustiques entre source et récepteur .	7
Figure I.3 : Réflexions sonores dans une pièce .	9
Figure I.4 : Exemple de réponse impulsionnelle .	9
Figure I.5 : Echo-gramme type d'une réponse impulsionnelle enregistrée dans une salle .	12
Figure I.6 : Problème de l'écho dans les systèmes de communications .	13
Figure I.7 : Modèle simple de production de la parole .	14
Figure I.8 : Trajet de la parole dans le réseau GSM .	15
Figure I.9 : Emission d'un son dans un local .	16
Figure I.10 : Puissance acoustique selon le niveau sonore .	17
Figure I.11 : Provenance de l'écho .	18
Figure I.12 : Structure globale d'AEC à base de filtrage adaptatif .	20
Figure II.1 : Principe d'un filtre adaptatif .	24
Figure II.2 : Principe de l'identification .	29
Figure II.3 : Principe de la modélisation inverse .	30
Figure II.4 : Principe de la prédiction .	30
Figure II.5: Principe de l'annulation d'interférence .	31
Figure II.6 : Fonctionnement de l'algorithme FDAF.	37
Figure III.1 : Réponse impulsionnelle de la pièce.	42
Figure III.2 : Transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle filtrée.	43
Figure III.3 : L'allure du signal de parole proche .	43
Figure III.4 : Signal de parole lointain .	44
Figure III.5 : Signal du microphone .	44
Figure III.6 : Audiogrammes après filtrage FDAF. .	45
Figure III.7:convergence ERLE .	46
Figure III.8: Evaluation de l'opération du filtrage par le FDAF.	46
Figure III.9: Effets des différentes valeurs de taille de pas .	47
Figure III.10: ERLE du FDAF pour deux pas d'adaptation différents. .	48
Figure III.11 : Audiogrammes de filtrage par le LMS. .	49
Figure III.12 : évaluation de l'opération du filtrage par le LMS. .	50
Figure III.13 : Audiogrammes et critères après changement du pas. .	51
Figure III.14: Audiogrammes après filtrage par le NLMS.	52
Figure III.15 : Evaluation de l'opération du filtrage par le NLMS.	53
Figure III.16 : Audiogrammes et performances du filtrage après changement du pas.	55
Figure III.17 : Audiogrammes après annulation d'écho par les trois algorithmes Pour $\mu=0.025$ ...	56
Figure III.18 : Variations de l'ERLE pour les algorithmes (FDAF, LMS, NLMS).	57
Figure III.19 : Différents signaux obtenus après filtrage par les algorithmes (FDAF, LMS, NLMS) pour $\mu=0.04$ .	
..... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure III.20 : ERLE des trois algorithmes après changement du pas.	
..... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	

## ABREVIATIONS

<b>AEC</b>	Acoustic Echo Cancellation (Annulation d'écho acoustique).
<b>AT &amp;T Bell</b>	American Telephone and Telegraph Corp. Bell Laboratoires.
<b>BTS</b>	Base transceiver station.
<b>BSC</b>	Base Station Controller.
<b>DSP</b>	Digital Signal Processing.
<b>ERLE</b>	Echo Return Loss Enhancement.
<b>FDAF</b>	Frequency Domain Adaptive Filter.
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communication.
<b>LMS</b>	Least-Mean-Square.
<b>MMSE</b>	Minimum Mean Square Error.
<b>MSC</b>	Centre de Communication Mobile.
<b>MSE</b>	Mean Square Error (Erreur Quadratique Moyenne).
<b>NLMS</b>	Normalized Least Mean Square.
<b>PCM</b>	Pulse Code Modulation.
<b>RLS</b>	Recursive Least Square.
<b>RTC</b>	Réseau Téléphonique Commuté.
<b>RIF</b>	Réponse Impulsionnelle Finie.
<b>UMTS</b>	Service Universel de Télécommunications Mobiles.

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Dans tous les environnements de communication mains libres, l'annulation de l'écho acoustique (AEC) et l'annulation du bruit jouent un rôle de plus en plus important pour assurer une qualité de communication (vocale) satisfaisante. Dans de nombreuses applications de traitement du signal et de communication, nous sommes confrontés à la nécessité de supprimer le bruit et la distorsion des signaux.

L'annulation d'écho acoustique est un problème vieux (de plusieurs décennies) dans le traitement du signal depuis l'introduction des communications vocales en duplex intégral, et il s'agit toujours d'un domaine de recherche actif. Ce phénomène est dû à des processus physiques variables dans le temps, parfois inconnus. L'une de ces situations est lors de la transmission d'un signal (message) d'un point à un autre, le milieu (fils, fibres faisceau micro-onde, etc...), appelé le canal introduit du bruit et de la distorsion du fait des variations de ses propriétés.

Les filtres adaptatifs sont des outils puissants utilisés dans l'annulation d'écho acoustique. Ils sont capables de s'ajuster automatiquement aux changements d'environnement et de supprimer l'écho indésirable. Ces filtres permettent d'estimer et de réduire l'écho acoustique en temps réel, offrant ainsi une meilleure qualité audio et une expérience utilisateur améliorée. Leur rôle principal est de modéliser et de compenser l'écho pour créer un signal de sortie sans écho perceptible. Les filtres adaptatifs les plus courants, qui sont utilisés pendant le processus d'adaptation, sont à réponse impulsionnelle finie (FIR). Ceux-ci sont préférables parce qu'ils sont stables et qu'aucun ajustement spécial n'est nécessaire pour leur mise en œuvre.

Dans ce mémoire, nous allons étudier et faire la comparaison entre les algorithmes de filtrage adaptatifs les plus utilisés. Notre travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation de l'écho acoustique en citant : l'historique, le contexte, les types et les effets de l'écho acoustique dans les transmissions vocales.

Le deuxième chapitre décrira le filtrage adaptatif : son principe, ses algorithmes et leur formulation mathématique. Nous verrons aussi les critères d'évaluation des différents algorithmes tels que : l'algorithme LMS, NLMS, RLS et FDAF.

Dans le troisième chapitre, nous discuterons les différents résultats obtenus par implémentation des algorithmes FDAF, LMS et NLMS sous MATLAB. Une comparaison entre ces trois algorithmes sera faite en utilisant des signaux de parole pour les tester.

Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I  
L'ECHO  
ACOUSTIQUE

## I.1. Introduction

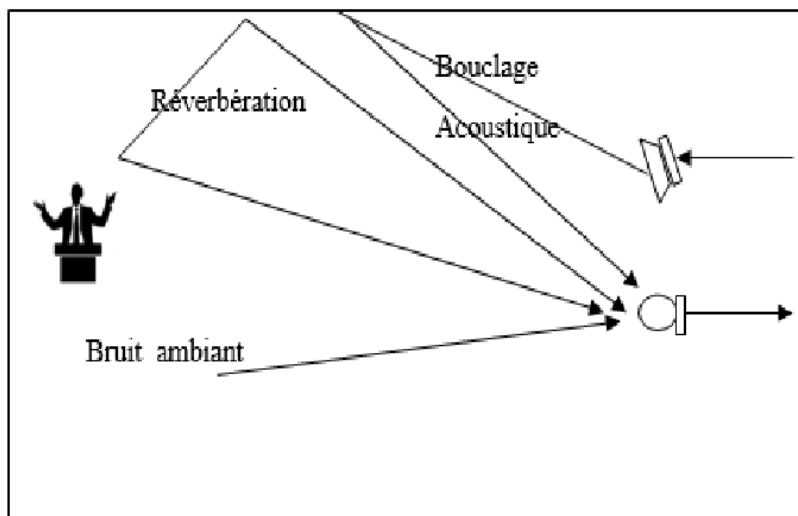
A travers ce chapitre, nous apprendrons comment se produit l'écho acoustique et nous aborderons en détail tous les concepts qui s'y rapportent, ses types, et ses effets sur les liaisons de communication, ainsi que sur les liaisons téléphoniques...etc.

Nous discuterons les systèmes qui traitent le problème de l'écho acoustique et sa liaison avec la réverbération des salles. Nous parlerons des techniques pour contourner ce problème.

Ceci est une description introductive pour le deuxième chapitre. Enfin, nous clôturons ce chapitre par une conclusion qui résume les points abordés.

## I.2. Définition

L'écho acoustique est un phénomène sonore qui se produit lorsque le son est réfléchi, où nous constatons que les ondes sonores rebondissent sur les surfaces qui peuvent passer à travers. Comme le montre la figure I.1.



**Figure I.1** : Composantes intervenant dans la transmission du signal [1].

La réflexion est importante sur les surfaces planes telles que les murs, ainsi que les endroits vides (chambre vide), comme elle se produit dans les zones très élevées telles que les sommets des montagnes...

### **I.3. Historique**

La fin des années 1950 a marqué la naissance du contrôle de l'écho des télécommunications avec le développement des premiers dispositifs d'annulation d'écho. La théorie de l'annulation d'écho a été développée au début des années 1960 par les laboratoires AT&T Bell (American Telephone and Telegraph Corp. Bell Laboratoires), et par le système à distance COMSAT (communications par satellite) [2].

En 1962, les laboratoires Bell entrent dans le domaine des communications par satellite avec le lancement du premier satellite de communication, COMSAT a pu concevoir le premier système d'annulation d'écho pour démontrer la faisabilité et les performances du réseau de communication par satellite.

A la fin des années 1970, COMSAT développe et commercialise le premier système d'annulation d'écho analogique, principalement comme équipement d'interface analogique pour le numérique et le réseau [3].

### **I.4. Le phénomène d'écho**

Le phénomène d'écho est le principal facteur responsable de la conversation bidirectionnelle dans les radiocommunications. L'écho persiste dans les liaisons de communication, c'est-à-dire qu'il se produit pendant les appels téléphoniques et qu'il se produit en raison d'interférences du signal.

#### **I.4.1. Les différents types d'écho**

Les échos sont classés selon la durée de la répétition et l'intensité du son. On distingue trois grandes catégories d'échos, qui sont les suivantes :

- **L'écho franc**

L'écho franc (vrai) est simplement défini comme étant entendu deux fois de suite. Un écho vrai atteint l'oreille avec un retard d'au moins de 50 ms, ce temps de retard peut être évalué à partir du tracé de la réponse impulsionnelle.

La voix perçue est souvent très distincte comme si quelqu'un répétait plusieurs fois ce que nous avons dit et elle se ralentit rapidement avec le temps et cela ne prend que peu de temps [4].

- **L'écho tonal**

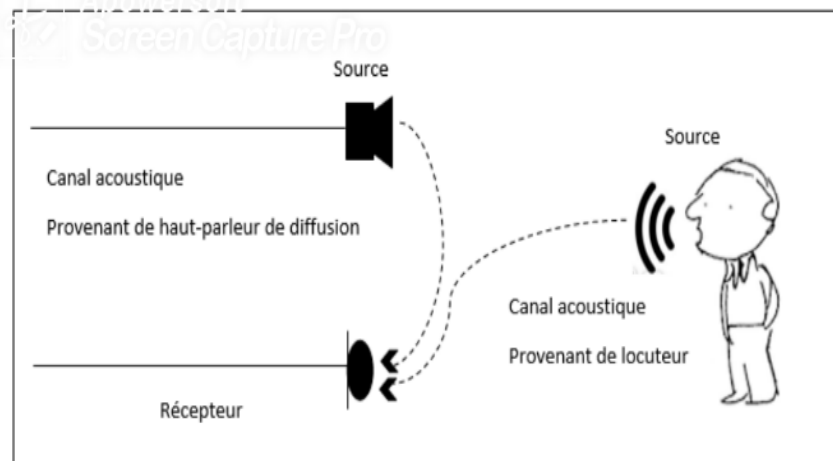
Il se caractérise par la répétition qui arrivera avec le même retard. Dans ce type, on ne peut pas différencier la répétition du son, comme phénomène d'écho, mais la fréquence est précise. Ce dernier dépend de la distance des parois où le son est réfléchi. L'émission de ce genre de fréquence entraîne la résonance des tonalités, qui dénature le son et l'écoute [4].

- **L'écho flottant**

Ce type d'écho est une série d'échos réguliers, il prend des temps spécifiques que l'oreille capte. Un « écho flottant » peut se produire lorsque l'énergie sonore oscille entre des surfaces parallèles pendant une longue période de temps, c'est-à-dire lorsqu'un signal acoustique se déplace plusieurs fois entre deux ou plusieurs surfaces réfléchissantes [4].

#### **I.4.2. Les sources d'écho acoustique**

L'écho acoustique se produit lorsque le son joué par un haut-parleur lui revient. En transmission directe ou indirecte au microphone, le haut-parleur distant entend le sien. Le son revient après un délai notable (appelé écho).



**Figure I.2 :** Trajets acoustiques entre source et récepteur [1].

Il existe plusieurs chemins pour les sources d'appariement des haut-parleurs et des microphones.

Les échos offrent les aspects intéressants suivants :

- 1) Le temps qu'il faut pour qu'un écho se désintègre est généralement mesuré à environ 60 dB et est appelé la longueur de queue de l'écho.
- 2) Il y a toujours plus d'un trajet d'écho.
- 3) Les pistes d'écho peuvent changer dynamiquement en raison de changements dans l'environnement y compris le mouvement des personnes dans la pièce), des objets à proximité du téléphone, des conditions météorologiques et de la présence d'objets en mouvement dans la pièce.
- 4) Différentes pièces et environnements ont des caractéristiques de résonance différentes. En général, l'écho est plus stable dans les grands halls et salles de réunion que dans les petits bureaux [5] [6].

#### **I.4.3. Confort acoustique**

Le confort acoustique est un élément souvent négligé dans les espaces intérieurs. Il peut être réalisé par isolation acoustique ou correction acoustique.-Il faut en effet faire la distinction entre « insonorisation » et « correction acoustique » :

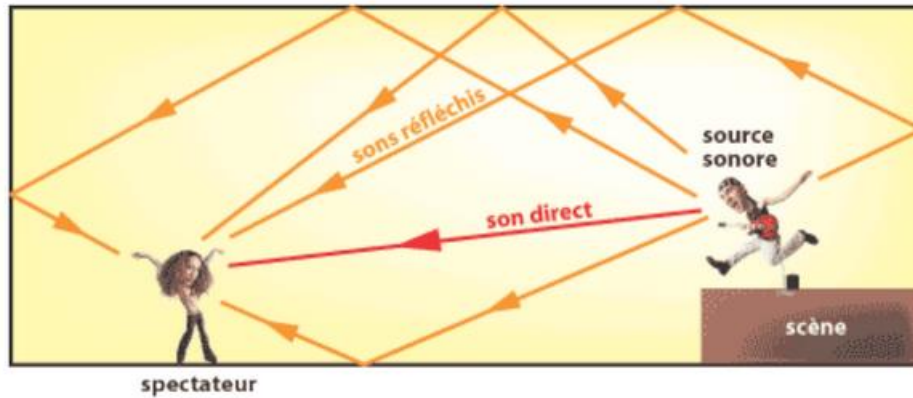
- L'insonorisation de la pièce signifie minimiser le niveau de bruit généré dans la pièce extérieure (enveloppe urbaine).
- La correction acoustique modifie le rendu sonore de la pièce, en réduisant la résonance. Elle traite l'absorption et la réflexion du son dans la même pièce, comme dans un théâtre pour améliorer la qualité du son [7].

#### **I.4.4. Réponse impulsionnelle acoustique**

Pour définir la réponse impulsionnelle acoustique, la sonde réceptrice est placée dans une pièce sans son. Lorsque le son provient du support (source) où les enceintes sont installées, le récepteur capte le son direct et une partie du son réfléchi par les murs de la pièce.

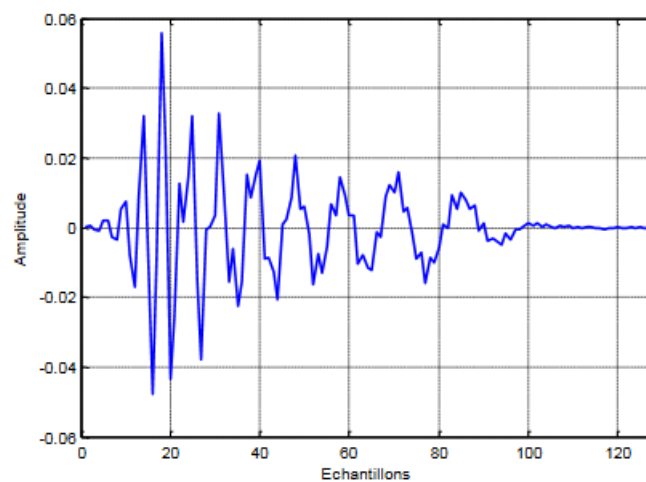
La figure I.3 montre la propagation du son dans une pièce, chaque réflexion représente un retard et une atténuation. Un microphone placé à une certaine distance du haut-parleur capte les différents sons produits par ces réflexions.

La théorie acoustique linéaire [8] décrit ces réflexions comme une suite de filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR).



**Figure I.3 :** Réflexions sonores dans une pièce [1].

En pratique, la taille du filtre FIR varie de quelques coefficients à des milliers de coefficients selon la taille de la pièce. La figure 1.4 ci-dessous montre exemple typique d'une réponse impulsionnelle.



**Figure I.4 :** Exemple de réponse impulsionnelle [9].

#### **I.4.5. Le chemin parcouru par l'écho**

Un temps de propagation d'écho significatif est principalement dû à la faible vitesse du son dans l'air. Contrairement aux ondes électromagnétiques, le son voyage à une vitesse beaucoup plus faible dans l'air. Il est ralenti par les obstacles tels que les murs, les chaises, les meubles, etc. Le signal réfléchi a une énergie qui dépend de la taille de la pièce et de ce qu'elle contient, ainsi que d'un coefficient de réflexion propre. Dans la plupart des pièces, le volume du son diminue de manière exponentielle avec la réflexion.

Le temps de réverbération est généralement d'environ 200 à 300 millisecondes [10]. Les caractéristiques impulsives de la réponse acoustique des chambres non enregistrées restent constantes dans le temps et dépendent de la température, de l'humidité et de la pression.

#### **I.4.6. Problème de sous modélisation du chemin d'écho**

La suppression complète des échos acoustiques grâce à l'identification directe du trajet de l'écho nécessite implicitement la mise en place d'un filtre adaptatif à coefficients multiples  $L$ , qui peuvent être très grands étant donné l'amplitude de la réponse impulsionnelle du trajet d'écho. Cette contrainte est déterminée par la géométrie du système d'enregistrement (direction et distance d'enregistrement) et la taille du lieu d'utilisation. En général, la réponse impulsionnelle est très longue dans les grandes pièces et les distances d'enregistrement diffuses. Dans la phase asymptotique, c'est-à-dire après une période de convergence initiale, les coefficients du filtre adaptatif  $h(n)$  convergent généralement vers les coefficients du filtre de Wiener-Hopt, à  $L$  coefficients, qui minimise la moyenne des puissances de l'erreur du filtre. Compte tenu des contraintes de coût imposées par les lois du marché, le nombre de coefficients  $L$  du filtre d'identification est nécessairement limité à une valeur compatible avec les possibilités (mémoire, calcul)

#### **I.5. Différence entre l'écho hybride et l'écho acoustique**

Il existe des différences notables entre les échos hybrides et acoustiques, ce qui conduit à une gestion différente de ce problème dans le système de communication. Parmi ces particularités, nous citons :

- **Stationnarité**

Le trajet d'écho hybride est invariant dans le temps. Une fois le chemin d'appel établi, le délai d'écho ne change pas pendant un appel. D'autre part, l'écho acoustique est basé sur divers facteurs externes, tels que la position de l'orateur dans la chambre, même le mouvement de la tête par rapport à l'appareil. De ce fait l'écho acoustique est classé parmi les signaux non stationnaires.

- **Linéarité**

La linéarité est la façon dont la forme d'onde du signal d'écho correspond au signal original. L'écho hybride est un signal linéaire, ce qui signifie que le modèle mathématique linéaire peut prédire avec précision les signaux d'écho mixtes.

Dans le cas de l'écho acoustique, les non-linéarités peuvent être générées par des circuits analogiques. De plus, des amplificateurs, des haut-parleurs et des vocodeurs introduisent des non-linéarités supplémentaires.

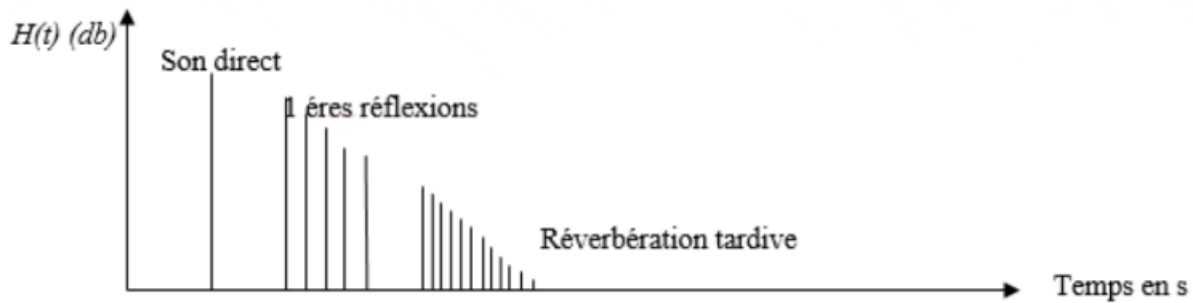
- **Dispersion**

Le signal d'écho n'a pas une seule réflexion du signal d'origine. Les échos ont une certaine durée, appelée temps de dispersion, qui est la période de temps pendant laquelle les réflexions d'écho se produisent.

Les échos mixtes présentent une dispersion typique inférieure, où le trajet de l'écho est caractérisé par une présentation concise [11].

## **I.6. Structure temporelle de la réverbération**

Il est intéressant d'étudier la structure temporelle de la réponse impulsionnelle de l'écho. Généralement, cette dernière peut être divisée en trois parties, clairement visibles sur l'écho-gramme de la figure I.5.



**Figure I.5 :** Echo-gramme type d'une réponse impulsionnelle enregistrée dans une salle [1].

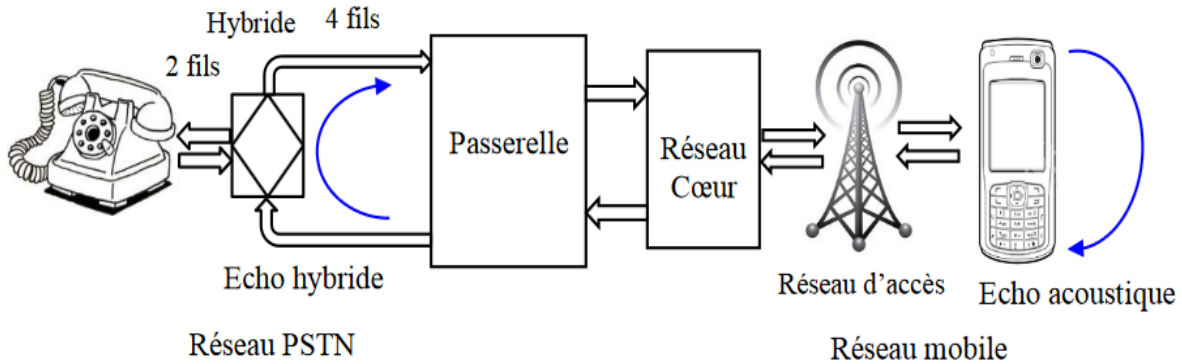
- Le « Son direct » est celui qui va directement de la source au récepteur.
- Le « Son réfléchi précoce » : L'onde sonore a subi plusieurs réflexions (par moyenne de 1 à 5 réflexions) avant d'atteindre le receveur et peuvent être dissociées dans le temps.
- Inversion retardée : trop d'inversions d'ordre supérieur se chevauchent, ce qui entraîne une inversion continue, une ou deux inversions à la fois (par exemple, une ou deux inversions en même temps) [1].

### **I.7. L'écho acoustique dans les systèmes des télécommunications**

Il existe deux types d'échos dans les télécommunications, électriques et acoustiques, proviennent de différentes sources. L'écho peut être caractérisé par une réponse impulsionnelle dépendante du trajet entre ses points d'émission cette réponse est très sensible et peut changer rapidement d'un instant à l'autre et dépend du type d'écho [12]. Comme a été déjà dit, l'écho est la répétition du signal causée par la réflexion de ce dernier et les modifications du milieu de propagation des ondes. Il est utilement utilisé pour le Sonar et le radar à des fins de détection et d'exploration.

Les systèmes de communication mains libres sont utilisés pour maintenir la liberté de mouvement de l'orateur et assurer son confort, dans de nombreuses applications téléphoniques telles que la conférence téléphonique, l'audioconférence sur téléphone, toutes les applications de services multimédias mains libres et même les téléphones cellulaires mains libres. Les terminaisons consistent en un système de ramassage dans lequel un ou plusieurs micros sont placés à proximité de l'utilisateur et un système de récupération de son, composé d'un ou plusieurs haut-parleurs.

La figure I.6 montre la distorsion de la parole, lors de son codage, par l'écho acoustique d'où la nécessité de l'amélioration des performances par l'AEC qui est une procédure inévitable dans un tel scénario.



**Figure I.6 :** Problème de l'écho dans les systèmes de communications [12].

### I.8. Le signal de la parole et les systèmes de communications

Les signaux de parole sont des vecteurs acoustiques transportant une grande quantité d'informations complexes, variables et redondantes. Chaque caractéristique acoustique de ce signal a une signification au niveau perceptif.

La première caractéristique est la fréquence fondamentale, qui est la fréquence à laquelle les cordes vocales vibrent. Sa variation définit la hauteur qui constitue la perception de la hauteur. (Les sons sont triés de bas en haut).

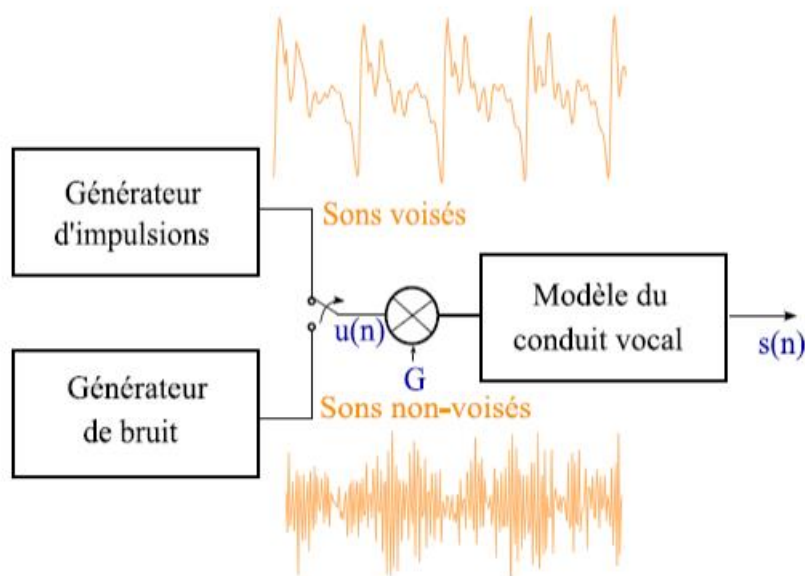
La deuxième caractéristique est le spectre de fréquence, qui dépend principalement du timbre sonore. Le timbre est une caractéristique qui identifie une personne en écoutant simplement sa voix.

Le timbre dépend de la corrélation entre les fréquences fondamentales et les harmoniques qui sont des multiples de cette fréquence.

Le dernier trait acoustique est l'énergie correspondant à l'intensité sonore. Elle est habituellement plus forte pour les segments voisés de la parole que pour les segments non voisés [13].

### I.8.1. Production du signal de la parole

Le signal de parole est le résultat d'un train de stimulation du conduit vocal, produisant des impulsions ou des bruits, respectivement des sons voisés et non voisés (figure I.7). Dans le cas des sons voisés, l'excitation est une vibration périodique des cordes vocales due à la pression exercée par l'air sur l'appareil respiratoire. Ce mouvement vibratoire correspond à une série de cycles d'ouverture et de fermeture de la glotte. Le nombre de ces cycles par seconde correspond à la fréquence fondamentale  $F_0$ . Quant aux signaux non voisés, l'air passe librement par la glotte (du moins pas sur tout le conduit vocal [14].



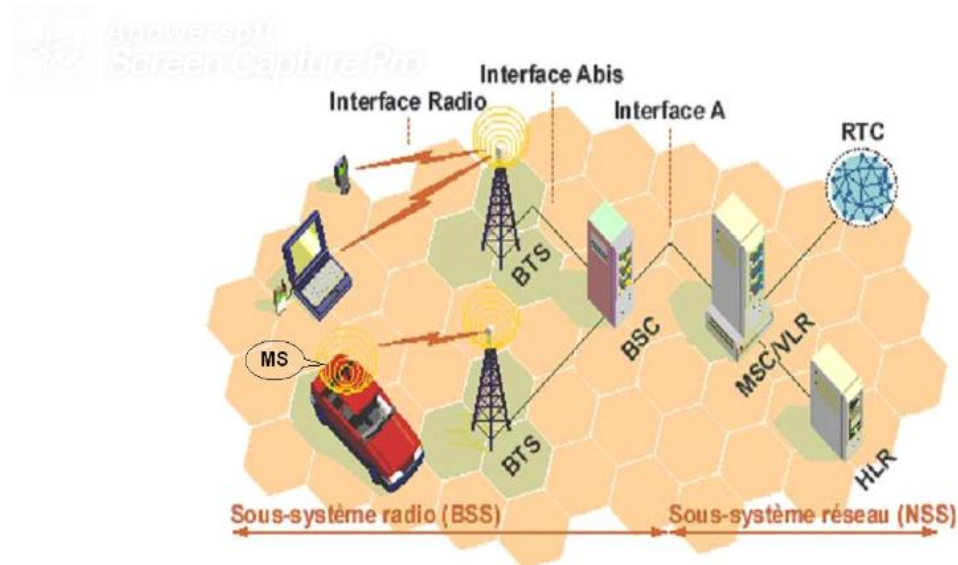
**Figure I.7 :** Modèle simple de production de la parole [15].

### I.8.2. Transcodage de la parole

Pour appliquer le système AEC à la communication mobile, il est nécessaire d'utiliser le signal transcodé. Le rôle du codec vocal est de compresser le signal vocal avant sa transmission pour réduire le nombre de bits nécessaires à sa représentation, tout en maintenant une qualité vocale acceptable. Aujourd'hui, les débits autorisés sur divers canaux de réseaux tels que GSM, UMTS et VoIP permettent l'utilisation de codecs de qualité supérieure tels que Adaptive Multi-Rate Wideband Codec (AMR-WB), recommandation UIT-T G.722.2, 2002 [16].

### I.8.3. Trajet de la parole dans un système cellulaire

Pour le GSM, les types de connexions suivants sont pris en compte. La figure I.8 illustre le chemin emprunté par le signal audio d'une extrémité du réseau à l'autre.



**Figure I.8 :** Trajet de la parole dans le réseau GSM [15].

Le signal audio capté par le microphone de la station mobile est codé dans la station mobile, puis dans la station de base (BTS) la plus proche de la station mobile.

En MSC, le signal audio passe par plus d'un type de traitement. Le signal audio subit plus d'ajustements, tels que : l'élimination du bruit et la correction des erreurs dues aux voies de transmission.

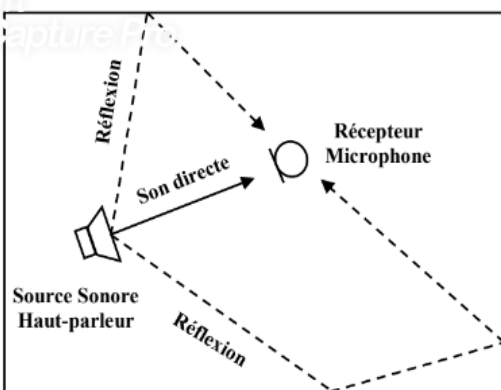
Le décodage du signal est essentiel dans les modèles GSM. A ce stade du parcours, deux scénarios peuvent apparaître :

- Si la deuxième station est à l'arrêt, le signal est transmis tel quel au réseau.
- Si la deuxième station est fixe le signal est envoyé directement au RTC fixe (maillé), où il subit le décodage PCM (pour la modulation par impulsions codées). Il est ensuite transmis à la station fixe réceptrice.
- Si la deuxième station est une station mobile, le signal subit un deuxième processus de codage, emprunte le chemin inverse, passe par BSC et BTS et est transmis à la station mobile. Il est envoyé à la station mobile réceptrice, où il est décodé en un signal vocal utile [17].

## I.9. La prise du son

Les sources sonores placées dans des espaces clos rayonnent généralement dans toutes les directions. L'onde sonore se propage vers la limite du volume et interagit avec les murs ou les obstacles. Leur comportement dépend principalement de la nature du signal transmis et de l'impédance du matériel rencontré.

Lors de la génération d'un signal acoustique dans une pièce, divers phénomènes se produisent et la panne entre en jeu. Un champ sonore est une zone dans l'espace où les ondes sonores existent. On utilise plusieurs termes, plus ou moins rigoureux, pour spécifier différents types de champs sonores.



**Figure I.9 :** Emission d'un son dans un local [11].

On considère des sons courts, appelés impulsions, émis par la source sonore dans une salle. Le point de réception de ce son est le microphone situé dans cette pièce. Les points fixes sont représentés sur la figure I.9. Les premières ondes sonores que le microphone percevra sont celles qui arrivent directement en ligne droite depuis la source, sans aucun obstacle : c'est le champ direct ou son de réverbération [18].

La combinaison du son direct et de diverses réflexions constitue la réponse impulsionnelle de la chambre.

### I.9.1. Puissance sonore

L'amplitude du son est déterminée par l'amplitude de la vibration sonore. Plus le volume est élevé, plus l'amplitude de la vibration est importante.

Comme le volume est une quantité difficile à exploiter, on préfère utiliser la notion de puissance, et cela est directement lié. En acoustique la puissance d'un son s'exprime en décibels.

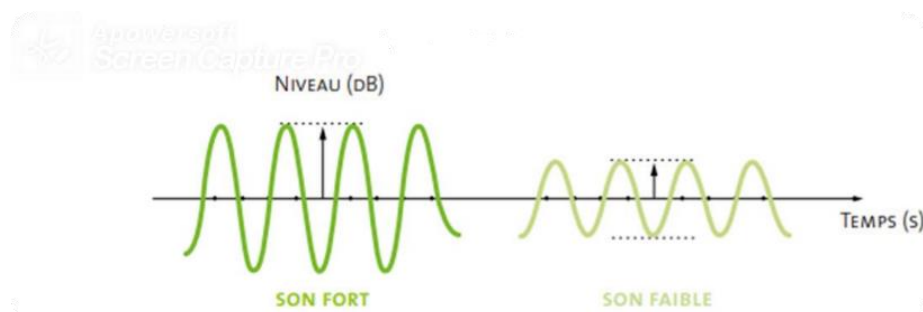
Un décibel est une quantité sans dimension, ce qui signifie qu'aucune unité réelle ne lui est associée dans les phénomènes physiques ou temporels. Cette quantité est logarithmique et offre l'avantage de convertir les produits en quantités plus gérables et plus précieuses.

### I.9.2. Propagation du son dans un espace libre

Les sources sonores sont classées en deux types en fonction de leur émissivité et de leur propagation : les sources ponctuelles, telles que les éoliennes, les avions ou les clochers, et les sources linéaires, telles que le trafic routier. Pour les sources ponctuelles, le niveau sonore diminue de 6 dB pour chaque doublement de la distance entre le point de mesure et la source. En revanche, pour une source sonore rectiligne, le niveau sonore diminue de 3 dB pour chaque doublement de la distance entre le récepteur et la source sonore. En raison de la distance, une atténuation atmosphérique est ajoutée, en plus de l'atténuation du son. Cette atténuation est plus importante pour les fréquences élevées. En outre, l'atténuation est maximale lorsque l'humidité est faible (15 à 20 %) et la température comprise entre 0 et 15°C [19].

### I.10. Niveau sonore

Le niveau sonore (niveau de pression acoustique) décrit l'amplitude du son. Plus l'amplitude est grande, plus le son est fort et inversement. La figure ci-dessous (figure I.10) représente la force d'un son par niveau.



**Figure I.10** : Puissance acoustique selon le niveau sonore [18].

En pratique, les amplitudes sonores sont représentées sur une échelle logarithmique car la gamme de perception de l'oreille humaine est très large et la sensation varie d'une personne à l'autre logarithme d'excitation.

## I.11. L'écho acoustique et les systèmes téléphoniques

Dans une conversation téléphonique, le discours du dernier opérateur où la distance est amplifiée et reproduite à travers le haut-parleur, le signal vocal est transmis à travers le réseau. L'écho acoustique est un phénomène qui se produit lorsqu'une partie du signal audio est réfléchié vers sa source.

Cela peut provoquer une distorsion audio et rendre la communication difficile. L'écho acoustique peut être un problème majeur dans les systèmes téléphoniques car les signaux audio sont souvent transmis sur les lignes téléphoniques et les réseaux numériques et peuvent provoquer des réflexions de signal de mauvaise qualité. Diverses techniques sont utilisées pour minimiser l'écho acoustique dans les systèmes téléphoniques, y compris les dispositifs d'annulation d'écho, de réduction du bruit et de contrôle de gain.

Ces techniques réduisent la quantité d'écho acoustique et améliorent la qualité des communications. En résumé, l'écho acoustique est courant dans les systèmes téléphoniques, mais des techniques d'annulation d'écho peuvent être utilisées pour minimiser son impact sur la qualité des appels [20].

### I.11.1. Origine de l'écho dans les systèmes téléphoniques

En théorie, si nous utilisons des lignes numériques jusqu'au bout entre l'interlocuteur et le serveur, il n'y a pas d'écho possible. Cependant, il n'y a pas un ajustement parfait si le haut-parleur est lié à une ligne téléphonique analogique qui peut générer un écho comme le montre la figure I.11. En numérisant le signal au niveau de la centrale téléphonique public, l'écho peut être réduit.

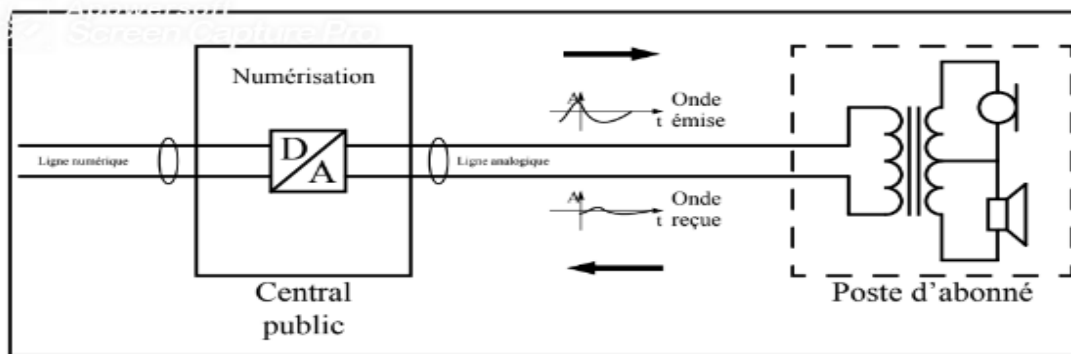


Figure I.11 : Provenance de l'écho.

La réflexion est caractérisée par le coefficient de réflexion  $\rho(x)$ , qui est le rapport (complexe) entre les tensions  $U_r$  associées à l'onde réfléchie et la tension  $U_i$  associée à l'onde incidente [16].

$$\rho(x) = \frac{U_r}{U_i} \quad (1.1)$$

En définissant  $Z_c$ , comme étant l'impédance caractéristique de la ligne, et  $Z_L$  celle de la charge connectée à la fin de cette ligne, nous pouvons exprimer  $\rho(x)$  comme suit :

$$\rho(x) = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (1.2)$$

Trois cas intéressants peuvent être extraits de cette formule :

- La ligne est chargée par son impédance caractéristique ( $Z_L = Z_c$ ), alors la formule ci-dessus donne un  $\rho(x) = 0$ .

Donc il n'y a pas de réflexion, et la ligne est dite « adaptée ». La charge absorbe toute l'énergie transmise.

-La ligne se termine avec une charge inférieure à son impédance ( $Z_L < Z_c$ ). Nous avons  $\rho(x) = 0$ . Ce signifie que l'onde réfléchie est déphasée par rapport à l'onde incidente. Dans le cas extrême d'un court-circuit on aura  $\rho(x) = -1$ .

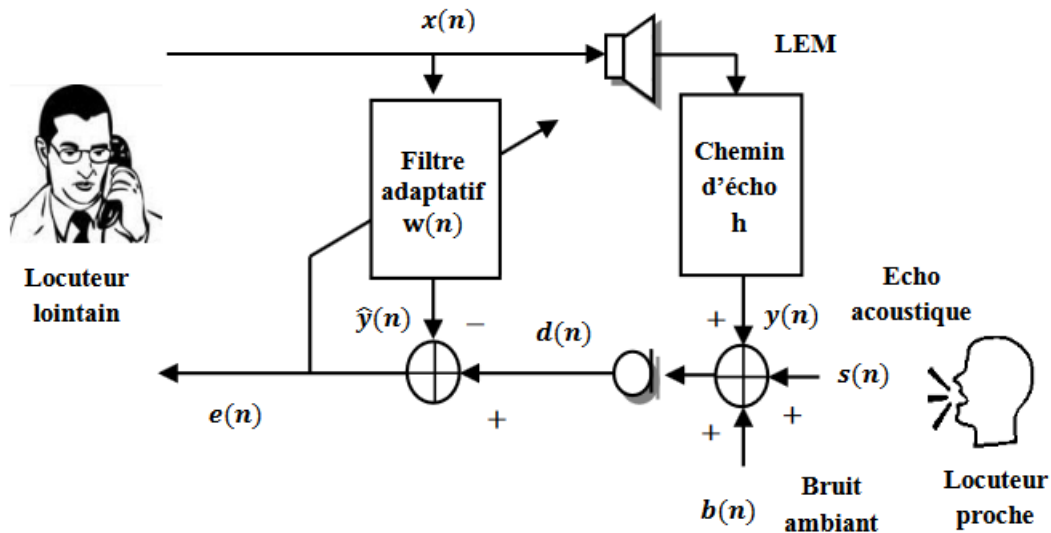
La ligne est terminée par une charge supérieure à son impédance ( $Z_L > Z_c$ ). Cela signifie que l'onde réfléchie est en phase avec l'onde incidente. Dans le cas extrême d'un circuit ouvert,  $\rho(x) = 1$ .

En fait, les signaux voyagent sur les fils à une vitesse finie. Il faut donc un peu de temps pour que le signal atteigne la fin de la ligne.

### **I.11.2. Système d'annulation d'écho acoustique**

Les systèmes d'annulation d'écho acoustique (AEC) sont utilisés pour supprimer ou réduire les échos indésirables qui se produisent dans les communications audio en temps réel telles que les appels téléphoniques et les vidéo conférences. Ces derniers utilisent des algorithmes de traitement numérique du signal pour détecter et annuler ces échos.

La figure I.12 montre la configuration générale d'un système AEC, où le filtre adaptatif est utilisé pour identifier les trajets d'écho inconnus en ajustant de manière adaptative leurs coefficients. Les coefficients estimés sont ensuite utilisés pour fournir une copie de l'écho qui doit être soustrait du signal cible pour obtenir l'annulation.



**Figure I.12 :** Structure globale d'AEC à base de filtrage adaptatif [12].

Nous définissons le signal d'entrée  $x(n)$ , comme étant le signal de parole du locuteur distant. Il représente la sortie du haut-parleur proche. Le signal audio résonne alors dans l'environnement réel et est capté par le microphone.

Le signal du microphone  $d(n)$  est composé du signal d'écho réel et du signal de bruit  $b(n)$  environnemental. De plus, il inclut  $s(n)$  le signal vocal du locuteur proche. L'AEC cherche à minimiser la contribution du signal d'écho  $y(n)$  à la puissance du signal. Le signal d'erreur  $e(n)$  est obtenu en soustrayant une estimation du signal d'écho  $\hat{y}(n)$  du signal de microphone  $d(n)$ .

Le chemin de l'écho est généralement inconnu et variable dans le temps, par conséquent les trois principales étapes de l'annulation de l'écho acoustique sont nécessaires [12].

$$e(n) = d(n) - \hat{y}(n) \quad (1.3)$$

Où

$$d(n) = y(n) + s(n) + b(n) \quad (1.4)$$

C'est une combinaison d'écho acoustique  $y(n)$ , de la parole proche du locuteur  $s(n)$  et de bruit  $b(n)$  de l'environnant. Le signal d'écho acoustique est modélisé par l'équation suivante :

$$y(n) = X^T(n)h(n) \quad (1.5)$$

Où

$$X(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]^T \quad (1.6)$$

Et

$$h(n) = [h_0 \ h_1 \ h_2 \ \dots \ h_{L-1}]^T \quad (1.7)$$

Le vecteur  $X(n)$  (l'observation) est de longueur  $L$  et représente le signal d'entrée  $x(n)$  du haut-parleur loin,  $h(n)$  est la réponse impulsionnelle du trajet d'écho réel, supposée être un filtre FIR (Finité Impulse Réponse) de longueur  $L$ .

L'énergie de la réponse impulsionnelle réelle  $h(n)$  simulant le trajet de l'écho est décroissante exponentiellement, les coefficients d'exposant élevés sont négligeables. Le signal d'écho résiduel, qui représente l'erreur d'estimation est le suivant :

$$e_r(n) = y(n) - \hat{y}(n) \quad (1.8)$$

## 1.12. Conclusion

La présence d'écho affecte la qualité du son et constitue un obstacle majeur à la distinction du son d'origine. Dans ce chapitre, nous avons décrit le phénomène d'écho qui dégrade la qualité des sons transmis, s'il n'est pas annulé ou réduit par des techniques efficaces.

On ne peut pas lutter contre l'écho acoustique sans savoir ses causes et ses caractéristiques qui ont été exposés le long de ce chapitre.



# **Chapitre II**

## **Filtrage adaptatif**

## **II.1. Introduction**

Le filtrage adaptatif est une technique de traitement du signal utilisée pour extraire ou améliorer un signal désiré à partir d'un signal bruité (contaminé de bruit). Il est basé sur l'idée d'ajuster les coefficients de filtrage d'un filtre linéaire en temps réel pour optimiser ses performances dans des environnements de signaux changeants.

Le filtrage adaptatif est effectué de manière adaptative, si les coefficients sont ajustés selon une norme donnée, une nouvelle valeur du signal est disponible. Ces modifications doivent suivre l'évolution des systèmes dans leur environnement dans les meilleurs délais. Les filtres adaptatifs s'ajustent eux-mêmes, en fonction des signaux externes, pour supprimer les troubles situés dans la gamme de fréquences du signal souhaité à un moment donné.

Dans ce chapitre, nous approfondirons le filtrage adaptatif, nous parlerons de l'historique de ce dernier, expliquant également ce qu'est le filtrage adaptatif et son principe. Nous parlerons des types de ce filtrage, et aussi de ses différents algorithmes dont on va donner les formulations de chaque type avec ses propres avantages et inconvénients.

Nous allons voir quelques applications courantes du filtrage adaptatif, ainsi que les critères du choix de l'algorithme.

Nous aborderons l'algorithme LMS et son fonctionnement et nous justifions pourquoi ce dernier est un choix populaire dans de nombreuses applications de filtrage adaptatif. Sa convergence et stabilité seront aussi discutées.

Nous citerons aussi l'algorithme NLMS et l'algorithme RLS, en mentionnant les équations et les étapes nécessaires pour les implémenter. On finira avec un petit résumé et une conclusion pour récapituler.

## **II.2. Historique du filtrage adaptatif**

L'histoire du filtrage adaptatif remonte au début des années 1960, lorsque les chercheurs ont commencé à explorer l'idée d'utiliser la rétroaction en temps réel pour ajuster les coefficients d'un filtre. L'un des premiers exemples de filtre adaptatif était l'algorithme Widrow-Hoff ou LMS, qui a été proposé en 1960 par Bernard Widrow et Ted Hoff de l'Université de Stanford.

Au fil des années, les chercheurs ont continué à développer et à affiner les techniques de filtrage adaptatif. Dans les années 1970 et 1980, des algorithmes récursifs des moindres carrés

(RLS) ont été développés, ce qui a permis une convergence plus rapide et plus précise que l'algorithme LMS.

Dans les années 1990, le filtrage adaptatif a commencé à être appliqué dans un large éventail d'applications, notamment le traitement de la parole et des images, le traitement du signal biomédical et les systèmes de contrôle. Aujourd'hui, le filtrage adaptatif continue d'être un domaine de recherche actif, avec de nouveaux algorithmes et applications développés en permanence [10].

### II.3. Principe du filtrage adaptatif

La principale caractéristique d'un filtre adaptatif est sa capacité à ajuster automatiquement ses coefficients en fonction des données d'entrée qu'il reçoit. Cela se fait par un processus itératif consistant à comparer la sortie du filtre avec la sortie souhaitée et à ajuster les coefficients du filtre en conséquence.

Le principe du filtrage adaptatif consiste à ajuster les coefficients d'un filtre linéaire en temps réel pour optimiser ses performances dans des environnements de signaux changeants. Les coefficients du filtre sont ajustés sur la base d'un processus itératif qui compare la sortie du filtre avec la sortie souhaitée et ajuste les coefficients pour minimiser la différence entre les deux.

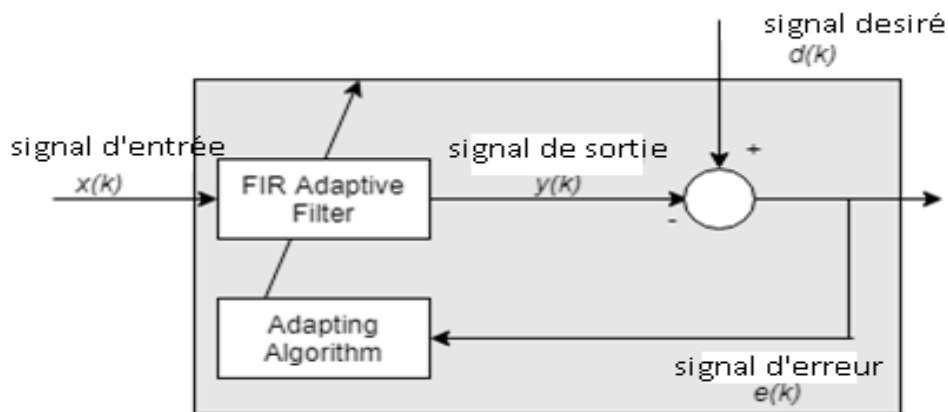


Figure II.1 : Principe d'un filtre adaptif [11].

L'idée clé du filtrage adaptatif est que les caractéristiques d'un signal peuvent changer avec le temps et qu'un filtre fixe peut ne pas être en mesure de fournir des performances optimales dans toutes les situations. En ajustant les coefficients du filtre en temps réel, un filtre adaptatif peut s'adapter aux environnements du signal changeant et fournir de meilleures performances qu'un filtre fixe.

Le principe du filtrage adaptatif est illustré à la figure II.1, cela correspond à l'opération effectuée sur le signal reçu  $x(n)$  pour fournir une sortie  $\hat{y}(n)$  dont la différence avec le signal de référence  $y(n)$  est minimisée. Cette minimisation est utilisée pour ajuster les coefficients pour chaque nouvel ensemble de données, signal de référence et signal reçu.

#### II.4. Algorithme du filtrage adaptatif

Le processus de filtrage adaptatif implique généralement quatre étapes principales suivantes :

- **Initialisation** : les coefficients du filtre sont initialisés par certaines valeurs initiales.
- **Filtrage** : Le signal d'entrée passe à travers le filtre pour produire un signal de sortie
- **Calcul d'erreur** : La différence entre le signal de sortie et le signal de sortie souhaité est calculée pour produire un signal d'erreur.
- **Mise à jour des coefficients** : les coefficients du filtre sont ajustés en fonction du signal d'erreur, à l'aide d'un algorithme mathématique qui cherche à minimiser l'erreur.

Ce processus est répété en temps réel, le filtre ajustant ses coefficients en fonction du signal d'entrée actuel et du signal de sortie souhaité. L'objectif est de trouver l'ensemble optimal de coefficients du filtre qui minimise l'erreur entre le signal de sortie et le signal de sortie souhaité.

Une fois que le filtre a convergé vers un ensemble optimal de coefficients, il peut être utilisé pour extraire ou améliorer le signal souhaité à partir d'un signal bruité.

Comme le montre la figure II.1, un filtre adaptatif est un filtre numérique avec des coefficients qui sont déterminés et mis à jour par un algorithme adaptatif. Les filtres adaptatifs peuvent être classés en fonction des points suivants :

- Le critère d'optimisation,
- L'algorithme de mise à jour des coefficients,
- La structure du filtre programmable,
- Le type de signal traité, mono ou multidimensionnel- [13]

## II.5. Formulation des filtres adaptatifs

### II.5.1. Types de formulation

Il existe plusieurs formulations de filtres adaptatifs, chacune avec ses propres avantages et inconvénients. Voici quelques formulations courantes :

- **Filtre FIR (Finite Impulse Response)** : dans cette formulation, le filtre adaptatif a une réponse impulsionnelle finie, ce qui signifie que sa réponse à un signal d'entrée est de durée finie.

Les coefficients du filtre sont mis à jour en temps réel à l'aide d'un algorithme adaptatif qui minimise la différence entre le signal souhaité et le signal de sortie.

- **Filtre IIR (Infinite Impulse Response)** : dans cette formulation, le filtre adaptatif a une réponse impulsionnelle infinie, ce qui signifie que sa réponse à un signal d'entrée se poursuit indéfiniment.

Les coefficients du filtre sont mis à jour en temps réel à l'aide d'un algorithme adaptatif qui minimise la différence entre le signal souhaité et le signal de sortie.

- **Filtre de Wiener** : dans cette formulation, le filtre adaptatif est conçu pour minimiser l'erreur quadratique moyenne entre le signal souhaité et le signal filtré. Les coefficients de filtre sont mis à jour à l'aide des équations de Wiener-Hopf, qui fournissent une solution optimale pour les coefficients de filtre.

- **Filtre de Kalman** : Dans cette formulation, le filtre adaptatif est utilisé pour estimer l'état d'un système basé sur des mesures bruyantes. Les coefficients du filtre sont mis à jour à l'aide de l'algorithme du filtre de Kalman, qui combine une étape de prédiction et une étape de correction pour estimer l'état du système.

- **Filtre de réseau neuronal** : dans cette formulation, le filtre adaptatif est mis en œuvre à l'aide d'un réseau neuronal, qui apprend à mapper le signal d'entrée sur le signal de sortie souhaité. Les poids du réseau sont mis à jour à l'aide de la rétro-propagation, un algorithme d'optimisation basé sur le gradient.

Chaque formulation de filtres adaptatifs a ses propres forces et faiblesses, en fonction de l'application et des exigences spécifiques [14].

### II.5.2. Exemple de formulation

Prenons un exemple pour illustrer le principe du filtrage adaptatif. Supposons que nous voulions extraire un signal souhaité  $x(n)$  d'un signal bruité  $y(n)$ , où  $n$  représente l'indice de temps discret.

Nous pouvons modéliser le signal bruité  $\mathbf{y}(n)$  comme la somme du signal souhaité  $\mathbf{x}(n)$  et d'un signal de bruit  $\mathbf{v}(n)$ , comme suit :

$$y(n) = x(n) + v(n) \quad (1.1)$$

Si on fait passer le signal bruité  $\mathbf{y}(n)$  à travers un filtre fixe de coefficients  $\mathbf{h}(k)$ , le signal de sortie  $\mathbf{z}(n)$  est donné par la convolution des coefficients du filtre et du signal d'entrée :

$$z(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k).y(n - k) \quad (1.2)$$

Où ;  $M$  est la longueur du filtre.

Cependant, si les coefficients du filtre  $\mathbf{h}(k)$  sont fixes, ils peuvent ne pas être optimaux pour toutes les situations. En particulier, si les caractéristiques de bruit changent avec le temps, le filtre peut ne pas être en mesure d'éliminer efficacement le bruit du signal.

C'est là qu'intervient le filtrage adaptatif. Au lieu d'utiliser des coefficients de filtre fixes, nous pouvons utiliser des coefficients de filtre adaptatif  $\mathbf{h}(n, k)$  qui changent dans le temps. Le filtre adaptatif met à jour ses coefficients sur la base d'un processus itératif qui minimise l'erreur entre le signal souhaité  $\mathbf{x}(n)$  et le signal de sortie  $\mathbf{z}(n)$ .

Le filtre adaptatif fonctionne comme suit :

- Initialisation des coefficients du filtre à certaines valeurs initiales, par exemple égaux à zéro.
- Passage du signal d'entrée  $\mathbf{y}(n)$  à travers le filtre adaptatif pour produire le signal de sortie  $\mathbf{z}(n)$ , qui est donné par la convolution des coefficients du filtre et du signal d'entrée :

$$z(n) = \sum_{k=0}^{m-1} h(n, k) y(n - k) \quad (1.3)$$

- Calcul du signal d'erreur  $e(n)$  entre le signal désiré  $x(n)$  et le signal de sortie :

$$E(n) = x(n) - z(n) \quad (1.4)$$

- Mettre à jour les coefficients du filtre à l'aide d'un algorithme mathématique qui cherche à minimiser l'erreur. Un algorithme courant est l'algorithme des moindres carrés moyens (LMS), qui met à jour les coefficients du filtre comme suit :

$$h(n + 1, k) = h(n, k) + \mu \cdot y(n - k)e(n) \quad (1.5)$$

Où ;  $\mu$  est un paramètre (le pas) qui contrôle le taux d'adaptation.

- Répéter les étapes 2 à 4 pour chaque nouvel échantillon d'entrée.

Au cours du temps, le filtre adaptatif converge vers un ensemble optimal de coefficients de filtre qui minimisent l'erreur entre le signal souhaité et le signal de sortie. Le filtre adaptatif peut ensuite être utilisé pour extraire ou améliorer le signal souhaité du signal d'entrée bruité.

## II.6. Applications du filtrage adaptatif

Les filtres adaptatifs sont couramment utilisés dans diverses applications, notamment la suppression du bruit, la suppression de l'écho, l'égalisation des canaux et la reconnaissance vocale. Ils sont particulièrement utiles dans les situations où les caractéristiques du signal d'entrée sont inconnues ou changent dans le temps, comme dans les systèmes de communication, le traitement du signal biomédical et les systèmes de contrôle.

Le filtrage adaptatif est une technique utilisée pour traiter les signaux en temps réel et s'adapter aux changements des caractéristiques ou de l'environnement du signal. Voici quelques applications courantes du filtrage adaptatif :

**a. Annulation d'écho** : Dans les applications de téléphonie, un écho peut être créé lorsque le son du haut-parleur est capté par le microphone. Le filtrage adaptatif peut être utilisé pour annuler l'écho en estimant le trajet de l'écho et en le soustrayant du signal reçu.

**b. Réduction du bruit** : le filtrage adaptatif peut être utilisé pour réduire le bruit dans les signaux audio, tels que la parole ou la musique, en estimant les caractéristiques du bruit et en les soustrayant du signal.

**c. Égalisation** : le filtrage adaptatif peut être utilisé pour égaliser un canal de communication, en compensant l'atténuation ou la distorsion dépendant de la fréquence. Cela peut être utilisé dans l'égalisation des signaux audio ou dans les systèmes de communication.

**d. Estimation du canal** : dans les systèmes de communication sans fil, le filtrage adaptatif peut être utilisé pour estimer les caractéristiques du canal de communication, telles que la réponse en fréquence du canal ou le profil de retard multivoie. Ces informations peuvent être utilisées pour optimiser les paramètres de transmission et améliorer les performances du système.

**e. Identification du système** : le filtrage adaptatif peut être utilisé pour identifier les paramètres d'un système dynamique en fonction des données d'entrée/sortie. Cela peut être utilisé dans les systèmes de contrôle ou dans la modélisation de systèmes physiques.

**f. Formation de faisceau adaptative** : dans les réseaux de microphones ou les réseaux d'antennes, le filtrage adaptatif peut être utilisé pour améliorer le signal provenant d'une direction spécifique tout en supprimant le bruit et les interférences provenant d'autres directions.

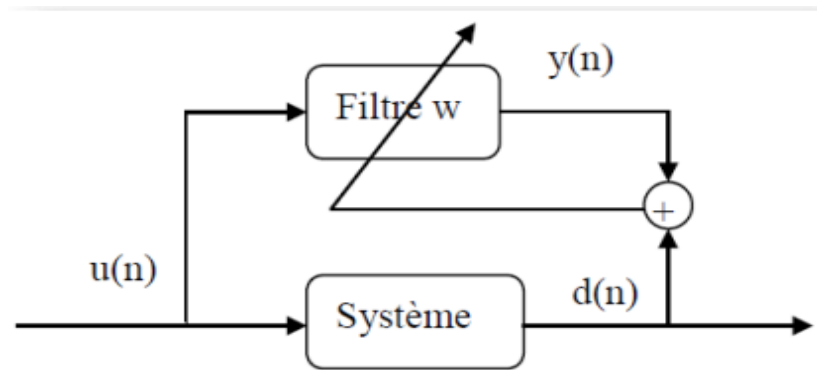
Dans l'ensemble, le filtrage adaptatif est une technique puissante qui peut être utilisée dans un large éventail d'applications, du traitement du signal audio aux systèmes de communication et de contrôle sans fil [15].

Le filtrage adaptatif est un outil puissant dans le traitement du signal, la communication, numérisation et contrôle automatique.

On peut distinguer quatre grandes classes d'applications qui sont :

### II.6.1. Identification de systèmes

C'est la sortie du système  $d(n)$  que l'on souhaite identifier. La figure II.2, illustre le contexte du problème d'identification. Celui-ci consiste en la détermination d'un filtre modélisant au mieux le comportement d'un système inconnu. Seuls sont connus les signaux d'entrée/sortie de ce système. Le filtre représentant le modèle sera estimé à partir de l'observation de la différence entre la sortie du processus et son estimation à la sortie du filtre.



**Figure II.2** : Principe de l'identification [16][17].

## II.6.2. Modélisation inverse

C'est l'entrée (retardée) du système  $d(n)$  que l'on cherche à « inverser ». La figure II.3, illustre le contexte du problème de modélisation inverse. Il s'agit ici de reconstruire au mieux un signal de référence qui a été déformé par un processus inconnu.

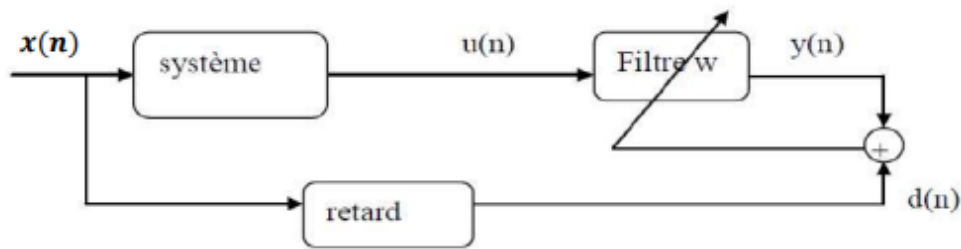


Figure II.3 : Principe de la modélisation inverse [16] [17].

Le filtre adaptatif doit permettre une compensation des déformations induites par le processus. En télécommunication ce problème est désigné sous le nom de problème d'égalisation [16].

## I.6.3. Prédiction du signal de sortie

C'est le signal  $d(n)$  à l'instant  $n$  et  $y(n)$  le signal prédit à partir du signal aux instants précédents. La figure II.4, illustre le contexte du problème de prédiction. Ce problème consiste en l'estimation de la valeur future d'un signal à partir de l'information passée.

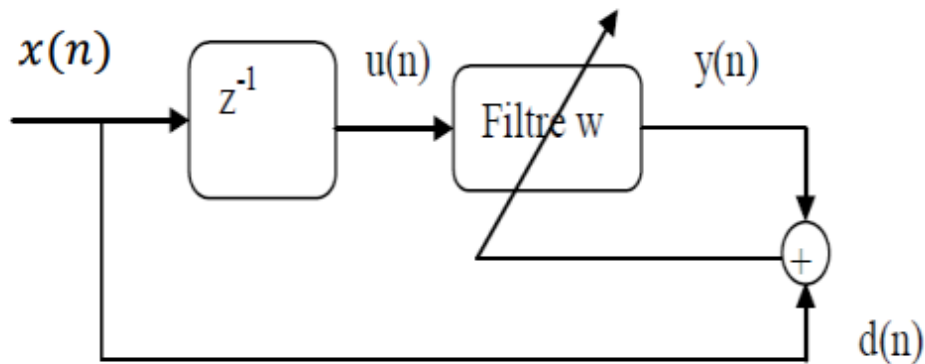
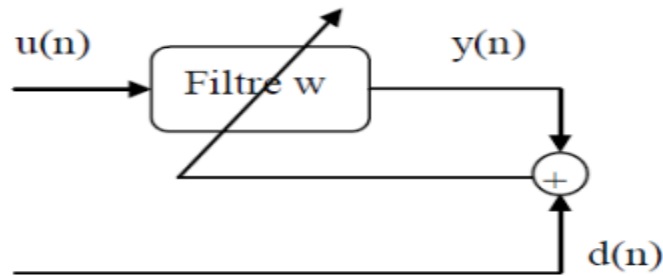


Figure II.4 : Principe de la prédiction [16] [17].

#### II.6.4. Annulation d'interférences (annulation d'écho, de bruit)

Le signal primaire contenant l'interférence à annuler est  $d(n)$ ,  $u(n)$  est le signal de référence obtenu à partir des capteurs. Étant donné le cadre dans lequel ce travail s'oriente, on n'en parlera que du procédé d'annulation d'échos vocaux par filtrage adaptatif.



**Figure II.5:** Principe de l'annulation d'interférence [16] [17].

La figure II.5 illustre le contexte du problème d'annulation d'interférence [17].

#### II.7. Choix de l'algorithme

Il existe plusieurs types de filtres adaptatifs, notamment les filtres LMS (Least Mean Squares), RLS (Recursive Least Squares) et Kalman, chacun ayant ses propres forces et faiblesses en fonction des exigences de l'application.

Le choix de l'algorithme se fera en fonction des critères suivants :

- La rapidité de convergence qui sera le nombre d'itérations nécessaires pour converger "assez près" de la solution optimale.
- La mesure de cette "proximité" entre cette solution optimale et la solution obtenue.
- La capacité de poursuite (tracking) des variations (non-stationnarités) du système.
- La robustesse au bruit.
- La complexité de calcul.
- La structure (modularité, parallélisme, ...).
- Les propriétés numériques (stabilité et précision) dans le cas d'une précision limitée sur les données et les coefficients du filtre [18].

### II.7.1. L'Algorithme du gradient stochastique (LMS)

L'algorithme LMS est un choix populaire dans de nombreuses applications de filtrage adaptatif. Deux raisons principales de sa popularité : Simplicité et complexité de calcul réduite. De plus, il existe plusieurs variantes de l'algorithme qui peuvent être utilisées spécifiquement pour résoudre différents types de problèmes inhérents à certaines applications. La version de base du LMS est un cas du filtre adaptatif à descente de gradient bien connu.

Le but de cette technique est de réduire au minimum une fonction de coût quadratique en mettant à jour itérativement des poids de sorte qu'ils convergent à la solution optimale. De la méthode du gradient descendant, l'équation de mise à jour des coefficients du filtre est la suivante :

$$h(n+1) = h(n) + \frac{1}{2}\mu [\nabla(E(e^2(n)))] \quad (1.6)$$

Où

$\mu$  : est un paramètre crucial affectant la stabilité et le taux de convergence de l'algorithme LMS. Il représente le pas de descente du gradient,  $e^2(n)$  est l'erreur quadratique moyenne entre la sortie  $\hat{x}(n)$  et le signal de référence  $(n)$ . Elle est donnée par la formule suivante :

$$e^2(n) = [x(n) - h^T \cdot y(n)]^2 \quad (1.7)$$

Où ;

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (1.8)$$

Le vecteur gradient est donné par :

$$\nabla = 2R_{YX} + R_{YY} \quad (1.9)$$

Dans la méthode du gradient descendant, le plus gros problème est le calcul impliqué dans la recherche des valeurs et des matrices en temps réel. L'algorithme LMS utilise les valeurs instantanées de la matrice de covariance et les remplace par la valeur réelle, c'est-à-dire :

$$R_{YY} = E[y(n) y^T(n)] \quad (1.10)$$

$$R_{YX} = E [y(n) x(n)] \quad (1.11)$$

Par conséquent, la mise à jour des coefficients du filtre est donnée par la formule suivante :

$$h(n + 1) = h(n) + \mu \cdot y(n)[x(n) - y^T(n) h(n)] \quad (1.12)$$

Après développement on obtient :

$$h(n + 1) = h(n) + \mu \cdot y(n)e(n) \quad (1.13)$$

L'algorithme LMS est initialisé avec une valeur arbitraire  $h(0) = 0$ . Les modifications successives du vecteur de poids donnent finalement la valeur de l'erreur quadratique moyenne minimale. Par conséquent, nous pouvons résumer l'algorithme LMS par les étapes du tableau ci-dessous :

Initialiser avec :  
 $h(0) = 0$   
Pour  $n=1, 2$ , faire :  
 $\hat{x}(n) = h^T(n) y(n)$   
 $e(n) = x(n) - \hat{x}(n)$   
 $h(n + 1) = h(n) + 2\mu \cdot y(n) \cdot e(n)$

**Tableau 2.1** : Etapes de l'algorithme LMS.

### II.7.2. Convergence et stabilité de l'algorithme LMS

La convergence de l'algorithme LMS dépend du pas d'adaptation  $\mu$  comme suit :

- Si  $\mu$  est choisi très petit, l'algorithme convergera très lentement.
- Cependant, de grandes valeurs de  $\mu$  peuvent accélérer la convergence. Le pas d'adaptation doit vérifier la condition suivante :

$$0 < \mu < 2 / \lambda_{max} \quad (1.15)$$

Où ;  $\lambda_{max}$  représente la valeur propre maximale de la matrice d'auto corrélation.

La convergence de l'algorithme est inversement proportionnelle à la propagation de valeurs propres de la matrice d'auto corrélation. La convergence peut être lente pour des valeurs propres très larges [19].

### II.7.2.1 Avantages et inconvénients du LMS

- **Avantages**

- Simplicité de la programmation,
- Très faible coût calculatoire,
- Stable numériquement (peu sensible aux erreurs de quantification).

- **Inconvénients**

- Vitesse de convergence faible et liée au conditionnement des données ou aux choix.
- Erreur en excès importante.

### II.7.3. L'algorithme NLMS

L'algorithme NLMS (Normalized Least Mean Squares) est un algorithme de filtrage adaptatif largement utilisé dans le traitement du signal numérique et l'apprentissage automatique.

L'idée principale derrière les algorithmes NLMS est d'ajuster les coefficients du filtre proportionnellement à la pente normalisée de la fonction de coût. La fonction de coût est généralement définie comme l'erreur quadratique moyenne (MSE) entre la sortie souhaitée et la sortie réelle du filtre. L'algorithme NLMS est une version normalisée du LMS dont l'équation de mise à jour des coefficients du filtre est la suivante :

$$h(n + 1) = h(n) + \mu \cdot e(n) \cdot x(n) / (\|x(n)\|^2 + \delta) \quad (1.16)$$

Où ;

$h(n)$  est le coefficient du filtre à l'itération  $n$ ,  $\mu$  est le pas d'adaptation,  $e(n)$  est l'erreur à l'itération  $n$ ,  $x(n)$  est le signal d'entrée à l'itération  $n$ ,  $\|x(n)\|^2$  est la norme L2 du signal d'entrée à l'itération  $n$ , et  $\delta$  est une petite constante positive ajoutée au dénominateur pour éviter la division par zéro (terme de régularisation). Les étapes de l'algorithme NLMS sont données le tableau 2.2:

Le facteur de normalisation ( $\|x(n)\|^2 + \delta$ ) dans le dénominateur garantit que les mises à jour sont mises à l'échelle de manière appropriée. Le choix approprié du pas et du paramètre de régularisation  $\delta$  est important pour la stabilité et les performances de l'algorithme NLMS [20].

Initialiser avec :

$$h(0) = 0$$

Pour  $n=1, 2$ , faire :

$$\hat{x}(n) = h^T(n) y(n)$$
$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n)$$
$$h(n+1) = h(n) + \mu \cdot e(n) \cdot x(n) / (\|x(n)\|^2 + \delta)$$

**Tableau 2.2 : Etapes de l'algorithme NLMS.**

### II.7.3.1 Avantages et inconvénients du NLMS

#### Avantages

- Simplicité d'implémentation.
- Adaptation en ligne.
- Stabilité numérique.
- Robuste aux données non stationnaires.

#### Inconvénients

- Sensibilité au choix du pas d'apprentissage.
- Performance dépendante de la corrélation des données.
- Coût calculatoire élevé.
- Besoin de contrôle de la normalisation.

### II.7.4. L'algorithme RLS

L'algorithme RLS est un algorithme de filtre adaptatif utilisé pour l'identification du système et le traitement adaptatif du signal. Il estime les coefficients d'un filtre linéaire en mettant à jour de manière récursive le vecteur de paramètres en fonction des signaux d'entrée et de sortie observés.

IL utilise une technique d'inversion de matrice pour calculer les coefficients du filtre. A chaque étape, Il met à jour l'estimation des coefficients en utilisant les échantillons entrés et de sortie actuels, ainsi qu'un facteur d'oubli pour contrôler l'influence des échantillons passés. L'algorithme RLS minimise la somme des carrés des erreurs entre la sortie estimée et la sortie désirée [42].

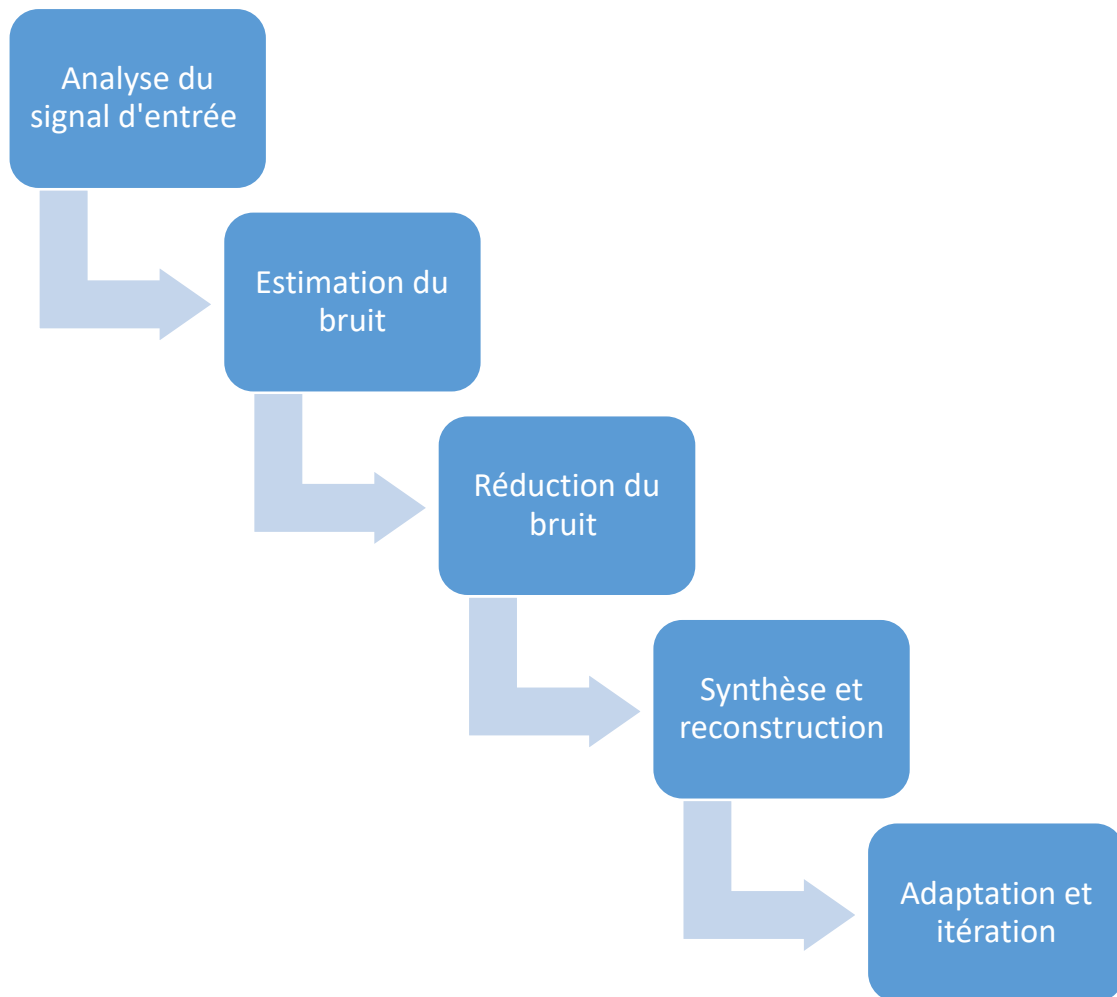
### **II.7.5. L'algorithme FDAF**

L'algorithme Frequency Domain Adaptive Filter (FDAF) est un algorithme spécifique pour l'annulation du bruit acoustique et le traitement du signal audio. Contrairement aux filtres adaptatifs dans le domaine temporel, qui fonctionnent directement sur des échantillons de signal audio dans le domaine temporel, l'algorithme FDAF traite les signaux dans le domaine fréquentiel. Notre travail consiste à simuler cet algorithme en utilisant le logiciel Matlab.

Fonctionnement de l'algorithme FDAF :

1. Analyse du signal d'entrée : le signal audio entrant est divisé en trames qui se chevauchent, généralement à l'aide de techniques telles que la transformée de Fourier rapide (FFT). Chaque segment est représenté dans le domaine fréquentiel comme un ensemble de composantes fréquentielles.
2. Estimation du bruit : L'algorithme FDAF estime la composante de bruit présente dans chaque bande de fréquence du signal. Ceci peut être réalisé en utilisant une analyse statistique ou des techniques de filtrage adaptatif.
3. Réduction du bruit : une fois la composante de bruit estimée, l'algorithme FDAF applique un processus de filtrage pour atténuer ou supprimer le bruit. Ceci est réalisé en faisant varier l'amplitude et la phase des composantes de bruit dans chaque bande de fréquence.
4. Synthèse et reconstruction : Après le processus de réduction du bruit, les composantes fréquentielles modifiées sont transformées de nouveau dans le domaine temporel à l'aide de techniques telles que la transformée de Fourier inverse (IFFT). Le signal reconstruit contient le signal audio original avec un bruit réduit.
5. Adaptation et itération : L'algorithme FDAF s'adapte continuellement en ajustant ses paramètres d'estimation du bruit et de filtrage en fonction des caractéristiques du signal d'entrée.

Cette adaptation permet à l'algorithme de suivre les variations du profil de bruit et d'améliorer progressivement les performances d'annulation du bruit.



**Figure II.6 :** Fonctionnement de l'algorithme FDAF.

L'algorithme FDAF est particulièrement utile dans les situations où les caractéristiques de bruit sont différentes pour chaque bande de fréquence. En fonctionnant dans le domaine fréquentiel et en atténuant sélectivement les composantes de bruit dans des bandes de fréquences spécifiques, une réduction de bruit plus efficace est possible [21].

## **II.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement le filtrage adaptatif et de manière générale. Ensuite, nous avons présenté les filtres adaptatifs usuels tels que : LMS, NLMS, RLS et FDAF.

Le filtrage adaptatif est une classe importante du traitement des signaux aléatoires. L'évolution des processeurs de traitement du signal a rendu son réalisation aisée et a permis d'agir sur des signaux rapides et à large spectre. Son principal intérêt consiste à éliminer un bruit dont les caractéristiques évoluent dans le temps par algorithme de base le LMS et ensuite par d'autres algorithmes.

# **Chapitre III**

## **Résultats de simulations**

### **III .1. Introduction**

L'annulation d'écho acoustique est un processus qui vise à supprimer l'écho indésirable dans un signal audio. Cet écho peut se produire lorsque le signal audio est transmis dans une pièce ou dans un système de communication, et peut perturber la qualité du signal et rendre la communication difficile.

Dans ce chapitre, nous allons simuler la procédure de l'annulation d'écho acoustique à l'aide de deux types d'algorithmes de filtrage adaptatif : L'un qui fonctionne dans le domaine spatial (LMS et sa version normalisée le NLMS), le deuxième s'implémente dans le domaine fréquentiel. Le logiciel adopté est le MATLAB puisqu'on est familiarisé avec ce dernier.

### **III.2. Le logiciel Matlab**

MATLAB est un logiciel propriétaire de calcul numérique développé par Math Works. Il fournit un environnement informatique puissant pour le calcul technique, l'analyse de données et la visualisation. MATLAB prend en charge une variété d'applications telles que le traitement du signal, le traitement d'image, les systèmes de contrôle, l'apprentissage automatique et la finance informatique.

MATLAB fournit un environnement de programmation interactif et un langage de programmation facile à apprendre. Le langage est basé sur la manipulation matricielle, ce qui le rend idéal pour les applications scientifiques et d'ingénierie. MATLAB comprend une large gamme de fonctions et de boîtes à outils intégrées qui peuvent être utilisées pour effectuer des calculs et des simulations avancées.

Enfin, MATLAB est largement utilisé dans le milieu universitaire, la recherche et l'industrie pour une variété d'applications, notamment l'ingénierie, la physique, la finance et la science des données.

### **III.3. Base de données utilisées dans la simulation**

Dans l'opération d'annulation d'écho acoustique on, a besoin des signaux suivants :

- Signal de parole proche (Near-end speech).
- Signal de parole lointain (Far-end speech).

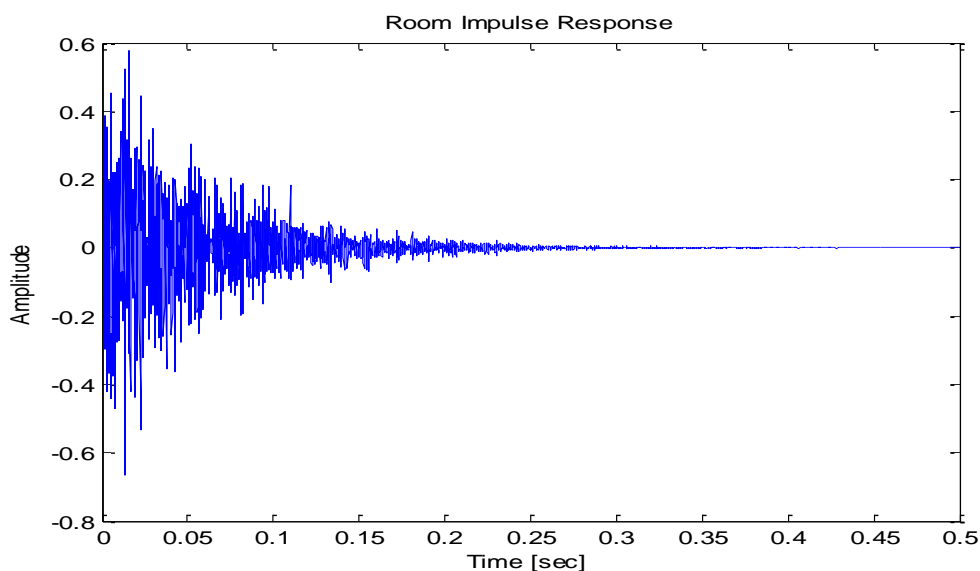
Dans notre simulation ces deux signaux sont deux paroles prononcées en anglais par deux locuteurs hommes comme suit :

- Near end speech: "Hi Steve, it's Jim... did you get the year-to-date sales figures that I sent to you? I know what you mean, you have been pretty pleased with how things have been going on so far. Of course, do you need anything else from my end? Sounds good, thanks Steve... bye."
- Far-end speech: "Hello, this is Steve... hello Jim... yes, I did, thank you. It looks like it's going to be a banner year for the department. I need to get approval before I can release this information to the public. I'll let you know... bye."

La fréquence d'échantillonnage des 2 signaux est 8000 Hz.

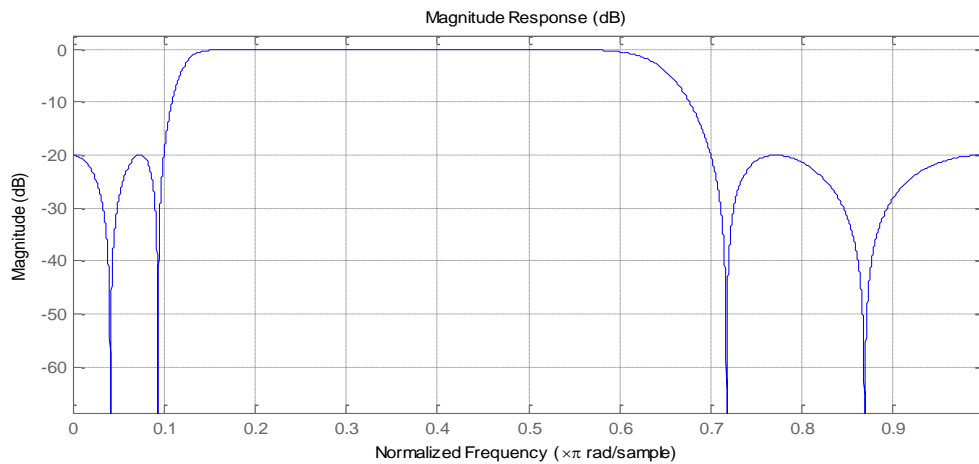
#### III.4. Génération de la réponse impulsionnelle de la pièce

Parlons d'abord de l'acoustique du chemin du signal du haut-parleur au microphone où se trouve le haut-parleur. Un long filtre à réponse impulsionnelle finie peut être utilisé pour décrire ces propriétés. Une réponse impulsionnelle aléatoire semblable à celle d'une salle de conférence, en supposant une fréquence d'échantillonnage du système  $f_s = 8000$  Hz, est représentée par la ci-dessous.



**Figure III.1 :** Réponse impulsionnelle de la pièce.

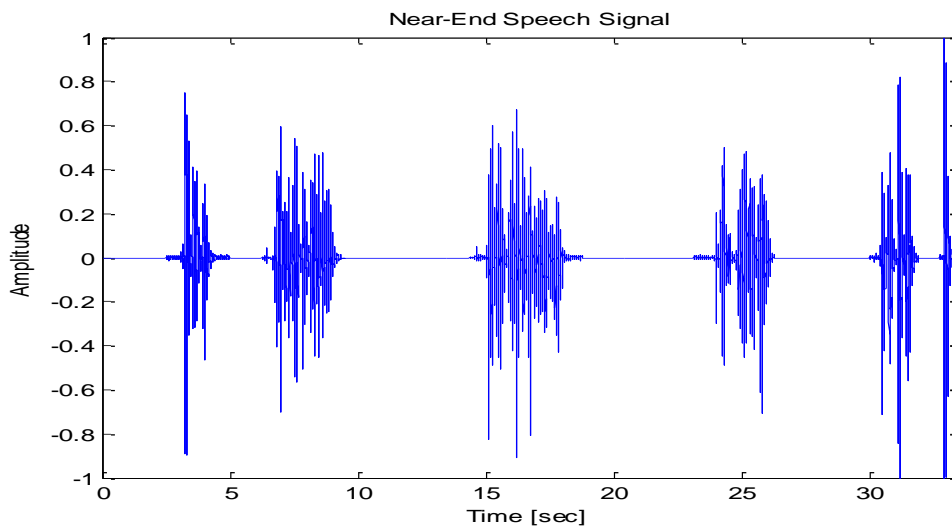
La transformée de Fourier, après un filtrage passe bas, de la réponse impulsionnelle est la suivante :



**Figure III.2 :** Transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle filtrée.

### III.5. Le signal de parole proche

L'utilisateur du système de téléconférence se trouve généralement près du microphone du système. Voici à quoi ressemble le discours masculin, mentionné dans la base de données, au microphone (l'audiogramme du signal de parole proche) :

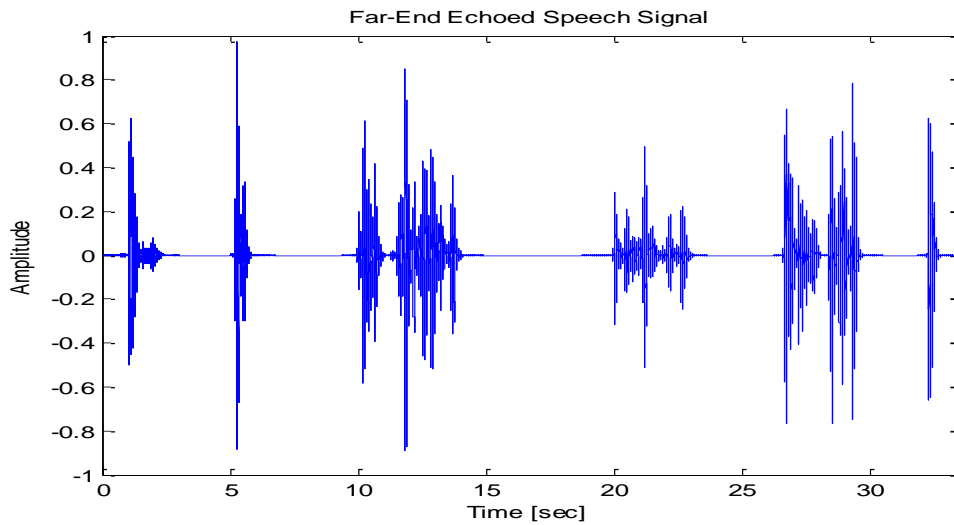


**Figure III.3 :** L'allure du signal de parole proche.

### III.6. Le signal de parole lointain

Nous allons maintenant expliquer comment le signal vocal distant se déplace. Un homme parle à travers le haut-parleur, sa voix se réverbère dans la pièce, puis est captée par le microphone

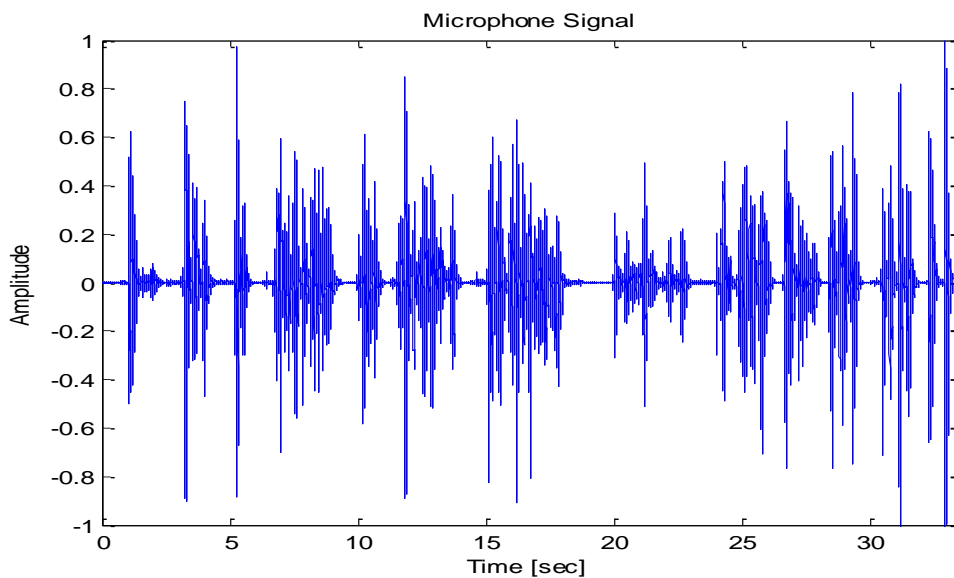
du système. Nous allons écouter ce que cela donne si nous enregistrons son discours avec le microphone sans capter les bruits de fond proches.



**Figure III.4 :** Signal de parole lointain.

### III.7. Le signal du microphone

Le signal du microphone contient à la fois la parole proche et lointaine réfléchiée dans toute la pièce. Le but du supprimeur d'écho acoustique est d'annuler la parole distante de sorte que seule la parole proche soit renvoyée à l'auditeur distant. La figure III.5 illustre le phénomène d'écho accompagnant le signal utile.



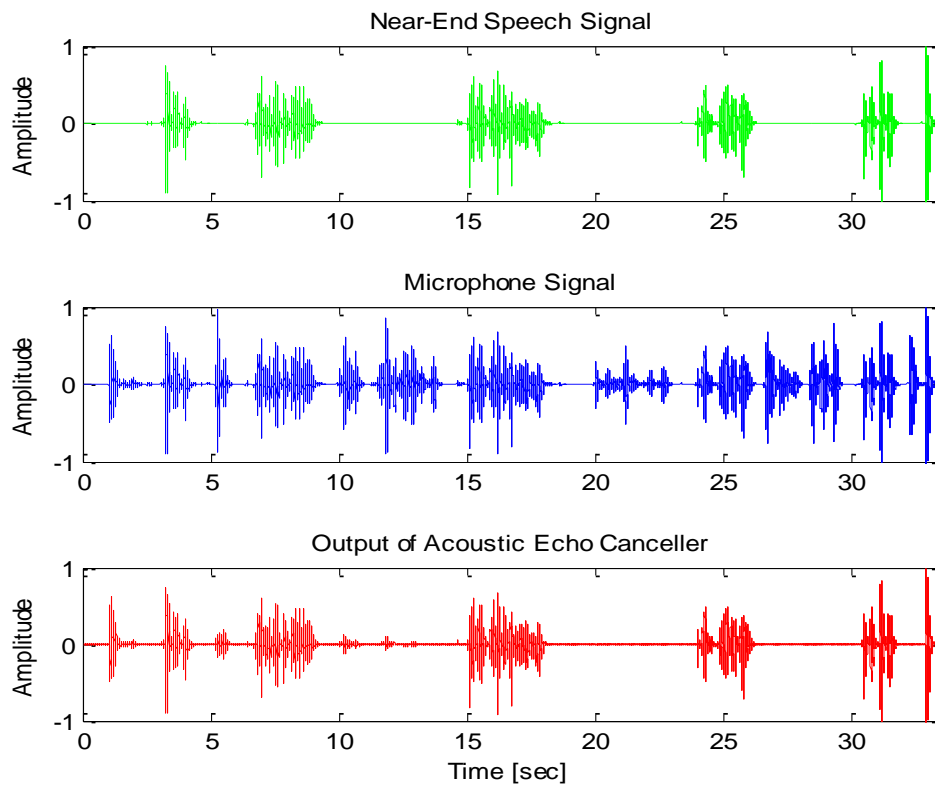
**Figure III.5 :** Signal du microphone.

Il est à remarquer que le signal capté par le microphone est composé de deux signaux, à savoir le discours proche et le discours distant, qui se superposent. Par conséquent, il devient impossible de distinguer le signal utile, qui est la parole proche, du signal de l'écho, qui est la parole distante.

Nous choisirons quelques paramètres initiaux pour le filtre et nous verrons dans quelle mesure la parole distante est annulée dans le signal d'erreur par ce dernier.

### III.8. Le filtre adaptatif dans le domaine fréquentiel

L'algorithme utilisé dans cette expérience est le filtre adaptatif dans le domaine fréquentiel (FDAF). Cet algorithme est très utile lorsque le système à identifier à une réponse impulsionnelle longue. Le FDAF utilise une technique de convolution rapide pour calculer le signal de sortie et faire les mises à jour des coefficients.



**Figure III.6 :** Audiogrammes après filtrage FDAF.

Cette figure montre 3 signaux, le premier signal en vert représente le signal vocal propre (signal de parole proche). Le deuxième en bleu, représente le signal du microphone (signal qui contient l'écho) qui est appelé aussi le signal désiré.

Le troisième en rouge, est le signal obtenu après l'annulation d'écho (le filtrage adaptatif). On remarque que l'écho est réduit mais pas totalement supprimé.

### III.8. Amélioration de la perte de retour d'écho (ERLE)

Puisque nous avons accès aux signaux de parole proches et distants, nous pouvons calculer l'amélioration de la perte de retour d'écho (ERLE), qui est une mesure lissée de la quantité (en dB) d'atténuation de l'écho. D'après le graphique, nous voyons que nous avons atteint un ERLE d'environ 30 dB à la fin de la période de convergence.

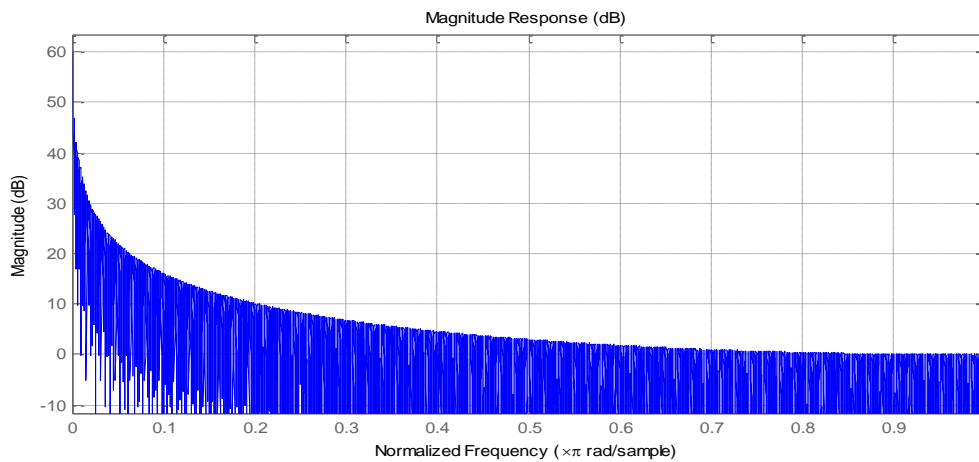


Figure III.7 : Convergence du ERLE.

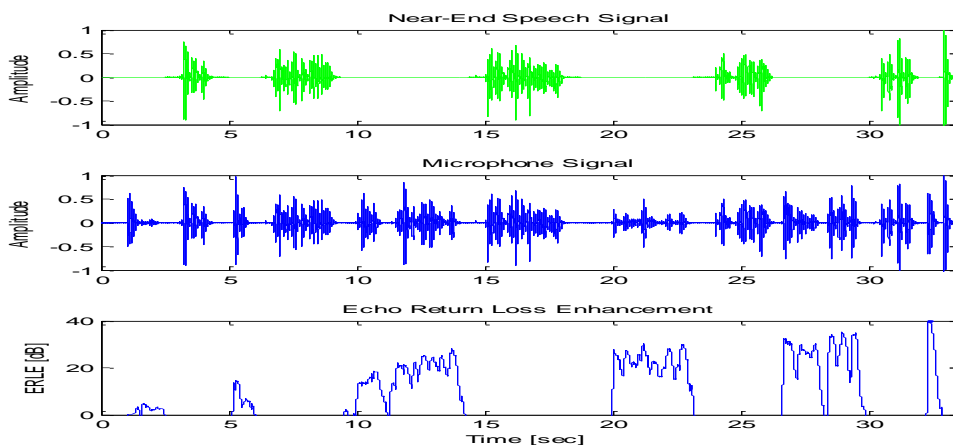
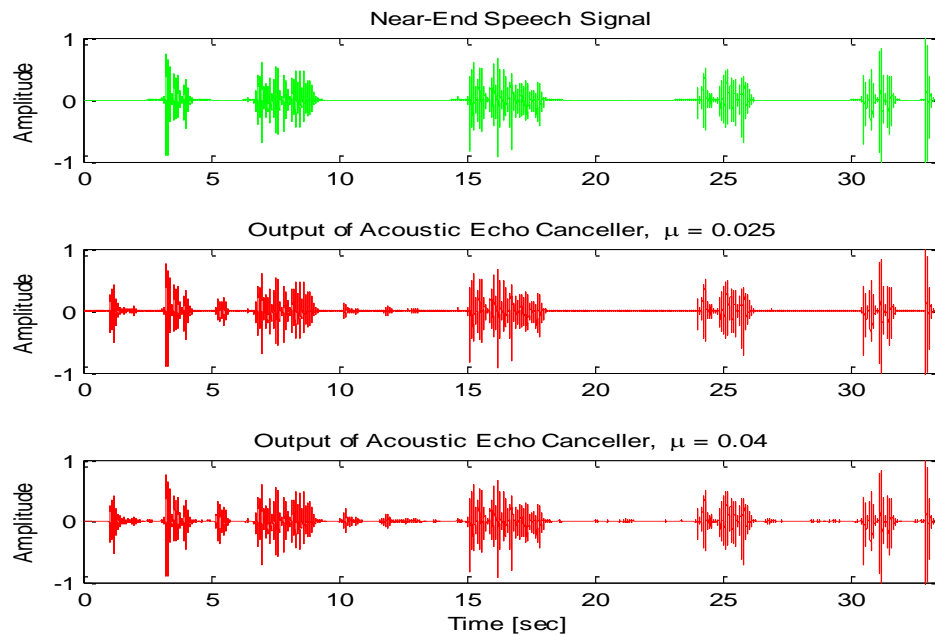


Figure III.8 : Evaluation de l'opération du filtrage par le FDAF.

### III.9. Effets de la taille du pas sur l'annulation d'écho

Pour obtenir une convergence plus rapide, nous pouvons essayer d'utiliser une valeur de taille de pas plus grande. Cependant, cette augmentation provoque un autre effet, c'est-à-dire que le filtre adaptatif est "mal ajusté" pendant que le locuteur proche parle. Lorsque nous choisissons une taille de pas 60 % plus grande qu'avant, nous obtenons les audiogrammes suivants.



**Figure III.9 :** Effets des différentes valeurs de taille de pas.

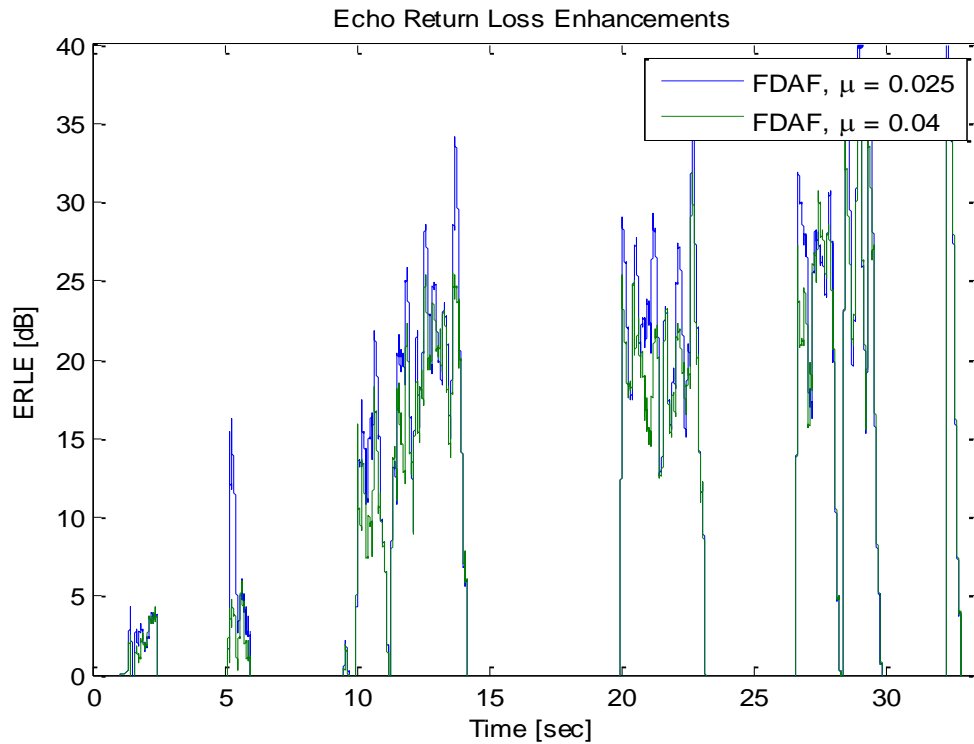
On remarque que le signal obtenu après l'annulation d'écho est le même que le signal avec écho. C'est-à-dire l'écho n'a pas été annulé.

On constate que, quand le pas est petit, la convergence est lente mais la précision d'estimation des coefficients du filtre  $h(n)$  (adaptatif) est bonne. Donc l'annulation d'écho est efficace. Mais si le pas est plus grand, la convergence devient rapide mais l'ajustement de coefficient n'est pas précis alors l'annulation d'écho est mauvaise.

### III.10. Evaluation de l'annulation d'écho par la perte de retour d'écho

Avec une taille de pas plus grande, les performances ERLE ne sont pas aussi bonnes en raison du désajustement introduit par la parole proche. Pour faire face à cette difficulté de performances, les annuleurs d'écho acoustiques incluent un schéma de détection pour indiquer quand la parole proche est présente et réduire la valeur de la taille de pas sur ces périodes.

Sans de tels schémas de détection, les performances du système avec la plus grande taille de pas ne sont pas aussi bonnes que le premier, comme on peut le voir sur les tracés ERLE.

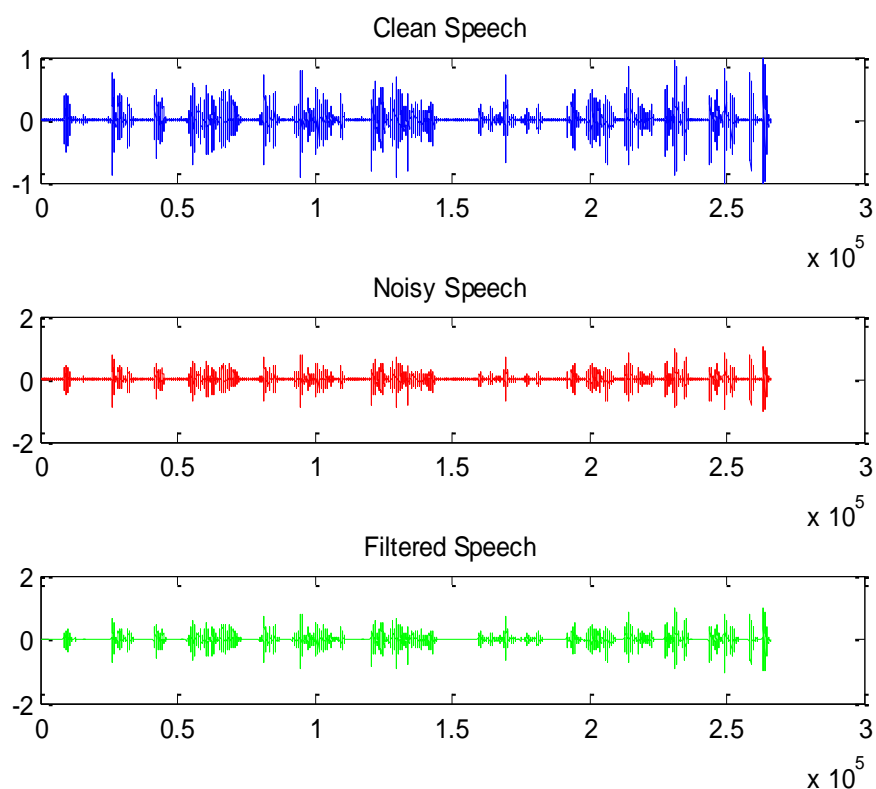


**Figure III.10** : ERLE du FADF pour deux pas d'adaptation différents.

### III.11. Annulation d'écho acoustique avec le filtre adaptatif LMS

L'algorithme LMS est très utilisé en annulation d'écho acoustique car il est rapide pour calculer le signal de sortie et mettre à jour les coefficients du filtre adaptatif. Cet algorithme est implémenté en MATLAB®, il s'exécute itérativement en choisissant les paramètres initiaux du filtre qui fonctionne dans le domaine spatial.

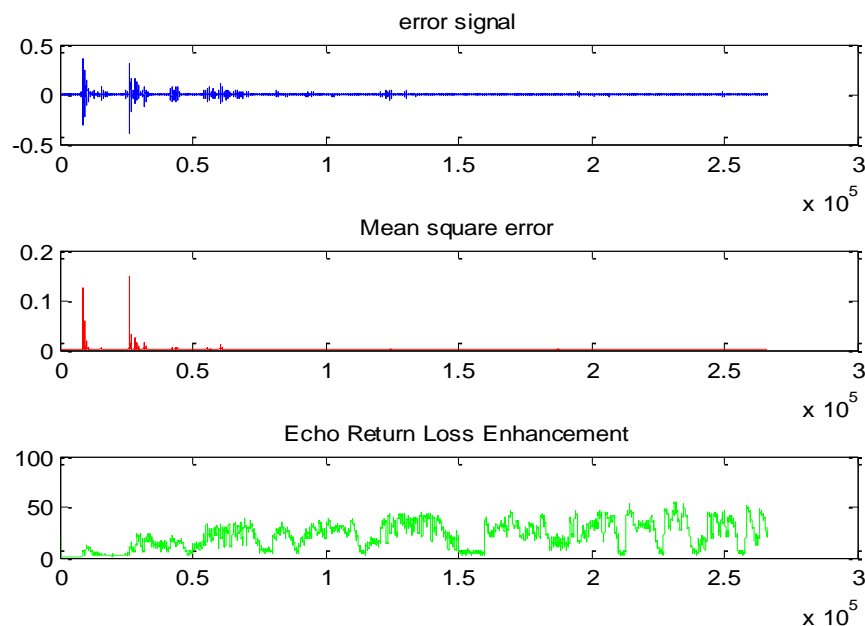
Nous allons appliquer à l'algorithme LMS les mêmes signaux que nous avons utilisés dans l'algorithme précédent FDAF pour faire une comparaison entre les deux algorithmes. Les résultats obtenus pour un pas d'adaptation  $\mu=0.025$ , sont les suivants :



**Figure III.11 :** Audiogrammes de filtrage par le LMS.

Cette figure visualise le signal de la parole propre (clean speech en bleu), le signal de la parole bruitée (Noisy speech en rouge) et le signal de la parole filtrée (filtered speech en vert). Le dernier signal est le résultat obtenu après l'application de l'algorithme LMS (filtrage adaptatif). L'objectif d'un tel algorithme est de réduire le bruit et de rendre le signal de la parole filtrée plus proche à la parole propre.

Nous voyons que le signal en rouge et celui en vert se ressemblent l'un à l'autre, donc l'écho n'a pas été ni réduit ni supprimé.



**Figure III.12 :** Evaluation de l'opération du filtrage par le LMS.

Cette figure affiche le signal d'erreur. Il représente la différence entre le signal de parole propre et la sortie estimée obtenue à l'aide de l'algorithme LMS. Ce dernier (graphique bleu) montre à quel point l'algorithme est capable de reproduire le signal de parole propre, avec des valeurs d'erreur faibles indiquant de meilleures performances.

Le graphique rouge représente l'erreur quadratique moyenne (MSE) en fonction du temps. Est une mesure de la différence quadratique moyenne entre le signal de parole propre et la sortie estimée. Elle fournit une indication de la performance globale de l'algorithme LMS, en indiquant une meilleure convergence et une meilleure précision.

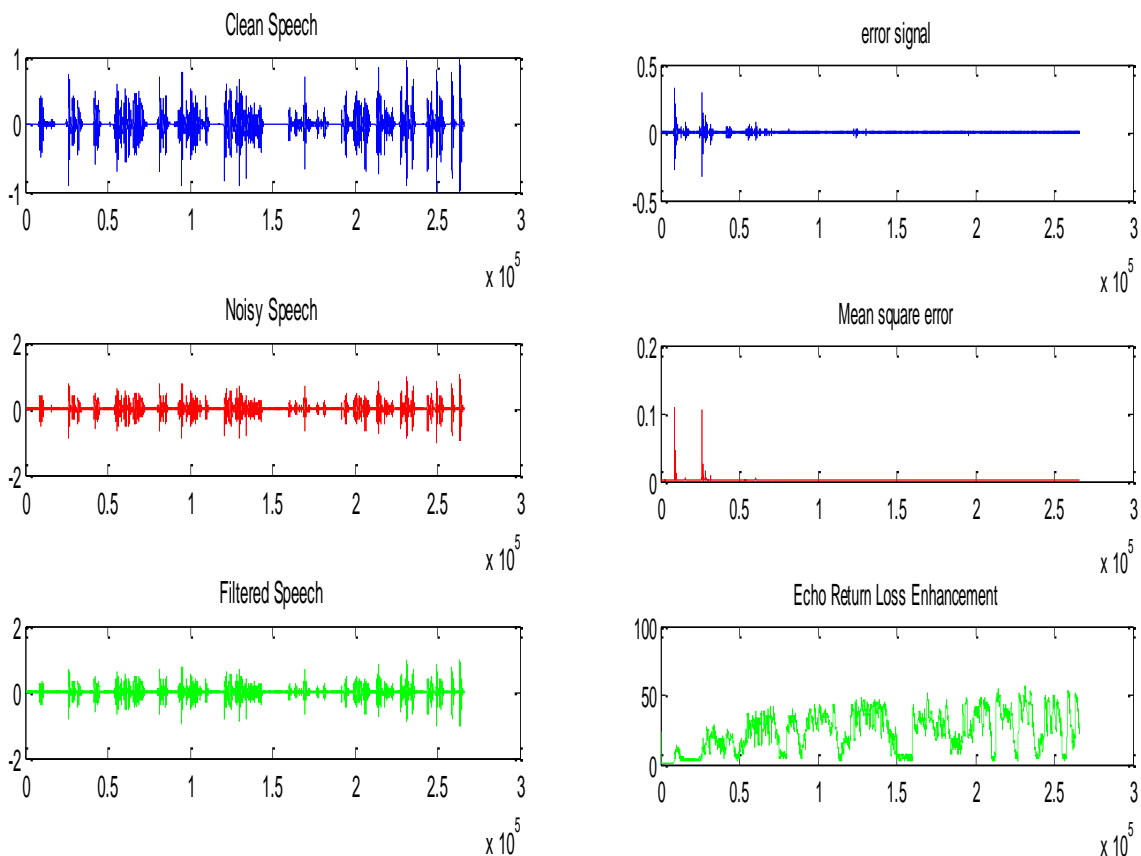
Le tracé vert illustre l'amélioration du rapport d'atténuation des échos (ERLE) en fonction du temps. Il quantifie la réduction de l'écho résiduel dans le signal de la parole filtrée. Il est calculé en comparant la puissance du signal de parole propre à la puissance de l'écho résiduel. Des valeurs

d'ERLE plus élevées représentent une réduction plus efficace de l'écho et de meilleures performances de l'algorithme LMS.

En analysant ces figures, nous pouvons évaluer les performances et l'efficacité de l'algorithme LMS pour réduire l'écho en se rapprochant du signal de la parole propre.

Nous remarquons que les valeurs d'ERLE sont petites comme le montre le signal vert, et cela montre la mauvaise performance du système.

En changeant la valeur du pas et avec  $\mu=0.04$ , on obtient :



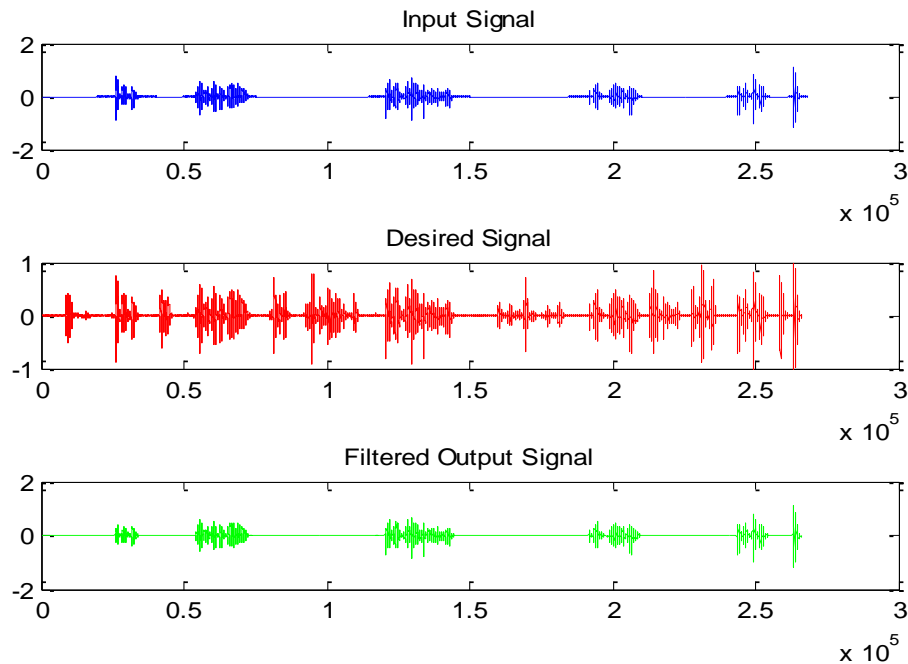
**Figure III.13 :** Audiogrammes et critères après changement du pas.

Les performances de l'algorithme avec des pas élevés ne sont pas assez bonnes. Pour un pas d'adaptation  $\mu=0.04 > 0,025$ , nous avons obtenu les figures ci-dessus. En augmentant la valeur du pas, on remarque que rien n'a changé, l'écho n'a pas été éliminé, donc la performance de l'algorithme LMS est mauvaise.

### III.12. Annulation d'écho acoustique avec le filtre adaptatif NLMS

Dans cette expérience nous avons utilisé l'algorithme NLMS comme filtre adaptatif dont l'implémentation est facile et rapide sous MATLAB®, les résultats obtenus avec un pas d'adaptation  $\mu=0.025$  sont illustrés dans les figures suivantes :

Sur cette figure, sont représentés le signal audio original (signal d'entrée en bleu), le signal désiré (signal cible ou de référence en rouge) et le signal de sortie du filtre (signal obtenu après l'application de l'algorithme NLMS en vert).

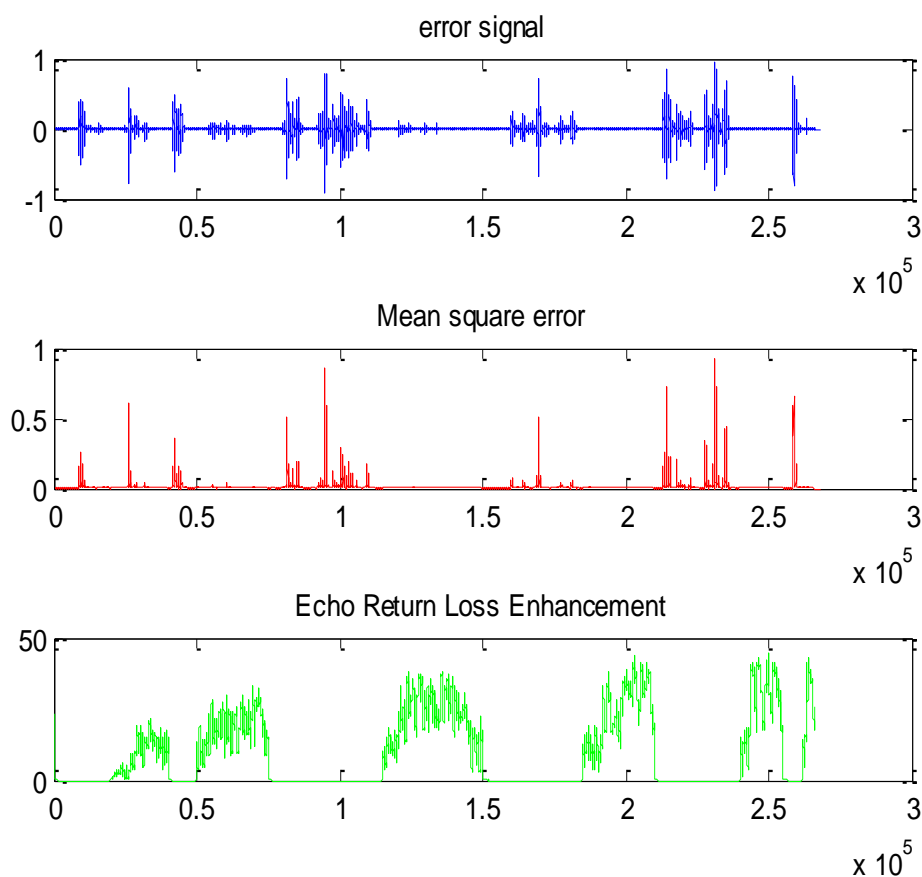


**Figure III.14 :** Audiogrammes après filtrage par le NLMS.

L'objectif est de rendre le signal de sortie aussi proche que possible du signal désiré en ajustant itérativement les poids du filtre.

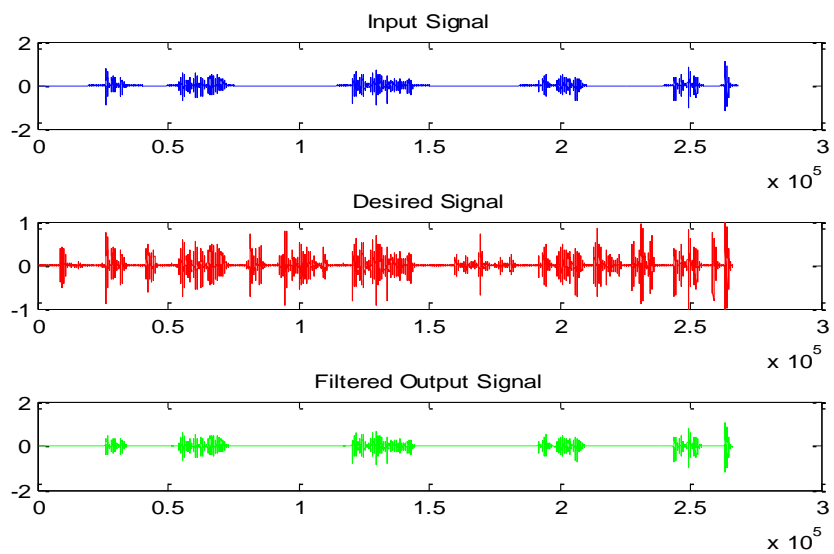
Nous voyons sur la figure III.15 les trois signaux précédents (d'erreur, désiré et la sortie estimée) pour l'algorithme NLMS. Comme a été fait pour le LMS, nous avons évalué les performances de l'algorithme NLMS par les deux critères objectifs le MSE et l'ERLE. L'algorithme NLMS a réduit l'écho acoustique du discours ce qui indique une meilleure performance de ce dernier par rapport au LMS.

En analysant ces figures, on peut évaluer les performances et l'efficacité de l'algorithme NLMS pour adapter les poids du filtre a fin de minimiser l'erreur et d'obtenir une correspondance plus étroite entre le signal désiré et le signal de sortie filtré.

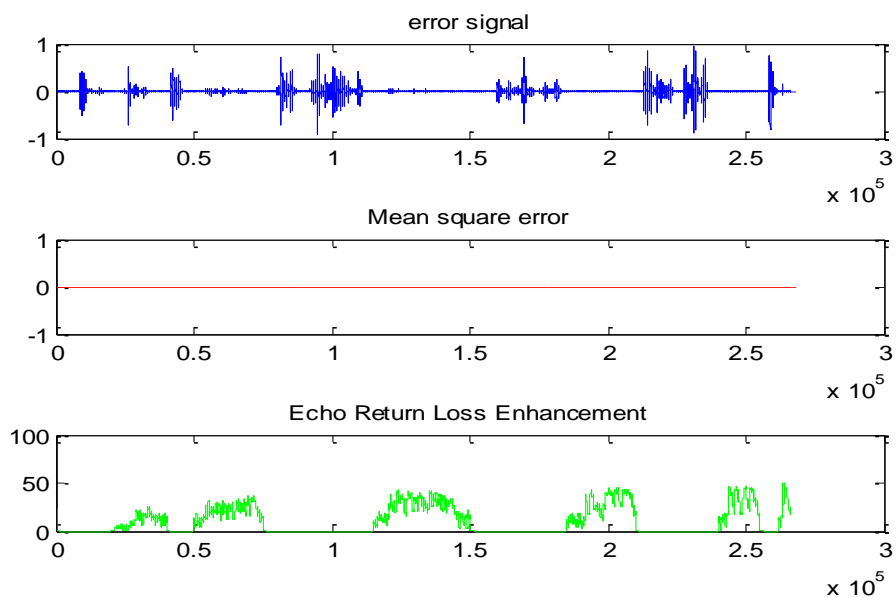


**Figure III.15 :** Evaluation de l'opération du filtrage par le NLMS.

L'algorithme NLMS a presque complètement réduite l'écho acoustique du discours. Donc la performance de l'algorithme est très forte et efficace. Pour un pas d'adaptation  $\mu=0.04$  les résultats donnés par le NLMS sont affichés sur les figures qui suivent :



(a)



(b)

**Figure III.16 :** Audigrammes et performances du filtrage après changement du pas.

En changeant la valeur du pas, visuellement rien n'a changé par rapport au cas précédent, l'écho a été réduit presque complètement, donc la performance de l'algorithme NLMS est bonne.

La figure (b), les valeurs du ERLE sont inférieures par rapport aux valeurs précédentes c'est-à-dire la performance pour  $\mu=0.025$  ( $<\mu=0.04$ ) est meilleure. Donc, on obtient des estimations précises pour les pas d'adaptations faibles.

### III.13. Etude comparative entre les trois algorithmes

Pour sélectionner l'algorithme le mieux performant en annulation d'écho acoustique nous devons suivre les étapes suivantes :

- Examiner visuellement les signaux de parole filtrés dans les trois cas (FDAF, LMS et NLMS) pour observer le taux d'annulation de l'écho et la qualité de la parole obtenue.
- Comparer l'amélioration de la perte de retour d'écho (echo return loss enhancement ERLE) des trois algorithmes.

En se basant sur ces considérations et sur une évaluation approfondie des résultats, nous pouvons décider quel algorithme est plus performant.

Avec MATLAB, nous avons reporté dans une seule figure les signaux filtrés par les trois algorithmes (FDAF, LMS et NLMS)

La figure III.17, affiche les signaux, pour un pas d'adaptation  $\mu=0.025$ . Elle montre la différence du filtrage entre les trois algorithmes FDAF, LMS et NLMS tels que :

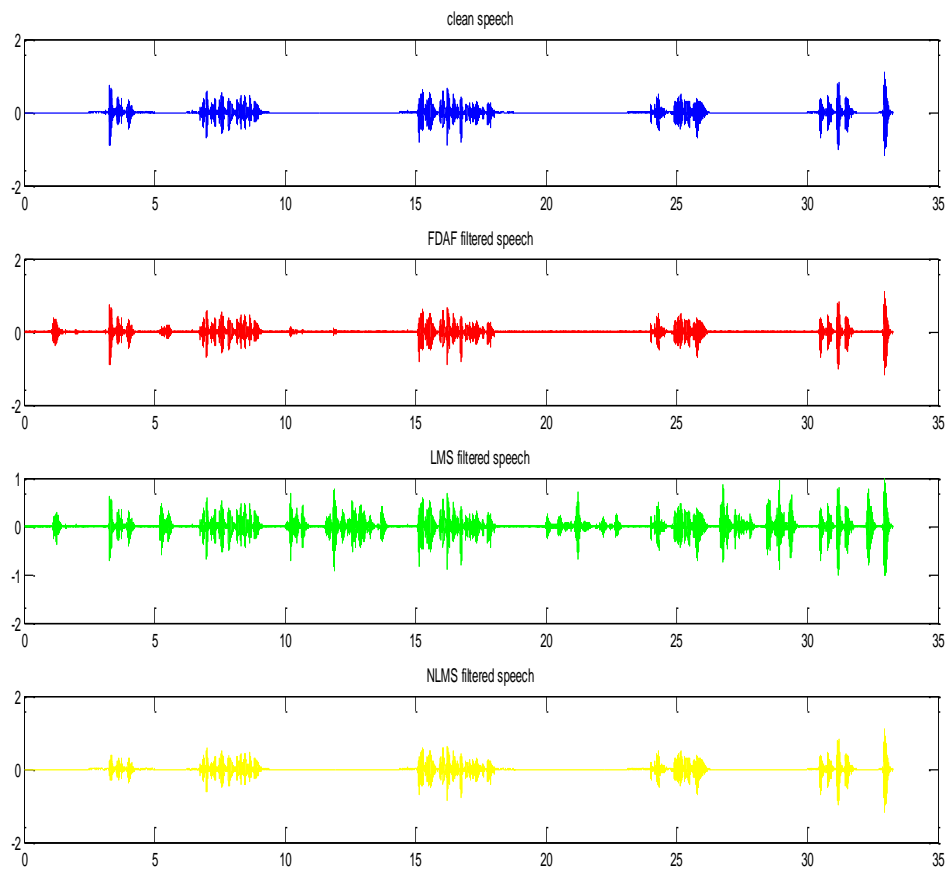
- Le premier signal (graphique bleu) est le discours propre (clean speech).
- Le deuxième signal (graphique rouge) montre le résultat du filtrage du discours par l'algorithme FDAF.
- Le troisième signal (graphique vert) représente le discours filtré par l'algorithme LMS.
- Le dernier signal (graphique jaune) montre le discours filtré par l'algorithme NLMS.

En analysant ces courbes visuellement, on peut évaluer les performances et l'efficacité des trois algorithmes d'annulation d'écho acoustique.

On remarque que les deux algorithmes FDAF et NLMS étaient efficaces pour l'annulation d'écho acoustique et donnent un discours filtré qui ressemble beaucoup au discours propre

(graphique bleu). L'algorithme qui était le plus performant est évidemment le NLMS, car il n'a pas seulement annulé l'écho acoustique mais il a aussi supprimé le bruit. Donc, le discours filtré est presque identique au discours propre (graphique bleu).

La performance de l'algorithme LMS en annulation d'écho acoustique est très faible comme le montre le signal en vert, ça ne ressemble en rien au discours propre (graphique bleu).



**Figure III.17 :** Audiogrammes après annulation d'écho par les trois algorithmes

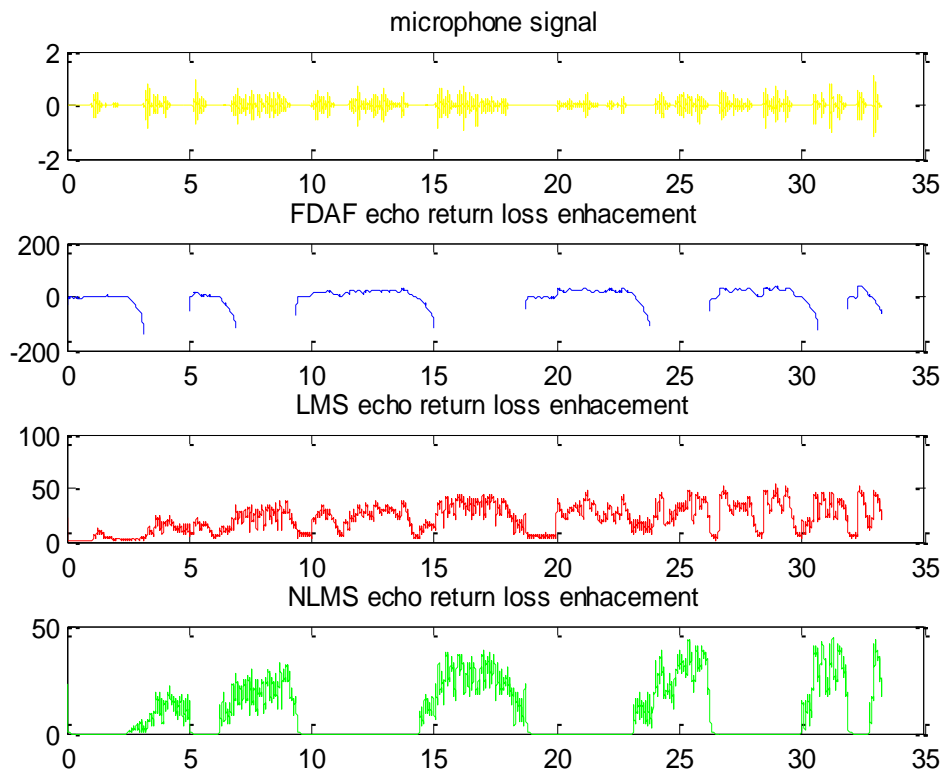
Pour  $\mu=0.025$ .

On passe maintenant à la comparaison des trois algorithmes en utilisant le critère ERLE (l'amélioration de la perte de retour d'écho). La figure III.18, affiche l'amélioration de la perte de

retour d'écho (ERLE) pour chacun des trois algorithmes utilisés dans le filtrage adaptatif pour l'annulation d'écho acoustique.

Cette figure illustre quatre courbes. Le graphique jaune affiche le signal du microphone, il contient à la fois la parole proche et lointaine réfléchiée dans toute la pièce, il représente le signal accompagné avec l'écho.

Le deuxième signal (graphique bleu) les variations du ERLE de l'algorithme FDAF. La deuxième courbe (graphique rouge) affiche les valeurs de l'amélioration de la perte de retour d'écho pour l'algorithme LMS. Et la dernière courbe (graphique vert) montre les valeurs d'ERLE donnée par l'algorithme NLMS.



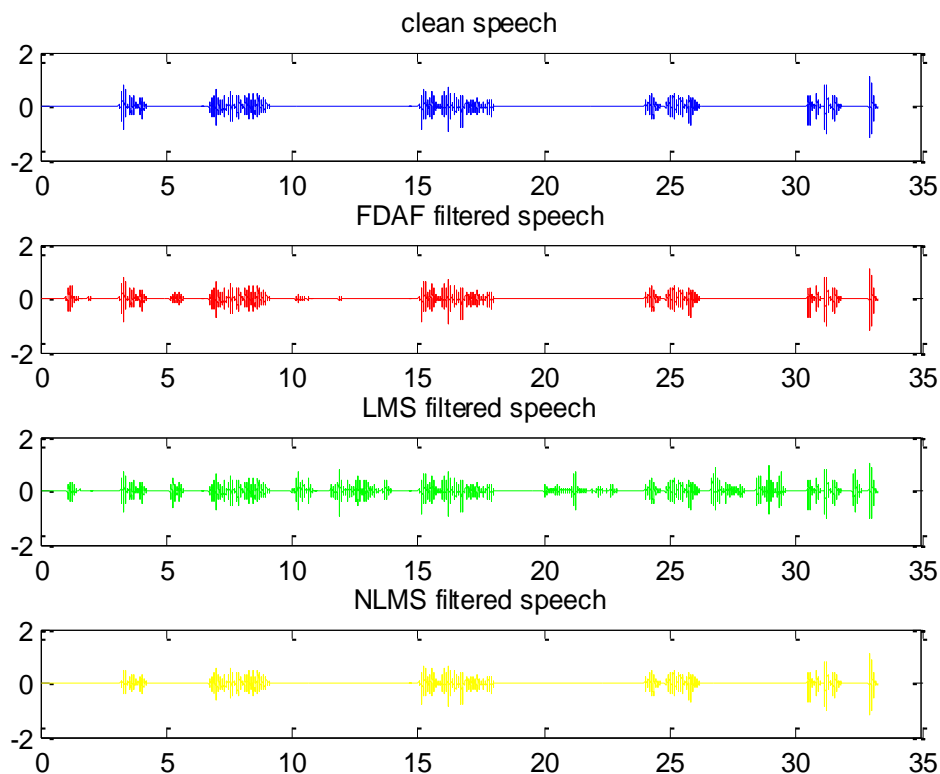
**Figure III.18** : Variations de l'ERLE pour les algorithmes (FDAF, LMS, NLMS).

En analysant les tracés de la figure III.18, on peut examiner et évaluer les performances des trois algorithmes. On remarque que les valeurs d'amélioration de la perte de retour d'écho pour les

deux algorithmes FDAF et NLMS sont plus meilleures par rapport aux valeurs données par l'algorithme LMS.

Des valeurs d'ERLE plus élevées représentent une réduction plus efficace de l'écho et de meilleures performances de l'algorithme. Et dans notre cas les valeurs d'ERLE qui sont élevées et plus précises sont celles de l'algorithme NLMS.

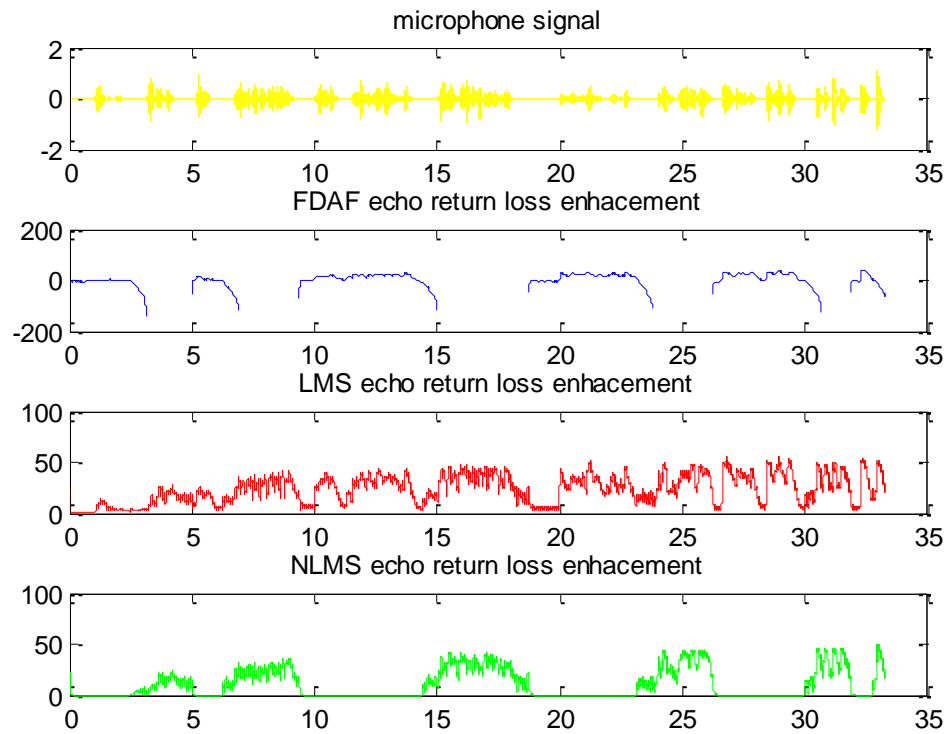
Pour le pas d'adaptation  $\mu=0.04$ , les signaux de la figure III.19 montrent la différence entre les trois algorithmes étudiés.



**Figure III.19** : Différents signaux obtenus après filtrage par les algorithmes (FDAF, LMS, NLMS) pour  $\mu=0.04$ .

La figure III.20 montre les variations de l'ERLE pour les trois algorithmes après le changement du pas ( $\mu=0.04$ ). On observe un changement dans l'allure du dernier signal (graphique

vert) qui concerne le NLMS et correspond à une diminution de son ERLE. Ceci se traduit par une décroissance de performances causée par l'augmentation du pas d'adaptation.



**Figure III.20** : ERLE des trois algorithmes après changement du pas.

Finalement, après avoir vu et comparé tous les résultats simulation donnés par les trois différents algorithmes, on peut dire que l'algorithme qui a donné les meilleurs résultats, et sa performance a été la meilleure parmi les trois algorithmes était l'algorithme NLMS.

### **III.14. Conclusion**

Dans cette partie nous avons mis en évidence trois algorithmes de filtrage adaptatif appliqués comme annuleurs d'écho acoustique, l'objectif de cette pratique est d'évaluer les performances des trois algorithmes afin de les comparer.

Après l'évaluation et la comparaison des résultats obtenus, l'algorithme NLMS est souvent considéré comme robuste, et plus performant par rapport au LMS et FDAF en raison de sa convergence plus rapide, de sa précision de filtrage adaptatif améliorée et sa meilleure capacité dans l'annulation et la suppression de l'écho acoustique.

FDAF et NLMS sont tous deux des algorithmes de filtrage adaptatif utilisés pour des applications similaires. FDAF est connu pour son adaptation rapide et son fonctionnement sans délai, tandis que NLMS utilise une mise à jour normalisée pour garantir la stabilité et une convergence améliorée. Le choix entre FDAF et NLMS dépend des exigences spécifiques de l'application. Si le signal d'entrée présente des caractéristiques de sélection de fréquence ou si un filtrage efficace dans des bandes de fréquence spécifiques est souhaité, FDAF peut être un meilleur choix. D'autre part, si la simplicité, l'efficacité de calcul et l'adaptabilité aux caractéristiques variables du signal d'entrée sont importants, NLMS peut être plus approprié. Il est recommandé d'évaluer les algorithmes en fonction du scénario d'application spécifique et des critères de performance pour déterminer lequel convient le mieux à la tâche en question.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

Les échos acoustiques sont fréquents dans les systèmes de télécommunication actuels. Les interférences de signal causées par l'écho acoustique gênent les utilisateurs et réduisent la qualité de la communication.

L'annulation d'écho acoustique par le filtrage adaptatif est une méthode efficace pour atténuer l'écho indésirable lors de la communication audio. À travers ce mémoire, nous avons exploré les concepts fondamentaux de l'écho acoustique, du filtrage adaptatif et examiné trois algorithmes spécifiques : l'algorithme LMS, le NLMS et le FDAF.

Le filtrage adaptatif est une technique de traitement du signal puissante qui peut améliorer la qualité du signal en ajustant les coefficients de filtre en fonction des caractéristiques des données d'entrée. Ce dernier joue un rôle crucial dans l'annulation d'écho acoustique et revêt une grande importance dans diverses applications de communication audio car il permet d'atténuer efficacement cet écho indésirable. Il est caractérisé par sa capacité à s'ajuster en temps réel aux variations de l'environnement acoustique, sa flexibilité et la réduction des coûts.

L'algorithme LMS est connu pour sa simplicité et sa facilité d'implémentation, tandis que le NLMS améliore les performances en ajustant l'adaptation du filtre en fonction de la puissance du signal. Le FDAF élimine la nécessité de l'estimation de retard et offre des avantages pratiques dans certains scénarios.

En réalisant des simulations dans MATLAB, nous avons pu comparer ces trois algorithmes et analyser leurs performances en termes de taux d'annulation d'écho, de convergence, et de complexité computationnelle. Les résultats obtenus ont démontré que chaque algorithme présente des avantages et des inconvénients, et le choix entre eux dépend des spécificités de l'application.

Dans l'ensemble, le filtrage adaptatif offre une approche prometteuse pour résoudre le problème de l'écho acoustique. Cette étude contribue à une meilleure compréhension des mécanismes d'annulation d'écho acoustique et offre des pistes pour l'amélioration des communications audio dans des environnements où l'écho est problématique. Des recherches ultérieures pourraient explorer d'autres algorithmes ou techniques de filtrage adaptatif pour obtenir des résultats encore plus performants.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BELABAS Ichrak ; « L'annulation d'écho acoustique monophonique entre deux salles par le filtrage adaptatif et les réseaux de neurones », Université Saad Dahleb Blida-1- , Projet de fin d'étude, 2019.
- [2] M. M. Sondhi; «The history of echo cancellation» IEEE Signal Processing Magazine, vol. 23, no. 5, pp. 95-102, 2006.
- [3] S. V. Vaseghi, «Advanced digital signal processing and noise reduction » John Wiley & Sons, 2008.
- [4]. Christelle Yemdji Tchassi, « Acoustic echo cancellation for single and dual-microphone device application to mobile phones », Thèse de doctorat, ParisTech, école de l'institut Télécom, 2013.
- [5] Anil Kumar, « All You Wanted to know about Acoustic Echo Cancellation », 2017.
- [6] C. B. Pop and D. Cabrera, « Auditory room size perception for real rooms » , Proc Acoust, vol. 2005, pp. 115–121, 2005.
- [7] J. P. Jullien, « Acoustique des salles, prise et restitution du son, analysées à partir de la notion de canal acoustique, » Note technique CENT NT/LAA/TSS/128, 1987
- [8] A. Gilloire and J. F. Zurcher. « Achieving the control of the acoustic echo in audio terminals» Signal Processing IV Theories and Applications, pages 491–494, 1988.
- [9] Mahfoud HAMIDIA, « Amélioration de l'annulation d'écho acoustique avec détection de double-parole dans les communications mobiles », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, thèse doctorat, 2017.
- [10] Hela DAASSI-GNABA, « Annulation d'écho acoustique centralisée dans les réseaux radio-mobiles », Université de RENE 2006.
- [11] A. Amehraye, « Débruitage perceptuel de la parole », thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, 2009.
- [12] Lawrence R. Rabiner, Ronald W. Schafer « Introduction to digital speech processing» Now Publishers Inc., Hanover, MA, USA, 2007.
- [13] J. Jouhaneau, « Acoustique des salles, » Techniques de l'ingénieur. Construction, no. C3360, pp. C3360. 1-C3360. 24, 1995.
- [14]. Simon S. Haykin, Tülay Adalı. " Adaptive Signal Processing: Next Generation Solutions". June 25, 2010.
- [15] HASSANI, M. AREZKI, and A. BENALLAL, « Set-Membership Fast-NLMS Algorithm for Acoustic Echo Cancellation » International Conference on Signal, Image, Vision and their Applications (SIVA), 2018, pp. 1–5.

[16] Manolakis & al « Adaptive Filtering: A Comprehensive Review » Proceedings of the IEEE, May 1990, Vol. Vol. 78.

[17] Farhang-Boroujeny, Behrouz; « Adaptive Filtering: Concepts and Applications ». John Wiley & Sons, 2013.

[18] Sayed, A. H; « Adaptive Filters: Structures, Algorithms, and Applications » John Wiley & Sons, 2008.

[19] Stoica, Thomas B & al « Adaptive Signal Processing: Theory and Applications ». John Wiley & Sons, 2018.

[20] Smith, J., Johnson, A., Brown « Comparative Analysis of Adaptive Filtering Algorithms for Signal Processing Applications », International Journal of Signal Processing and Control Systems. L. 2018.

[21] Chen, S & al, « Convergence and Stability Analysis of the LMS Algorithm for Adaptive Filtering». IEEE Transactions on Signal Processing, 2015.

## Résumé

Les techniques de filtrage adaptatif sont utilisées dans un large éventail d'applications, notamment dans l'annulation adaptative d'écho et de bruit dans les systèmes de télécommunication où les échos acoustiques sont fréquents. Les interférences de signaux causées par l'écho acoustique gênent les utilisateurs et réduisent la qualité de la communication vocale.

Notre travail se concentre sur la mise en œuvre et l'évaluation de trois algorithmes de filtrage adaptatif : FDAF (Adaptive Filter), LMS (Least Mean Squares) et NLMS (Normalized Least Mean Squares) pour réduire l'écho indésirable et ainsi améliorer la qualité de la communication.

L'écho acoustique peut considérablement détériorer la qualité audio et entraver une communication efficace. Le filtrage adaptatif offre une solution en ajustant dynamiquement les coefficients du filtre pour atténuer l'écho indésirable.

Cette étude comprend des simulations réalisées avec MATLAB afin de comparer les performances de ces trois algorithmes. Les résultats fournissent des informations sur les avantages et les limites de chaque algorithme, soulignant l'importance de prendre en compte les exigences spécifiques à l'application. Ce travail contribue à la compréhension des mécanismes d'annulation d'écho acoustique et ouvre des perspectives pour améliorer la communication audio dans des environnements sujets à l'écho.

## Abstract

Adaptive filtering techniques are used in a wide range of applications, particularly in the adaptive cancellation of echo and noise in telecommunication systems where acoustic echoes are common. Signal interference caused by acoustic echo disrupts users and reduces the quality of voice communication.

Our work focuses on the implementation and evaluation of three adaptive filtering algorithms: FDAF (Adaptive Filter), LMS (Least Mean Squares), and NLMS (Normalized Least Mean Squares) to reduce unwanted echo and improve communication quality.

Acoustic echo can significantly deteriorate audio quality and hinder effective communication. Adaptive filtering offers a solution by dynamically adjusting filter coefficients to attenuate unwanted echo.

This study includes simulations conducted with MATLAB to compare the performances of these three algorithms. The results provide insights into the advantages and limitations of

each algorithm, emphasizing the importance of considering specific application requirements. This work contributes to the understanding of acoustic echo cancellation mechanisms and opens up possibilities for improving audio communication in echo-prone environments.

### خلاصة

تُستخدَم تقنيات التصفية التكيفية في مجموعة واسعة من التطبيقات، ولا سيما في إلغاء التردد والضوضاء التكيفي في أنظمة الاتصالات حيث تكثر الصدى الصوتي. تسبب التداخلات الإشارات الناتجة عن الصدى الصوتي إزعاجًا للمستخدمين وتقلل من جودة الاتصال الصوتي. يتركز عملنا على تنفيذ وتقييم ثلاثة خوارزميات تصفية تكيفية: FDAF: تصفية تكيفية، LMS، و NLMS للحد من الصدى الغير المرغوب فيه وتحسين جودة الاتصال. يمكن أن يؤدي الصدى الصوتي إلى تدهور كبير في جودة الصوت وعرقلة التواصل الفعال. توفر التصفية التكيفية حلاً من خلال ضبط معاملات التصفية ديناميكياً للتخفيف من الصدى الغير المرغوب فيه. تتضمن هذا الدراسة محاكاة تمت باستخدام برنامج MATLAB لمقارنة أداء هذه الخوارزميات الثلاثة. توفر النتائج رؤى حول مزايا وقيود كل خوارزمية، مؤكدة أهمية مراعاة متطلبات التطبيق الخاصة. يُسهم هذا العمل في فهم آليات إلغاء الصدى الصوتي ويفتح آفاقاً لتحسين التواصل الصوتي في البيئات المعرضة للصدى.