

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département : Aéronautique



## projet de fin d'études

**En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Aéronautique  
Option : Installation**

### *Thème*

Utilisation du filtrage adaptatif  
Pour  
L'élimination active du bruit sonore ANC

**Présenté par :**  
YAHA Meriem

**Encadré par :**  
Mr: BENOURED. A

Promotion 2007

اللّٰه

الرحيم

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة طريقة التحكم الفعال في التشويش الصوتي باستعمال الفلتر التآقلمية. التحكم الفعال في الضجيج أصبح واحدا من المتطلبات الناتجة عن التقدم التكنولوجي الذي أدى إلى ارتفاع مستوى الضجيج في المحيط أقلمي يسمح بمعالجة الذبذبات العشوائية بفضل قدرته على أقلمة خصائصه.

في هذه الدراسة قمنا باستعمال ألقورتمين للحساب الرقمي، و هما الأكثر استعمالا في هذا المجال، كما تطبقية باستعمال برنامج ماتلب و التي سمحت بإظهار فعالية كل منهما.

## Abstract

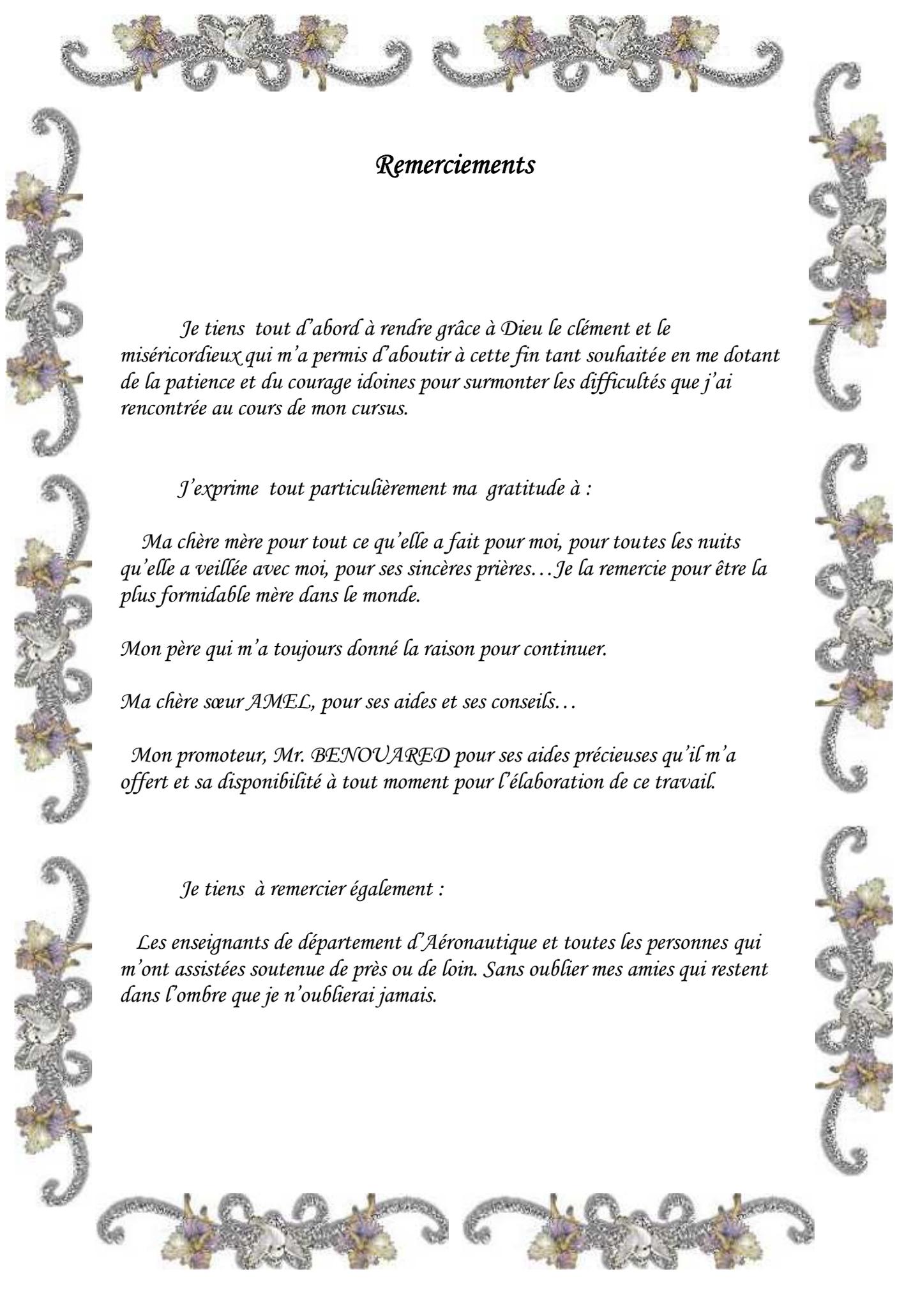
The objective of this work it is the study of the method of the active acoustic noise control ANC based on the adaptive filtering. The active noise control is one of requirements caused by the increase of the level of the noise in the environment due to the technological development and the machinisme, especially in the industrial domain and the domain of transportation. The adaptive filtering permits the random signal processing thanks to its capacity to adapt its parameters, and the ANC is one of the its principal applications.

In this study we present two algorithms of numeric calculation: the RLS algorithm and the LMS algorithm that are the most useful in this context. We present a simulation on the MATLAB that permits to show the efficiency of each of the two algorithms in the elimination of noise.

## Résumé

L'objectif de ce travail c'est l'étude de la méthode du contrôle actif du bruit acoustique ANC basée sur le filtrage adaptatif. Le contrôle actif du bruit est une des exigences causées par l'augmentation du niveau du bruit dans l'environnement dû au développement technologique et du machinisme, surtout dans le domaine industriel et le domaine du transport. Le filtrage adaptatif permet le traitement des signaux aléatoires grâce à sa capacité d'adapter ses paramètres, et l'ANC est une des ses principaux applications.

Dans cette étude, on a présenté deux algorithmes du calcul numérique : l'algorithme RLS et l'algorithme LMS qui sont les plus utilisables dans ce contexte. On a fait une simulation sur le logiciel MATLAB qui nous a permet de montrer l'efficacité de chacun des deux algorithmes dans l'élimination du bruit.



## Remerciements

*Je tiens tout d'abord à rendre grâce à Dieu le clément et le miséricordieux qui m'a permis d'aboutir à cette fin tant souhaitée en me dotant de la patience et du courage idoines pour surmonter les difficultés que j'ai rencontrée au cours de mon cursus.*

*J'exprime tout particulièrement ma gratitude à :*

*Ma chère mère pour tout ce qu'elle a fait pour moi, pour toutes les nuits qu'elle a veillée avec moi, pour ses sincères prières... Je la remercie pour être la plus formidable mère dans le monde.*

*Mon père qui m'a toujours donné la raison pour continuer.*

*Ma chère sœur AMEL, pour ses aides et ses conseils...*

*Mon promoteur, Mr. BENOUARFED pour ses aides précieuses qu'il m'a offert et sa disponibilité à tout moment pour l'élaboration de ce travail.*

*Je tiens à remercier également :*

*Les enseignants de département d'Aéronautique et toutes les personnes qui m'ont assistées soutenue de près ou de loin. Sans oublier mes amies qui restent dans l'ombre que je n'oublierai jamais.*

## Sommaire

<b>Résumé</b> .....	1
<b>Introduction générale</b> .....	2

### **Chapitre 01 : Le contrôle actif du bruit**

1-1- Introduction.....	3
1-2- Le signal acoustique.....	3
1-3- Le Concept Général de Contrôle du Bruit Acoustique.....	8
1-4- Comparaison entre le contrôle passif et le contrôle actif du bruit.....	8
1-5- Le principe d'un système de contrôle actif .....	10
1-6- Le Développement des Techniques Actives pour le Contrôle du Bruit Acoustique.....	11
1-7- Propriétés d'un système ANC.....	13
1-8- Le bruit large-bande et le bruit bande étroite (broadband et narrowband).....	13
1-9 - Les méthodes utilisées pour le contrôle actif .....	13
1-10- Le Système ANC de Multi-Canal.....	18
1-11- Applications du système de contrôle actif du bruit ANC.....	19
1-12- L'écho acoustique.....	27
1-13- Conclusion.....	28

### **Chapitre 02 : identification des modèles**

3-1- Introduction.....	29
3-2- Définition.....	29
3-3- types de modèles pour l'identification.....	29
3-4- Procédure de l'identification paramétrique.....	31
3-5- Estimation off-line et estimation on-line.....	32
3-6- Algorithmes pour l'identification paramétrique.....	33
3-7- Modèles stochastiques pour l'estimation paramétrique.....	33

3-8- Conclusion.....	35
----------------------	----

### **Chapitre 03 : Le filtrage numérique et le filtrage adaptatif**

4-1- Introduction.....	36
4-2- Le filtrage numérique.....	36
4-3- Le filtrage adaptatif.....	39
4-4- Principaux algorithmes d'adaptation : algorithme RLS et algorithme LMS.....	43
4-5- Conclusion.....	52

### **chapitre 04 : Simulation et interprétation**

4-1-Introduction .....	53
4-2- Résultats de simulation.....	54
4-2-1- Utilisation d'un signal d'entrée sinusoïdal.....	54
4-2-2- utilisation d'un signal du son à l'entrée.....	67
4-3- Conclusion.....	77

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>79</b>
---------------------------------	-----------

<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>80</b>
---	-----------



# *Dédicace*

*A la plus merveilleuse mère dans le monde, ma mère.*

*A mon cher père.*

*A mes sœurs Amel, Aziza, Fatma, Hadda, et à mon frère Abdelmadjid.*

*A mon promoteur Mr. Benouared.*

*A tout mes amies et mes collègues.*

*A la mémoire de notre collègue Boussebouaa Mohamed, j'espère que son  
âme repose en paix dans le paradis*

*A tout qui m'aiment et qui j'aime*

*MERIEM*

# Liste des abréviations

<b>Symbole</b>	<b>Abréviation</b>
ANC	Active Noise Control (le contrôle actif du bruit).
DSP	Digital Signal Processing (traitement numérique du signal).
RLS	Recursive Least Square (les moindres carrés récursifs).
LMS	Least Mean Square (les moindres carrés moyens).
NLMS	Normalised LMS (LMS normalisé).
SNR	Signal Noise Ratio (rapport signal/bruit).
MIMO	Multi Input- Multi Output (multiple entrée, multiple sortie)

## Liste des figures

Figure 1.1 : onde acoustique complexe d'un mot parlé.....	3
Figure 1.2 : Schéma d'une onde de pression (son).....	4
Figure 1.3 : Schéma représentant l'interférence de deux ondes de mêmes fréquence et amplitude.....	6
Figure 1.4 : Schéma représentant l'interférence destructive de deux ondes de mêmes fréquence et amplitude.....	6
Figure 1.5 : densité de puissance et fonction de corrélation d'un bruit blanc.....	7
Figure 1.6 : un diagramme bloc d'un système du contrôle .....	10
Figure 1.7 : le concept physique du contrôle actif du bruit.....	11
figure 1.8 : Schéma des signaux traités dans un contrôle de type feedforward.....	14
Figure 1.9 : Un canal du système ANC feedforward broadband dans un conduit.....	15
Figure 1.10 : Un canal du système ANC feedforward narrowband dans un conduit.....	16
Figure 1.11: Schéma des signaux traités dans un contrôle de type feedback .....	17
Figure 1.12 : Système ANC Feedback.....	18
Figure 1.13 : System ANC Multi-Canal pour 3-D 30.....	18
Figure 1.14 : exemple d'application du contrôle actif au bruit moteur dans une voiture.....	21
Figure 1.15 : les principaux sources de bruit d'avion en vol.....	22
Figure 1.16 : dispositif de contrôle du bruit des hélices.....	24
Figure 1.17 : Le banc d'essai du bruit de soufflante.....	25
Figure 1.18 :Contrôle actif du bruit de soufflante sur 16 microphones extérieurs.....	25
Figure 1.19 :L'écran actif de Lyon St Exupéry.....	26
Figure 1.20 :principe d'annulation d'écho acoustique.....	27
Figure 2.1 : Procédure de l'identification paramétrique.....	32
Figure 2.2: Génération d'un signal aléatoire corrélé.....	34
Figure 3.1: représentation du filtre numérique.....	37
Figure 3.2: Principe d'un filtre adaptatif.....	40
Figure 3.3: Identification d'un système.....	42
Figure 3.4: Principe de la prédiction.....	42
Figure 3.5: Principe de la modélisation inverse.....	43
Figure 3.6: Annulation d'interférences.....	43
Résultats de simulation.....	54

# Introduction générale

# Introduction générale

Les nuisances sonores engendrées par le bruit ont été longtemps considérées comme une contrepartie négative d'une évolution technologique et urbaine, avec l'accroissement régulier du machinisme, des trafics routiers, ferroviaires et aériens. Devant l'extension du problème, les efforts ont d'avantage visé à éviter une aggravation du phénomène. Néanmoins dans de nombreux domaines tels que le confort des passagers des moyens de transport ou la communication radio, les problèmes du bruit sont devenus des questions majeures devant être prises en compte.

Les nuisances sonores ont été le sujet d'un grand nombre d'études visant à leur suppression. Les développements récents en matière de traitement numérique des données et d'analyse en temps réel offrent de nouvelles perspectives à cet effet. Il est désormais possible d'envisager le contrôle actif de bruit pour lutter contre ces nuisances.

Les solutions techniques basées sur l'optimisation des filtres adaptatifs se rencontrent dans une variété de problèmes, Mais la principale application de ces filtres c'est l'élimination du bruit.

Le travail présenté dans cette thèse est donc centré sur le thème de l'utilisation du filtrage adaptatif pour le contrôle actif du bruit. Cette étude est répartie en quatre chapitres :

Le premier chapitre donne une description détaillée sur le principe du contrôle actif du bruit, la conception, l'implantation et les applications du système.

On s'intéresse dans le deuxième chapitre au concept de l'identification des modèles qui présente une partie très importante dans le traitement des signaux stochastiques.

Le troisième chapitre présente une étude sur les filtres numériques et précisément les filtres adaptatifs où on présente les deux algorithmes les plus utilisables pour ces filtres (RLS et LMS).

Dans le dernier chapitre, on présente les résultats de simulation pour les deux algorithmes RLS et LMS sur MATLAB.

## Chapitre 01

# Le controle actif du bruit

## 1-1- Introduction :

Les nuisances sonores sont une gêne quotidienne pour le quart de la population mondiale. Les problèmes du bruit acoustiques dans l'environnement deviennent plus notables pour plusieurs raisons:

- L'augmentation du nombre de grands matériels industriels qui sont utilisés: moteurs, ventilateurs, transformateurs, Compresseurs.....
- L'augmentation de la densité de population et la haute exposition au bruit à cause de la proximité des zones industrielles.
- Le développement important des moyens de communication et le besoin de réduction de bruit de transmission pour assurer une qualité meilleure pour la communication.

Le but de ce chapitre est de donner une description détaillée de la technique du contrôle actif du bruit acoustique, son principe de fonctionnement, les moyens utilisés pour le contrôle, et finalement les principaux domaines d'application.

## 1-2- Le signal acoustique :

### 1-2 -1- Les ondes acoustiques :

Le son est une série d'ondes de compression de l'air qui se déplacent à travers l'air ou une matière. Ces ondes sonores sont créées par la vibration de quelque objet, comme un haut-parleur de la radio. Les ondes sont détectées quand ils permettent à un détecteur de vibrer en oscillant rapidement. Le tympan d'oreille vibre à cause d'ondes sonores.

Les ondes acoustiques voyagent à travers beaucoup de matières tel que l'eau et l'acier. Quelques matières isolantes absorbent beaucoup des ondes sonores, en empêchant les ondes de pénétrer dans la matière. Parce que le son est une vibration de matière, il ne voyage pas à travers le vide.



Figure 1.1 : onde acoustique complexe d'un mot parlé

La figure 1.1 donne un exemple de la forme d'une onde acoustique d'un mot parlé.

### 1-2 -2 - Caractéristiques du son :

Le son a les caractéristiques standards de toute onde, comme le montre le schéma de la figure 1.2.

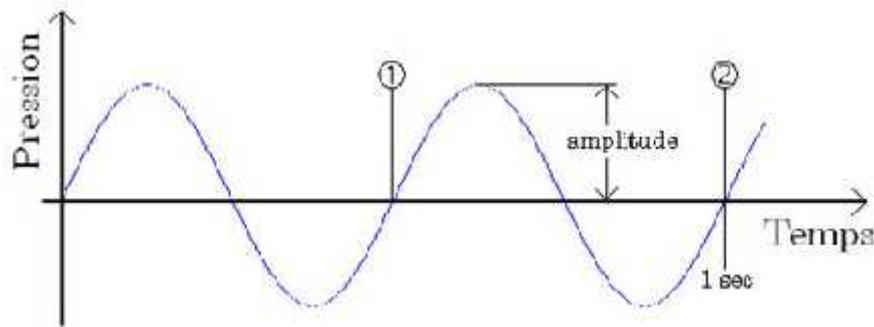


Figure 1.2 : Schéma d'une onde de pression (son)

#### 1-2 -2 -1- L'amplitude :

L'amplitude d'une onde sonore est la même chose que sa force. Tant dis que le son est une onde de compression, sa force ou amplitude correspond à combien cette onde est comprimée.

Une onde sonore s'étendra après qu'il laisse sa source, en diminuant son amplitude ou force.

#### Le décibel :

Une mesure commune de force est le décibel (dB). C'est 1/10 d'un bel qui a été nommé après l'inventeur du téléphone Alexander Graham Bell. C'est une unité qui varie comme la proportion des logarithmes de force.

#### 1-2 -2 -2- Vitesse ou vélocité de son :

La vitesse ou vélocité de son dans l'air sont approximativement 344 mètres/second (toutes les fréquences du son ont la même vitesse), 1130 ft/sec. ou 770 milles par heure à température de 20°C (70°F).

La vitesse varie avec la température d'air, le son voyage plus lentement à plus hautes altitudes ou dans les endroits où la température est basse.

### 1-2 -2 -3- La longueur d'onde :

La longueur d'onde est la distance d'une crête à une autre d'une onde. Du fait que le son est une onde de compression, la longueur d'onde est la distance entre compressions maximales.

### 1-2 -2 -4- La fréquence :

La fréquence de son est le taux à que les ondes passent un point donné. La fréquence est aussi appelée le ton d'un son. Il est appelé la note dans les sons musicaux.

La fréquence représente le nombre d'oscillations de pression d'air par seconde, elle se mesure en Hertz (Hz).. Par ailleurs, plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu.

#### Relation entre vitesse, longueur d'onde et la fréquence :

$$\text{la vitesse} = \text{longueur d'onde} \times \text{fréquence}$$

### 1-2-3 - L'interférence

L'interférence sonore est un phénomène basé sur le principe de la superposition des ondes. Il se produit lorsque deux ondes de même amplitude se déplacent dans la même direction. En s'additionnant, elles créent une nouvelle onde de fréquence et d'amplitude différentes.

Si le mélange des deux ondes produit une onde résultante ayant la plus grande amplitude possible, on parle d'interférence constructive, ces deux ondes sont alors dites « en phase ».

Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque les ondes s'annulent, il s'agit plutôt d'interférence destructive, les ondes sont alors en opposition de phase.

Le phénomène d'interférence est représenté dans les figures 1.3 et 1.4, où on additionne des ondes de même fréquence, mais qui sont déphasées l'une par rapport à l'autre.

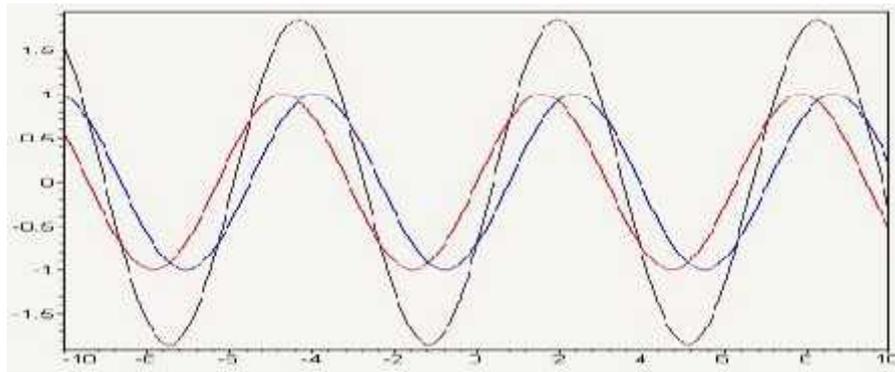


Figure 1.3: Schéma représentant l'interférence de deux ondes de mêmes fréquence et amplitude

La figure 1.3, nous montre trois ondes. La rouge et la bleue ont la même fréquence et la même amplitude, mais elles sont légèrement déphasées l'une par rapport à l'autre. En les additionnant, on obtient le tracé en violet. Comme les ondes tracées en rouge et en bleu sont relativement rapprochées l'une de l'autre, l'onde en violet, qui a la même fréquence que les deux précédentes, possède une amplitude presque égale au double des deux ondes de départ.

Lorsque les ondes qui s'additionnent sont totalement opposées, elles s'annulent, comme l'illustre la figure 1.4.

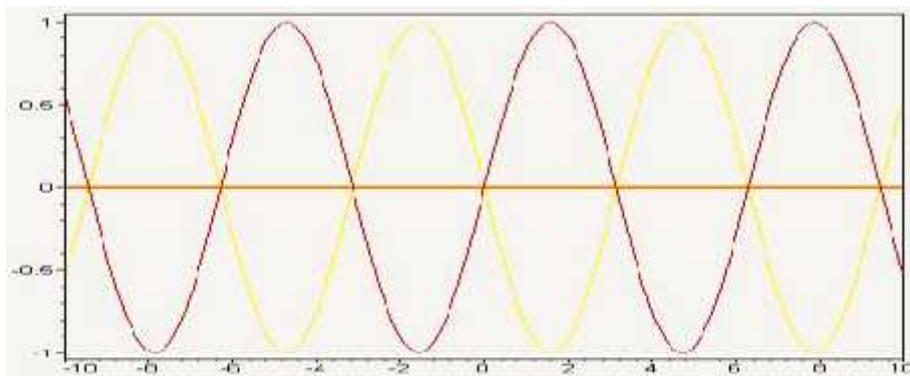


Figure 1.4 : Schéma représentant l'interférence destructive de deux ondes de mêmes fréquence et amplitude.

Sur la figure 1.4, l'onde tracée en jaune est opposée à celle tracée en rouge. Comme ces deux ondes possèdent une fréquence et une amplitude identique, la somme de ces deux ondes est nulle partout : c'est le tracé orangé.

Le phénomène d'interférence est une notion très importante dans le principe du contrôle actif de bruit qu'on étudiera par la suite.

### 1-2-4 - Le Bruit:

Les ondes tel qu'ondes sonores, peuvent inclure le bruit. Le bruit peut irriter et perturber avec communication. La proportion signal à bruit détermine combien de bruit il y a.

Il n'y a pas de définition physique exacte de bruit, mais on peut dire, pour l'acoustique, que tout type de son qui perturbe avec l'audition normale peut être considéré un bruit. Donc tout signal qui interfère avec le signal du son désiré soit qu'il s'agit d'un écho résultant de la diffraction du signal désiré lui-même sur un obstacle, ou bien un autre signal interférant est constaté comme un bruit indésirable.

#### 1-2-4-1- Le bruit blanc :

Le bruit blanc est un processus stochastique utilisé afin de modéliser les bruits intervenant dans toute modélisation de systèmes dynamiques. Il possède une densité spectrale de puissance constante :

$$S_x(f) = \frac{n}{2}$$

Par conséquent, sa fonction de corrélation est donnée par :

$$R_x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{n}{2} e^{j2ft} df = \frac{n}{2} \delta(t)$$

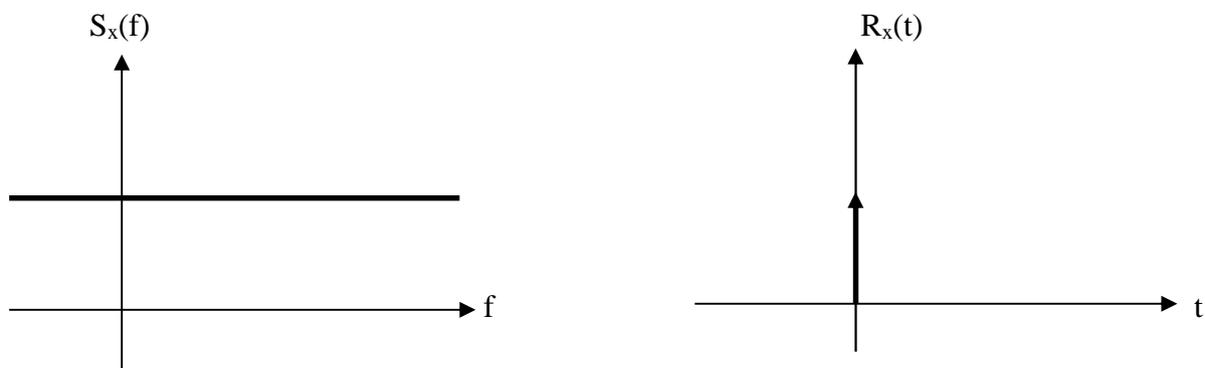


Figure 1.5 : densité de puissance et fonction de corrélation d'un bruit blanc

#### 1-2-4-2- Le bruit coloré :

C'est un bruit blanc filtré par une fonction de transfert  $H(f)$ , il est donc à bande limitée, dans ce cas on a :

$$S_y(f) = |H(f)|^2 S_x(f) = |H(f)|^2 \frac{n}{2}$$

### 1-2-4-3- Le Rapport signal/bruit :

La qualité d'un signal est souvent représentée par le rapport de l'énergie du signal divisé par l'énergie du bruit, appelée "Rapport signal/bruit" (SNR en anglais).

pour  $x(t) = s(t) + n(t)$ . Le rapport signal sur bruit est défini par :

$$SNR = \frac{W_s}{W_n}$$

où  $W_s$  est l'énergie du signal  $x(t)$  et  $W_n$  est l'énergie du bruit  $n(t)$

Le SNR est souvent représenté avec une échelle logarithmique appelée décibels et noté dB.1

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} SNR$$

### 1-3- Le Concept général de contrôle du bruit acoustique :

Il y a deux approches du contrôle du bruit acoustique: passif et actif.

#### 1-3-1- Le contrôle passif :

Il utilise des silencieux ou des isolements, ou barrières atténuateurs. Il n'introduit pas d'énergie externe au système, il cherche à interrompre la propagation du bruit.

#### 1-3-2- Le contrôle actif ANC (active noise control):

Il annule ou amortit les foyers du bruit, c'est un moyen efficace qui se présente pour lutter contre les signaux acoustiques de basses fréquences.

Le principe est simple: à l'onde émise par la source (que l'on cherche à traiter), on ajoute une autre onde via une source secondaire en opposition de phase de façon à avoir un résultat, une absence de bruit.

### 1-4- Comparaison entre le contrôle passif et le contrôle actif du bruit :

L'approche traditionnelle du contrôle passif du bruit se trouve dans un état très mur et est très utile par son efficacité et atténuation sur un large rang de fréquences.

Les silencieux passifs utilisent le concept de changement de l'impédance causé par une combinaison de cloisons et tubes pour faire taire le son indésirable (silencieux réactifs) ou le concept de perte d'énergie causé par la propagation du son dans un conduit relié avec une matière absorbante du son pour fournir le silence (les silencieux résistives).

les silencieux réactifs sont utilisés comme cache-cols sur les moteurs à combustion interne, pendant que les silencieux résistives sont utilisés pour le bruit du ventilateur principalement. Ces

silencieux passifs sont évalués pour leur haut atténuation sur une gamme de la fréquence générale.

Cependant, ils sont relativement grands, chers, et inefficaces à basses fréquences, rendre l'approche passive du réduction du bruit souvent non pratique . De plus, ces silencieux créent souvent une pression arrière indésirable s'il y a l'écoulement d'air dans le conduit.

Dans un effort de vaincre ces problèmes, l'intérêt considérable a été montré dans contrôle actif du bruit.

Les méthodes actives permettent des améliorations dans le contrôle du bruit, et bénéfiques en taille, poids volume et coût du système. L'annulation active du bruit est une nouvelle technique pour atténuer, éliminer ou annuler le bruit acoustique. L'annulation de ce bruit est effectuée en produisant un nouveau bruit ( anti-bruit ) au moyen des dispositifs électro acoustiques de telle sorte que dans une zone d'intérêt du milieu acoustique une interférence destructive se produise (ondes de pression en opposition de phase).

L'efficacité de ces systèmes de contrôles est limitée par l'état actuel de la technologie, ce qui empêche une utilisation plus répandue de ces derniers. Entre autres, ces derniers ne sont efficaces, actuellement, que pour des signaux simples ou déterministes. En effet, la grande majorité des systèmes utilisés annulent des bruits périodiques, simples et faciles à détecter. De plus, de tels systèmes fonctionnent mieux pour annuler des bruits de basses fréquences, car les hautes fréquences contiennent plus d'information par unité de temps que les basses. Plus d'information à traiter demande donc plus de puissance de calcul.

De par la complexité des systèmes de contrôle actif, ces derniers deviennent intéressants là où les systèmes passifs perdent leur efficacité ou leur rentabilité. Précisément, les systèmes de contrôle actifs surpassent les passifs quand la perturbation est d'une fréquence relativement basse, et ce, pour deux raisons principales :

Premièrement, les basses fréquences nécessitent une plus grande isolation que les hautes pour être atténuées passivement.

Deuxièmement, le contrôle actif s'applique surtout dans le domaine des basses fréquences puisque celles-ci sont plus faciles à analyser par le contrôleur. En effet, la performance de la majorité des systèmes de contrôle actif est limitée par la capacité du processeur à déterminer la meilleure correction à apporter. Les basses fréquences contiennent moins d'information par unité de temps que les hautes, simplifiant la tâche du processeur.

### 1-5-Le principe d'un système du contrôle actif :

Un contrôleur actif du bruit (comme montré dans la figure 1.6), est formé par :

- Un capteur de référence ( un microphone, un tachymètre, un accéléromètre,,)
- Un contrôleur électronique qui modifie en amplitude et en phase le signal du capteur de référence. le contrôleur utilise souvent un filtre adaptatif pour l'identification du bruit.
- Un haut-parleur qui produit des ondes de pression ( des ondes acoustiques).
- Un microphone de réalimentation au système qu'il sert à modifier son fonctionnement et à obtenir des diminutions de pression acoustique justement ou soit placé ce dernier.

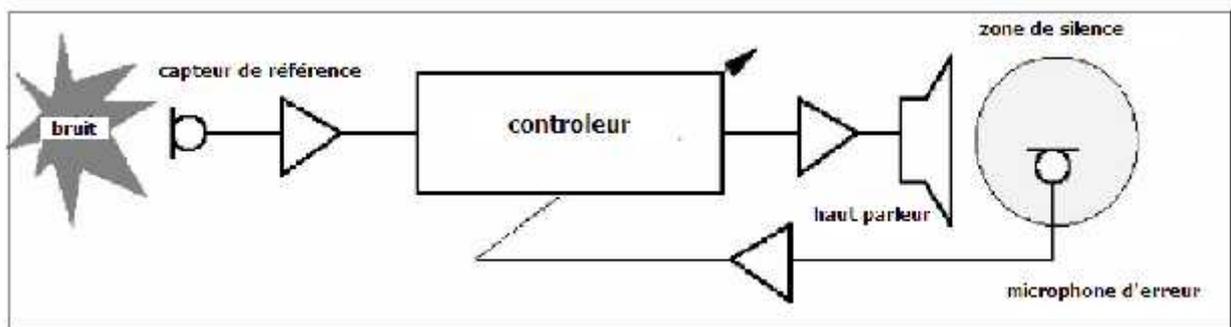


Figure 1.6 : un diagramme bloc d'un système du contrôle actif

Le système du contrôle actif du bruit contient un appareil électroacoustique qui annule le son non désiré par produire un anti-son (anti-bruit) d'amplitude égale et phase du contraire :

- 1- Le système prend un échantillon du bruit que nous voulons annuler.
- 2- Ensuite on produit un anti-bruit obtenu à partir de l'échantillon la même amplitude mais déphasée  $180^\circ$  de sorte que les bouts du bruit coïncident avec des vallées de ce qui est anti-bruit et vice versa.
- 3- Le système émet cet anti-bruit en annulant ainsi le bruit.
- 4- Le son non désiré, et l'antibruit se combinent acoustiquement, en résultant l'annulation des deux sons.

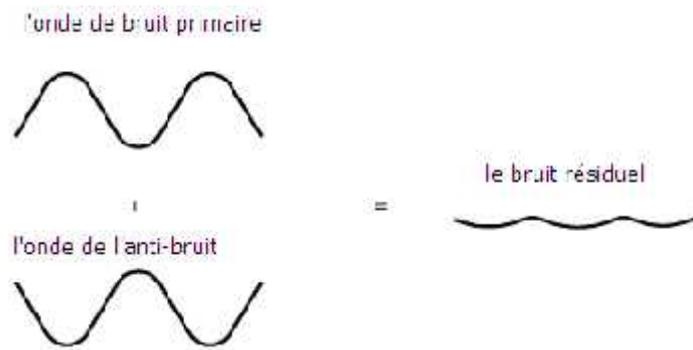


Figure 1.7 : le concept physique du contrôle actif du bruit

La figure 2.7 montre un exemple d'annulation pour une onde simple : L'onde du bruit non désiré (le bruit primaire), l'anti-bruit (le bruit secondaire), et le bruit résidu qui résulte quand ils superposent.

L'efficacité d'annulation du bruit primaire dépend de l'exactitude de l'amplitude et phase de l'anti-bruit produit.

Pratiquement, pour les ondes du son, la technique d'annulation est un peu plus compliquée.

Une des techniques utilisés pour le contrôle actif est le filtrage adaptatif .Il est nécessaire de faire appel à des algorithmes d'adaptation adéquats

### **Remarque : Le contrôle actif des vibrations :**

le contrôle actif des vibration partage beaucoup de concepts avec le contrôle actif acoustique. Les algorithmes développés pour le contrôle actif du bruit peuvent aussi être appliqués pour contrôle actif de vibration.

le contrôle actif de vibration peut être utilisé pour isoler les vibrations d'une variété de machines et à stabiliser plusieurs plates-formes dans la présence de troubles de la vibration. Comme la performance et la précision continue à améliorer, et le coût initial continue à décliner, les systèmes actifs peuvent devenir la solution préférée à plusieurs problèmes du contrôle de vibration .

### **1-6-Le Développement des Techniques Actives pour le Contrôle du Bruit Acoustique :**

Le contrôle actif du bruit développe rapidement parce qu'il autorise des améliorations considérables dans contrôle du bruit.

L'étude de ce phénomène a eu un long développement durant les années 70. depuis sa genèse en 1930 jusqu'à son état présent avec des produits de consommation sur le marché. Le développement du contrôle actif du bruit a été parallèle et dépendant des avances des produits électroniques de bas coût.

L'idée de ce système, comme interférence destructive entre le domaine primaire du bruit, et d'un secondaire, produit électroniquement, a été posée par Paul Lueg en 1934. Son brevet incluait trois concepts du contrôle de bruit actif : suppression du bruit dans des conduits, annulation par interférence dans des points en espace, et création de « quiet zones » protégées. La première démonstration expérimentale est due à Olson 1953 qui a montré q'en ajustant le champ produit par un haut parleur à l'aide d'un contrôle par feed-back, on pourrait réduire la pression acoustique au voisinage d'un microphone de référence de 10 à 25 dB dans le domaine des basses fréquences.

Il a eu une phase précoce d'exploration durant les années cinquante, où on trouve quelques mises en œuvre pratiques à la réduction du bruit avec une structure spatio-temporelle très simple comme celui diffusée par des transformateurs électriques.

Mais le véritable intérêt pour le contrôle actif du bruit apparaît à partir de travaux de Widrow sur le filtrage adaptatif. La puissance des filtres adaptatifs est située dans sa capacité d'adapter le système du contrôle aux conditions changeantes du bruit qu'on prétend réduire.

Durant les années 80, se présentent des applications pratiques du système dans des conduits (tubes d'échappement moteurs, systèmes de ventilation et air conditionné) et dans des protecteurs auditifs. Durant les années 90, sont publiés des résultats spectaculaires du contrôle actif du bruit dans des moyens de transport (voitures, avions).

On a appliqué cette méthode au bruit périodique diffusé sur des transformateurs électriques, à protecteurs auditifs, au bruit propagé dans des conduits (systèmes de ventilation et air conditionné, tubes d'échappement moteurs), au bruit dans des moyens de transport (carlingues de véhicules, moteurs), au bruit de diffraction (barrières acoustiques), et au bruit structurel.

Le progrès continu de contrôle du bruit actif implique le développement du traitement numérique du signal DSP et du filtrage adaptatif traitant les algorithmes et des transducteurs.

Les algorithmes filtrant autorisent la convergence plus rapide (l'égalisation de la phase et magnitude du bruit indésirable et l'antibruit afin que l'annulation se produit.

### 1-7- Propriétés d'un système ANC :

Pour être convenable à usage industriel ou commercial, le système ANC doit avoir des certaines propriétés:

- efficacité Maximale sur la bande de la fréquence désirée
- Autonomie quant à l'installation (le système pourrait être construit et pourrait être pré-régulé au temps de la fabrication et après a installé sur place)
- L'adaptation du système avec toutes variations dans les paramètres physiques (température, écoulement d'air, etc.)
- Robustesse et précision des éléments du système et simplification du contrôle électronique

### 1-8- Le bruit large-bande et le bruit bande étroite (broadband et narrowband) :

Deux types de bruit acoustique existent dans l'environnement :

- Un est causé par la turbulence et est totalement aléatoire. Le bruit turbulent distribue son énergie à travers les bandes de la fréquence également. C'est connu sous le nom de bruit **broad-band** ou bruit large-bande. par exemple :les sons basse fréquence d'avions à réaction ,bruit de l'impulsion d'une explosion....
- Un autre type de bruit, appelé bruit **narrowband** ou bruit de bande étroite, concentre la plupart de son énergie à des fréquences spécifiques. Ce type de bruit concerne les machines à rotation ou répétitives, donc c'est périodique ou presque périodique. exemple: le bruit de moteurs à combustion interne dans les moyens de transport, compresseurs dans les réfrigérateurs.

L'annulation du bruit Broadband exige de la connaissance de la source du bruit (le bruit primaire) à fin de produire le signal de l'anti-bruit.

La mesure du bruit primaire est utilisée comme une entrée de référence au contrôleur du bruit. Le bruit primaire qui correspond avec le signal référence d'entrée est annulé en aval du générateur du bruit (un haut-parleur) quand la phase et la magnitude sont modelées dans le contrôleur numérique correctement.

### 1-9 - Les méthodes utilisées pour le contrôle actif :

Les systèmes du contrôle actif du bruit sont basés sur une des deux méthodes : le contrôle feedforward et le contrôle feedback.

### 1-9-1- Le contrôle Feedforward :

Dans ce cas, à l'entrée, un bruit de référence cohérent est senti avant qu'il propage devant l'annulant orateur. L'approche feedforward consiste à capter le bruit avant être éliminé avant qu'il n'arrive au système de contrôle. Le signal est acheminé au contrôleur qui évalue le meilleur son à émettre, de façon à éliminer celui capté précédemment par le capteur de détection. Par la suite, le contrôleur transmet cet « antibruit » à une source sonore secondaire qui émet ce signal sous forme de son. Enfin, le capteur d'erreur, situé en aval de système, capte le bruit résiduel et fournit cette information au contrôleur, qui en tient compte lorsqu'il calcule le meilleur « antibruit » à émettre (figure 1.8).

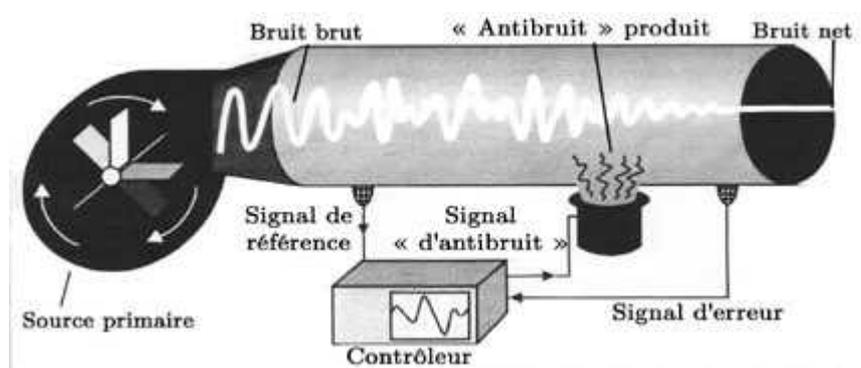


Figure 1.8 : Schéma des signaux traités dans un contrôle de type feedforward

Les systèmes ANC Feedforward sont les techniques principales utilisées aujourd'hui. Ces systèmes sont classés en deux catégories:

- Le contrôle adaptatif feedforward broadband: contrôlent avec une sonde d'entrée acoustique.
- Le contrôle adaptatif feedforward narrowband: contrôlent avec une sonde d'entrée non-acoustique.

#### 1-9-1-1- Le Système Feedforward broadband (à large bande):

Un montant considérable de bruit de large bande est produit dans les conduits tel que les pots d'échappement et les systèmes de ventilation.

Un système de contrôle feedforward relativement simple pour un conduit long et étroit est illustré dans la figure 1.9.

Un signal de référence  $x(n)$  est senti par un microphone d'entrée près de la source du bruit avant qu'il passe par le haut-parleur. Le suppressor du bruit utilise le signal de référence de

l'entrée pour produire un signal  $y(n)$  d'amplitude égale mais  $180^\circ$  hors de phase. Ce signal de l'antibruit est utilisé pour conduire le haut-parleur pour produire un son annulant, cela atténue le bruit acoustique primaire dans le conduit.

Le principe de base de l'approche feedforward broadband est que le délai du temps de la propagation entre la sonde du bruit en amont (microphone de l'entrée) et la source du contrôle active (orateur) offre l'occasion réintroduire le bruit à une place dans le champ où il causera l'annulation électriquement. L'espacement entre le microphone et le haut-parleur doit satisfaire les principes de causalité et la haute cohérence.

Ce signifie que la référence doit être mesurée assez tôt afin que le signal antibruit soit généré au temps que le signal du bruit arrive à l'orateur.

Le contrôleur du bruit utilise le signal de l'entrée pour produire un signal  $y(n)$  d'amplitude égale et  $180^\circ$  hors de phase avec  $x(n)$ . Ce bruit est sorti à un haut-parleur et utilisé pour annuler le bruit non désiré.

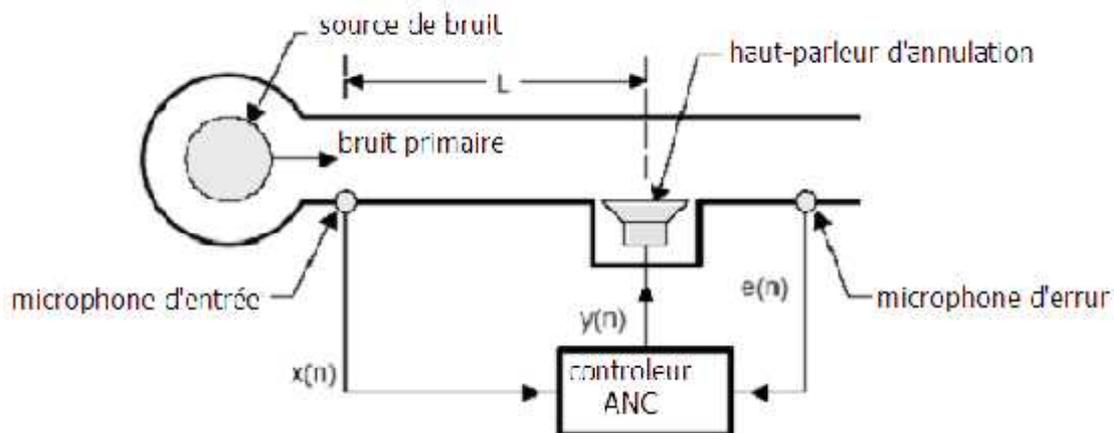


Figure 1.9 : Un canal du système ANC feedforward broadband dans un conduit

Le microphone d'erreur mesure signal d'erreur (ou résidu)  $e(n)$  qui est utilisé pour adapter les coefficients du filtre à fin de minimiser cette erreur.

### 1-9-1-2- Le Système Feedforward Narrowband (à bande étroite) :

Dans les applications où le bruit primaire est périodique (ou presque périodique) et est produit par la rotation ou par les machines à mouvement alternatif, le microphone d'entrée peut

être remplacé par une sonde non-acoustique tel qu'un tachymètre, un accéléromètre, ou une sonde optique. Ce remplacement élimine le problème du feedback acoustique

Le diagramme du bloc d'un système du contrôle feedforward narrowband est montré dans la figure 1.10.

Le signal de la sonde non-acoustique est synchrone avec la source du bruit et est utilisé pour simuler un signal de l'entrée qui contient la fréquence fondamentale et tout l'harmoniques du bruit fondamental.

Dans beaucoup de voitures, camions... etc., le signal des révolutions par minute (tr /mn) est disponible et peut être utilisé comme signal de référence.

Un microphone d'erreur est encore exigé pour mesurer le bruit acoustique résidu, ce signal d'erreur est utilisé pour ajuster les coefficients du filtre adaptatif.

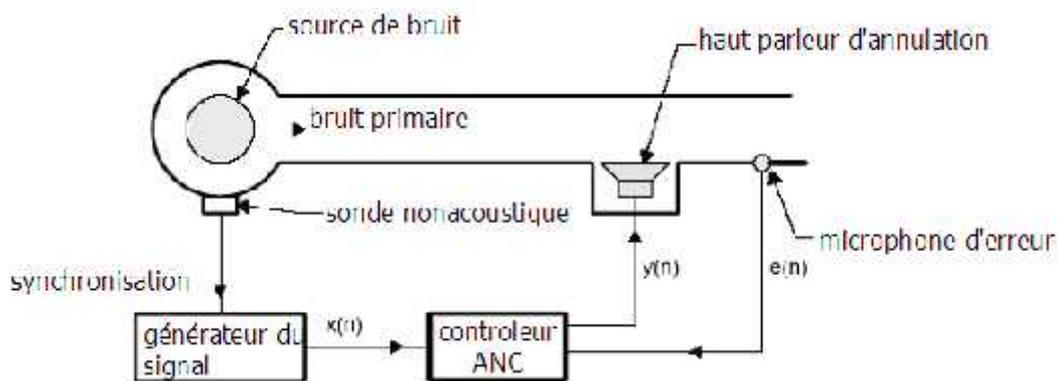


Figure 1.10 : Un canal du système ANC feedforward narrowband dans un conduit

Généralement, l'avantage des systèmes ANC narrowband est que les sondes non-acoustiques sont insensibles au son annulant. Spécifiquement, cette technique a les avantages suivants :

- le problème environnemental et les problèmes du microphone d'entrée sont éliminés automatiquement. C'est particulièrement important du point de vue d'ingénieur, parce que c'est difficile de sentir le bruit référence dans les hautes températures et dans les conduits du gaz turbulent comme le système d'échappement du gaz du moteur.
- La périodicité du bruit permet à la contrainte de la causalité d'être enlevé. la fréquence du bruit est constante. Seulement des ajustements pour phase et magnitude sont exigés. Ceci résulte un positionnement plus flexible de l'annulant orateur (haute parleur) et permet plus longs délais pour être introduit par le contrôleur.

- L'usage d'un signal de référence généré par le contrôleur a l'avantage d'annulation sélective; donc, il a la capacité de contrôler chaque harmonique indépendamment.

### 1-9-2- Le contrôle feedback :

C'est où le contrôleur du bruit actif essaie d'annuler le bruit sans l'utilisation d'un référence en amont à l'entrée.

Contrairement à l'approche feedforward, qui se base sur une mesure du bruit en amont du système pour évaluer l'« antibruit » à produire, l'approche feedback vise plutôt à réduire les effets d'un bruit déjà passé. En d'autres termes, il s'agit ici de trouver le meilleur son à émettre afin que le système retrouve son état initial imperturbé, et ce, le plus rapidement possible. Physiquement, un système fonctionnant en feedback nécessite un capteur d'erreur, une source secondaire et un contrôleur. Dans les cas les plus simples, c'est-à-dire ceux où la source secondaire est suffisamment près de la source primaire, le contrôleur ne fait que reproduire le signal capté avec une amplitude plus élevée et en opposition de phase avec le bruit brut.

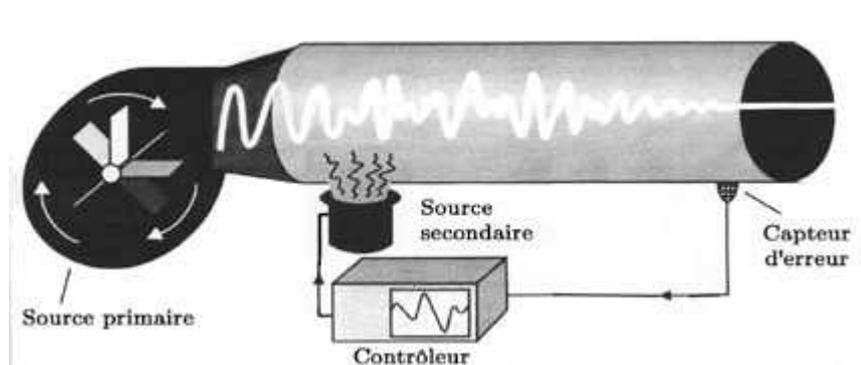


Figure 1.11: Schéma des signaux traités dans un contrôle de type feedback

Le contrôle actif du bruit feedback a été proposé par Olson et May en 1953. Dans ce plan, un microphone est utilisé comme une sonde d'erreur pour détecter le bruit indésirable.

Le signal de la sonde d'erreur est rendu à travers un amplificateur (filtre électronique) avec une réponse de magnitude et de phase pour produire l'annulation dans la sonde par un haut-parleur localisé près du microphone (figure 1.11 et 1.12).

Cette configuration fournit l'atténuation limitée sur une gamme de fréquence restreinte pour un bruit périodique ou bande - limité.

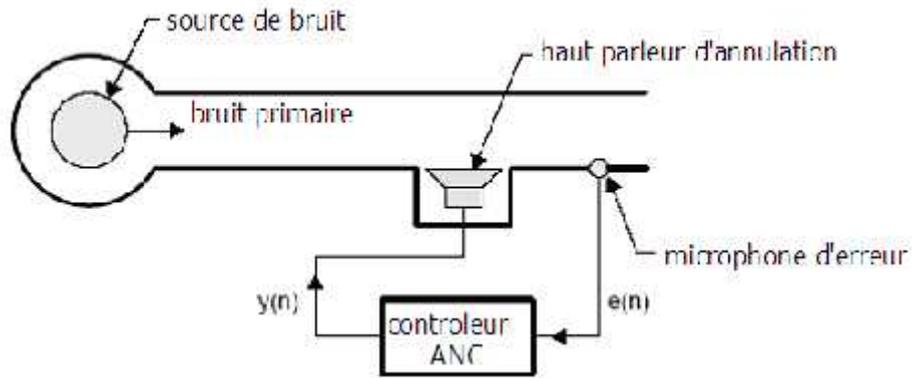


Figure 1.12 : Système ANC Feedback

**1-10- Le Système ANC de Multi-Canal :**

Beaucoup d’applications peuvent afficher le comportement complexe du modèle. Ces applications incluent:

- contrôle actif du bruit dans les grands conduits ou les clôtures.
- contrôle actif de la vibration sur corps rigides ou structures avec multiples degrés de liberté.
- contrôle actif du bruit dans des compartiments du passagers d’avion ou automobiles.

Quand la géométrie du champ de son est compliquée, on utilise plusieurs sources secondaires pour annuler le bruit primaire.

Le contrôle du champs acoustique compliqué exige l'exploration et le développement des stratégies optimums et la construction d'un contrôleur de multiple canal adéquat. Ces tâches exigent l'usage d'un algorithme adaptatif multiple entrée - multiple sortie (MIMO).

Le système ANC de multiple canal général implique une collection de sondes et actuateurs.

Un diagramme du bloc d'un système ANC de multiple canal est montré dans la figure 1.13.

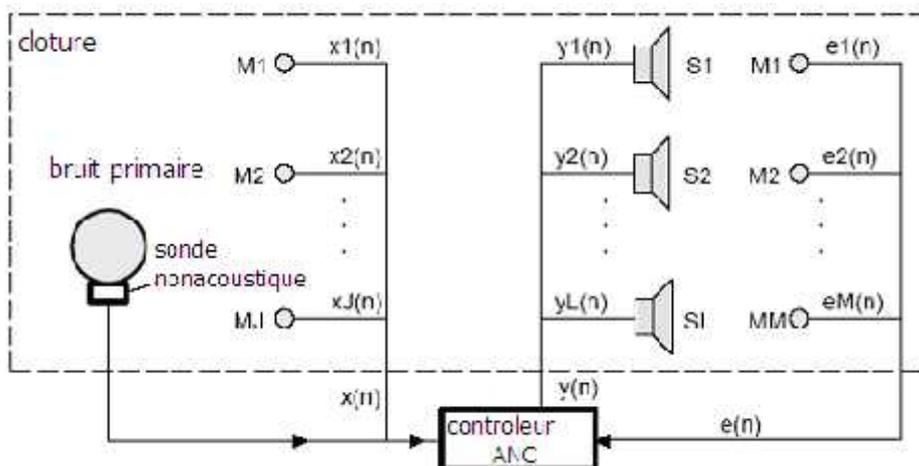


Figure 1.13 : System ANC Multi-Canal pour 3-D

## **1-11- Applications du système de contrôle actif du bruit ANC :**

Pour une véritable application industrielle, d'autres facteurs sont à prendre en compte : En premier lieu le coût du dispositif et de sa maintenance sera déterminant : un système de contrôle actif permettant une réduction du bruit de plus de 60dB ne sera jamais appliqué si une solution passive nettement moins chère est disponible.

En deuxième lieu, le produit commercialisé ne se résume pas à une simple performance, il est entouré d'une image qui peut tout autant susciter une envie d'achat qu'un simple énoncé technique. Enfin une étude des brevets concernant l'application visée est nécessaire. Le principe du contrôle par feedforward a été par exemple décrit dans un brevet de 1975 tombé dans le domaine public, le casque antibruit a été breveté en 1985.

Dans cette section on va décrire quelques-unes des applications industrielles du contrôle actif en se restreignant aux seuls aspects techniques.

### **1-11-1- Le casque anti-bruit actif :**

Les casques anti-bruit classiques protègent mal leur porteur à basse fréquence lorsque l'épaisseur des coquilles devient trop petite devant la longueur d'onde. Inversement, à basse fréquence, réaliser un point sourd dans la coquille du casque suffit à réduire le bruit jusque dans le conduit auditif ; un contrôle actif efficace est envisageable dans la bande 30-500 Hz, y compris avec un haut-parleur de petite surface.

Pour ce qui est du filtre de contrôle, il est peu envisageable de disposer un ensemble de capteurs de référence autour du porteur du casque pour détecter à l'avance les bruits incidents sauf par exemple dans le cas de bruits produits par des machines à proximité ; on doit plutôt résoudre un problème de contrôle par feedback que par feedforward.

Le problème de contrôle optimal peut être traité avec les outils de l'automatique classique et conduire à un filtre de contrôle assez simple que l'on peut mettre en oeuvre avec un circuit analogique.

Dans les années 1980, était la mise au point et le brevet d'un casque anti-bruit actif permettant une atténuation active du bruit dépassant 20dB dans la bande 100-400 Hz. Ce casque et ses variantes ultérieures (permettant par exemple une communication radio non atténuée par le contrôle) qui sont commercialisés permettent d'améliorer significativement la protection des personnes exposées à des bruits intenses avec des composantes basse fréquence comme par exemple dans les aéroports.

### **1-11-2- Contrôle actif et automobile :**

La réduction du bruit à l'intérieur des voitures est destinée à améliorer le confort du conducteur. Ce confort acoustique a fortement été amélioré au cours des deux dernières décennies du vingtième siècle.

La réduction du bruit vers l'extérieur correspond, au besoin de satisfaire les normes; la norme actuelle (basse vitesse/haut régime) pénalise le bruit dû au moteur et à l'échappement.

En dehors du bruit produit par quelques appareils spécifiques (ventilation, essuie-glace, turbo-compresseur ...), le bruit dans les voitures provient essentiellement du moteur à basse vitesse, du contact pneu/chaussée puis de l'écoulement de l'air autour de l'habitacle à haute vitesse. Pour ce qui est du bruit vers l'extérieur il faut ajouter à ces trois sources le bruit rayonné par l'échappement.

#### **1-11-2-1- Contrôle du bruit moteur :**

Le bruit produit par un moteur de voiture n'est pas majoritairement dû aux explosions. En fait ce bruit est en grande partie produit par les vibrations du moteur liées aux mouvements des masses qui sont reliées à l'attelage mobile constitué par les pistons, les bielles et le vilebrequin) et aux forces appliquées au moteur à cause des combustions. Ces vibrations sont responsables d'un rayonnement acoustique mais elles sont aussi transmises à différents éléments de l'habitacle qui, à leur tour, vont y rayonner du bruit.

En ce qui concerne les masses en mouvement, chaque piston est en translation verticale mais non sinusoïdale puisque, pour des raisons cinématiques, il passe plus de temps au voisinage du vilebrequin que de la culasse. Ce mouvement de translation peut être développé en série de Fourier. Lorsqu'on combine ensuite deux pistons parallèles avec des mouvements en opposition de phase, les fréquences fondamentales se compensent .

D'un point de vue purement acoustique un contrôle actif global de ce bruit est donc envisageable dans l'habitacle avec un nombre réduit de transducteurs. Le bruit dans l'habitacle est la conséquence du fonctionnement et du mouvement du moteur.

N'importe quel signal corrélé (i.e. synchronisé, pour un mouvement périodique) avec la rotation du moteur peut servir de signal de référence pour un contrôle par feedforward, qu'il soit obtenu avec un capteur optique, magnétique, vibratoire ou acoustique.

Un algorithme FXLMS peut donc être utilisé pour déterminer comment filtrer ce signal pour minimiser le bruit sur des capteurs dans l'habitacle. Même avec une voiture «sportive», les variations de régime moteur sont lentes en termes de nombre de périodes du bruit à traiter ; avec

un algorithme adaptatif qui converge en quelques périodes, suivre les variations de régime moteur ne pose pas de problèmes.

La figure 1.14 montre un exemple d'application du contrôle actif au bruit moteur dans une voiture.

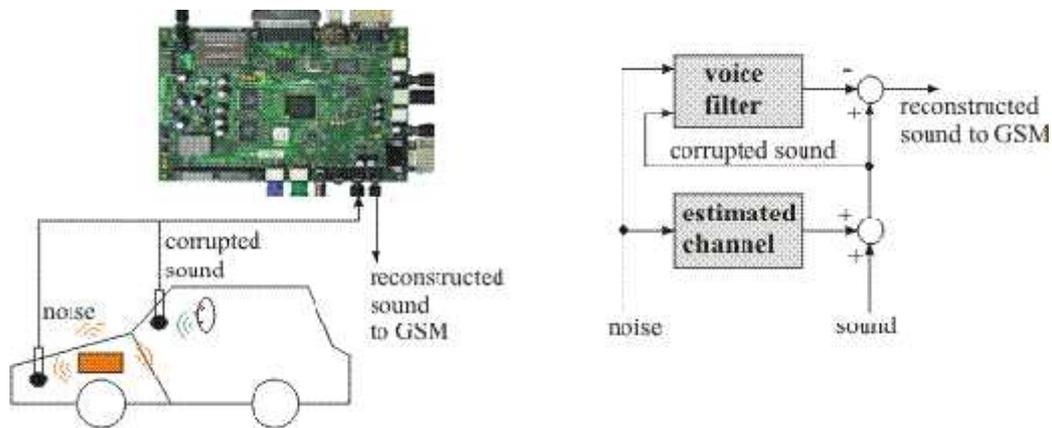


Figure 1.14 : exemple d'application du contrôle actif au bruit moteur dans une voiture

Le contrôle actif du bruit moteur dans les voitures est donc techniquement possible et il peut donner des résultats appréciables. Toutefois, à l'exception d'une Nissan Blue Bird distribuée exclusivement au Japon au début des années 1990, aucune voiture n'est commercialisée avec un dispositif de contrôle actif du bruit moteur. Cela est principalement dû au coût d'un système de contrôle actif, coût moins lié aux microphones, au micro-processeur pour les calculs en temps-réel, aux haut-parleurs et à l'amplificateur (déjà présents dans une voiture) qu'au câblage et au frais d'implantation sur le véhicule.

### 1-11-2-2- Contrôle du bruit d'échappement :

L'écoulement pulsé en sortie de la ligne d'échappement d'une voiture est une source de débit acoustique. Deux expulsions de gaz se produisent par tour sur un moteur pour un 4 cylindres, la fréquence fondamentale du bruit rayonné sera double de celle du régime.

Par ailleurs, un algorithme FXLMS ou bien un algorithme RLS peut être utilisé pour un contrôle adaptatif à partir d'un signal de référence pris au niveau du moteur.

Un contrôle actif du bruit d'échappement est donc théoriquement faisable.

En pratique, plusieurs dispositifs ont été installés à titre expérimental sur différents véhicules. Des haut-parleurs optimisés pour résister à un environnement agressif (température

élevée, projections diverses, vibrations etc ...) peuvent tout à fait être utilisés comme sources secondaires.

### 1-11-3- Contrôle actif et aéronautique :

Comme en automobile, le contrôle actif peut d'une part être envisagé dans les avions pour améliorer le confort acoustique des passagers; et aussi améliorer la qualité de transmission vocale au bord de l'avion notamment la transmission entre le pilote et les contrôleurs situés dans les centres du contrôle aérien.

En classe économique le manque d'espace est la première source d'inconfort mais pour les autres classes un système de réduction du bruit est envisageable.

D'autre part le contrôle actif peut aider à satisfaire les normes qui réglementent le bruit rayonné par les avions.

Une contrainte particulièrement aigüe dans le monde de l'aéronautique est celle du poids des systèmes embarqués. Si une solution active de réduction du bruit s'avérait globalement bien plus légère qu'une solution passive, les contraintes de coût, de mise en place et de maintenance pourraient être reléguées au second plan. On va présenter quelques uns des systèmes de contrôle actif qui ont été étudiés pour les avions.

#### 1-11-3-1- Les sources de bruit dans un avion :

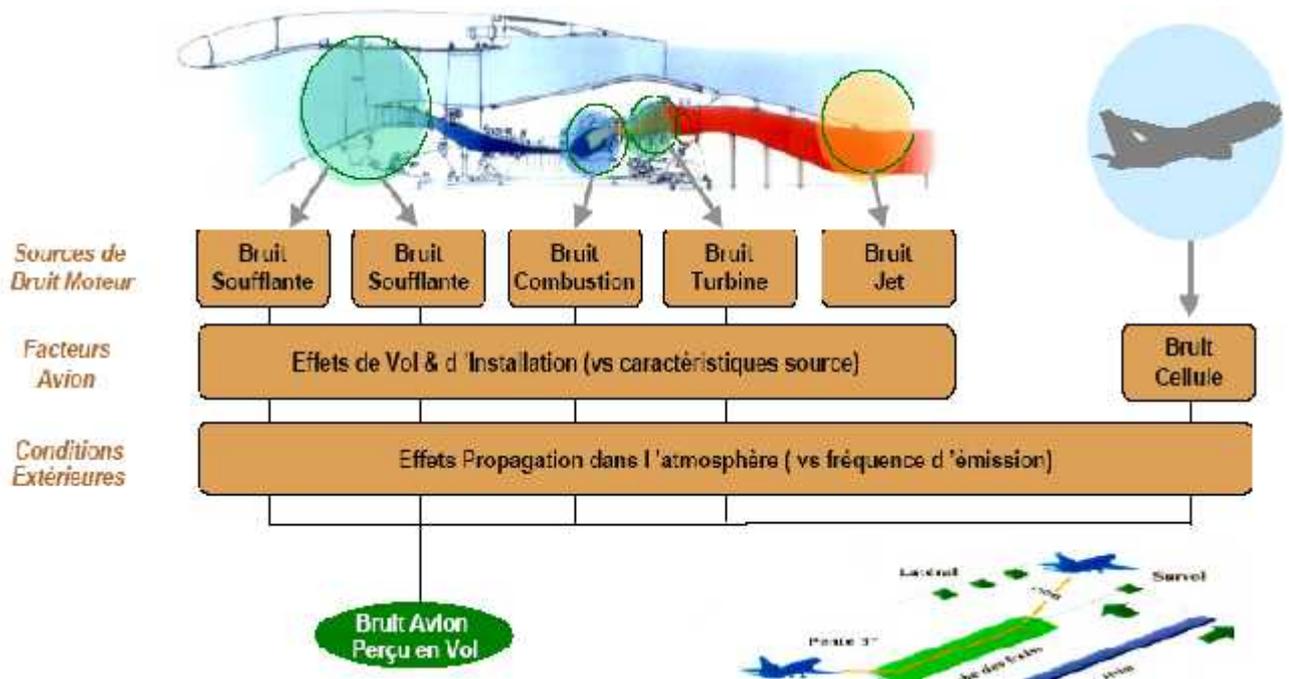


Figure 1.15 : les principaux sources de bruit d'avion en vol

La figure 1.15 résume les principales sources de bruit dans un avion :

Le bruit soufflante, le bruit de combustion, le bruit turbine : qui sont assemblés dans la case de bruit moteur.

On a aussi le bruit de la cellule (frame), le bruit des hélices, et aussi le bruit causé par les différentes installations dans l'avion et enfin les effets de propagation dans l'atmosphère.

### **1-11-3-2- Contrôle du bruit d'hélices :**

Le niveau du bruit est particulièrement élevé dans les avions à hélice commerciaux de quelques dizaines de places (ATR 42 de l'ex-Aérospatiale, avions Dornier, Saab ...).

La fréquence fondamentale du bruit de raies produit par une hélice est égale à sa fréquence de rotation multipliée par le nombre de pales ; elle vaut typiquement une centaine de Hz pour les avions ci-dessous.

Un contrôle acoustique en est donc tout à fait envisageable. D'un point de vue acoustique, des signaux synchronisés à la rotation des hélices sont disponibles comme référence pour un contrôle par feedforward.

Avec deux hélices, on pourrait croire qu'un système bi-référence est nécessaire mais en fait un système de synchronisation (le synchro-phaser) est déjà installé sur les avions pour éviter le battement qui résulterait de deux moteurs de régime légèrement différents ; un seul signal de référence suffit.

La figure 1.16 montre un dispositif qui a été testé en vol dans le cadre des programmes de recherche européens ASANCA. Il s'agissait non seulement de réduire le bruit au niveau supposé de la tête des passagers mais aussi de ne pas utiliser de transducteurs sur les sièges qui peuvent être démontés pour le transport de fret.

Les microphones sous les compartiments à bagage ne sont donc pas directement utilisés comme capteurs de minimisation mais ils servent à estimer les quantités à minimiser.

Un certain nombre d'avions SAAB équipés d'un système anti-bruit actif sont en service en Europe.



Figure 1.16 : dispositif de contrôle du bruit des hélices

### 1-11-3-3- Contrôle du bruit de soufflante :

Le bruit des turbo-réacteurs est dû à la turbulence du jet en sortie et à la combustion, mais aussi à la soufflante qui émet un sifflement caractéristique, particulièrement audible en approche et au sol. Ce bruit périodique est dû à l'effet sur l'écoulement du passage des aubes du rotor devant les éléments du stator ; sa fréquence fondamentale se situe typiquement vers 2 kHz.

Le bruit de soufflante se propage à contre-courant dans l'entrée du réacteur avant d'être rayonné vers l'extérieur. La section du réacteur est grande devant la longueur d'onde; un assez grand nombre de modes contribue à la propagation du bruit de soufflante dans le réacteur, et un contrôle actif ne peut être envisagé qu'avec plusieurs capteurs et actionneurs.

Comme le bruit est lié à la rotation de la soufflante, le contrôle est facile à mettre en oeuvre par filtrage d'un signal de référence.

La figure 1.17 montre le banc d'essai 5C2 de la SNECMA qui comprend un turbo-réacteur à l'échelle 1/4 destiné à l'étude et au contrôle du bruit de soufflante ; la soufflante y est entraînée par un moteur auxiliaire, aucune combustion n'a lieu dans le moteur.

Des microphones et des chambres de compression sont disposés en paroi de conduit, une antenne disposée devant l'entrée devant le conduit permet d'évaluer le rayonnement vers l'extérieur.

La figure 1.18 montre la raie fondamentale du bruit de soufflante mesurée, avec et sans contrôle, sur 16 microphones disposés devant le moteur. Le régime de rotation fluctue légèrement en permanence, ce qui explique le léger décalage fréquentiel des raies entre les mesures avec et sans contrôle.

Comme la raie fondamentale du bruit de soufflante a une fréquence assez élevée et elle émerge nettement du bruit de fond large bande, sa réduction par contrôle actif est bien audible même si le niveau du bruit reste conséquent après contrôle.

Les résultats du contrôle actif du bruit de soufflante obtenus au sol sont très satisfaisants ; ils conduisent à une atténuation très supérieure à celle permise par les dispositifs passifs.



Figure 1.17 : Le banc d'essai du bruit de soufflante

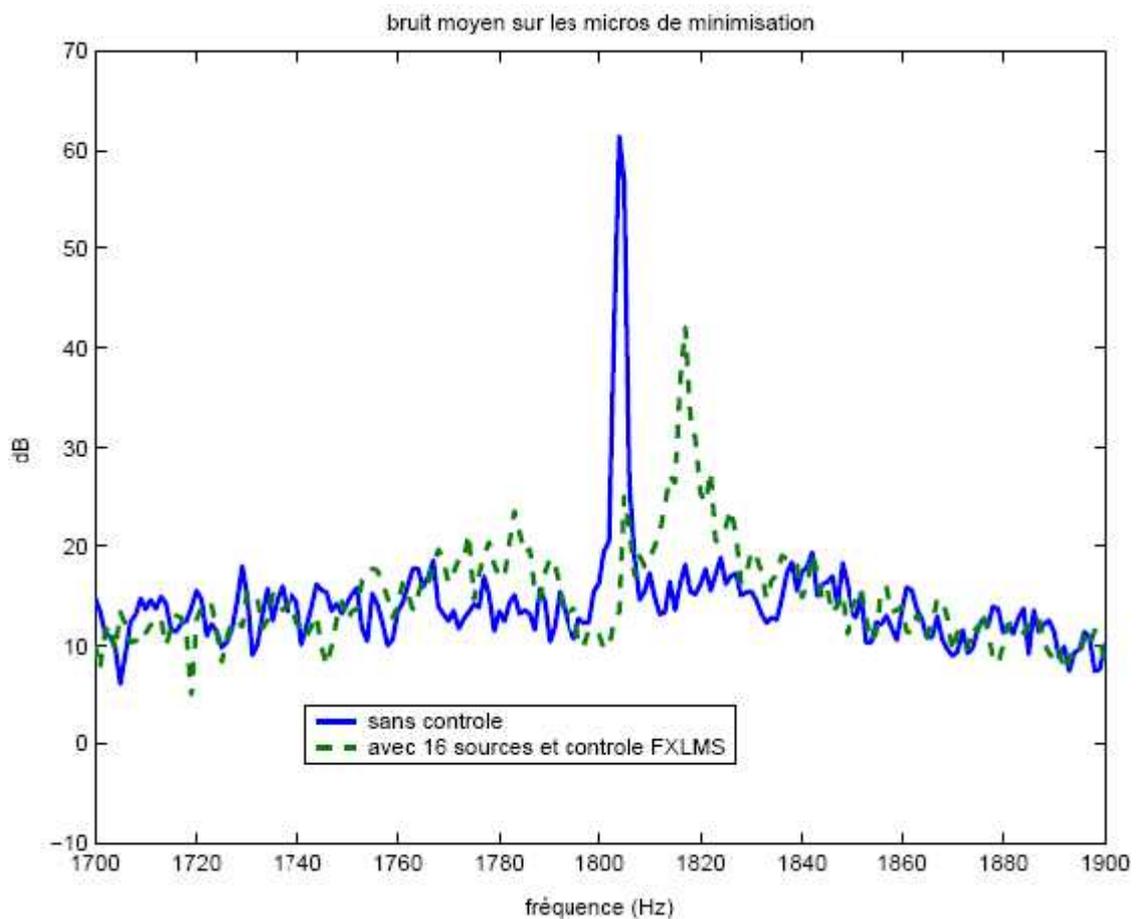


Figure 1.18 : Contrôle actif du bruit de soufflante sur 16 microphones extérieurs

### 1-11-4- Ecrans anti-bruit actifs :

Les problèmes de bruit au voisinage des aéroports, des voies ferrées et des autoroutes ou tout simplement en ville font que l'on peut s'interroger sur la possibilité d'isoler certaines zones à l'aide d'écrans antibruit actifs.

Compte tenu des ordres de grandeur, on peut estimer le nombre de points de minimisation (et le nombre de sources secondaires) nécessaire à deux ou trois par longueur d'onde pour qu'un écran antibruit actif ait le même effet qu'un écran passif.

L'écran actif ne peut par conséquent avoir d'intérêt que pour des bruits intenses à basse et très basse fréquence, vouloir isoler une zone de bruits large bande tels que ceux en provenance des avions ou des voitures n'aurait pas de sens car le maillage de haut-parleurs à utiliser s'apparenterait à un mur.

La mise au point d'un écran actif, même destiné aux basses fréquences, pose donc un certain nombre de problèmes accentués par le fait de se trouver en extérieur avec de larges fluctuations de température, d'orientation et de vitesse du vent.



Figure 1.19 :L'écran actif de Lyon St Exupéry

La figure 1.19 montre un dispositif anti-bruit installé à proximité de l'aérodrome de Lyon St Exupéry.

Un premier microphone qui reçoit le bruit en provenance des pistes fournit un signal de référence pour les sources secondaires disposées derrière. La réduction du bruit sur des

microphones de minimisation en aval permet, moyennant quelques aménagements des algorithmes de contrôle, d'obtenir derrière l'antenne une zone où le bruit est atténué dans la bande 50-300 Hz.

Les écrans actifs constituent un thème de recherche intéressant avec de nombreuses difficultés théoriques et pratiques à surmonter.

### 1-12- L'écho acoustique :

L'écho acoustique est un type particulier du bruit causé par la réflexion des ondes du son sur des parois ou des obstacles situés dans le milieu de propagation.

L'écho acoustique est un problème rencontré en télécommunication, notamment dans les applications de téléconférence. L'écho provient du passage du signal envoyé à travers un canal, par exemple une salle, pour le cas de la téléphonie mains libres. Il est donc désirable de pouvoir éliminer cet écho à la réception du signal.

L'annulation de l'écho requiert la connaissance d'un modèle pour le canal à égaliser. Toutefois, la réponse impulsionnelle du canal en question peut varier en fonction du temps.

Le filtrage adaptatif est l'approche la plus appropriée dans ce cas pour estimer les paramètres variables du canal.

L'algorithme adaptatif LMS (ou aussi NLMS ou bien RLS), basée sur le gradient de fonction de coût, est un algorithme très utilisé dans le domaine, surtout pour sa simplicité d'implantation.

La figure ci dessous présente un schéma du principe d'annulation d'écho

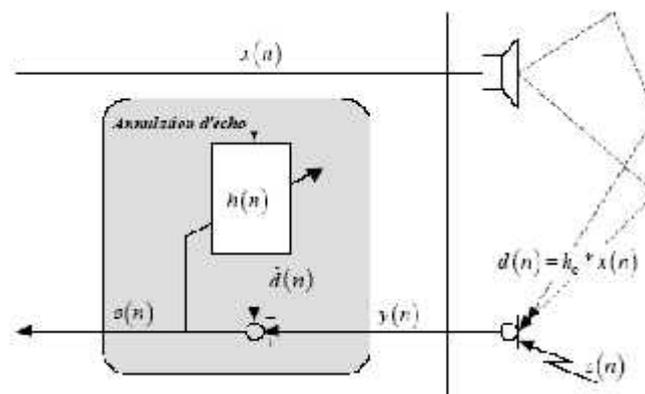


Figure 2.15 : principe d'annulation d'écho acoustique

### 1-13- Conclusion :

Le contrôle actif de bruit consiste à atténuer des bruits indésirables en générant un anti-bruit en opposition de phase. Tout le problème est de contrôler avec précision l'anti-bruit, malgré les incertitudes dans le système.

Les champs acoustiques sont d'autant plus faciles à contrôler qu'on s'intéresse aux basses fréquences parce que le nombre de transducteurs nécessaires pour atténuer un bruit dans une zone donnée augmente rapidement avec la fréquence.

Les actionneurs secondaires permettent un contrôle d'autant plus efficace que le bruit à contrôler est prédictible (périodique ou à bande étroite). Avec un bruit imprédictible il faut disposer d'une prise d'information sur le bruit en amont pour espérer un contrôle efficace ; les retards présents dans les fonctions de transfert secondaires pénalisent alors l'efficacité du contrôle.

En pratique, des algorithmes de contrôle adaptatifs sont souvent nécessaires pour un contrôle efficace et robuste ; l'algorithme FXLMS (Filtered-X Least Mean Square), RLS (moindres carrés récursif à référence filtrée) permet dans de nombreux cas un contrôle quasi optimal.

Dans des cas complexes, le contrôle actif permet une réduction du bruit de l'ordre de 20 dB. Malheureusement cette réduction souvent obtenue à basse fréquence ne se traduit pas toujours par une réduction importante du bruit total tel qu'il est perçu.

Le système ANC a prouvé son efficacité dans plusieurs domaines d'application tels que : l'aéronautique, l'automobile, l'industrie...etc.

L'écho acoustique est un type particulier du bruit qui cause un vrai problème dans la télécommunication et dont l'annulation peut être réalisé par le filtrage adaptatif . Les mêmes algorithmes utilisés pour le contrôle actif de bruit peuvent être appliqués pour annuler l'écho.

## Chapitre 02

# Identification des modèles

### **2-1- Introduction :**

Identifier un système revient à trouver le modèle mathématique capable de décrire ses caractéristiques temporelles et fréquentielles.

Depuis longtemps, l'hypothèse de linéarité a été privilégiée supposant que la partie non linéaire du système, quand elle existe, est négligeable.

Depuis quelques dizaines d'années et grâce au développement de nouveaux calculateurs très puissants, les structures non linéaires ont été de plus en plus utilisées pour modéliser les systèmes physiques. Grâce à cette connaissance croissent de plusieurs modèles mathématiques non linéaires.

L'identification a connu durant la dernière décennie un fort engouement dans les domaines aussi variés que la physique, les statistiques ou la médecine.

Ce chapitre a pour but de donner les principes de base de l'identification des modèles dynamiques des procédés, il présente les principaux types de modèles stochastiques et leur utilisation dans les filtres numériques.

### **2-2- Définition :**

L'identification, c'est l'opération de détermination des caractéristiques dynamiques d'un procédé dont la connaissance est nécessaire pour la conception et la mise en œuvre d'un système.

L'identification a pour but d'estimer les paramètres d'un modèle mathématique qui reproduit le comportement entrée /sortie d'un système donné. Ce modèle mathématique décrit le système à l'aide d'une expression mathématique reliant les différentes variables du système. Plusieurs caractéristiques peuvent être attribuées à un modèle mathématique : il est dit à temps continu ou à temps discret, déterministe ou stochastique, linéaire ou non linéaire. Ces modèles sont beaucoup utilisés dans le domaine de la physique et de l'ingénierie.

### **2-3- types de modèles pour l'identification :**

la notion du modèle mathématique d'un système ou d'une phénomène est un concept fondamental. En général, il existe une multitude de types de modèles, chaque type de modèle étant destiné à une application particulière :

### **2-3-1- Les modèles de connaissance (basés sur les lois de physique, chimie,...etc) :**

Elles permettent une description assez complète des systèmes et sont utilisés pour la simulation et la conception des procédés.

Ces modèles sont en général extrêmement complexes et rarement utilisables pour l'automatique (méthode qui demande une connaissance approfondie du système).

### **2-3-2- Les modèles dynamiques :**

Elles donnent la relation entre les variations d'entrée d'un système et les variations de sortie.

Il y a deux types des modèles dynamiques :

- les modèles non paramétriques (exemple : réponse fréquentielle, réponse à un échelon)
- les modèles paramétriques (exemple : fonction de transfert, équation différentielle aux différences).

#### **2-3-2-1- L'identification non paramétriques :**

La méthode d'identification classique utilise des modèles non paramétriques de type « réponse à échelon » pour obtenir des modèles paramétriques continues et étendue pour l'identification des modèles échantillonnés. La performance dynamique peut être meilleur, mais cette méthode possède plusieurs inconvénients tels que :

- signaux test d'amplitude importante (rarement tolérés par les installations industrielles).
- Précision réduite.
- Influence néfaste des perturbations.
- Procédure longue.

#### **2-3-2-2- L'identification paramétrique :**

Le principe d'une identification paramétrique est d'extraire un modèle mathématique à partir d'observations. Le modèle doit permettre de calculer la sortie du procédé  $y$  à n'importe quel instant  $t$  si les conditions initiales du système sont connues. Pour cela on peut se servir des valeurs des entrées aux instants présents et précédents ( $u(t)$ ,  $u(t-1)$ , ...) et des valeurs précédentes de la sortie ( $y(t-1)$ ,  $y(t-2)$ , ...) dans le cas d'un modèle régressif.

Les calculateurs numériques permettent de mettre en place des algorithmes d'estimation automatique des paramètres des modèles échantillonnés des procédés.

L'identification des modèles paramétriques échantillonnés permet (par simulation) d'obtenir des modèles non paramétriques type réponse à un échelon ou réponse fréquentielle, avec une précision meilleur que lors d'une approche directe et en utilisant des signaux d'excitation extrêmement faibles. Le fait que ces méthodes d'identification peuvent opérer avec des signaux extrêmement faibles consiste une qualité très appréciable en pratique.

L'identification paramétrique conduit à des modèles d'utilisation très générale et offre de nombreux avantages par rapport aux autres approches.

Des algorithmes d'identification très performants, ayant une formulation adaptée aux problèmes d'identification temps réel et à leur mise en œuvre sur micro-ordinateur, ont été développés.

Cette approche moderne pour l'identification des modèles de procédé élimine tous les défauts des méthodes classiques et offre d'autres possibilités telles que :

- Suivi des variations des paramètres du procédé en temps réel, permettant un réajustement des régulateurs pendant le fonctionnement.
- Identification des modèles de perturbation.
- Modélisation des bruits « capteurs » en vue de leur suppression.
- Détection et mesure des fréquences de vibration.
- Analyse spectrale des signaux.

#### **2-4- Procédure de l'identification paramétrique:**

Pour obtenir un modèle consistant, il est important d'exciter le processus avec toutes les fréquences de sa plage de fonctionnement. Le signal d'entrée appliqué doit donc être riche en fréquences (posséder un large spectre). Lorsque le système possède plusieurs entrées/plusieurs sorties (MIMO), il est important d'appliquer des signaux décorrélés pour ne pas introduire de biais d'identification.

Il est important de respecter une procédure rigoureuse pour identifier un procédé :

- Détermination d'un protocole de test : propriétés statistiques des signaux d'entrée pour balayer toutes les fréquences intéressantes, le ratio (rapport) signal/bruit doit être suffisamment important et le nombre de points de mesures doit être significatif pour le test.
- Détermination de la structure du modèle : type de modèle, ordre et retard

- Identification : choix d'un algorithme pour trouver le modèle en minimisant les erreurs entre les mesures et le modèle.
- Validation du modèle : Réalisation de plusieurs tests de vérification. Il est nécessaire pour cette étape d'utiliser des mesures différentes de celles utilisées lors de l'identification.

La figure 2.1 donne une explication simplifiée des étapes suivies pour l'identification paramétrique.

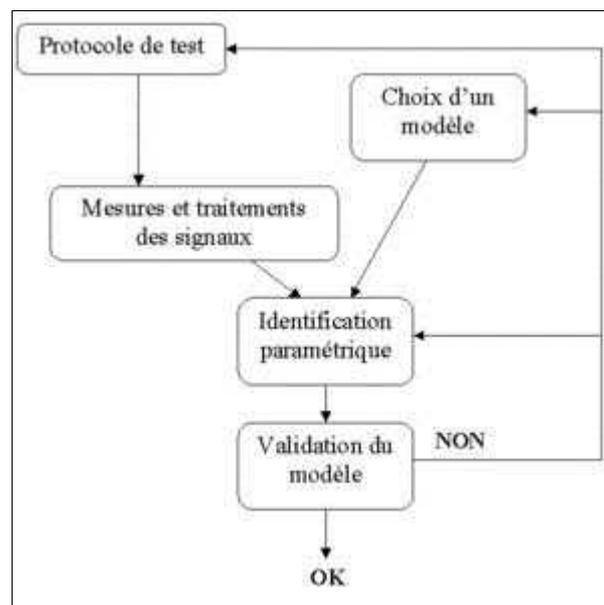


Figure 2.1 : Procédure de l'identification paramétrique:

D'autres approches sont également possibles, notamment en regardant les matrices de sous-espace d'un système (mais moins efficace que ci-dessus pour les systèmes non-linéaires).

Ceci peut ainsi facilement donner un modèle moins "théorique" et aider à l'amélioration du rendement, du contrôle ou de la prédiction (pour des valeurs d'action dans un système économique par exemple).

### 2-5- Estimation OFF LINE et estimation ON LINE:

Pour que l'efficacité d'un contrôleur adaptatif soit immédiate, il est important que l'identification se fasse sur un temps réel. Il existe (en relation avec le temps et l'espace mémoire) deux modes d'estimation :

### 2-5-1- Estimation Hors Line (OFF LINE):

c'est une estimation des valeurs des paramètres du modèle obtenu par identification où l'on stocke les grandeurs entrées/sorties, ce qui nécessite une grande capacité de mémoire, puis s'effectue le traitement en temps différé en faisant appel aux données stockées.

### 2-5-2- Estimation En Ligne (ON LINE) :

Cette méthode consiste à estimer les paramètres au fur et à mesure que l'on avance au terme de réponse, c'est à dire qu'à chaque échantillon nous avons nos paramètres calculés et adaptés aux nouvelles données, ceci se fait à l'aide des algorithmes récursifs pour une parfaite mise à jour continue des paramètres.

### 2-6- Algorithmes pour l'identification paramétrique :

L'identification des systèmes dynamiques non linéaires à partir d'un ensemble de données entrée/sortie est d'une importance fondamentale pour les applications pratiques puisque beaucoup de systèmes physiques possèdent des caractéristiques non linéaires.

Deux catégories d'algorithmes d'estimation paramétrique sont utilisés :

- les algorithmes non-récursifs vis-à-vis de temps qui découlent de l'algorithme de maximum de vraisemblance ou de l'algorithme des moindres carrés non-récursifs. Ce dernier est basé sur la minimisation de l'erreur quadratique moyen (EQM) ou sur son équivalent déterministe à savoir le critère des moindres carrés (MC)
- les algorithmes récursifs vis-à-vis de temps : ce sont des algorithmes en ligne traitant directement les mesures d'entrée/sortie. Ils sont appelés adaptatifs puisqu'ils permettent l'ajustement du modèle aux données. Parmi ces méthodes, on trouve l'algorithme des moindres carrés récursifs, l'algorithme LMS.....

### 2-7- Modèles stochastiques pour l'estimation paramétrique:

Un signal est souvent modélisé comme la réponse d'un système à un autre signal de caractéristiques plus simples.

L'idée essentielle est qu'une suite temporelle  $y(n)$  dont les observations sont très corrélées peut être générée à la sortie d'un filtre linéaire qui a pour entrée une suite de nombres statistiquement indépendants.

L'entrée du filtre est souvent supposée être un bruit blanc gaussien de moyenne nulle avec une variance constante:

$$E \left\{ x(n)x^*(n-k) \right\} = \begin{cases} \sigma^2 & k=0 \\ 0 & k \neq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$



Figure 2.2: Génération d'un signal aléatoire corrélé.

L'estimation spectrale paramétrique suppose que ce signal suit un modèle donné. Ce modèle comporte un certain nombre de paramètres qui sont adaptables en fonction du signal observé.

Il existe plusieurs modèles linéaires stochastiques classiques:

- Modèle dit à moyenne ajustée (MA),
- Modèle autorégressif (AR),
- Modèle ARMA.

### 2-7-1- Le modèle à moyenne ajustée (MA) :

Le type de filtre le plus simple est le filtre à réponse impulsionnelle finie (RIF), associée au modèle dit à moyenne ajustée (MA), et défini par:

$$G(z) = \sum_{l=1}^{Lg} g_l^* z^{-l}$$

ou encore dans le domaine temporel par:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{Lg} g_l^* x(n-l)$$

où les coefficients  $g_l^*$  définissent la réponse impulsionnelle du filtre.

La réponse du filtre de modèle MA a une longueur finie.

### 2-7-2- Le modèle autorégressif (AR) :

A un filtre à réponse impulsionnelle infinie (RII) correspond un modèle autorégressif (AR). La fonction de transfert en  $z$  s'écrit:

$$A(z) = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^{La} a_i^* z^{-i}}$$

et dans le domaine temporel l'équation de récurrence associée:

$$y(n) = x(n) + \sum_{l=0}^{La} a_l^* y(n-l)$$

### 2-7-3- Le modèle ARMA :

Un signal ARMA est obtenu 'a l'aide d'un filtre de fonction de transfert:

$$H(z) = \frac{\sum_{l=1}^{Lg} g_l^* z^{-l}}{1 - \sum_{i=1}^{La} a_i^* z^{-i}} = G(z)A(z)$$

Dans le domaine temporel:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{Lg} g_l^* x(n-l) + \sum_{l=0}^{La} a_l^* y(n-l)$$

### 2-8- Conclusion :

Dans ce chapitre, les éléments de base de l'identification des modèles stochastiques ont été présentés. La méthode d'identification qui nous intéresse c'est l'identification paramétrique des modèles dynamiques qui est utilisée dans l'adaptation des filtres numériques.

## Chapitre 03

# Le filtrage numérique et le filtrage adaptatif

### 3-1- Introduction :

Le filtrage adaptatif qui est un type du filtrage numérique représente aujourd'hui une part importante de traitement des signaux aléatoires. L'évolution des processus de traitement numérique du signal « DSP » a rendu leur réalisation aisée, et leur permet d'agir sur des signaux rapides, à large spectre. Leur principal intérêt consiste à éliminer un bruit dont les caractéristiques évoluent dans le temps, ce qui n'est pas envisageable avec les structures non adaptatives ; cependant, on les rencontre également dans les applications de prédiction de signal ou d'identification de processus.

On se base dans ce chapitre à définir le filtrage numérique et ces principales classes et ses propriétés. Dans la deuxième partie, on va étudier le filtrage adaptatif et ses algorithmes les plus fréquemment utilisés.

### 3-2- Le filtrage numérique :

#### 3-2-1- Définition d'un filtre numérique :

Un filtre numérique est constitué d'un groupement de circuits logiques astreints à un processus de calcul (ou algorithme) qui confère à ce filtre une fonction déterminée (passe-bas, passe-haut, passe-bande, réjecteur de bande, intégrateur, différentiateur, ...).

Le calcul porte sur une séquence (ou suite) de nombres introduites à son entrée et fournit une séquence numérique modifiée, c'est-à-dire "filtrée" ou traitée, à sa sortie.

Les éléments physiques (résistance, capacité, inductance, amplificateurs opérationnels) sont en quelque sorte transposés en éléments logiques (des registres à décalage, multiplieurs, additionneurs...).

Si l'on compare les filtres analogiques et numériques, on peut observer des analogies et des différences :

- ❖ Analogie de comportement : c'est par analogie avec les filtres analogiques que l'on conçoit les filtres numériques et c'est à leurs réponses en amplitude et en phase que l'on compare celles des filtres numériques, tout au moins dans un premier temps.
- ❖ Différence fondamentale de structure : les filtres numériques sont implantés sur des processeurs standards ou dédiés (processeurs de traitement du signal); l'utilisation d'un micro-ordinateur n'a de sens que si les phénomènes mis en jeu ne sont pas trop rapides.

Les filtres numériques ont deux applications principales :

- séparation de signaux combinés (démultiplexage).
- restauration de signaux distordus.

### 3-2-2- Propriétés des filtres numériques:

Un filtre numérique peut être représenté de la façon suivante :

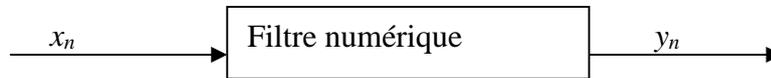


Figure 3.1: représentation du filtre numérique

L'entrée  $x_n$  est l'excitation, la sortie  $y_n$  est la réponse.

Pour définir un filtre numérique, on doit donner certaines règles de correspondance entre l'entrée et la sortie. Soit  $R$  la relation correspondante.

#### 3-2-2-1- Invariance temporelle :

Un filtre numérique est invariant dans le temps si les paramètres internes qui le définissent sont invariants dans le temps. Cela signifie que la réponse à la même excitation sera toujours la même quelque soit l'instant d'application de cette excitation.

Si on décale dans le temps le signal d'entrée d'une durée  $n_0 T_e$ , un nombre entier de pas d'échantillonnage, le signal de sortie est décalé de la même durée.

#### 3-2-2-2- Causalité :

Un filtre numérique est dit causal si sa réponse à un instant spécifique est indépendante des valeurs futures de l'excitation. Cela se traduit par

$R[x_{1,n}] = R[x_{2,n}]$  quelque soit  $n \geq k$ , pour toutes entrées  $x_1$  et  $x_2$  satisfaisant :

$$x_{1,n} = x_{2,n} \quad n \geq k$$

$$x_{1,n} = 0 \quad n < k$$

#### 3-2-2-3- Linéarité :

Un filtre numérique est dit linéaire s'il satisfait à :

$$R[x_{1,n} + x_{2,n}] = R[x_{1,n}] + R[x_{2,n}]$$

Quelque soit  $\alpha, \beta, x_{1,n}, x_{2,n}$

### 3-2-3- représentation des filtres numériques :

Un filtre peut être représenté par :

#### 3-2-3-1- La réponse impulsionnelle :

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\infty} x(k)h(n-k)$$

on peut classer les filtres selon la durée de la réponse impulsionnelle :

– RIF (FIR : *finite impulse response*) :

Réponse Impulsionnelle finie :  $h(n) = 0$  pour  $n < 0$  et  $n > N$

– RII (IIR : *infinite impulse response*) :

Réponse impulsionnelle infinie :  $h(n) \neq 0 \forall n$

#### 3-2-3-2- L'équation aux différences (relation entrée-sortie) :

On distingue deux grands types de filtres : les filtres non récursifs et les filtres récursifs. Ils sont solutions d'équations récurrentes de la forme :

$$y(n) = \sum_i a_i x_{n-i} - \sum_j b_j y_{n-j}$$

**Les filtres récursifs (RII) :** la sortie  $y(n)$  dépend de l'entrée courante, des entrées précédentes et des sorties précédentes :

$$y(n) = \sum_i a_i x_{n-i} - \sum_j b_j y_{n-j}$$

d'où la transformé en z:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=0}^N a_i z^{-i}} = \frac{N(z)}{D(z)}$$

En pratique on a :  $N=M$ ,  $N$  est appelée l'ordre du filtre.

**Les filtres non récurrents (RIF):**

la sortie  $y(n)$  ne dépend que de l'entrée courante et des entrées précédentes :

$$y(n) = a_0 x(n) + a_1 x(n-1) + \dots + a_k x(n-k)$$

$$y(n) = \sum_i a_i x_{n-i}$$

d'où la transformé en  $z$  :

$$H(z) = \sum_{i=0}^M b_i z^{-i}$$

Un filtre à non récurrent ou filtre RIF possède une fonction de transfert polynomiale.

**3-3- Les filtres adaptatifs :****3-3-1- Définition :**

Les filtres adaptatifs sont des systèmes numériques appliqués sur des données bruitées afin d'obtenir une information utile à un certain instant  $t$ .

ces systèmes étant mis en œuvre dans trois configurations :

- Le filtrage c'est à dire l'extraction de cette information au temps  $t$  à partir des données bruitées mesurées jusqu'au temps  $t$  inclus.
- Le lissage qui utilisera aussi les données postérieures au temps  $t$ .
- La prédiction qui ne se sert que des données jusqu'au temps  $t-$  pour déduire l'information qui nous intéresse au temps  $t$ .

Un filtrage est rendu adaptatif si ses paramètres, les coefficients, sont modifiés selon un critère donné, dès qu'une nouvelle valeur du signal devient disponible. Ces modifications doivent suivre l'évolution des systèmes dans leur environnement aussi rapidement que possible. Le filtrage adaptatif est généralement associé avec un fonctionnement en temps réel.

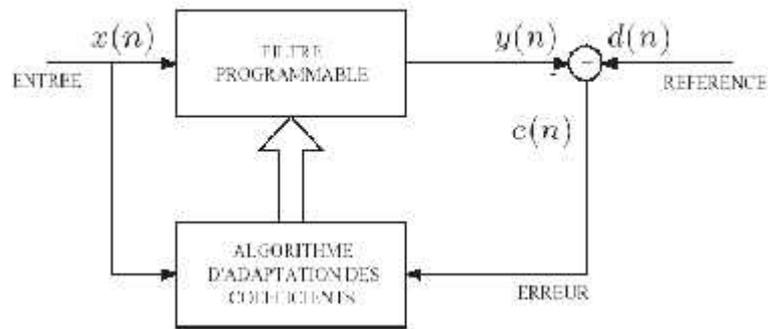


Figure 3.2: Principe d'un filtre adaptatif

Par rapport au filtrage classique le filtrage adaptatif comporte une mise à jour récursive des paramètres (coefficients) du filtre.

L'algorithme part de conditions initiales prédéterminées et modifie de façon récursive les coefficients du filtre pour s'adapter au processus.

### 3-3-2- Quelques notes historiques

- Le début d'une théorie sur l'estimation dans laquelle plusieurs tentatives sont faites pour minimiser une fonction d'erreur remonte à Galileo Galilei en 1632.
- L'origine de la théorie sur l'estimation linéaire est créditée à Gauss qui en 1795 inventa la méthode des moindres carrés.
- Les premières études utilisant l'erreur quadratique moyenne dans les processus stochastiques sont dues à Kolmogorov, Krein, et Wiener vers la fin des années 1930.
- Wiener formula (en temps continu) le problème de filtrage pour estimer un processus corrompu par du bruit.
- En 1947, Levinson formula le filtre de Wiener en temps discret.
- Swerling et Kalman, en 1958 et 1960 respectivement, furent les premiers à s'attaquer aux processus non stationnaires.
- Les premiers travaux sur les filtres adaptatifs ont commencé vers la fin des années 1950.
- L'un de ces premiers algorithmes est l'algorithme du gradient stochastique ou LMS (least-mean-square) conçu par Widrow et Hoff en 1959.
- Le LMS est très proche du concept d'approximation stochastique développé par Robbins et Monro en 1951 en statistiques.
- L'algorithme RLS (recursive least-squares) standard fût inventé par Plackett en 1950.
- La première version rapide du RLS fût développée par Morf en 1974.

### 3-3-3- Classification des filtres adaptatifs :

Les filtres adaptatifs peuvent être classés en fonction des choix qui sont faits sur les 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 .

### 3-3-4- Choix de l'algorithme :

Le choix de l'algorithme pour un filtre 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.
- 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 (problèmes d'implémentation en virgule fixe)..

### 3-3-5- Applications des filtres adaptatifs :

Le filtrage adaptatif est un outil puissant en traitement du signal, communications numériques, et contrôle automatique. Les applications sont diverses et présentent des caractéristiques variées.

on dispose d'une entrée  $x(n)$  ainsi que de la réponse désirée (référence)  $d(n)$  et l'erreur  $e(n)$ , qui est la différence entre  $d(n)$  et la sortie du filtre  $y(n)$ , sert à contrôler (adapter) les valeurs des coefficients du filtre. Ce qui différencie essentiellement les applications provient de la façon de définir la réponse désirée  $d(n)$ . On peut distinguer quatre grandes classes d'applications:

- l'identification de systèmes,
- la prédiction,
- la modélisation inverse,
- l'annulation d'interférences.

### 3-3-5- 1- Identification des systèmes :

$d(n)$  est la sortie du système que l'on souhaite identifier.

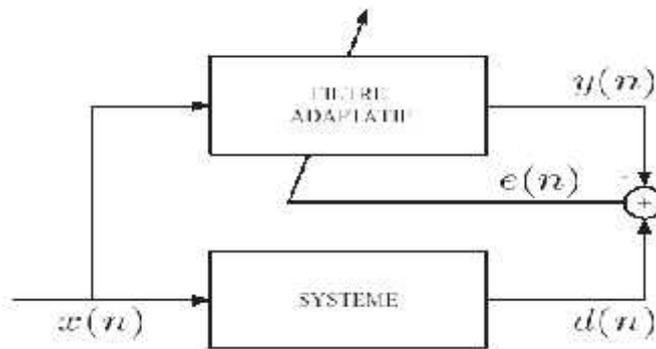


Figure 3.3: Identification d'un système.

### 3-3-5-2- Prédiction:

$d(n)$  est le signal à l'instant  $n$  et  $y(n)$  le signal prédit à partir du signal aux instants précédents  $[d(n-1), d(n-2), \dots]$ .

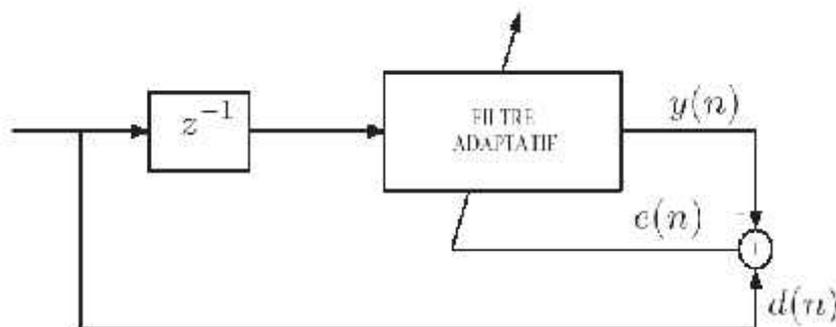


Figure 3.4: Principe de la prédiction.

### 3-3-5-3- Modélisation inverse (égalisation, déconvolution) :

$d(n)$  est l'entrée (retardée) du système que l'on cherche à inverser.

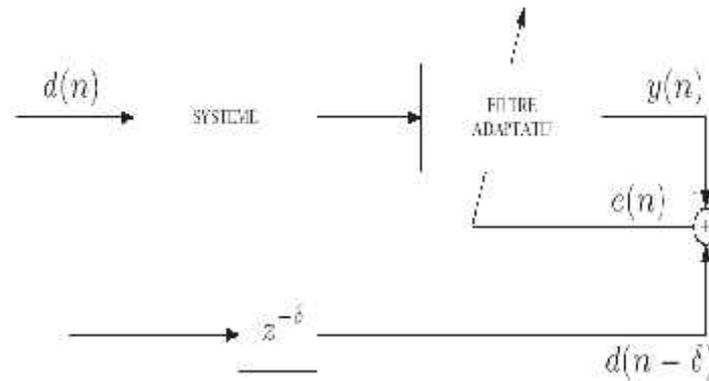


Figure 3.5: Principe de la modélisation inverse.

### 3-3-5-4- Annulation d'interférences (annulation d'écho, de bruit) :

$d(n)$  est un signal contenant le signal utile et les interférences à annuler.  $x(n)$  est le signal de référence dénué (ou presque) d'information et obtenu par un capteur proche des interférences.

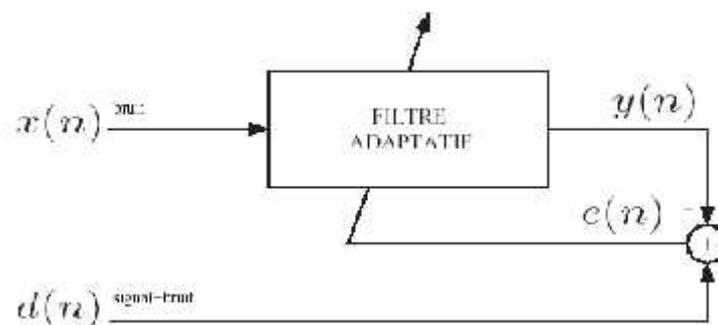


Figure 3.6: Annulation d'interférences.

### 3-4- Principaux algorithmes d'adaptation :

Dans cette partie, on va étudier les critères et les algorithmes d'optimisation les plus fréquemment rencontrés :

- Le critère des moindres carrés moyens (LMS :least mean squared) utilisant l'algorithme du gradient.
- Le critère des moindres carrés exactes utilisant l'algorithme des moindres carrés récursifs (RLS : recursive least square) .

**3-4-1- Critère des moindres carrés moyens :**

**3-4-1-1- Mise en équation :**

Notons  $h(k)$  le vecteur des  $n$  coefficients de la réponse impulsionnelle du filtre numérique

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

$x(k)$  le vecteur des  $n$  échantillons du signal d'entrée,

$$x(k)=[x_0(k) \quad x_1(k)\dots\dots\dots x_{n-1}(k)]^T \quad (2)$$

et  $e(k)$  le signal d'erreur,  $e(k)= y(k)- \hat{y}(k)$  (3)

$$e(k)= y(k)- h^T(k) x(k) \quad (4)$$

l'optimisation consiste à minimiser le critère de coût  $J(k)$ , choisi comme étant la somme de carrés de l'erreur :

$$J(k)=\sum_{i=1}^k [y(i)-h^T(k)x(i)]^2 \quad (5)$$

On recherche alors le vecteur des coefficients  $h(k)$  qui minimise  $J(k)$ , ce qui revient à annuler la dérivée de  $J(k)$  par rapport au vecteur  $h(k)$ , soit :

$$\frac{dJ(k)}{dh(k)}=0 \quad (6)$$

On obtient, en remplaçant  $J(k)$  par son expression :

$$2\sum_{i=1}^k [y(i)-h^T(k)x(i)]x(i)=0 \quad (7)$$

On obtient l'expression suivante :

$$\sum_{i=1}^k x^T(i)y(i)=h^T(k)\sum_{i=1}^k x(i)x^T(i) \quad (8)$$

Dans laquelle on peut sortir le vecteur optimum des coefficients du filtre :

$$h^T(k)=\frac{\sum_{i=1}^k x^T(i)y(i)}{\sum_{i=1}^k x(i)x^T(i)} \quad (9)$$

Cette expression fait apparaître les matrices d'autocorrélation  $C_{xx}(k)$  du signal d'entrée, et d'intercorrélation  $C_{yx}(k)$ , entre le signal d'entrée et le signal de référence. Ces matrices sont de dimensions  $(n,n)$ .

$$C_{xx}(k) = \sum_{i=1}^k x(i)x^T(i) \quad , \quad C_{yx}(k) = \sum_{i=1}^k x^T(i)y(i)$$

L'écriture matricielle du vecteur optimum des coefficient est ainsi :

$$h^T(k)_{opt} = C_{yx}(k) C_{xx}^{-1}(k) \quad (10)$$

On recherche une écriture récursive des coefficients permettant d'obtenir le vecteur  $h(k)$  à partir du vecteur obtenu une période d'échantillonnage plus tôt  $h(k-1)$ .

Commençons, pour cela, par formuler l'écriture récursive des matrices d'autocorrélation et d'intercorrélation précédentes :

$$C_{xx}(k) = C_{xx}(k-1) + x(k) x^T(k) \quad (11)$$

$$C_{yx}(k) = C_{yx}(k-1) + x^T(k) y(k) \quad (12)$$

Remplaçons  $C_{yx}$  par son écriture dans l'expression du vecteur des coefficients  $h(k)$  dans (10):

$$h^T(k) = C_{yx}(k) C_{xx}^{-1}(k)$$

soit: 
$$h^T(k) = [C_{yx}(k-1) + x^T(k)y(k)] C_{xx}^{-1}(k) \quad (13)$$

or, compte tenu de fait que: 
$$C_{yx}(k-1) = h^T(k-1) C_{xx}(k-1) \quad (14)$$

on peut écrire :

$$h(k) = C_{xx}^{-1}(k) [C_{xx}(k-1) h(k-1) + y(k) x^T(k)] \quad (15)$$

soit, en remplaçant  $C_{xx}(k-1)$  par l'expression présentée quelques lignes plus tôt :

$$h(k) = C_{xx}^{-1}(k) [C_{xx}(k) - x(k)x^T(k) h(k-1) + y(k) x^T(k)] \quad (16)$$

ou encore :

$$h(k) = h(k-1) + C_{xx}^{-1}(k) [y(k)x(k) - x(k)x^T(k) h(k-1)] \quad (17)$$

par conséquent, la relation de mise à jour récursive des coefficients de filtre s'écrit :

$$h(k) = h(k-1) + C_{xx}^{-1}(k)x(k)[y(k) - x^T(k)h(k-1)] \quad (18)$$

avec :

$$y(k) - x^T(k)h(k-1) = e(k)$$

le terme  $e(k)$  représente l'erreur à priori, car elle est calculée avec les coefficients de l'instant d'échantillonnage précédent.

En pratique, bien souvent, la complexité de calcul de  $h(k)$  est incompatible avec les contraintes « temps réel » de l'application.

On se permet alors de remplacer le terme  $C_{xx}^{-1}$  par  $\mu I$  avec :

$\mu$  : scalaire d'adaptation

$I$  : matrice identité

Dans ce cas :

$$h(k) = h(k-1) + \mu x(k)e(k) \quad (19)$$

Il ne s'agit plus du critère des moindres carrés exactes, mais des moindres carrés moyens.

### 3-4-1-2- Algorithme de gradient, critère LMS :

L'algorithme du gradient se réduit aux équations suivantes :

$$e(k) = y(k) - h^T(k-1)x(k) \quad (20)$$

$$h(k) = h(k-1) + \mu x(k)e(k) \quad (21)$$

#### a- Choix du scalaire d'adaptation :

##### Stabilité de l'algorithme :

On peut supposer l'algorithme stable si l'erreur calculée à posteriori est inférieure ou égale à l'erreur à priori. Soit :

$$e(k) = h(k) - h_{opt} \quad (22)$$

$$e(k+1) = h(k+1) - h_{opt} \quad (23)$$

si le système est stable:

$$E[e(k+1)] < E[e(k)] \quad (24)$$

avec :

$$e(k+1) = h(k) + \mu x(k+1)e(k) - h_{opt} \quad (25)$$

$$E[e(k+1)] = E[h(k) + \mu x(k+1)[y(k+1) - h^T(k)x(k+1)] - h_{opt}] \quad (26)$$

nous obtenons après quelques calculs :

$$E[x^2(k+1)] = E[x^2(k)] - \mu E[x^T(k)h(k-1)]^2 \quad (27)$$

par conséquent, la condition permettant d'obtenir  $E[x^2(k+1)] < E[x^2(k)]$ , s'écrit :

$$E[x^2(k+1)] < E[x^2(k)] \quad (28)$$

avec pour un signal centré :

$$E[x^2(k)] = n \sigma_x^2 \quad (29)$$

ce qui donne comme condition de stabilité sur le scalaire d'adaptation :

$$0 < \mu < \frac{2}{n \sigma_x^2} \quad (30)$$

le choix effectif de  $\mu$  résulte ensuite d'un compromis entre la rapidité d'adaptation, d'autant meilleure que  $\mu$  est élevé, et la puissance de l'erreur résiduelle également proportionnelle à  $\mu$ .

**b- Vitesse d'adaptation, constante de temps du filtre :**

On admettra, pour constante de temps la plus faible, donc apportant la convergence la plus rapide au filtre, l'expression :  $T_{min} = n T_e$

Avec :

- n : nombre de coefficients du filtre ;
- $T_e$  : période d'échantillonnage.

**Remarque :**

Le nom d'algorithme du gradient, associé à ce critère, provient du fait que le gradient du carré de l'erreur est proportionnel au terme  $x(k)e(k)$ .

En effet :

$$e^2(k) = y^2(k) - 2x^T(k)h(k-1)y(k) + [x^T(k)h(k-1)]^2 \quad (31)$$

soit :

$$\frac{\partial e^2(k)}{\partial h(k-1)} = -2x^T(k)[y(k) - x^T(k)h(k-1)] \quad (32)$$

$$\frac{\partial e^2(k)}{\partial h(k-1)} = -2x^T(k)e(k) \quad (33)$$

### 3-4-2- Algorithme des moindres carrés récursifs RLS, critère des moindres carrés exactes :

La différence essentielle que présente cet algorithme vis à vis de l'algorithme LMS vient du fait qu'il utilise l'information contenue dans les précédents échantillons du signal d'entrée. Le résultat est une diminution du temps de convergence par rapport à un filtre adaptatif LMS de même ordre. Par contre, cette amélioration s'obtient au prix d'une complexité et d'un temps de calcul nettement augmenté.

#### 3-2-1-Mise en équation :

Reprenons l'étude à partir du système d'équation suivant, précédemment décrit :

$$e(k+1) = y(k+1) - h^T(k)x(k+1)$$

$$h(k) = h(k-1) + C_{xx}^{-1}(k)x(k) [y(k) - x^T(k)h(k-1)]$$

La matrice de covariance  $C_{xx}^{-1}$  peut également être mise à jour par récurrence en utilisant le lemme d'inversion suivant :

$$A = B + CDC^T$$

$$A^{-1} = B^{-1} C [C^T B^{-1} D^{-1}]^{-1} C^T B^{-1}$$

Soit :

$$C_{xx}(k) = C_{xx}(k-1) + x(k)x^T(k)$$

En considérant les analogies :

$$B = C_{xx}(k-1)$$

$$C = x(k)$$

$$D = I$$

On obtient:

$$C_{xx}^{-1}(k) = C_{xx}^{-1}(k-1) \frac{C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)}{1 + x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} \quad (34)$$

et en définissant le gain d'adaptation :

$$g(k) = \frac{C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}{1 + x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} \quad (35)$$

on obtient :

$$C_{xx}^{-1}(k) = C_{xx}^{-1}(k-1) - g(k)x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1) \quad (36)$$

les coefficients peuvent également être mis à jour à l'aide du gain d'adaptation  $g(k)$ , variant dans le temps

$$h^T(k) = C_{yx}(k)C_{xx}^{-1}(k) \quad (37)$$

soit:

$$h^T(k) = C_{yx}(k-1)C_{xx}^{-1}(k) + x^T(k)y(k)C_{xx}^{-1}(k) \quad (38)$$

en remplaçant  $C_{xx}^{-1}(k)$  par son expression, on obtient :

$$h^T(k) = C_{yx}(k-1)C_{xx}^{-1}(k-1) - C_{yx}(k-1)C_{xx}^{-1}(k-1)g(k)x^T(k) + x^T(k)y(k)C_{xx}^{-1}(k) \quad (39)$$

$$h^T(k) = h^T(k-1) - h^T(k-1)g(k)x^T(k) + x^T(k)y(k)C_{xx}^{-1}(k) \quad (40)$$

l'expression du gain d'adaptation peut être modifiée comme suit :

$$g(k) + g(k)x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)x(k) = C_{xx}^{-1}(k-1)x(k) \quad (41)$$

$$\text{soit : } g(k) = C_{xx}^{-1}(k)x(k)$$

on obtient finalement, en reportant entre cette expression dans celle de  $h^T(k)$  :

$$h^T(k) = h^T(k-1) - h^T(k-1)g(k)x^T(k) + g^T(k)y(k) \quad (42)$$

soit :

$$h(k) = h(k-1) + g(k)[y(k) - h^T(k-1)x(k)] \quad (43)$$

l'algorithme récursif des moindres carrés exacts RLS se résume aux équations suivantes :

$$\begin{cases} g(k) = \frac{C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}{I + x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} \\ C_{xx}^{-1}(k) = C_{xx}^{-1}(k-1) - g(k)x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1) \\ h(k) = h(k-1) + g(k)[y(k) - h^T(k-1)x(k)] \\ e(k) = y(k) - h^T(k-1)x(k) \end{cases} \quad (44)$$

### 3-4-2-2- mise en oeuvre:

pour cela, il est nécessaire d'initialiser la matrice  $C_{xx}^{-1} = kI$ , où  $I$  est la matrice identité  $(n,n)$  et  $k$  un coefficient assez élevé pour assurer une convergence rapide de l'algorithme.

Si on ne dispose pas d'informations à priori sur les coefficients du filtre, ce qui est généralement le cas, alors  $h(k)=0$ . il suffit ensuite de calculer pour chaque période d'échantillonnage :

- Le gain d'adaptation :  $g(k) = \frac{C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}{1+x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}$
- L'erreur à priori :  $e(k) = y(k) - h^T(k-1)x(k)$
- Le vecteur des coefficients :  $h(k) = h(k-1) + g(k)[y(k) - h^T(k-1)x(k)]$
- La matrice d'autocorrélation :  $C_{xx}^{-1}(k) = C_{xx}^{-1}(k-1) - g(k)x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)$

### 3-4-2-3- Utilisation du facteur d'oubli :

L'algorithme précédent s'adapte aux signaux stationnaires. Le gain d'adaptation est décroissant et prend rapidement une faible valeur qui ne permet plus au filtre de s'adapter efficacement aux variations statistiques du signal d'entrée.

D'autres méthodes sont envisageables quant à l'évolution du gain d'adaptation, afin de satisfaire une adaptation correcte pour des signaux plus ou moins fortement non stationnaires, elles consistent à faire intervenir un facteur supplémentaire appelé « facteur d'oubli ».

Ce coefficient est appelé facteur d'oubli car il permet d'influencer la mémoire de l'algorithme. Il pourra être choisi de façon à suivre les variations statistiques de l'entrée dans le cas d'un signal non stationnaire.

$$0 < \lambda < 1$$

Le critère minimisé sera :

$$J(k) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda^{n-i} |e(i)|^2 \tag{45}$$

l'algorithme récursif des moindres carrés est alors modifié de la façon suivante, qui consiste à calculer pour chaque période d'échantillonnage :

- $g(k) = \frac{\lambda^{-1} C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}{1 + \lambda^{-1} x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}$
- $e(k) = y(k) - h^T(k-1)x(k)$

$$- \quad h(k) = h(k-1) + g(k)[y(k) - h^T(k-1)x(k)]$$

$$- \quad C_{xx}^{-1}(k) = \{I - g(k)x^T(k)\}C_{xx}^{-1}(k-1)$$

**3-4-2-4-Choix du facteur d’oubli :**

□ **facteur d’oubli fixe:**  $\lambda(k) = \lambda = \text{cte}$

critère minimisé :  $J(k) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda^{n-i} |e(i)|^2$  (46)

choix courant :  $\lambda = 0.9 \text{ à } 0.99$

le coefficient produit une pondération décroissante avec l’ancienneté des échantillons. Ce choix convient aux variations lentes des caractéristiques du signal d’entrée.

□ **facteur d’oubli variable:**

$$\lambda(k) = \lambda(k-1) + 1 - \lambda(k-1)$$

choix courant :  $\lambda = 0.9 \text{ à } 0.99, \lambda = 0.9 \text{ à } 0.99$

critère minimisé :  $J(k) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda^{n-i}(i) |e(i)|^2$  (47)

$\lambda(k)$  peut tendre vers 1 pour  $k$  élevé, ce qui correspond à une pondération apportée uniquement sur les échantillons récents.

Ce choix convient aux signaux stationnaires et produit une accélération de la convergence en évitant une décroissance trop rapide du gain d’adaptation.

□ **facteur d’oubli maintenant une trace constante:**

L’objectif consiste à ajuster  $\lambda(k)$  à chaque pas d’échantillonnage afin de maintenir la trace de la matrice  $C_{xx}^{-1}(k)$  constante.

On évite ainsi au gain d’adaptation de tendre vers zéro, cette méthode correspond au filtrage des signaux fortement non stationnaires.

(k) se calcule à partir de l'équation suivante :

$$trace[C_{xx}^{-1}(k)] = \frac{1}{\lambda(k)} trace \left[ C_{xx}^{-1}(k) - \frac{C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)}{1+x^T(k)C_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} \right] \quad (48)$$

### 3-5- Conclusion :

le filtrage adaptatif un des plus importants concepts du DSP , la propriété de modifier les coefficient le donne une grande importance dans le traitement des signaux non stationnaires. Il représente une solution pour le problème de stationnarité rencontré dans le filtrage classique de weinner.

Le filtrage adaptatif utilise des algorithmes numériques récurrents et non récurrents pour le calcul et la modification de ces paramètres.

Un des plus utilisables critères utilisés par le filtrage adaptatif est le critères des moindres carrés, qui donne, par développement, l'algorithme des moindres carrés moyens (LMS :least mean square) et l'algorithme des moindres carrés récurrents (RLS : récurrente least square) qui sont les algorithmes les plus utilisables dans le contrôle actif du bruit.

## Chapitre 04

# Simulation et interprétation

## 4-1- Introduction

Dans beaucoup de situations, la statistique du bruit qui corrompt un signal n'est pas connue a priori, ou la puissance du bruit est plus grande que la puissance du signal désiré. Dans ces circonstances, on ne peut pas utiliser de techniques de filtrage traditionnelles tel que filtrage Weiner. Cependant, si c'est possible de rendre un enregistrement séparé du bruit seul, on peut utiliser une technique adaptative pour améliorer le signal.

Une application de cette annulation du bruit adaptative est dans le casque de la radio du pilote d'un avion à jet. Un moteur du jet peut produire des niveaux du bruit de plus de 140 dB. Comme la parole humaine normale se produit entre 30 et 40 dB, c'est clair que les techniques de filtrage traditionnelles ne travailleront pas.

Pour rendre effectif une technique adaptative, on place un microphone supplémentaire à l'arrière de l'avion pour enregistrer le bruit du moteur directement. En profitant des renseignements supplémentaires que ce microphone de référence nous donne, on peut améliorer le signal du pilote substantiellement.

Une approche ancienne pour implémenter l'annulation du bruit serait soustraire le signal du bruit référence directement du signal fondamental. Cependant, cette technique ne travaillera pas, parce que le bruit au microphone de référence ne sera pas exactement le même comme le bruit au microphone fondamental. Il y aura un délai qui correspond à la distance entre le primaire et microphones de référence. Aussi, les effets acoustiques inconnus, tel qu'un écho, ou le bruit pouvant se produire à travers le fuselage de l'avion.

Si on modélise la trajectoire de la source du bruit au microphone fondamental comme un système linéaire, on peut imaginer un algorithme adaptatif pour former un filtre FIR pour relier les caractéristiques acoustiques du canal. Si on applique ce filtre au bruit enregistré au microphone de référence alors, on peut être capables de soustraire dehors le bruit avec succès.

Nous avons utilisé deux algorithmes différents pour adapter le filtre, LMS et RLS. Ce sont des algorithmes itératifs qui prennent les coefficients du filtre en faisant des modifications légères pour chaque échantillon traité.

Dans ce chapitre, on montre les résultats de simulation par le logiciel MATLAB obtenus pour les deux algorithmes.

## 4-2- Résultats de simulation :

Dans la première partie de la simulation, on utilise un signal d'entrée sinusoïdal, car c'est plus facile de remarquer la convergence de l'algorithme et la reconstruction du signal original (plus facile à comparer) que l'utilisation d'un signal complexe.

On ajoute à notre signal un bruit blanc aléatoire, et on applique le contrôle actif adaptatif en utilisant la méthode RLS et LMS pour extraire l'information utile (notre signal de départ).

Dans la deuxième partie, on utilise un signal de parole préenregistré et on refait le même travail.

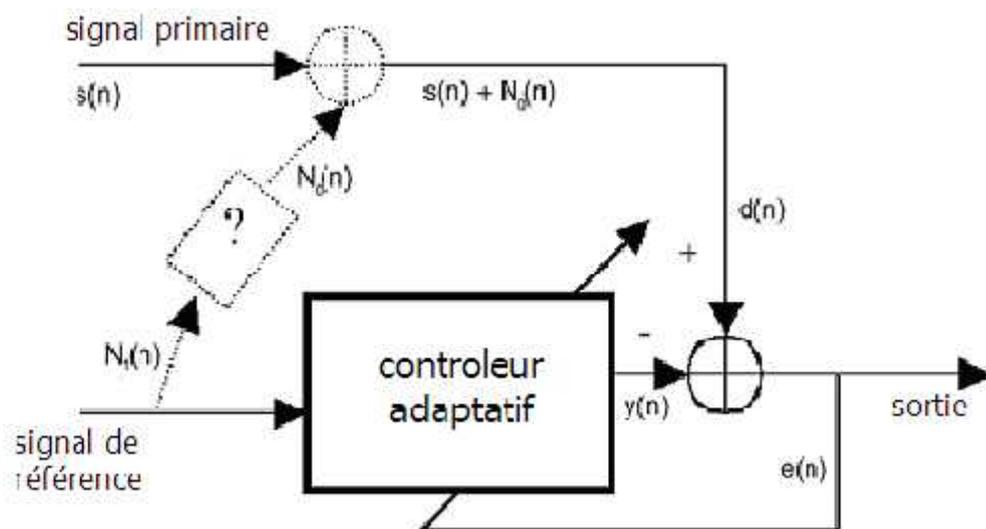


Figure 4.1 : schéma bloc d'un contrôleur adaptatif

### 4-2-1- Utilisation d'un signal d'entrée sinusoïdal :

On utilise comme signal d'entrée un signal sinusoïdal :  $x(t) = \sin\left(\frac{2\pi f t}{N^2}\right) \times 8$

de longueur  $N = 500$ , l'ordre de filtre est 8, et le gain est 1. On ajoute à ce signal un bruit blanc aléatoire, et on utilise les algorithmes d'adaptation pour extraire l'information utile.

Premièrement, on fait l'adaptation avec RLS, en utilisant les trois types de facteur f'oubli (facteur d'oubli constante, variable, et trace constante). On calcule pour chaque cas le rapport

signal sur bruit SNR qui est donné par la formule :  $SNR = \frac{W_s}{W_n}$

Le SNR est représenté avec une échelle logarithmique appelée décibels et noté dB.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} SNR$$

On représente pour chaque cas l'évolution des paramètres du filtre pour étudier la convergence, et aussi l'erreur quadratique moyenne MSE, qui est le carré de la différence entre le bruit ajouté

(ou bien enregistré par le microphone de détection pour le cas d'un son) et le bruit estimé par l'algorithme :  $MSE(i) = [N(i) - \hat{N}(i)]^2$

Après, on refait l'adaptation en utilisant l'algorithme LMS, en choisissant trois valeurs différentes de facteur d'adaptation  $\mu$ . finalement on fait la comparaison.

La forme du signal original est montrée dans la figure 4.2 :

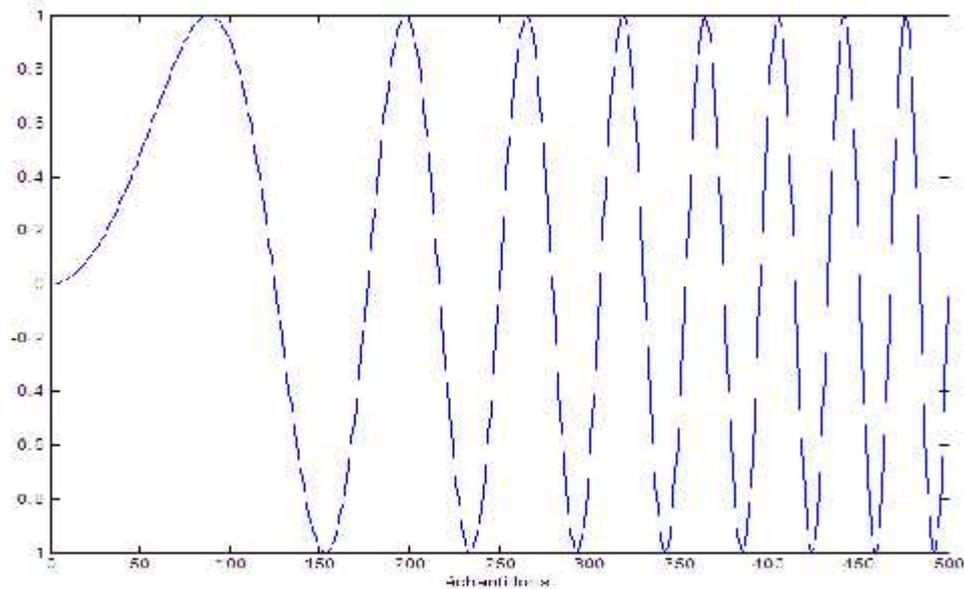


Figure 4.2 : Le signal original

On ajoute à ce signal un bruit blanc, dont la forme est montrée dans la figure 4.3

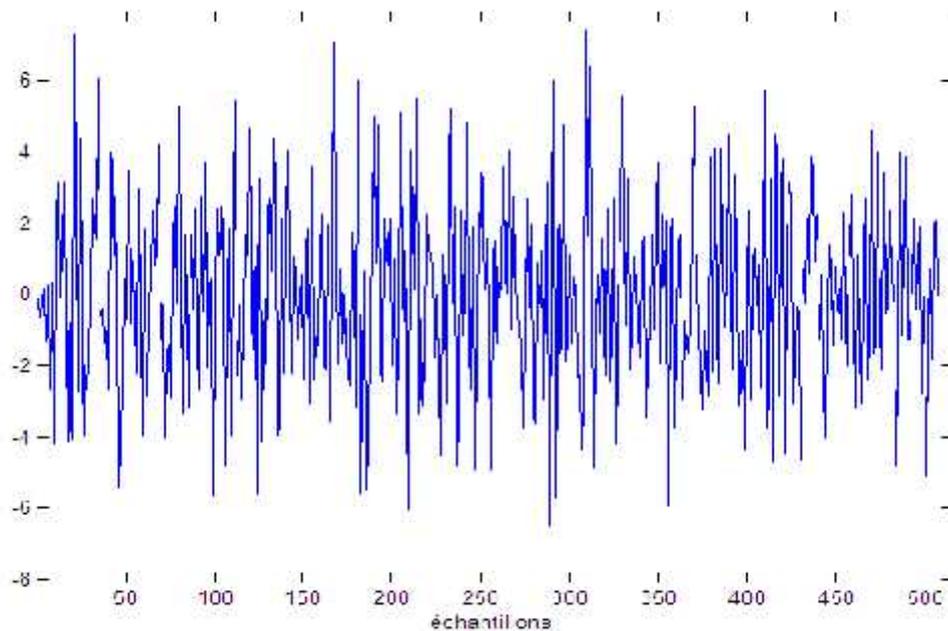


Figure 4.3 : le bruit ajouté

On obtient le signal de la figure 4.4 :

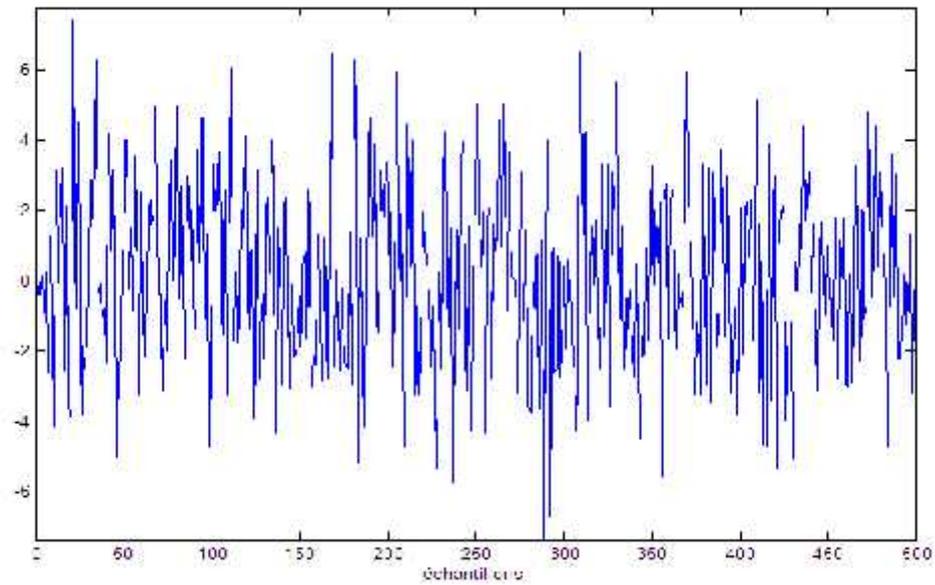


Figure 4.4 : le signal bruité d'entrée

#### 4-2-1-1- Simulation avec RLS

a- Facteur d'oubli constant :  $\lambda = 0.98$  :

Le rapport signal /bruit à la sortie est dans ce cas :

SNR = 11.9335 dB

Le signal de sortie est presque superposable au signal original, comme le montre la figure 4.5 :

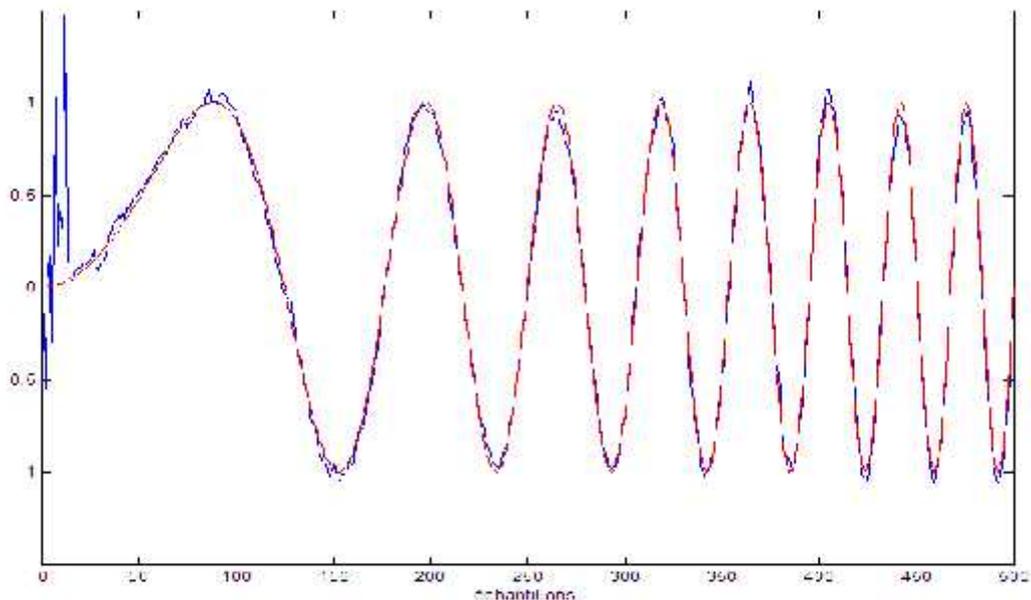


Figure 4.5 : la sortie filtrée comparée avec Le signal original

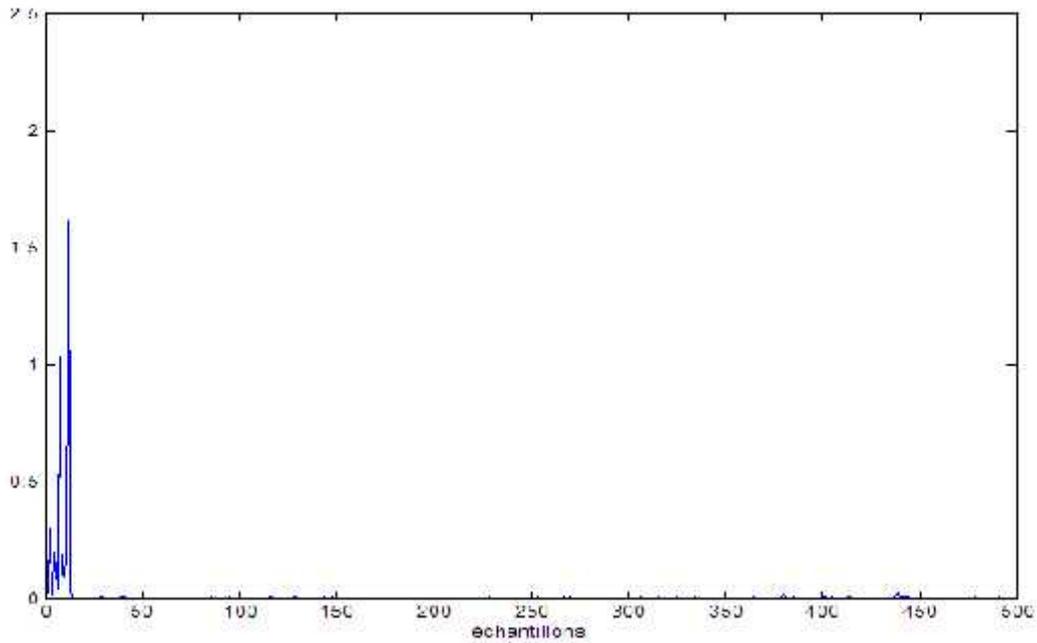


Figure 4.6 : L'erreur quadratique moyenne MSE

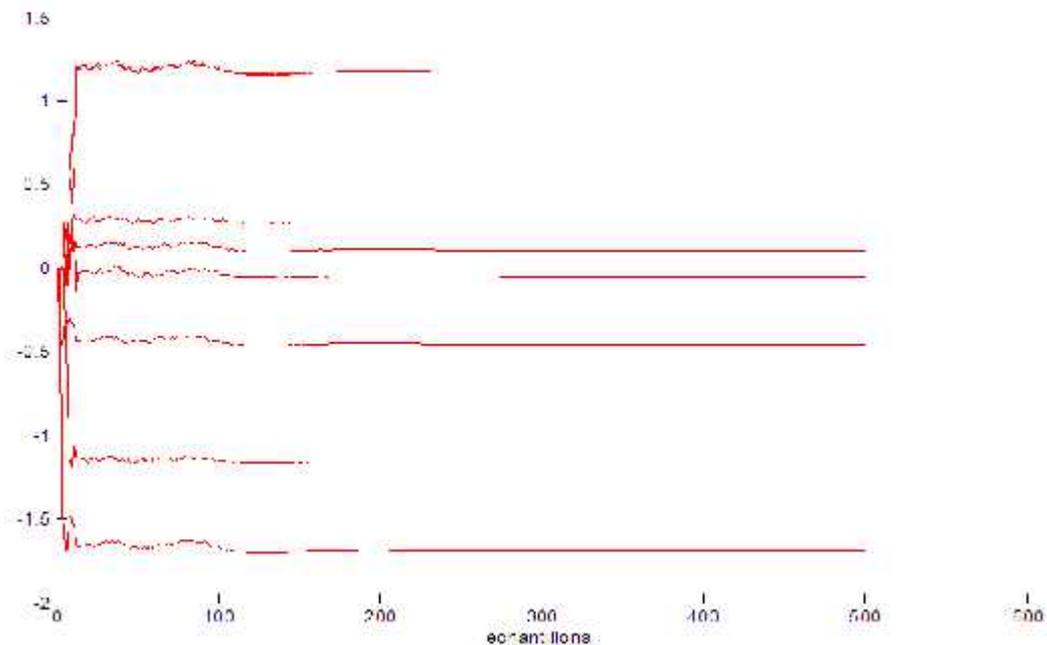


Figure 4.7 : l'évolution des coefficients du filtre

On peut clairement voir que RLS converge très rapidement aux valeurs correctes, il prend environ 13 itérations pour converger. Le signal de sortie est presque identique au signal original, avec des petites fluctuations au début du signal qui représentent le temps nécessaire pour la convergence. On note aussi que l'erreur quadratique moyenne MSE est minimisée très

rapidement (figure 4.6), il semble à être presque nul après quelques itérations (il reste de l'ordre de moins de 0.02).

Aussi les coefficients du filtre montrés dans la figure 4.7 convergent rapidement vers des valeurs spécifiques et restent stables.

**b- Facteur d'oubli variable :**

$$k(k) = k(k-1) + 1 - k \quad \text{avec:}$$

$$k(1) = 1$$

$$k = 0,95;$$

Après simulation, on obtient le rapport signal/bruit :

$$\text{SNR} = 7.1082 \text{ dB}$$

Le signal obtenu à la sortie du filtre est comparé avec le signal original dans la figure 4.8 :

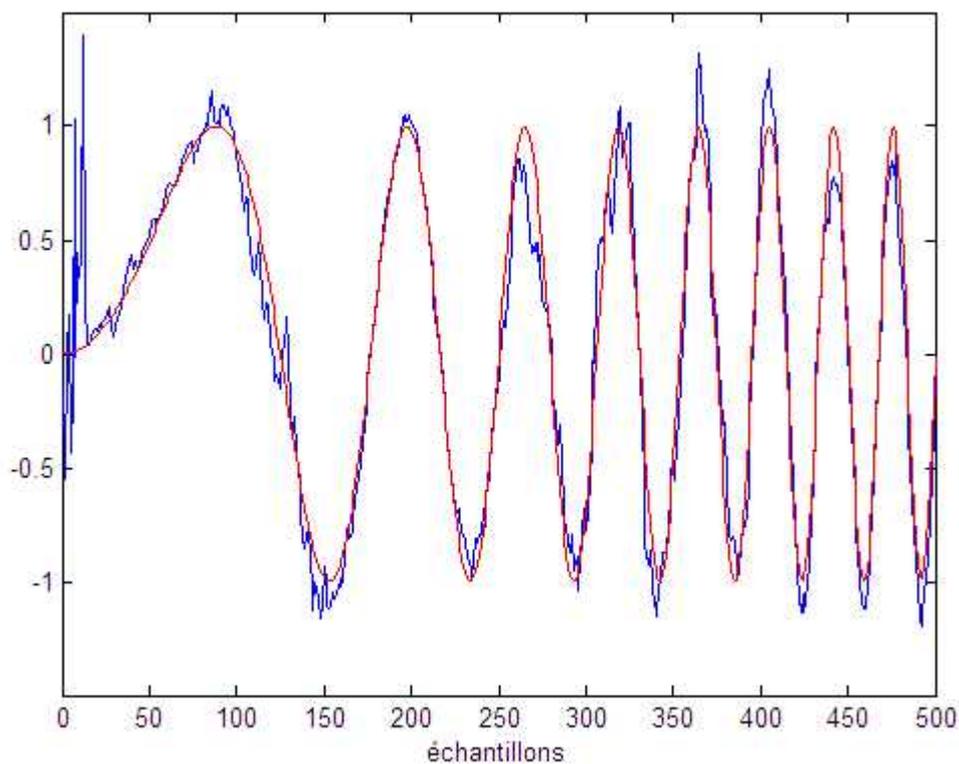


Figure 4.8 : la sortie filtrée comparée avec Le signal original

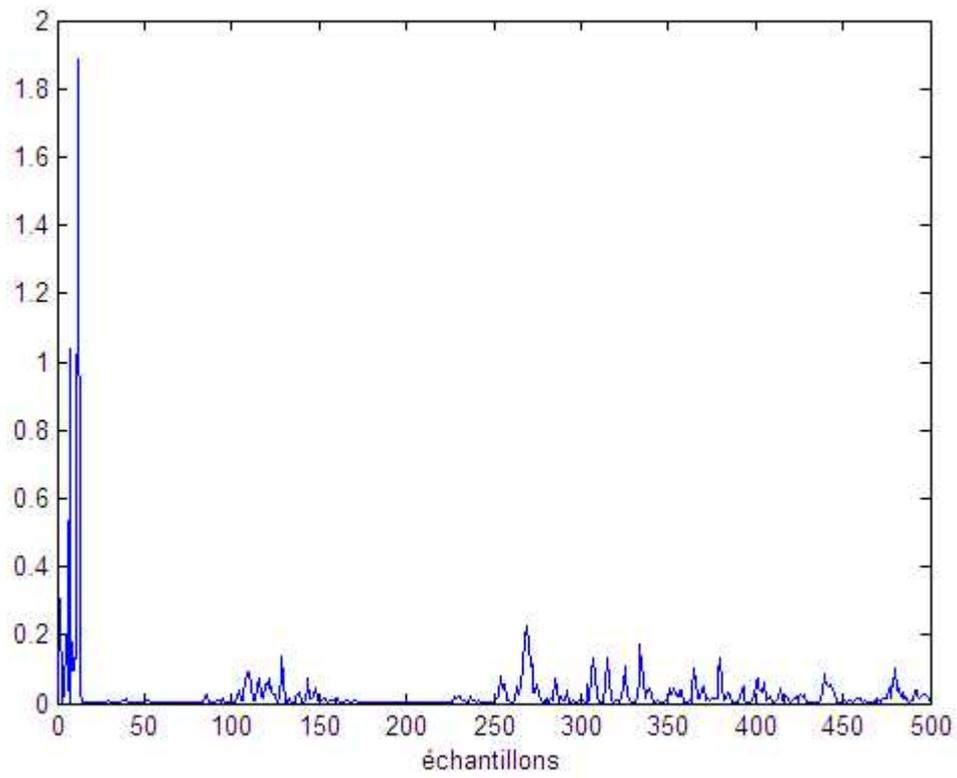


Figure 4.9: L'évolution de l'erreur quadratique moyenne MSE

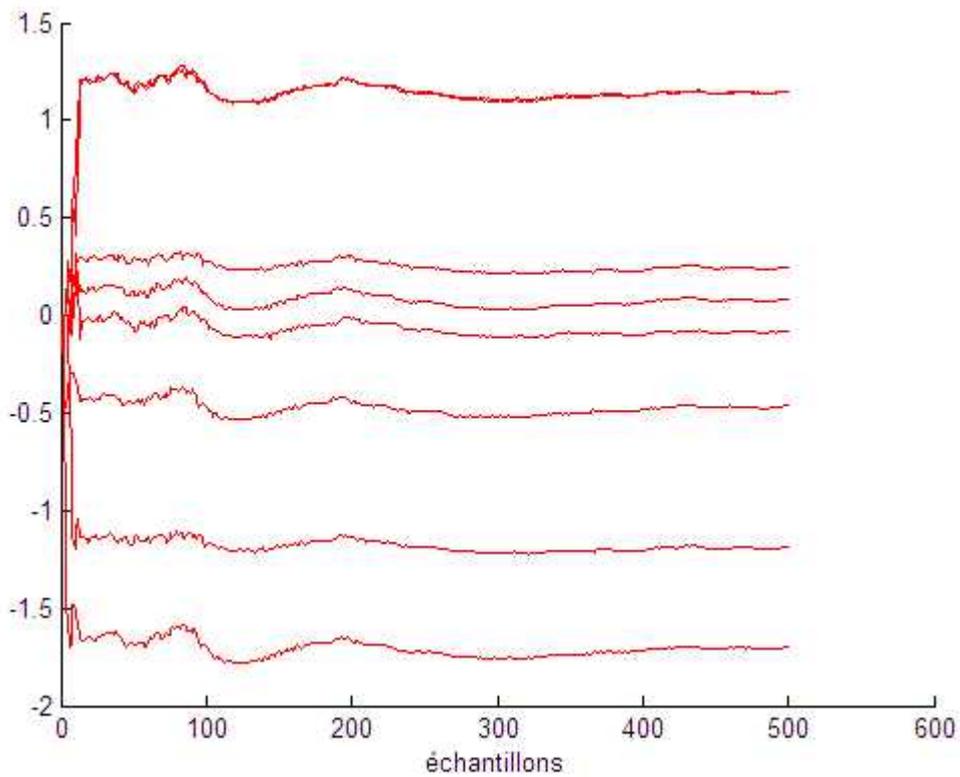


Figure 4.10 : l'évolution des coefficients du filtre

On note, pour un facteur d'oubli variable, un résultat proche, le nombre d'itérations nécessaire pour la convergence est presque le même, mais le signal cette fois est moins net, le rapport signal sur bruit est moins que celui du signal précédent, aussi le MSE a plus de fluctuations après sa minimisation (figure 4.9), sa valeur varie légèrement mais reste moins de 0.2.

Les paramètres du filtre convergent rapidement, mais présentent légèrement moins stabilité que précédemment (figure 4.10).

**c- Facteur d'oubli qui maintien qui maintien une trace constante :**

$$(1)=1$$

Le rapport signal /bruit à la sortie est dans ce cas :

$$\text{SNR} = 8.666 \text{ dB}$$

On peut remarquer la reconstitution du signal avec une bonne approximation au signal original dans la figure 4.11 :

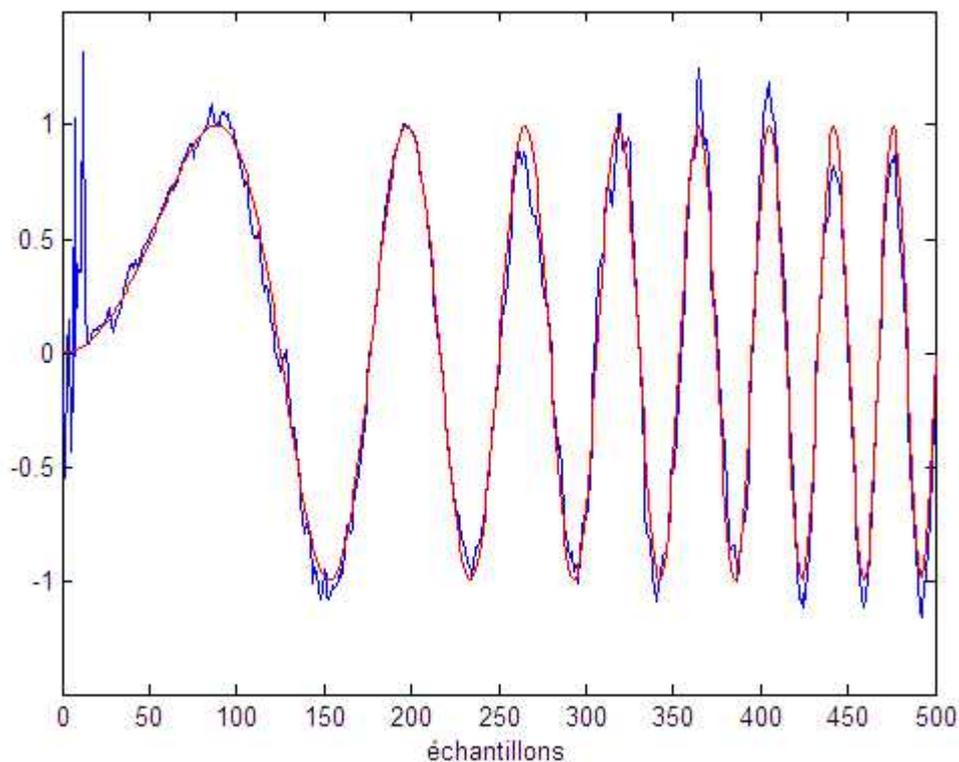


Figure 4.11 : la sortie filtrée comparée avec Le signal original

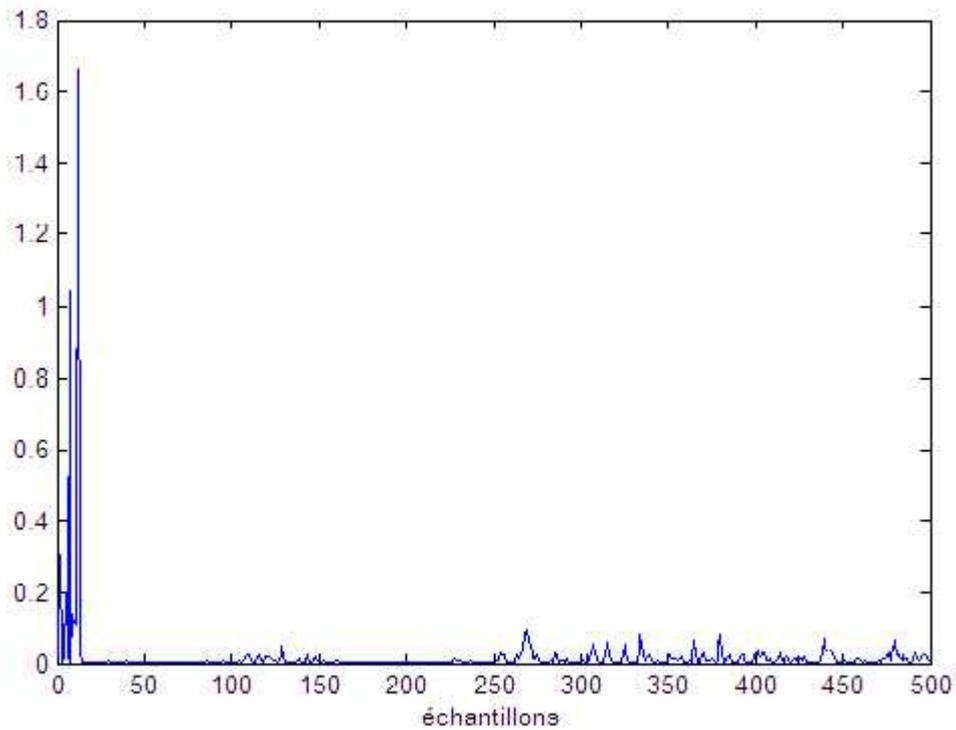


Figure 4.12 : L'évolution de l'erreur quadratique moyenne MSE

On note pour ce choix, un résultat semblable, avec une petite amélioration par rapport au choix d'un facteur d'oubli variable. La figure 4.12 montre moins de fluctuations pour le MSE, et aussi la stabilité des coefficients du filtre dans la figure 4.13.

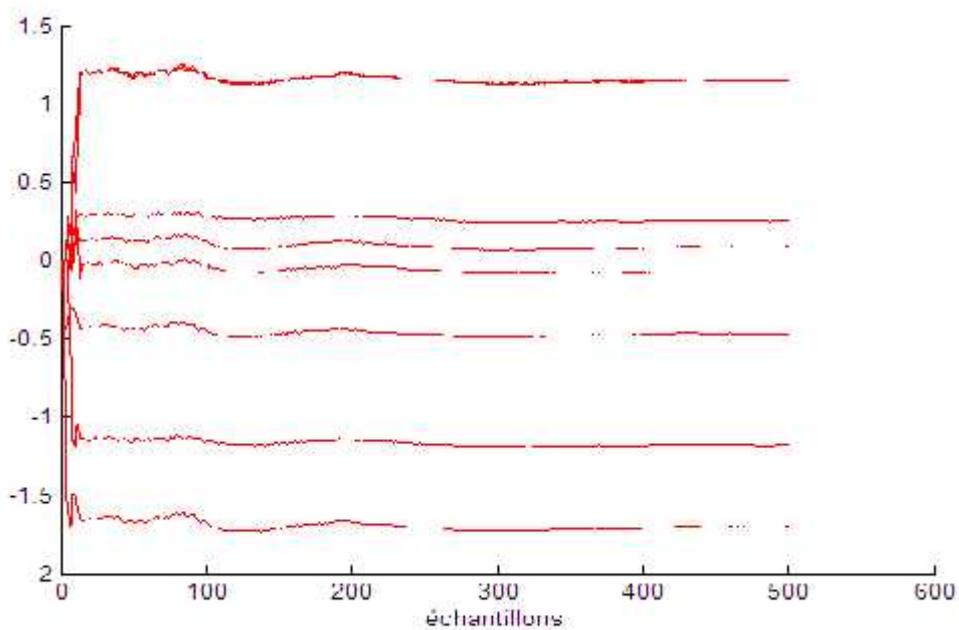


Figure 4.13 : l'évolution des coefficients du filtre

### 4-2-1-2- Simulation avec LMS:

#### a- Facteur d'adaptation $\mu = 0.1$ :

Le rapport signal /bruit à la sortie est dans ce cas :

$$\text{SNR} = 0.7014 \text{ dB}$$

Le signal obtenu à la sortie du filtre LMS présente un mal reconstitution comme l'indique la figure 4.14

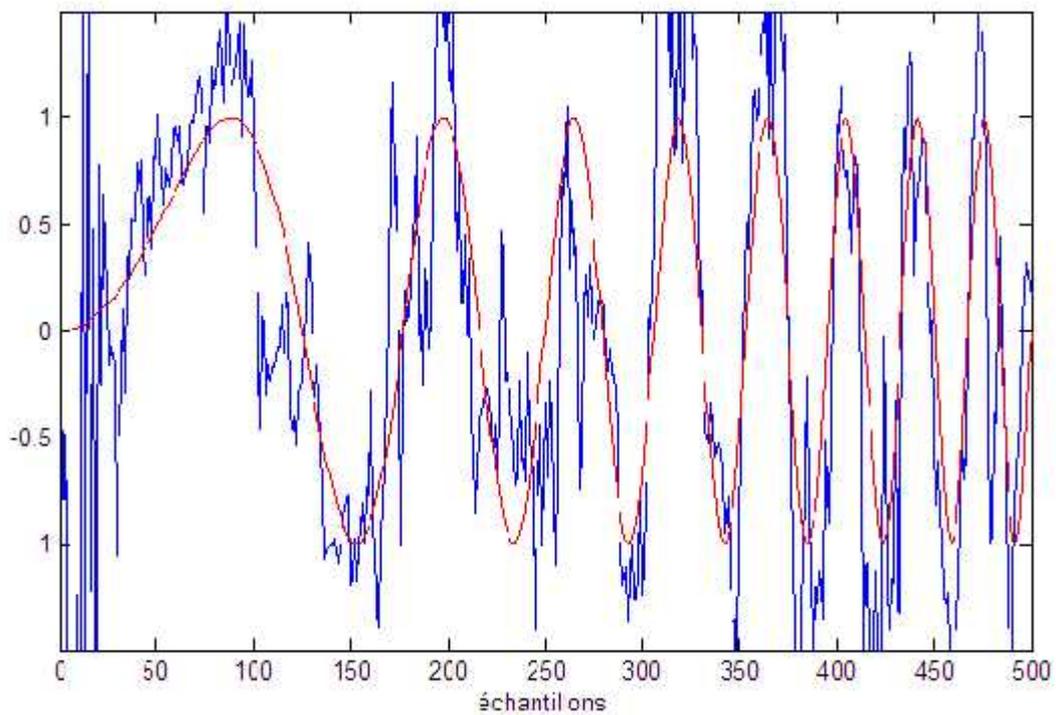


Figure 4.14 : la sortie filtrée comparée avec Le signal original

La figure 4.15 donne l'évolution du MSE selon le nombre d'itérations, nous remarquons bien que l'erreur quadratique moyenne est minimisée, mais n'est pas annulée, il reste instable autour des valeurs faibles

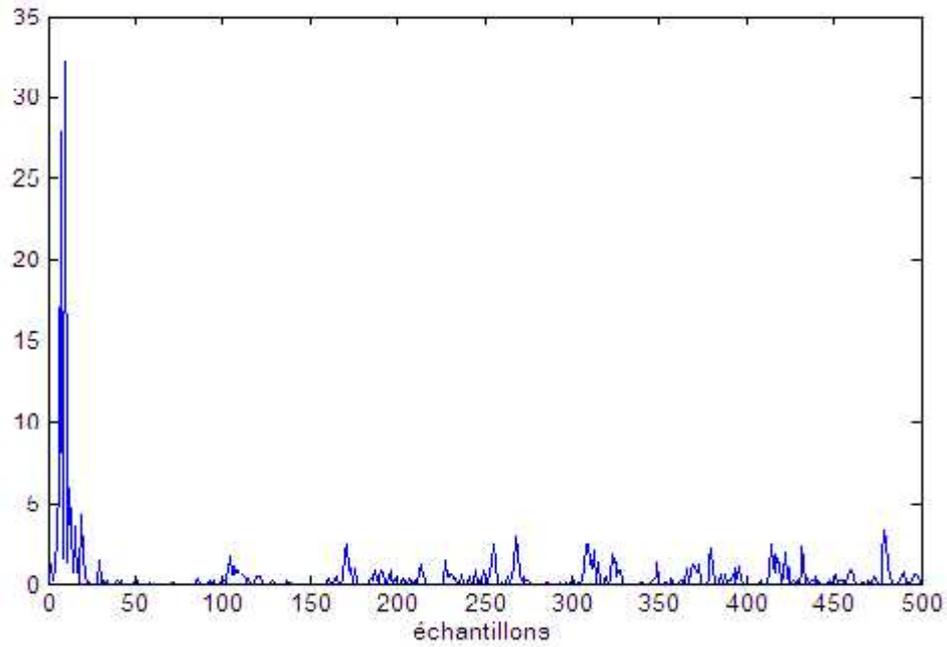


Figure 4.15 : L'évolution de l'erreur quadratique moyenne

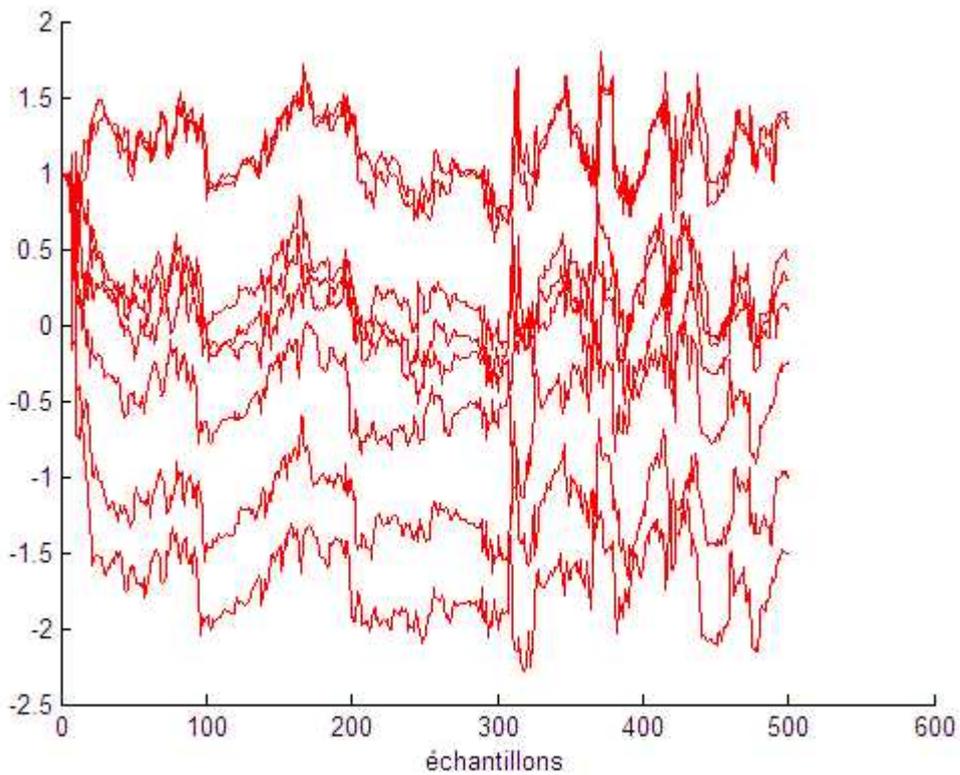


Figure 4.16 : l'évolution des coefficients du filtre

On peut clairement voir que l'algorithme de LMS n'exécute pas en juste le signal. Le signal reconstitué est remarquablement différent de l'original, et le rapport signal/bruit est relativement faible.

Les coefficients du filtre sont instables, leur convergence est lente (ils prend plus de 22 itérations pour commencer à converger), et elles ne convergent stablement pas vers une valeur comme pour l'algorithme RLS, comme le montre la figure 4.16.

#### **b- Facteur d'adaptation $\mu = 0.05$ :**

Le rapport signal /bruit à la sortie est dans ce cas :

$$\text{SNR} = 1.1845 \text{ dB}$$

La figure 4.17 montre la sortie filtrée, le signal cette fois est moins déformé que dans le cas de  $\mu=0.1$ , mais il reste toujours différent du signal de départ notamment dans les premières itérations (l'amplitude du signal élevée et sa forme semble la forme d'un signal bruité).

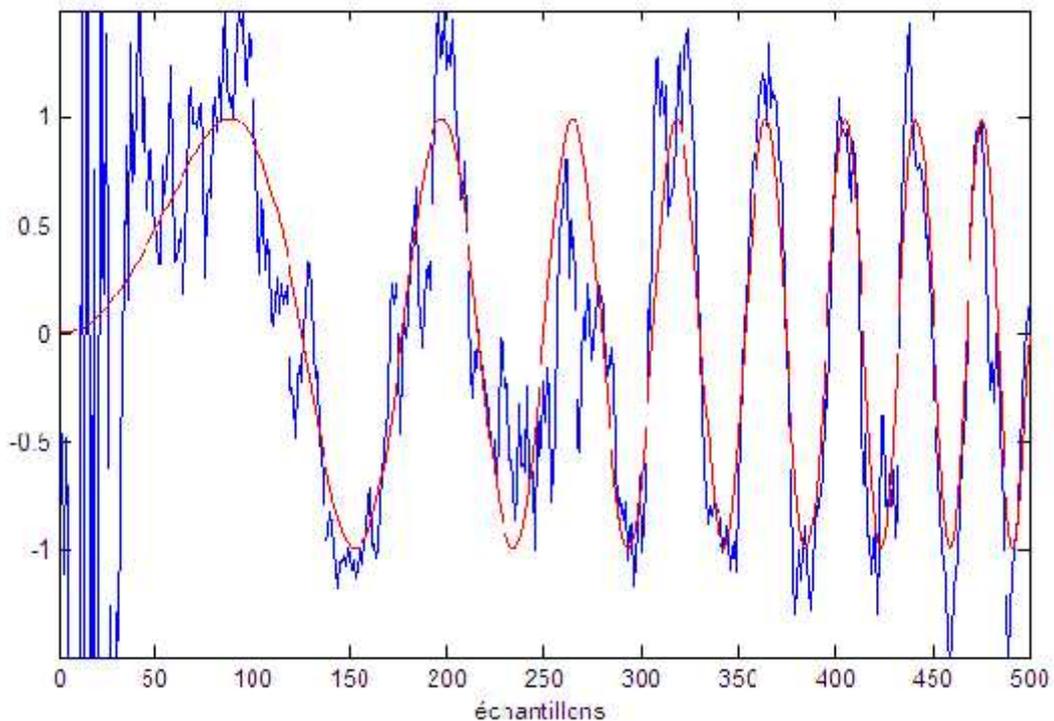


Figure 4.17 : la sortie filtrée comparée avec Le signal original

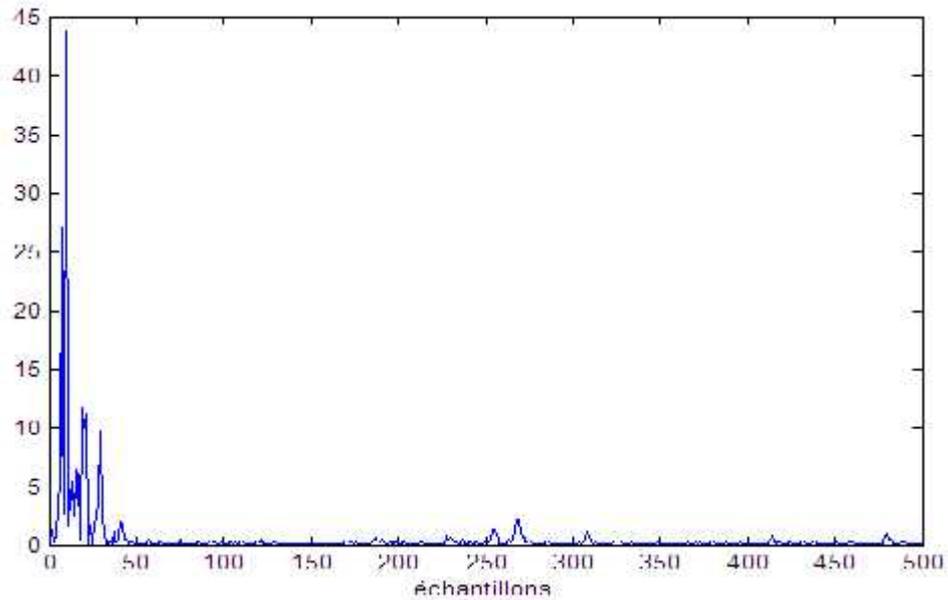


Figure 4.18 : L'évolution de l'erreur quadratique moyenne

D'après la figure 4.18, on voit que l'erreur quadratique moyenne semble mieux minimisée que dans le cas précédent, mais les coefficients du filtre présentent toujours des fluctuations dans leur évolution pour la convergence, mais cette fois elles sont moins perturbées, comme la montre la figure 4.19

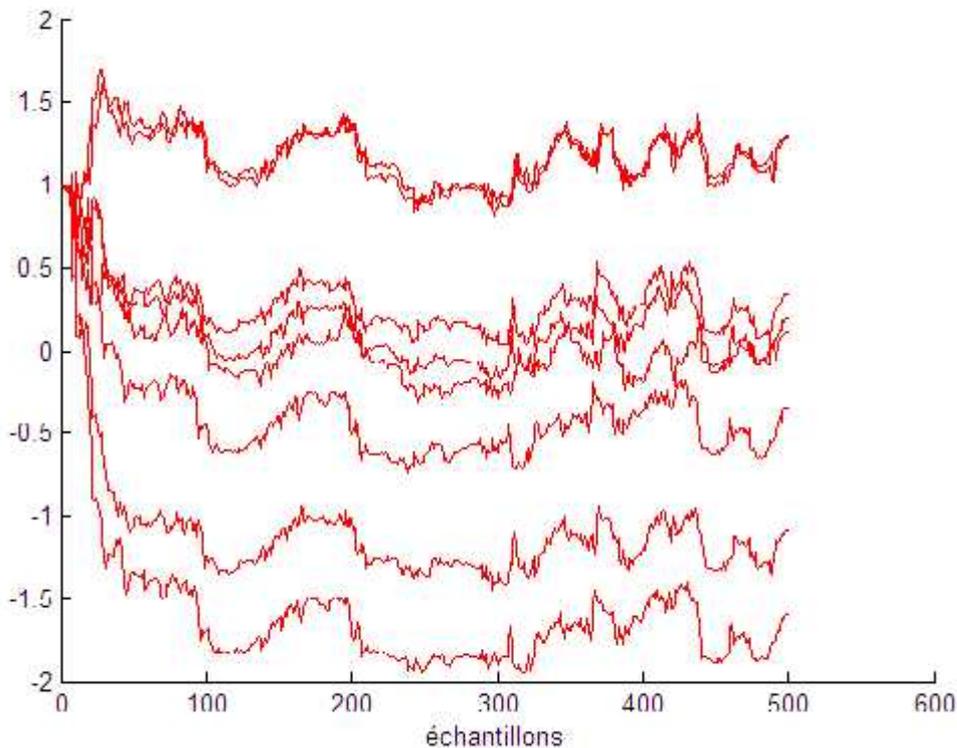


Figure 4.19 : l'évolution des coefficients du filtre

**c- Facteur d'adaptation  $\mu = 0.09$  :**

Le rapport signal /bruit à la sortie est dans ce cas :

$$\text{SNR} = 1.0102 \text{ dB}$$

La figure 4.20 montre la sortie filtrée comparée avec le signal sinusoïdal du départ. Comme pour les deux cas précédents, le signal obtenu est remarquablement différent et semble aléatoire, et par conséquence, le rapport SNR faible qui indique la mauvaise qualité du signal.

L'erreur quadratique moyenne MSE est minimisé, mais pas annulé complètement (figure 4.21). L'amplitude du MSE est considérable au départ, car la convergence de LMS est lente par rapport au RLS.

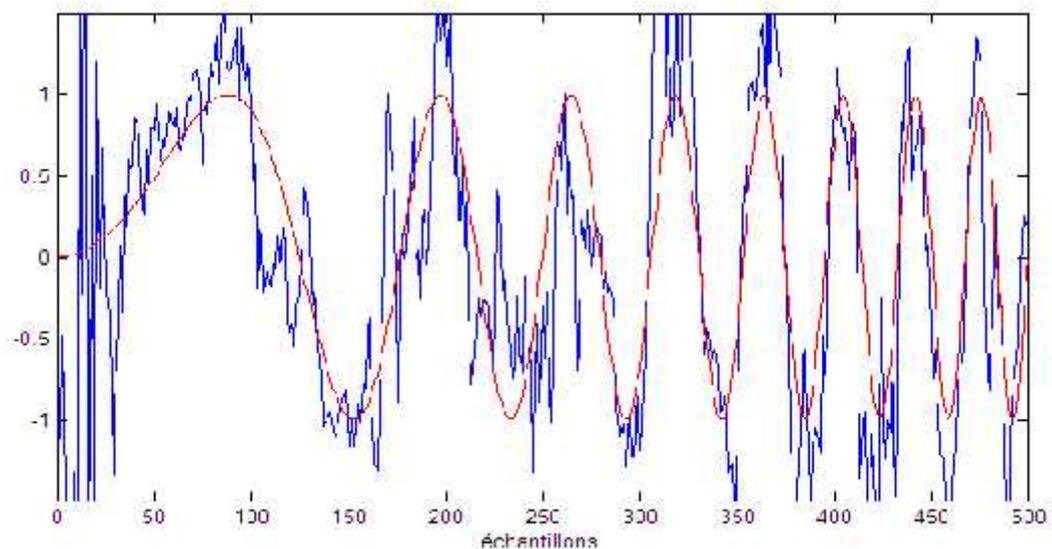


Figure 4.20 : la sortie filtrée comparée avec Le signal original

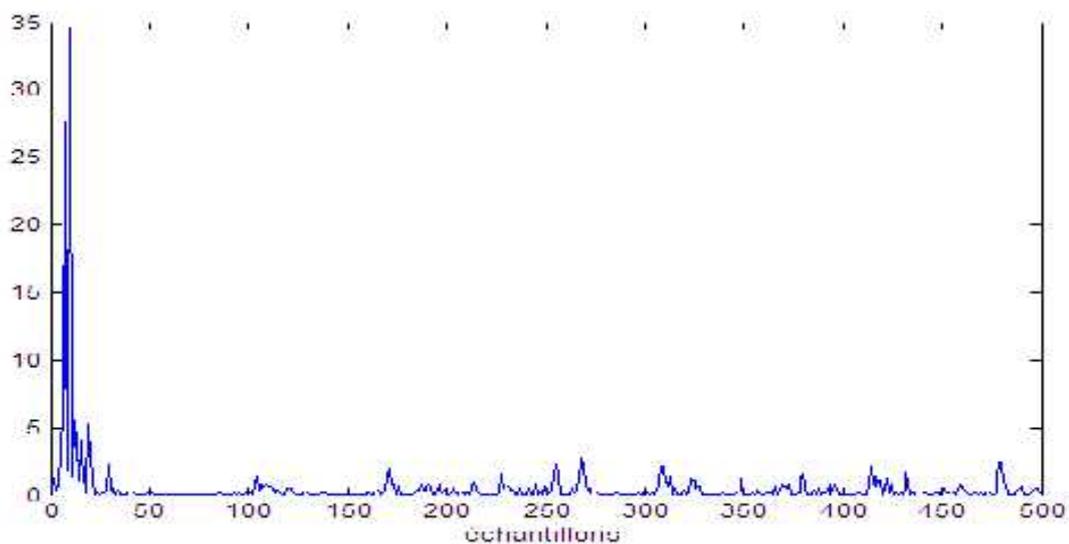


Figure 4.21 : L'évolution de l'erreur quadratique moyenne

D'après la figure 4.22, les coefficients du filtre ne sont pas stables et présentent des fluctuations.

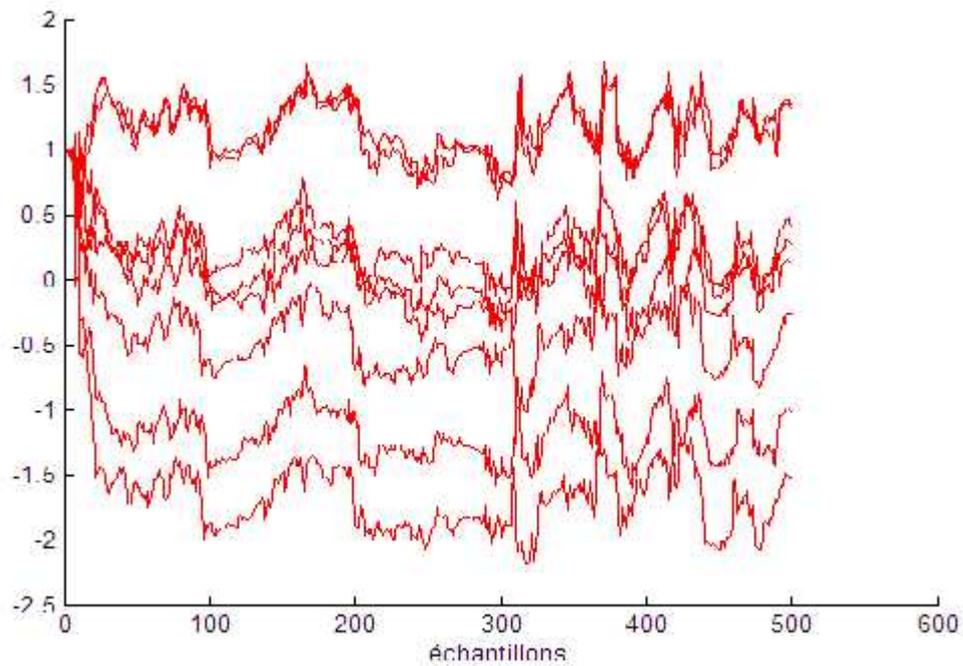


Figure 4.22 : l'évolution des coefficients du filtre

#### 4-2-2- Utilisation d'un signal du son à l'entrée :

On va utiliser dans cette partie un signal son de parole préenregistré, et on fait les mêmes étapes qu'on a fait pour le signal sinusoïdal.

Le signal présenté dans la figure 4.23 est la forme d'une phrase parlé :

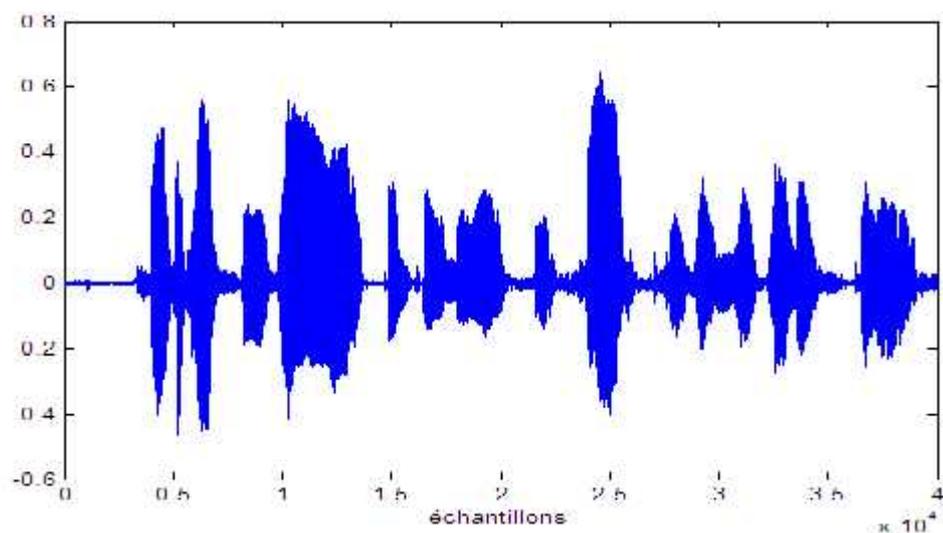


Figure 4.23 : Le signal son original

On ajoute à ce signal un bruit blanc dont la forme est montrée dans la figure 4.24:

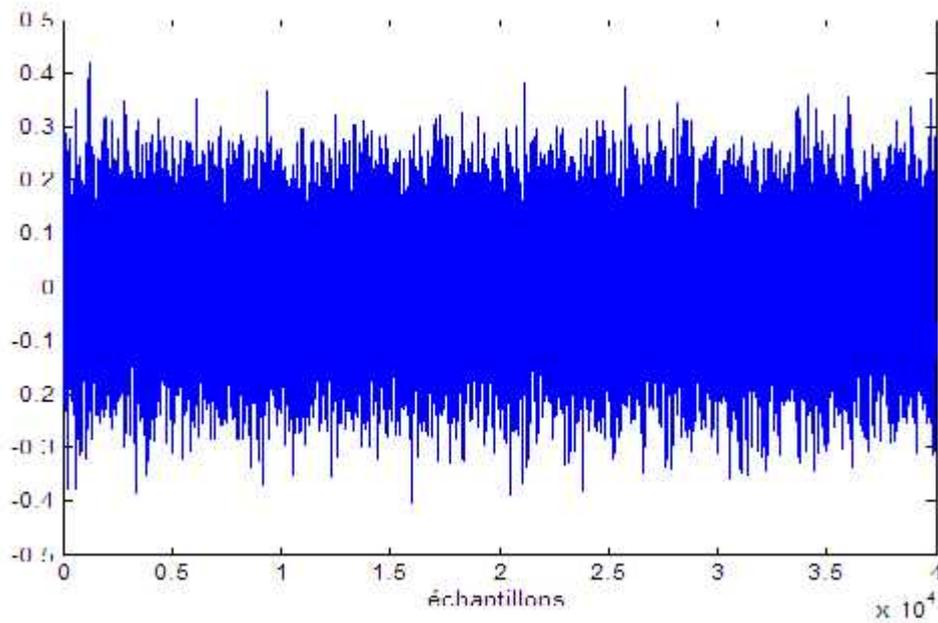


Figure 4.24 : le signal bruité ajouté

Ainsi on obtient notre signal bruité d'entrée (figure 4.25)

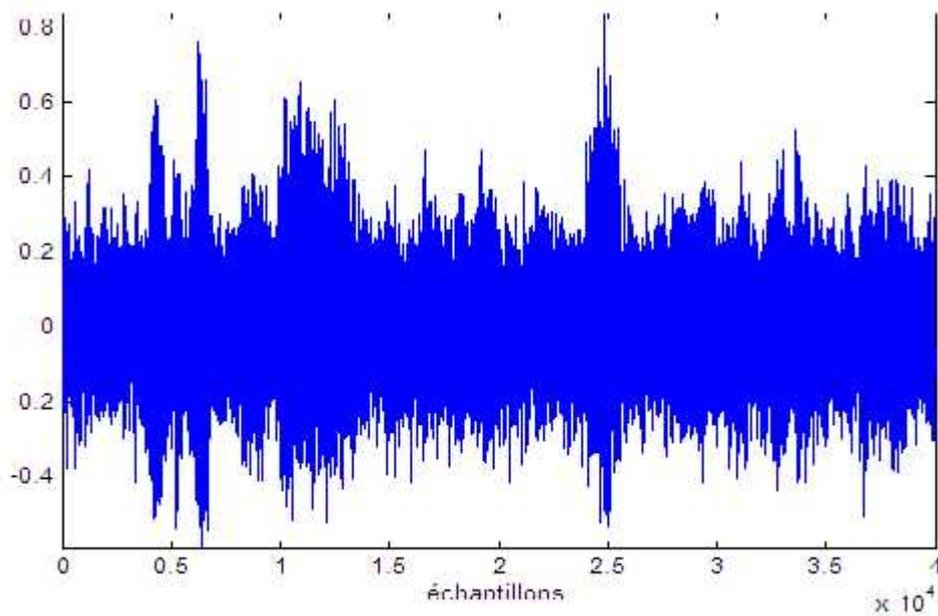


Figure 4.25 : le signal bruité d'entrée

#### 4-2-2-1- Simulation avec RLS :

##### a- Facteur d'oubli constant : $\lambda = 1$ :

En utilisant un facteur d'oubli constant  $\lambda = 1$ , on obtient le rapport signal /bruit à la sortie  
 $SNR = 16.4888$  dB

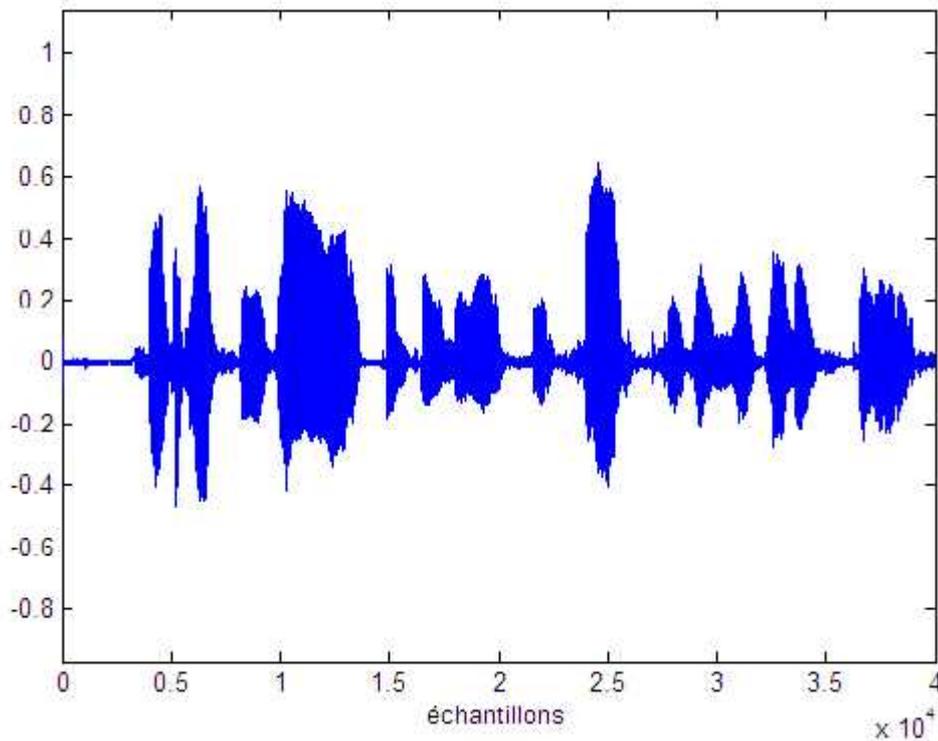


Figure 4.26 : La sortie filtrée

Comme le montre la figure 4.26, le signal de sortie est presque identique au signal de départ, et l'élimination du bruit est faite d'une manière remarquable, le rapport SNR est élevé, et la figure 4.27 indique que le MSE est minimisé très rapidement et stabilisé avec des petites fluctuations non remarquables, il semble qu'il est nul dès le départ car la convergence était rapide, elle s'est effectuée après les premières itérations.

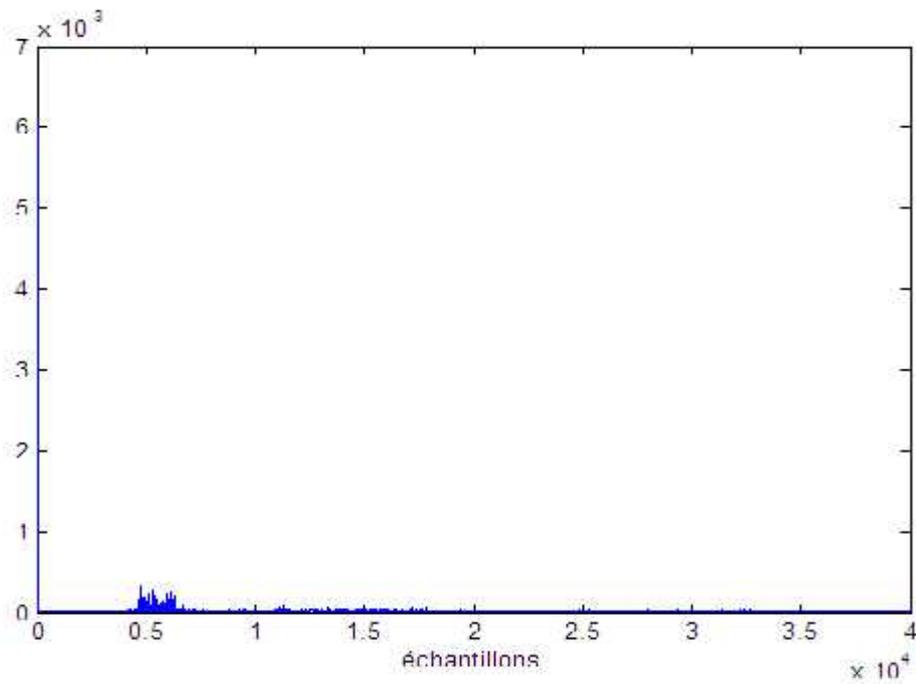


Figure 4.27 : L'évolution de l'erreur quadratique moyenne MSE

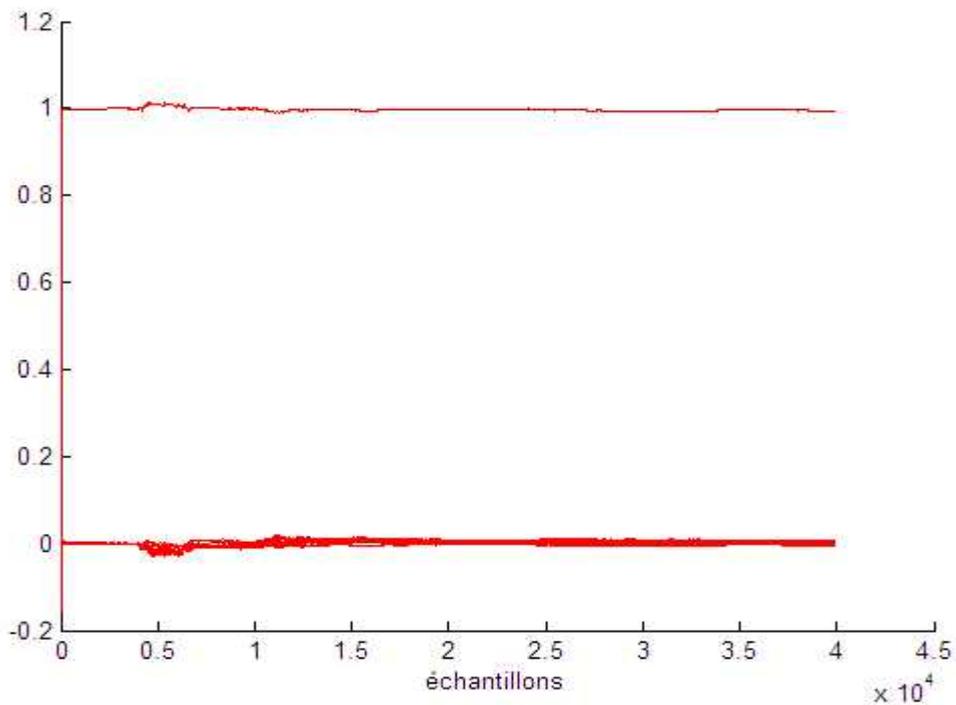


Figure 4.28 : L'évolution des coefficients du filtre

D'après la figure 4.28, les coefficients du filtre RLS sont stables et convergent très rapidement dès les premières itérations.

**b- Facteur d'oubli variable :**

On utilise cette fois un facteur d'oubli variable qui varie selon la formule:  $(n+1) = (n) * k + 1 - k$

Avec:  $(1) = 1$ , et le facteur de variation :  $k=0,95$

Le rapport signal /bruit à la sortie est dans ce cas :

SNR = 16.5 dB, c'est proche du facteur d'oubli obtenu précédemment (dans le cas de constant).

Le signal à la sortie est montré dans la figure 4.29 :

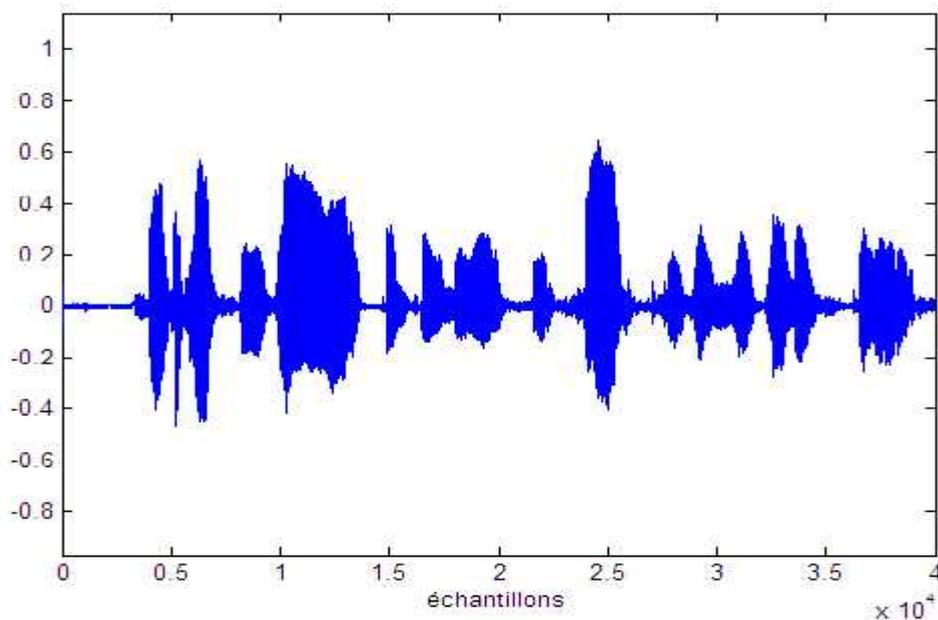


Figure 4.29: La sortie filtrée

On note que notre signal de parole est bien reconstruit, et la convergence est obtenue rapidement (après la 10<sup>ème</sup> itération), les coefficients du filtre semblent stables (figure 4.31), avec une bonne minimisation du MSE comme l'indique la figure 4.30.

Le résultat est mieux remarquable quand on écoute le son de la sortie qui est net et claire.

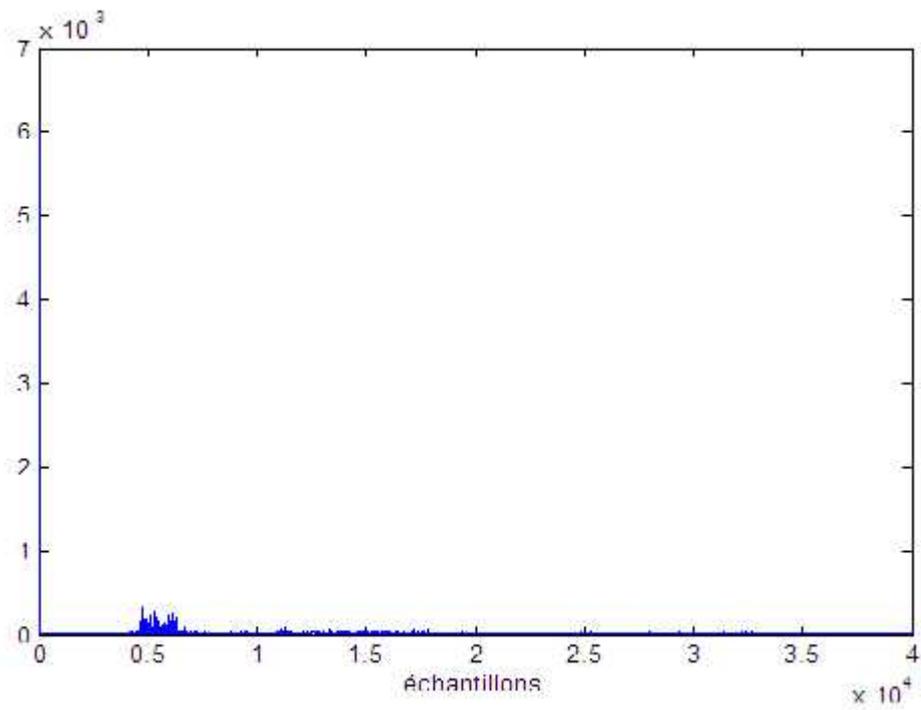


Figure 4.30 : L'évolution de l'erreur quadratique moyenne

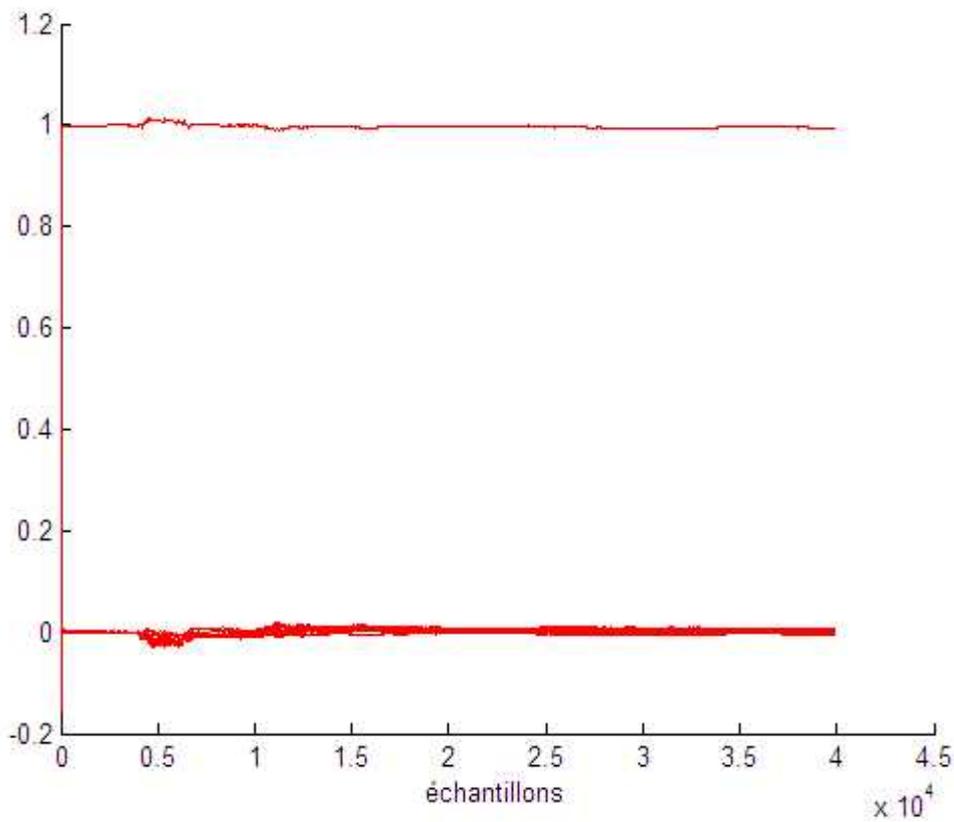


Figure 4.31 : L'évolution des coefficients du filtre

**c- Facteur d'oubli qui maintien une trace constante :**

Avec un RLS à trace constante, avec  $\lambda=1$ , on obtient le rapport signal /bruit à la sortie :

SNR = 10.3138 dB.

Le signal sortie est comme le montre la figure 4.32 :

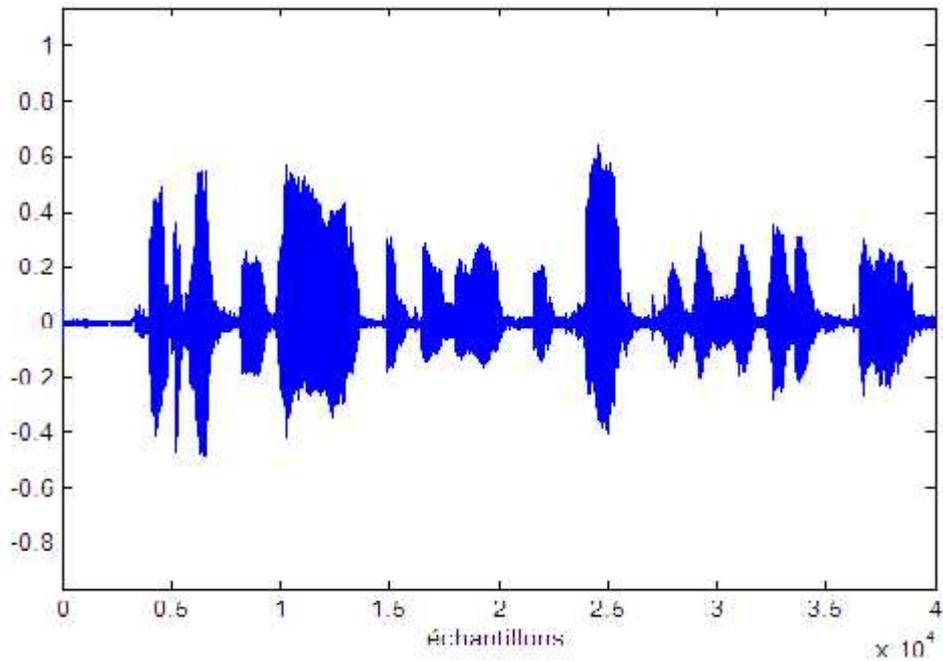


Figure 4.32 : La sortie filtrée

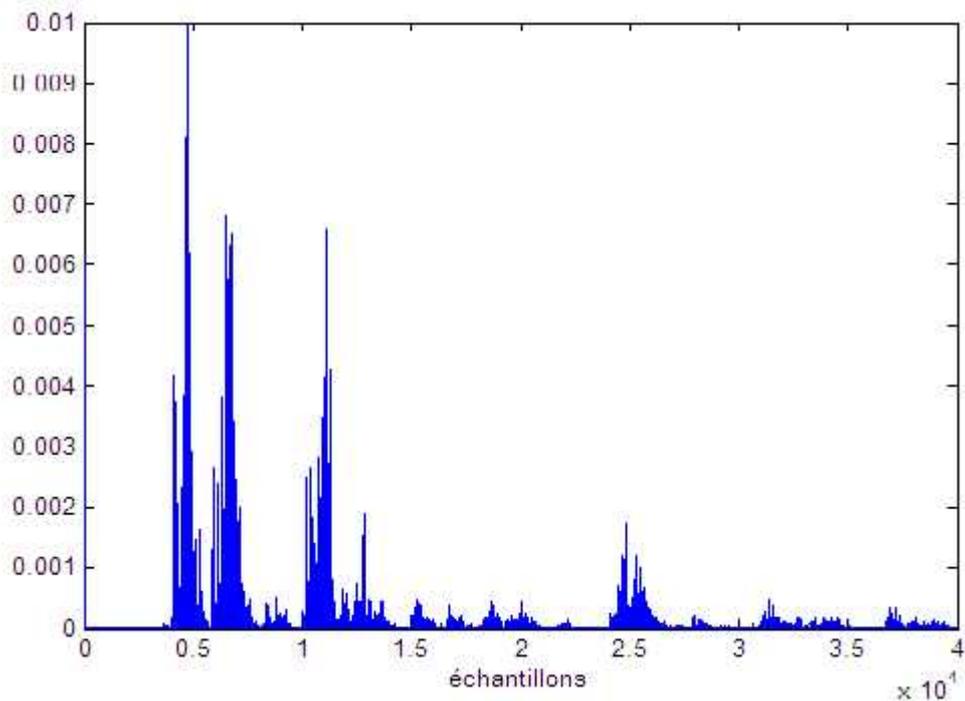


Figure 4.33 : L'évolution de l'erreur quadratique moyenne

D'après la figure 4.33, le MSE présente des fluctuations bien notées, il atteint pour quelques itérations des valeurs importantes, ce qui est indique une mal minimisation de l'erreur, e par conséquence, un rapport SNR faible comparé avec les deux cas précédents. Mais malgré ça, le son écouté à la sortie du filtre est acceptable.

La figure 4.34 montre que les paramètres du filtre ne sont pas assez stables dans leur convergence.

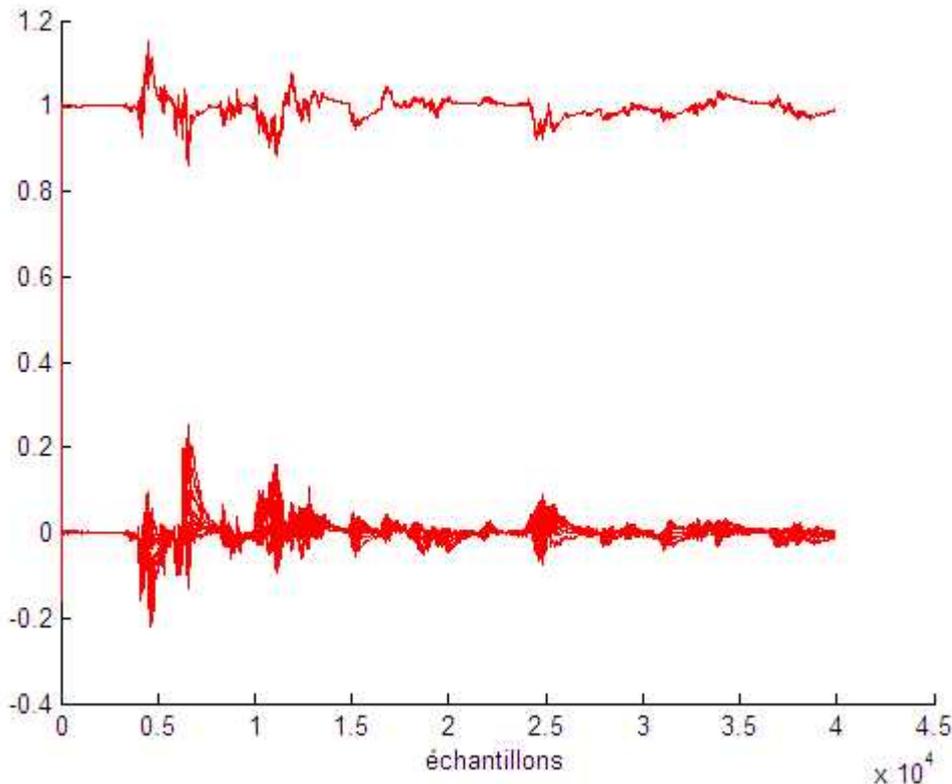


Figure 4.34 : L'évolution des coefficients du filtre

#### 4-2-2-1- Simulation avec LMS :

##### Facteur d'adaptation $\mu=0.3$ :

En utilisant un Facteur d'adaptation  $\mu=0.3$ , le rapport signal /bruit à la sortie est dans ce cas :  
 $SNR = 6.4121$  dB

Le signal obtenu est montré dans la figure 4.35, où on note qu'il est légèrement différent du signal original, notamment dans les premiers échantillons, ceci peut être expliqué par le fait que le LMS est lent, il prend un certain temps pour converger, contrairement au RLS.

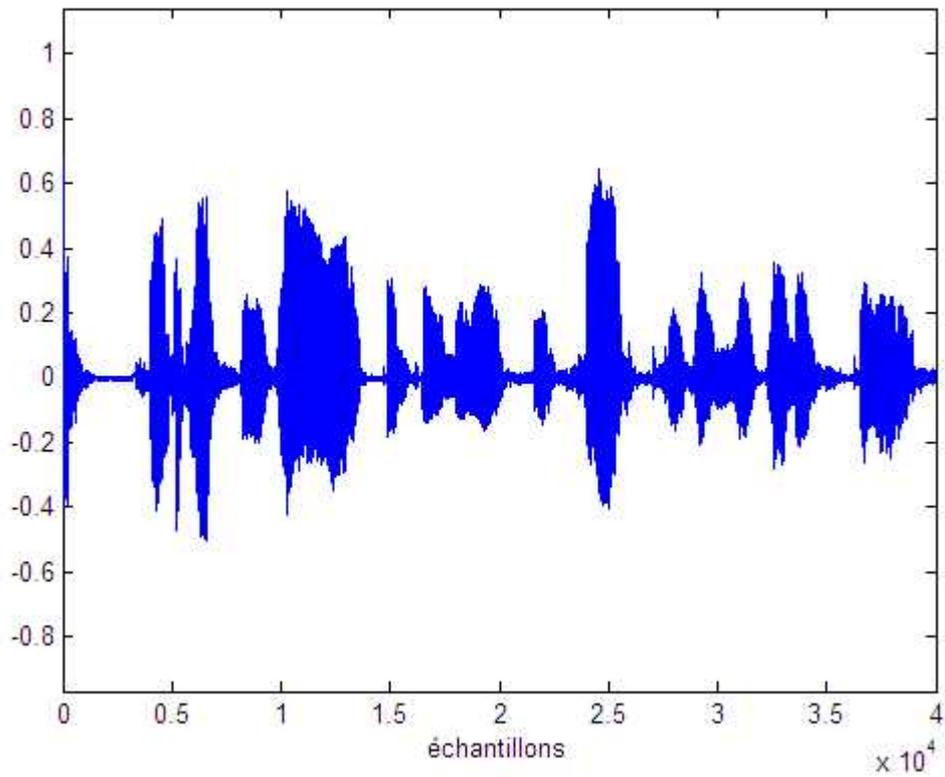


Figure 4.35 : La sortie filtrée

La figure 4.36 qui montre l'évolution de l'erreur quadratique moyenne MSE en fonction du nombre d'itérations indique bien le caractère de convergence lente de LMS, ou on voit la valeur importante du MSE pour les premières itérations.

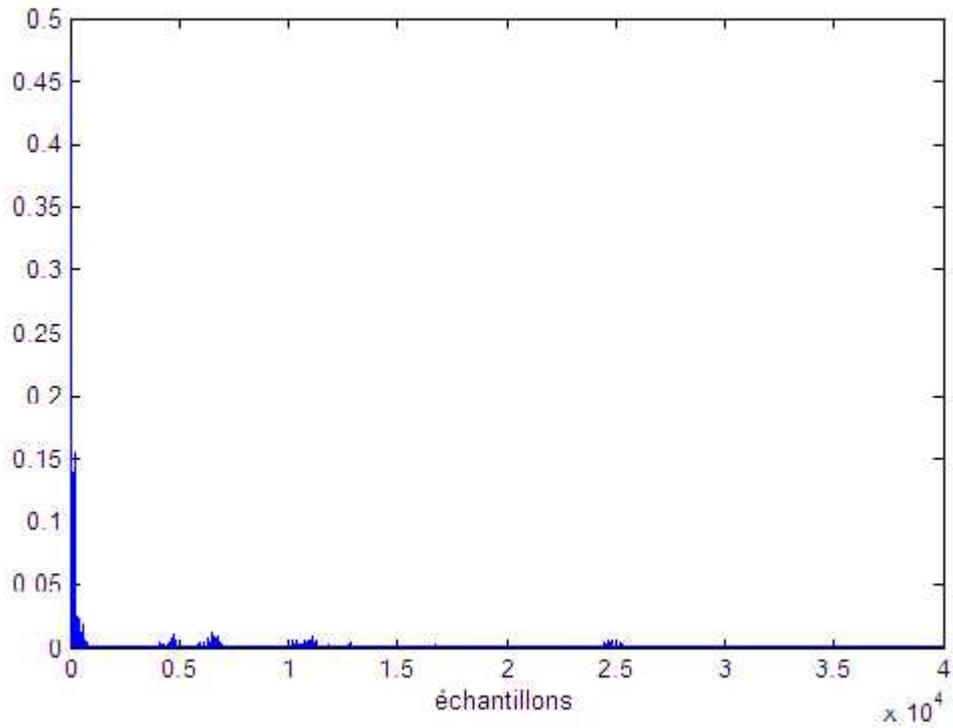


Figure 4.36 : L'évolution de l'erreur quadratique moyenne

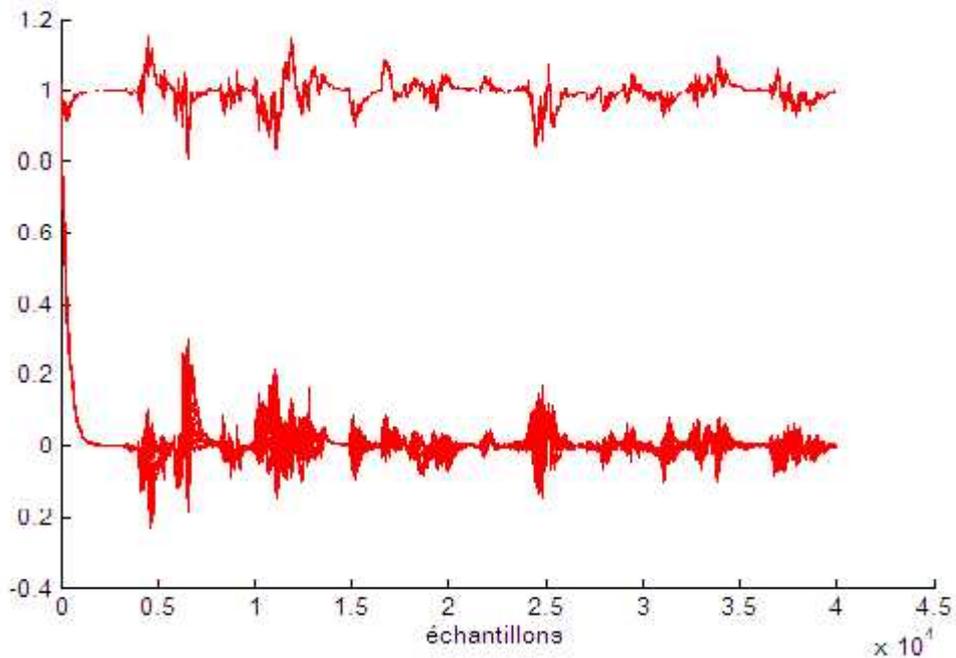


Figure 4.37 : L'évolution des coefficients du filtre

D'après la figure 4.37, on peut remarquer l'instabilité et les fluctuations des coefficients du filtre par rapport aux ceux de RLS.

## Interprétation des résultats :

Les simulations de RLS vu dans les figures ont donné des résultats proches pour chaque type de signal d'entrée. Le RLS montre qu'il a le comportement de convergence rapide et la minimisation considérable de l'erreur quadratique moyen.

L'utilisation d'un facteur d'oubli constant convient aux variations lentes des caractéristiques du signal d'entrée, tandis que le choix d'un facteur d'oubli variable convient aux signaux stationnaires et produit une accélération de la convergence en évitant une décroissance trop rapide du gain d'adaptation.

Le RLS à trace constante est utilisé pour éviter au gain d'adaptation de tendre vers zéro, cette méthode correspond au filtrage des signaux fortement non stationnaires.

Dans notre cas le RLS à facteur d'oubli constant nous a donné le meilleur résultat en vue de son rapport SNR et la stabilité des coefficients.

Pour le LMS, le choix effectif du scalaire d'adaptation résulte ensuite d'un compromis entre la rapidité d'adaptation, et la puissance de l'erreur résiduelle, mu doit être choisi d'une façon à permettre à l'algorithme la meilleure approximation et la meilleure vitesse en essayant à minimiser le temps de convergence

Les simulations par LMS ont montré des caractéristiques de convergence et de reconstitution du signal original moins performantes que celles montrées par le RLS. Il est plus lent, il prend un certain temps avant commencer à converger, on note ça dans la comparaison entre le signal original et le signal reconstitué, aussi le rapport signal/bruit faible comparé à ce de RLS, et c'est plus remarquable quand on écoute le son à la sortie du filtre où on note un petit bruit avant que le son soit net.

## 5-3- Conclusion

Comme nous avons observé dans nos expériences, le RLS a un comportement de convergence considérablement plus rapide que le LMS. De plus, le RLS a une meilleure approximation de l'état stable de poids. Cela améliore la performance de l'annulation du bruit considérablement.

Généralement, nous avons trouvé qu'un système de l'annulation du bruit basé sur RLS a la capacité pour bien travailler, à condition de vaincre l'intensité computationnelle (la complexité) de l'algorithme. Les capacités de LMS étaient insuffisantes pour la tâche, surtout pour les grands filtres. L'utilisation répandue de LMS est due à sa simplicité d'implémentation, et aussi parce

qu'il exige une capacité computationnelle moins que celle exigée par le RLS (moins de complexité).

Il serait intéressant d'étudier des versions plus efficaces de l'algorithme RLS, telles que ceux qui utilisent des facteurs prédictifs de treillis ou des filtres transversaux. L'efficacité computationnelle de ces mises en oeuvre peut améliorer les performances et les caractéristiques de LMS et RLS.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Dans le cadre du projet de fin d'études, nous avons présenté dans ce travail qui consiste au contrôle actif du bruit acoustique en utilisant les filtres adaptatifs une étude des moyen utilisés pour le contrôle du bruit, en particulier le filtrage adaptatif basé sur l'identification des modèles. Nous avons présenté les principaux domaines d'application des systèmes ANC, et finalement nous avons proposé deux algorithmes comme application du système.

Ce travaille nous a permis de présenter un domaine très important de l'application pratique du traitement numérique du signal, qui a connu un développement considérable grâce au développement des processeurs numériques.

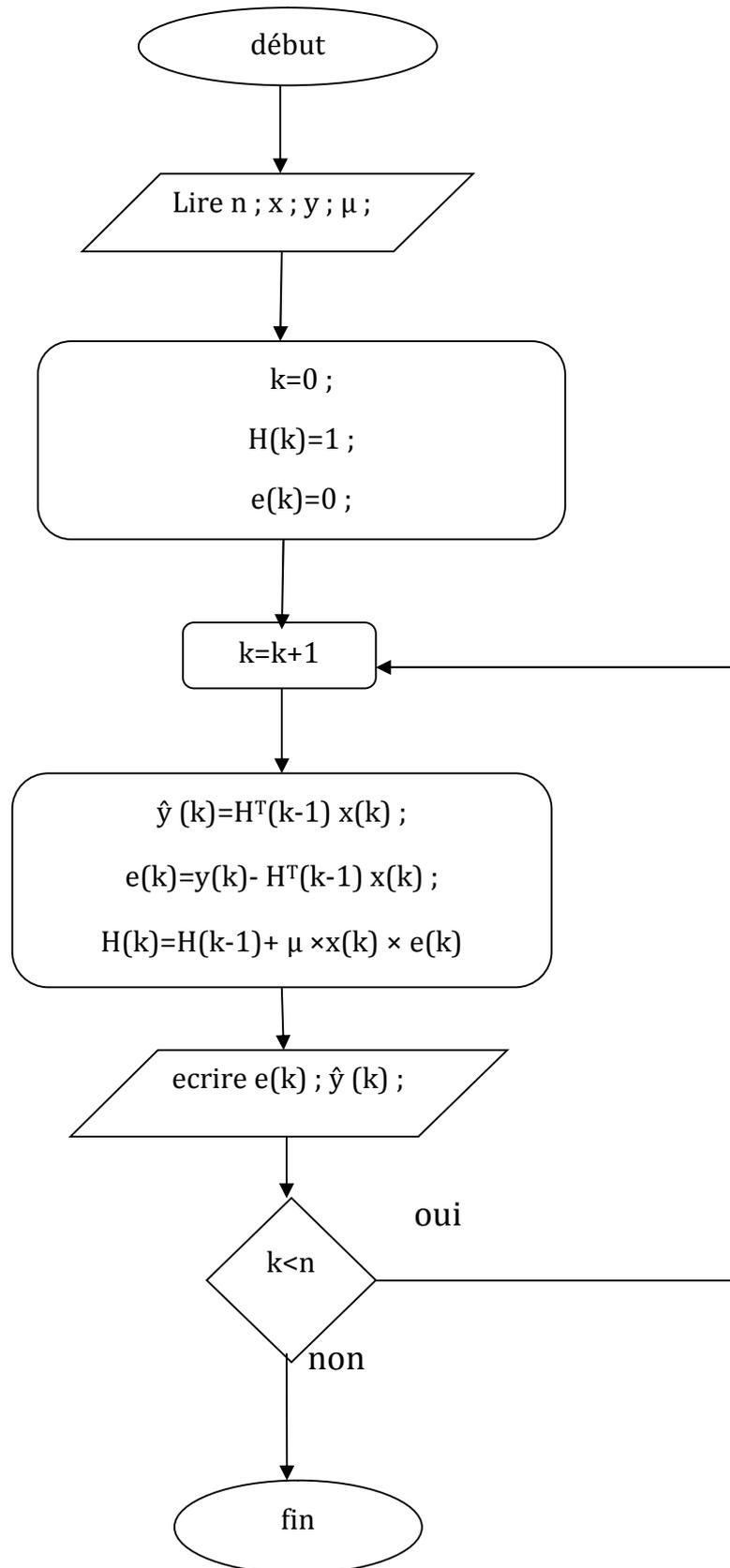
Les deux algorithmes étudiés dans l'application par MATLAB ont prouvé leur efficacité et leur intégrité dans plusieurs applications pratiques tels que la communication (l'exemple présenté dans la simulation).

Le principal problème rencontré dans la réalisation d'un contrôleur adaptatif c'est qu'on ne peut pas connaître la forme exacte du bruit : c'est un processus aléatoire, c'est pour ça que l'approche suivi est approximative, ce qui pose de son part le problème de convergence et de capacité de poursuite de l'algorithme, ce problème se pose notamment dans le cas des signaux non stationnaires.

En fin Nous espérons que ce modeste travail servira comme base et sera bénéfique pour d'autres étudiants qui voudraient continuer dans ce domaine et soit complété par d'autre études qui tiennent compte le développement des méthodes numériques utilisées dans les contrôleurs adaptatifs et l'élaboration des nouvelles versions d'algorithmes.

## Annexe -1-

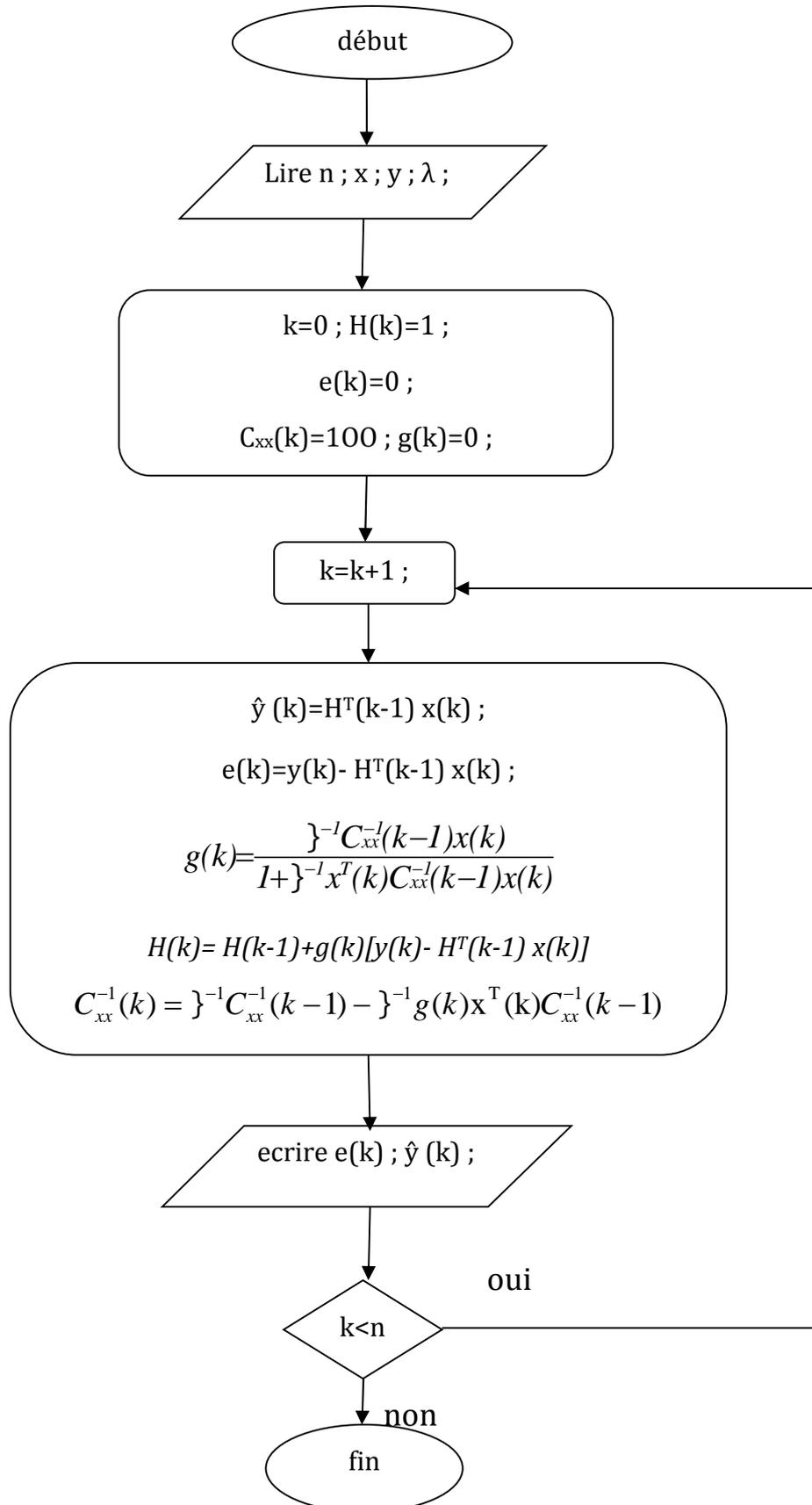
### Organigramme d'identification LMS :



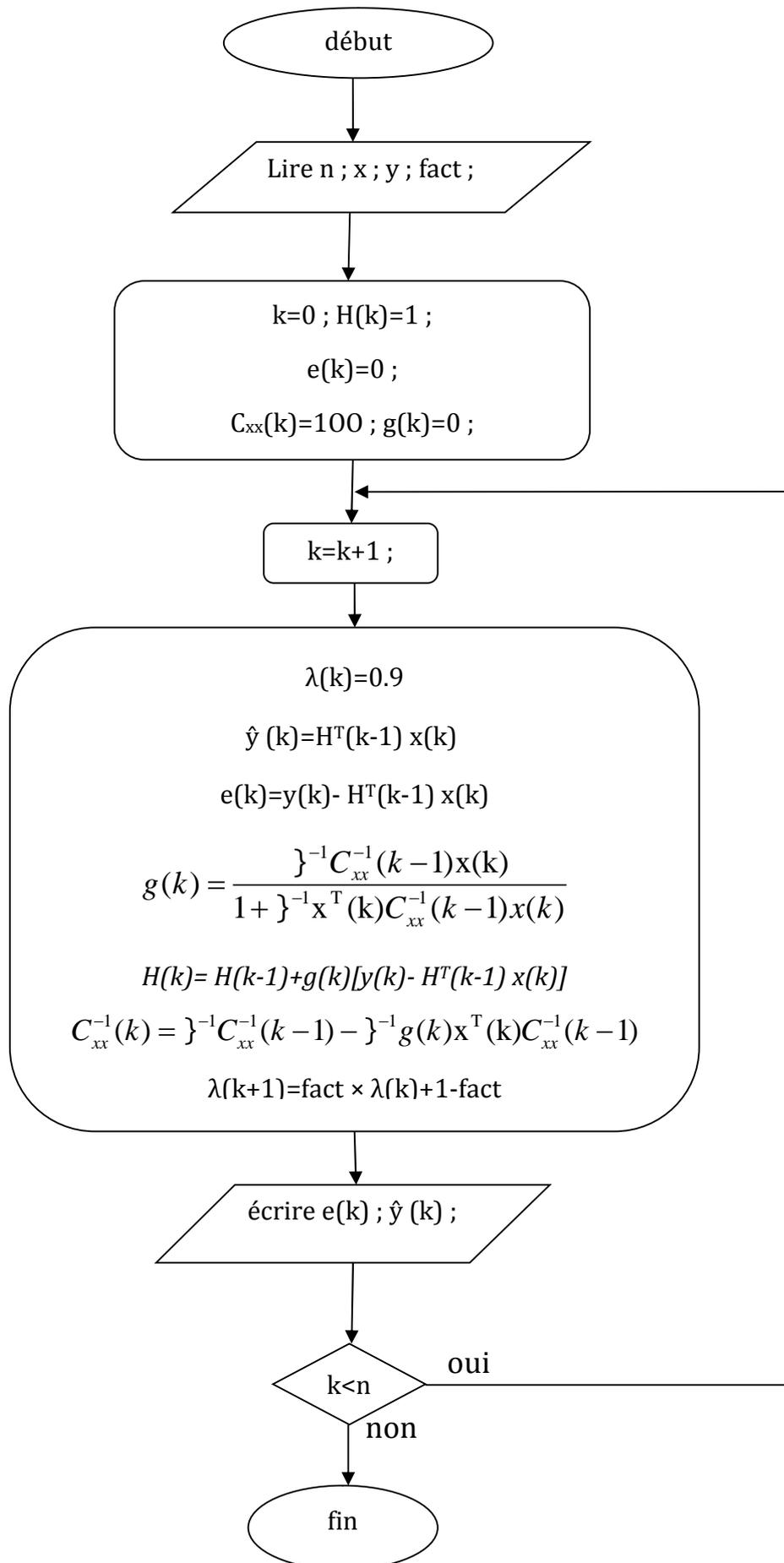
## Annexe -2-

### Organigramme d'identification RLS :

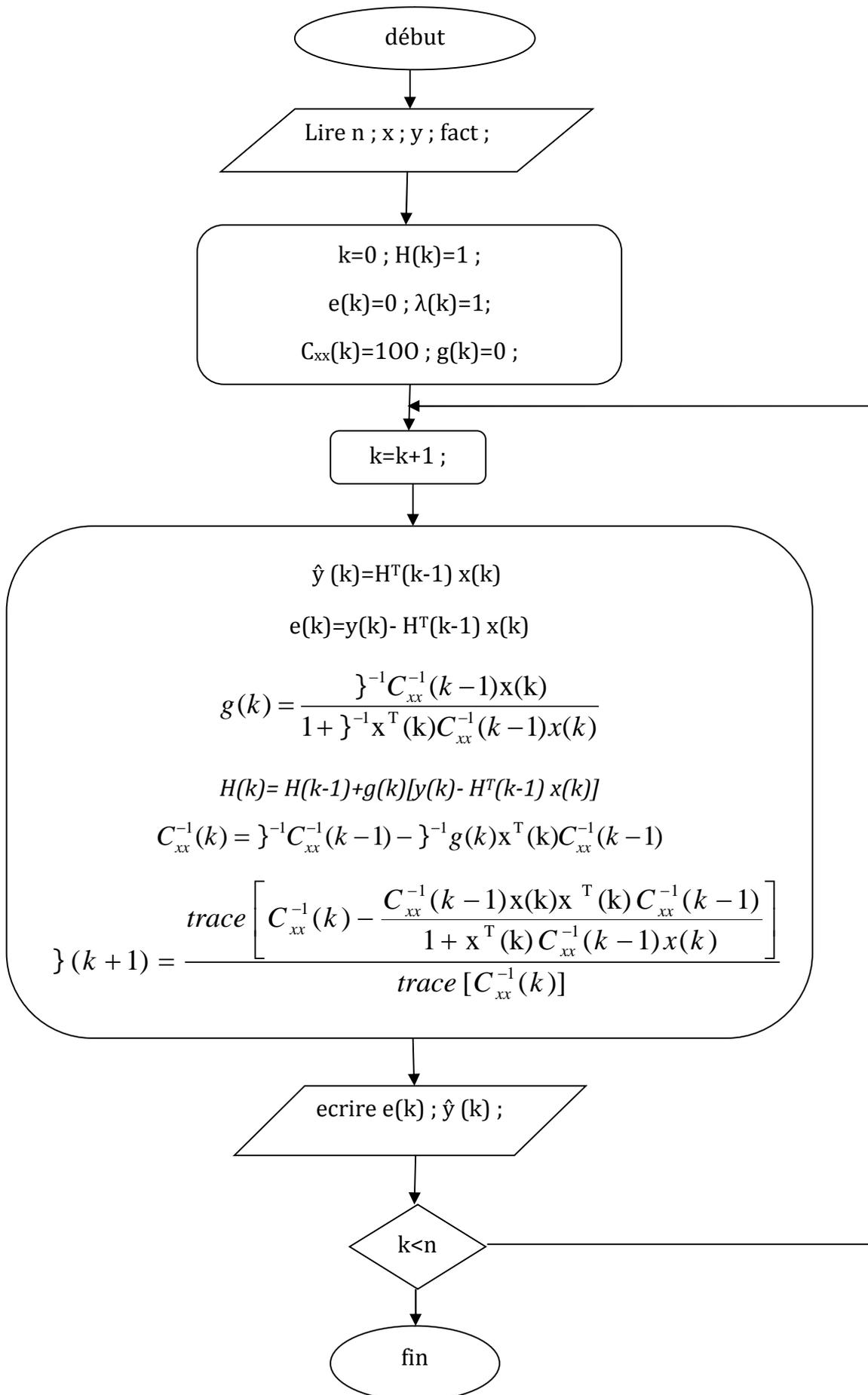
#### A- RLS à facteur d'oubli fixe :



## B- RLS à facteur d'oubli variable:



**C- RLS à trace constante:**



## *Références Bibliographiques*

- [1] - **Benouared.A.** « Commande adaptative auto ajustable pour maintien du cap d'un avion de transport ». Thèse d'ingénieur d'état en électronique. Alger. (2004)
- [2] - **Hellal.** « cours traitement du signal 4<sup>ème</sup> année aéronautique ». (2006)
- [3] - **Doudou.** « Cours traitement numérique du signal 4<sup>ème</sup> année aéronautique ». (2006)
- [4] - **Benachenhou.** « Cours processus stochastiques 5<sup>ème</sup> année aéronautique ». (2007)
- [5] - **James L. Crowley.** « Cours Traitement du Signal ». ENSIMAG
- [6] - **Michel ETIQUE.** « Identification des systèmes dynamiques linéaires ». Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud. Département d'électricité et d'informatique.
- [7] - **Olivier SENTIEYS.** «Traitement Numérique du Signal ».
- [8] - **J.-F. Bercher & P. Jardin.** « Introduction au filtrage adaptatif. ESIEE Paris ». 2003
- [9] - **ID LANDAU.** « Identification et commande des systèmes». (1994)
- [10] - **Mohamed Moukhtari.** «Simulink 5, 6». (1995)
- [11] - **Emmanuel Friot.** « Introduction au contrôle acoustique actif ». CNRS-Laboratoire de mécanique et d'acoustique. (2005)
- [12] - **A. Miguez-Olivares, M. Recuero-Lopez.** « Development of an Active Noise Controller in the DSP Starter Kit ».
- [13] - **Publication de Groupe Texas Instruments.** « Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family ». (1996)
- [14] - **Poo oonam jindal.** « Algorithms for tracking formant frequencies of a continuous speech with speaker variability ». these master en électronique et communication. institut d'ingenieurs et de technologie de Thamas. Inde. 2005
- [15] - **J. Julliard.** « Problématique des matériaux absorbants sonores pour applications sur turboréacteur ». 2003