



Annulation active du bruit de moteur dans l'habitacle d'une voiture



Rapport de stage

Adèle Simon

7 Août 2015

Encadrant

Delphine DEVALLEZ (Arkamys)

Résumé

L'objet du stage présenté ici concerne le contrôle actif du bruit généré par un moteur automobile. Le travail réalisé durant ce stage porte donc sur la conception d'un système adaptatif permettant de réduire efficacement une harmonique du son d'un moteur, tout en tenant compte des spécificités liées au contexte automobile. Ce stage a porté principalement sur la partie algorithmique du problème, c'est à dire déterminer un algorithme capable de produire en continu un anti-bruit s'adaptant en temps réels aux variations du bruit de moteur.

Mots clés : Contrôle actif de bruit, Bruit de moteur, Algorithmes adaptatifs, Méthode des moindres carrés moyens

Abstract

This report is about active noise control applied to engine noise in the automotive context. The work done during this internship focuses on the design of an adaptive system that reduces one harmonic of the engine noise. This system should take into account the automotive specificity. This internship focused on the algorithmic part : design a real time algorithm that can generate an anti-noise and follow the changes in engine noise.

Key-words : Active Noise Control, Engine noise, Adaptive algorithms, Least mean square

Sommaire

Introduction	6
1 Contexte	7
1.1 Présentation de l'entreprise	7
1.2 Active Noise Control	7
1.2.1 Principes fondamentaux	7
1.2.2 Applications de l'ANC	8
1.2.3 ANC dans le contexte automobile	9
1.3 Principes théoriques	10
1.3.1 Principe Acoustique	10
1.3.2 Filtrage adaptatif	10
2 Etat de l'art	15
2.1 Historique	15
2.2 Bibliographie	16
2.3 Systèmes commercialisés	17
2.4 Etat initial du projet ANC Arkamys	18
3 Problématiques et simulations	21
3.1 Contexte et paramètres	21
3.1.1 Contraintes du système	21
3.1.2 Environnement de simulation	22
3.2 Problématiques préalables	24
3.2.1 Simulation du temps réel	24
3.2.2 Divergence et contrôle du niveau de l'anti-bruit	24
3.2.3 Erreur dans l'estimation du chemin secondaire	26
3.3 Problématique principale : Erreur dans l'information RPM	28
3.3.1 Tolérance selon le pas μ	29
3.3.2 Estimation de la fréquence à annuler	29
3.3.3 Modulation du signal	31
3.3.4 LMS basé sur le filtrage de Kalman	32
3.3.5 Méthode hybride FeedBack/FeedForward	34
3.3.6 Suivi adaptatif de la fréquence	36

3.3.7	Captation du signal de référence	37
4	Résultats et perspectives	41
4.1	Cas des références générées	41
4.2	Cas des références captées	42
4.3	Suite du travail	44
4.4	Perspectives du projet	45
	Conclusion	47
A	Analyse de l'algorithme FxLMS pour un signal de référence déterministe - Cas de la référence généré	48
B	Script Matlab de l'ANC avec référence captée	50
	Bibliographie	52

Introduction

Dans le cadre du master ATIAM, j'ai effectué un stage de recherche de 6 mois au sein de la société Arkamys [3], société spécialisée dans le traitement numérique du signal audio. Le stage s'est déroulé au sein de l'équipe innovation.

Ce stage a porté sur un système de réduction active de bruit (ANC pour *Active Noise Control*) pour l'automobile.

L'objectif d'un tel système est l'atténuation de bruit gênant produit par un moteur. L'atténuation est réalisée à l'intérieur de l'habitacle du véhicule, pour améliorer le confort auditif du conducteur et de ces passagers. Le système doit alors cadrer avec les contraintes automobiles (acoustique particulière de l'habitacle, spécificités du bruit de moteur, capacité d'implémentation dans un véhicule, ...) Il s'agit donc de créer des zones de calmes autour des têtes des utilisateurs en tenant compte des variations de régimes du moteur sans interférer avec des sons utiles du véhicule ou les sons de distractions (musique, discussion entre passagers, ...). Le système ANC tend aussi à être facilement implémentable au sein d'une voiture, avec peu de matériels et une solution algorithmique "simple" pouvant être portée sur une carte DSP.

Le projet ANC étant un projet préexistant au sein d'Arkamys je me suis donc principalement concentrée sur les améliorations possibles de ce système initial.

Après une interrogation sur la pertinence du système initial, mon stage a principalement porté sur les différentes méthodes utilisables pour contrer les faiblesses de ce système afin de le rendre utilisable en cas réels.

Dans ce rapport, Je vais d'abord présenter brièvement l'entreprise qui m'a accueillie, le contexte d'un projet ANC, ainsi que les concepts théoriques. Dans un second temps je vais développer l'état de l'art, les solutions existantes, et les bases déjà réalisées dans l'entreprise au début de mon stage. Puis je vais me pencher sur les problématiques traitées durant ce stage, et les solutions envisagées. Pour conclure je présenterais les résultats obtenus, les choix réalisés ainsi que les perspectives du projet.

Chapitre 1

Contexte

1.1 Présentation de l'entreprise

La société Arkamys[3] se spécialise depuis plus de 15 ans dans le traitement numérique du signal audio. Basée à Paris, l'entreprise s'est développée en ouvrant plusieurs antennes à l'international (Chine, Corée, Etats-Unis).

Cette entreprise a débuté grâce à des algorithmes de spatialisation sonore pour le cinéma. A l'heure actuelle, les solutions proposées par Arkamys portent principalement sur des améliorations de son pour les voitures (PSA, Renault, GM, Daewoo, etc...), téléphones mobiles (LG, Alcatel, etc...), ou les *home-cinemas*. Les produits d'Arkamys regroupent des solutions de spatialisation, d'élargissement sonore, de localisations de source sonore, d'amélioration de la parole, ou encore de création d'ambiance sonore.

1.2 Active Noise Control

Le contrôle actif du bruit (ANC pour *Active Noise Control*) est une technique permettant l'atténuation de bruits grâce à des sources de bruit additionnelles. Le contrôle actif de bruit (ANC pour Active Noise Control) s'oppose au contrôle passif, obtenu par exemple à l'aide de matériaux isolants. Les méthodes passives offrent des performances limitées dans certaines conditions que les méthodes actives permettent de surpasser, notamment en basses fréquences.

1.2.1 Principes fondamentaux

L'ANC repose sur le principe des interférences destructives.

L'intérêt est donc de produire en continu un anti-bruit similaire au bruit à annuler, mais en opposition de phase. Une unité de calcul va permettre la génération de l'anti-bruit, de manière adaptative pour suivre les variations du bruit.

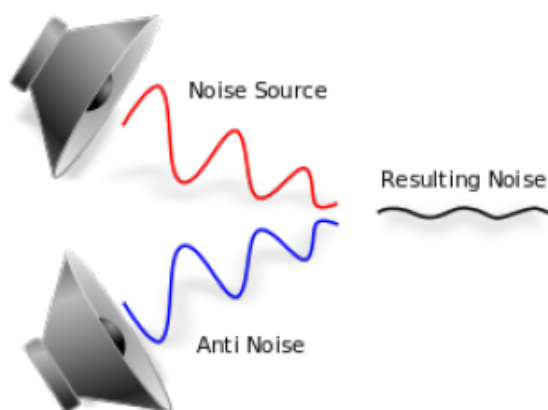


FIGURE 1.1 : Principes des interférences destructives

1.2.2 Applications de l'ANC

Le principe de contrôle actif de bruits trouve des applications dans plusieurs domaines, dont principalement :

- Casques anti-bruit : Depuis quelques années les casques à réduction active de bruit ont fait leur apparition sur le marché. Ce type de casque permet d'isoler l'utilisateur du bruit extérieur sans altérer le signal transmis par le casque. Le système est composé de microphones placés sur les coques extérieures qui captent le bruit et permettent de générer un anti-bruit en opposition de phase en tenant compte du filtrage effectué par les coques. La proximité entre le microphone, le haut-parleur et l'utilisateur permet d'atténuer efficacement une large bande de fréquences.
- Gaine d'aération : Les bruits produits par des systèmes d'aération peuvent être efficacement réduits. Le bruit est généralement périodique et la fréquence reste assez stable, ce qui facilite le traitement. Les systèmes ANC se déclinent dans les applications industrielles, afin de réduire des bruits périodiques de diverses machines.
- Habitacle de véhicule : L'ANC peut être utilisé pour réduire le bruit à l'intérieur de l'habitacle du véhicule, ou encore pour la réduction du bruit dans un cockpit d'hélicoptère [22] et aussi pour la réduction des bruits des moteurs. C'est sur cet aspect que ce stage porte, plus particulièrement pour les voitures.

En plus de ces applications, on retrouve dans la littérature des articles traitant d'utilisations plus marginales de l'ANC : Couveuse médicale pour bébés prématurés, oreiller anti-ronflement [26], ...

1.2.3 ANC dans le contexte automobile

Dans le contexte automobile un bruit trop important dans l'habitacle peut gêner les utilisateurs, générant de la fatigue pour le conducteur et des désagréments lors de discussion ou d'écoute de musique.

Trois sources de bruits sont identifiées

- Vibrations dues au contact entre le véhicule et la route.
- Bruits générés par les frottements de l'air à l'extérieur du véhicule.
- Bruits dûs au fonctionnement du moteur.

Dans ce projet ANC, nous nous focaliserons sur cette dernière source, pour atténuer le bruit généré par les rotations du moteur.

Bruit du moteur

Le bruit d'un moteur est un son harmonique auquel on peut associer une hauteur tonale. La fréquence fondamentale est directement reliée aux rotations par minute (RPM) du moteur, par la formule suivante :

$$f_0 = \frac{RPM}{60}$$

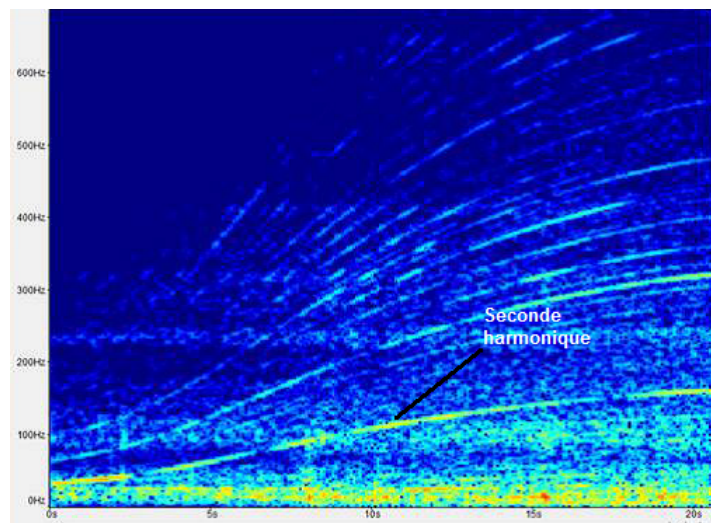


FIGURE 1.2 : Spectrogramme d'un son de moteur en accélération

La deuxième harmonique concentre une importante quantité d'énergie. Le bruit de cette harmonique est appelé bruit de combustion (ou *booming noise* en anglais), et correspond au bruit émis dans la phase d'explosion du moteur. Pour un moteur de n cylindres, on observe n explosions tous les deux tours de moteur. Ainsi la fréquence du bruit de combustion peut être connue de la manière suivante :

$$F_{booming\ noise} = \frac{n}{2} * \frac{RPM}{60}$$

$n = \text{nombre de cylindres}$

Ainsi cette harmonique varie entre 50 et 300 Hz. Cette zone risque d'interférer avec les fréquences basses d'un morceau de musique, mais également avec les fréquences fondamentales des voix.

De part son amplitude et sa position sur le spectre, cette fréquence s'avère particulièrement gênante pour les utilisateurs. C'est donc sur cette fréquence que ce système va se concentrer.

1.3 Principes théoriques

1.3.1 Principe Acoustique

L'ANC repose de manière fondamentale sur le principe acoustique des interférences destructives : deux ondes similaire en opposition de phase peuvent "s'annuler". Pour des ondes sonores, deux sons peuvent alors se sommer pour créer un "silence".

Dans une hypothèse de champ libre (sans obstacles et sans réflexions), pour adapter globalement un bruit, il faudrait superposer les sources de bruit et d'anti-bruit. (fig.1.3)

Cependant, dans le cas d'un système ANC pour l'automobile, on ne recherche pas une atténuation globale, mais seulement une atténuation sur une zone englobant les passagers.

La création d'interférences destructives dans les zones de calme va alors produire des interférences constructives sur d'autres zones. (fig . 1.4) Cependant, des lors que les passagers restent globalement statiques dans un véhicule, on ne se préoccupe pas de ces zones d'interférences constructives. En effet, les passagers évolueront dans les zones de calmes créées autour de leurs positions.

Malgré tout l'acoustique d'un habitacle de véhicule est très différente que celle d'un champ libre. Il est alors nécessaire de prendre en compte les effets de réflexions et d'acoustique modale de la cavité pour mettre en place un système ANC performant. L'étude acoustique d'un tel système n'as pas été traité durant ce stage. Cependant il est important de noter que l'installation du système réalisé pendant ce stage nécessitera une étude modale pour estimer la pertinence du placement des haut-parleur d'anti-bruit, l'efficacité du système et ses limites.

1.3.2 Filtrage adaptatif

Un système ANC suppose de connaître le signal que l'on cherche à annuler. En considérant ce signal connu, il n'est pas possible de se contenter d'utiliser ce signal en opposition de phase

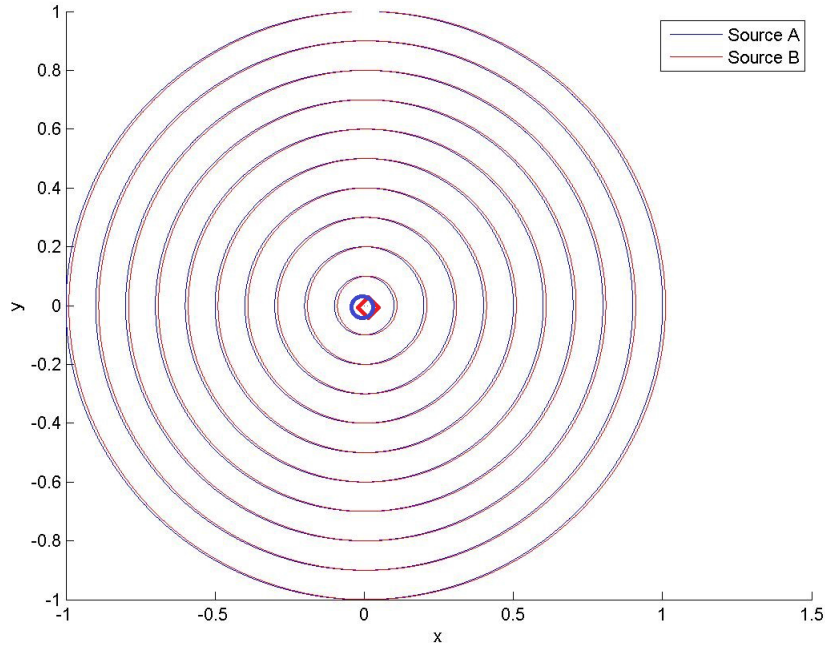


FIGURE 1.3 : Fronts d’ondes provenant de deux sources proches (par rapport à la longueur d’onde)

pour produire un anti-bruit. En effet, le trajet acoustique et les potentiels obstacles présents sur ce chemin agissent sur le signal à la manière d’un filtre. Il sera alors nécessaire de compenser les effets de ce filtrage mécanique.

Ce filtrage acoustique est susceptible de changer au court du temps, il est donc nécessaire de l’estimer de manière adaptative pour le compenser.(fig . 1.5)

Dans ce contexte de l’ANC, un algorithme de filtrage adaptatif est privilégié pour sa simplicité et sa stabilité. Il s’agit de l’algorithme LMS (Least Mean Square, ou algorithme des moindres carrés moyens). L’algorithme LMS apparaît dans un article de Widrow et Hoff en 1959. [38] Cet algorithme a fait l’objet de nombreuses études, conduisant à de diverses variantes, donc le FxLMS (Filtered X LMS), qui est l’algorithme mis en place dans la version initiale du système ANC d’Arkamys, développée par un précédent stagiaire.

Solution Optimale

Le problème consiste à estimer de manière optimale le filtre acoustique $P(z)$. Les filtres solutions sont appelés filtres de Wiener.

On peut exprimer le signal de sortie $e(n)$ à l’aide du filtre $W(z)$ (d’ordre Q) et du signal de référence $x(n)$.

$$e(n) = d(n) - [w \star x](n) = d(n) - w(n)^T .x(n) \quad , \quad e \in \mathbb{N} \quad (1.1)$$

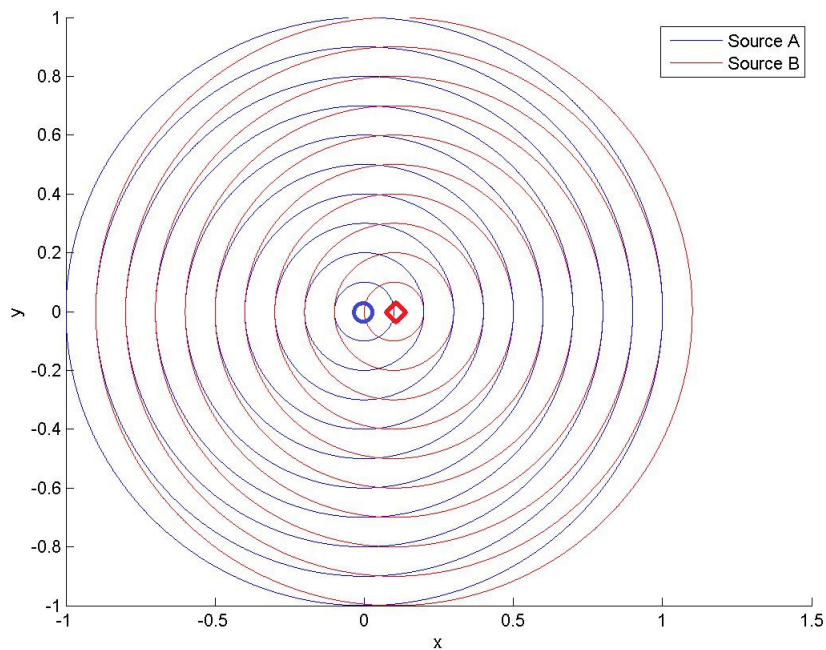


FIGURE 1.4 : Fronts d’ondes provenant de deux sources acoustiques espacées

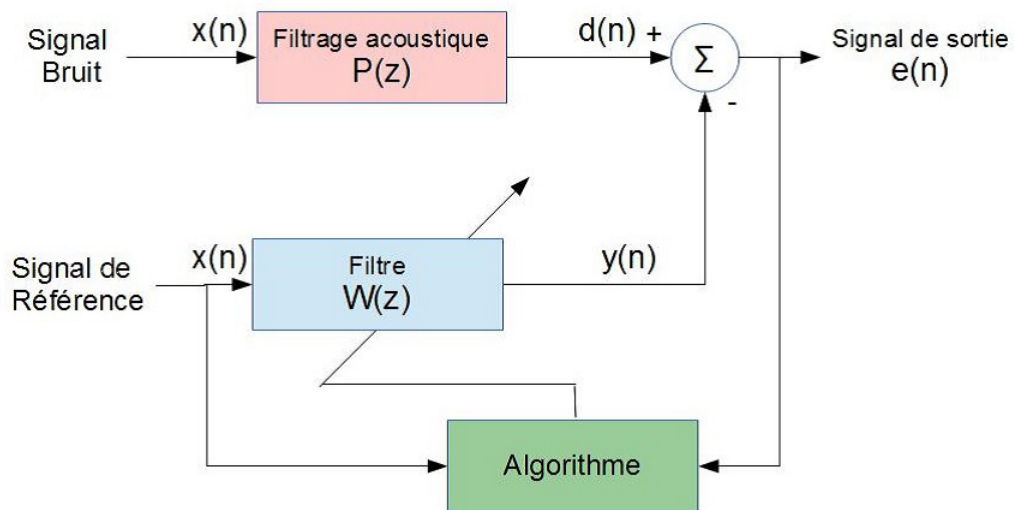


FIGURE 1.5 : Schéma bloc d’un système adaptatif

avec $w(n)$ les coefficients de W pris à l’instant N .

Le but est de minimiser le signal de sortie. On définit la fonction de coût.

$$J(n) = \mathbb{E}(e^2(n)) \quad (1.2)$$

$J(n)$ est l'erreur quadratique moyenne (*Mean square error* en anglais soit MSE) et est fonction du filtre W . Si J admet un minimum, il sera atteint au point critique. On dit alors que le filtre W est optimal au sens des moindres carrés.

$$\nabla J(w(n)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial J}{\partial w_0}(n) \\ \frac{\partial J}{\partial w_1}(n) \\ \vdots \\ \frac{\partial J}{\partial w_{Q-1}}(n) \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

Soit , pour k compris entre 0 et $Q-1$,

$$\frac{\partial J}{\partial w_k}(n) = 2 \mathbb{E} \left[\frac{\partial e}{\partial w_k}(n) e(n) \right] \quad (1.4)$$

Soit, d'après (1.1)

$$\frac{\partial e}{\partial w_k}(n) = -x(n-k) \quad (1.5)$$

D'ou

$$\frac{\partial J}{\partial w_k}(n) = -2 \mathbb{E} [x(n-k)e(n)] \quad (1.6)$$

Algorithme LMS

La solution optimale du problème de Wiener est la solution qui minimise la fonction de coût J . On peut utiliser un algorithme de plus grande pente qui converge vers la solution optimale à chaque instant. Ainsi, en connaissant (voir équation (1.3)) le gradient de la fonction J par rapport aux coefficients de W .

$$\nabla J(n) = 2 \nabla e(n)e(n) \quad (1.7)$$

et selon (1.3)

$$\nabla e(n) = -x(n) \quad (1.8)$$

Soit

$$\nabla J(n) = -2x(n)e(n) \quad (1.9)$$

L'algorithme LMS modifie itérativement les coefficients du filtre W en allant dans la direction inverse de celle du gradient de la fonction de coût. Le pas de déplacement est géré par le paramètre μ .

$$w(n+1) = w(n) - \hat{\mu} \nabla J(n) \tag{1.10}$$

En posant $\mu = 2\hat{\mu}$

$$w(n+1) = w(n) + \mu x(n)e(n) \tag{1.11}$$

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Historique

Le sujet de la réduction active de bruit n'est pas récent. Le premier brevet relatif à ce sujet est attribué à Paul Lueg en 1934 [33] . Ce document explique comment annuler des sons purs dans des tuyaux et étend la technique à plusieurs dimensions. (fig . 2.1)

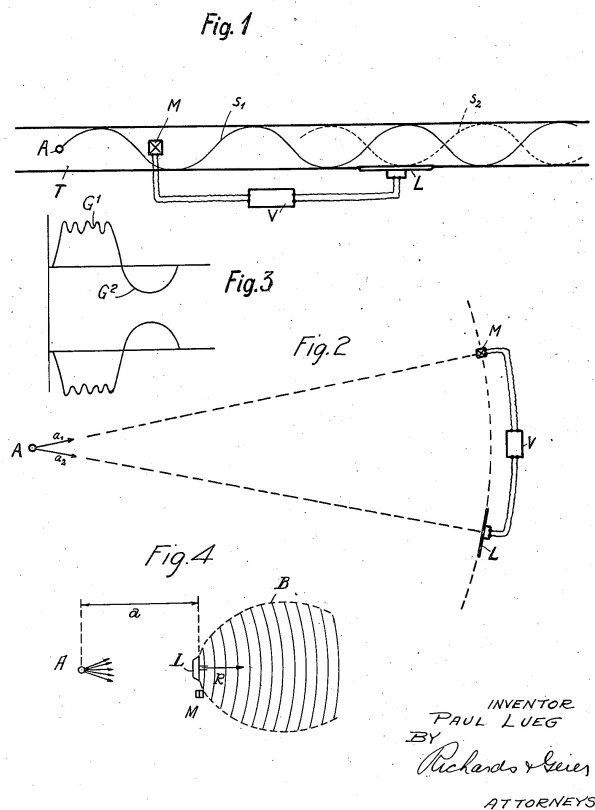


FIGURE 2.1 : Schema de Paul Lueg [33]

Dans le contexte automobile, on peut citer le système proposé en 1961 par Olson et May [32], qui consiste à placer un haut-parleur d'anti-bruit à proximité de la tête de l'utilisateur pour produire une "zone de calme". (fig . 2.2)

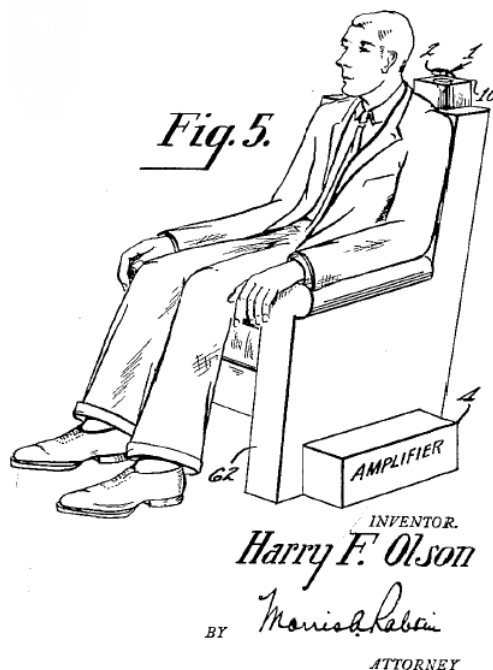


FIGURE 2.2 : Schema d'Olson et May [32]

Ces dernières années le sujet de l'ANC connaît un regain d'intérêt, grâce à l'évolution des microprocesseurs permettant l'implémentation des algorithmes adaptatifs et la perspective d'applications commerciales.

2.2 Bibliographie

L'état de l'art de l'ANC est riche compte tenu des diverses applications possibles. Pour introduire le sujet, des articles synthétisent les différentes approches et les algorithmes utilisables :

- *Active Noise Control*, par S.J.Elliott et P.A.Nelson [14], publié en 1993 ;
- *Active Noise Control : a tutorial review*, de Sen M.Kuo et Dennis R.Morgan [24] écrit en 1999 ;
- *A review of active Noise and vibrations control in road Vehicles*, publié en 2008 par S.j.Elliott [13].

Concernant les aspects acoustiques, on trouve l'article d'Emmanuel Friot [15], *une introduction au contrôle acoustique actif*, publié en 2006, qui regroupe des problématiques d'un tel système.

Des thèses portant sur l'ANC ont été réalisées : Celle de Jordan Cheer en 2012 [9], ou encore celle de Jari Kataja [21]. Bien que les sujets divergent un peu des problématiques de ce stage, ces thèses proposent des idées intéressantes.

Pour les algorithmes adaptatifs, il existe plusieurs articles d'analyse [39]. Un article de I.Ardekani et W.H.Abdulla [6] propose une analyse de l'algorithme LMS qui m'a permis de me familiariser avec le système initial de ce projet ANC. L'article *Analysis of the filtered-X LMS algorithm* de E.Bjarnason [7] donne aussi plus de précisions sur les variantes mises en place dans l'algorithme FxLMS. Le livre de S.Haykin, *Adaptive Filter Theory* [17] constitue également une ressource intéressante.

Les brevets industriels apportent aussi de riches informations, notamment sur les détails pratiques de réalisation d'un système ANC et les "astuces" envisageables pour l'implémentation. Le brevet de Renault [20] propose des "gardes fous" pour contrer un système défaillant par exemple.

Il existe aussi de nombreuses variantes de l'algorithme LMS : le *leaky LMS* [11] et de nombreuses variantes pour le calcul du pas d'adaptation [35, 12, 36, 16]. J'ai implémenté et testé plusieurs de ces variantes, pour tenter d'obtenir de meilleures atténuations ou des convergences plus rapides. Aucune de ces variantes n'ont fournies de résultats probants.

Concernant la problématique principale rencontrées au cours de ce stage, soit le suivi de fréquence et la différence fréquentielle entre le signal de bruit et le signal de référence, certains articles existent. La publication de Y.Hinamoto et H.Sakai [19], datant de 2007, analyse les effets du "*frequency mismatch*" pour l'algorithme FxLMS. Pour cette problématiques, il est aussi intéressant de regarder la littérature concernant l' "amélioration du son de moteur" (ESE, Engine Sound Enhancement). Certaines questions sont communes aux deux sujets, en particulier les problèmes liés au suivi fréquentiel. On peut citer les brevets de Bose [18] ou de Lotus [30], ou encore l'article de P.Boussard [8].

2.3 Systèmes commercialisés

Plusieurs systèmes ANC pour l'automobile existent. La commercialisation s'est accélérée ces dernières années. Le système proposé par Nissan en 1991 est probablement le premier système ANC pour voiture commercialisé [31]. Il fonctionne grâce à des haut-parleurs, des microphones et une unité de calcul indépendants de ceux du véhicule et sont donc particulièrement onéreux. Plus récemment, plusieurs systèmes ont fait leur apparition sur le marché :

- Système mis en place pour la Toyota Crown Hybrid [4] qui annonce une réduction globale

de 5 à 8dB avec trois haut-parleurs. (fig . 2.3)

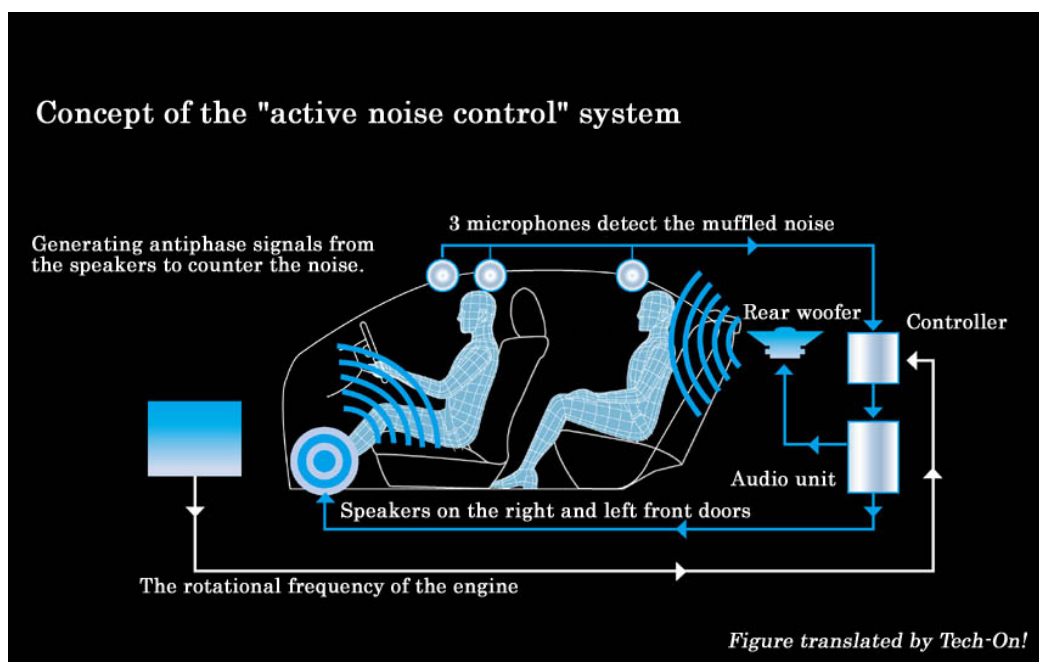


FIGURE 2.3 : Schema du système ANC de Toyota

- Neosonics PANC [2].
- Mentor Graphics Xse ANC [1] qui annonce une atténuation large bande et une convergence plus rapide que pour les algorithmes LMS et NLMS (Normalized LMS). (fig . 2.4)

Ces performances annoncées de ces systèmes sont à prendre avec précaution. Les mesures ont probablement été faites dans des conditions optimales : faible présence de bruit extérieur, fréquences judicieusement choisies, régimes moteurs stables ou à variations lentes, ...

2.4 Etat initial du projet ANC Arkamys

Mon travail fait suite au travail débuté un an plus tôt par un précédent stagiaire. Durant 6 mois il a conçu un système ANC fonctionnel dans des cas idéaux. Le système initial permet alors d'annuler totalement un sinus grâce à un algorithme FxLMS. Ce système initial a été écrit en langage C, et testé dans des conditions "réelles" (somme du bruit et de l'anti-bruit réalisé de manière acoustique). Les résultats de ces tests étaient, semble-t-il, mitigés.

Après une importante recherche bibliographique, son travail a porté sur l'analyse des différents algorithmes envisageables pour réaliser un système ANC : diverses variantes de l'algorithme

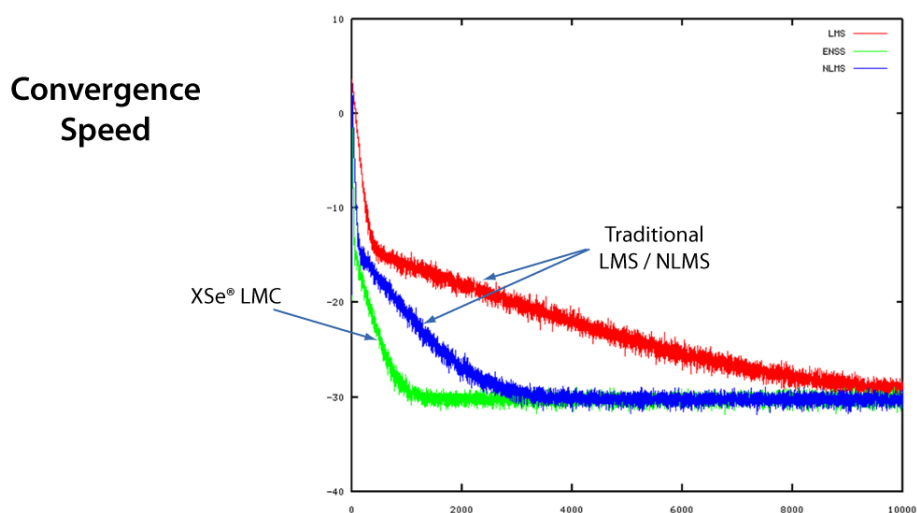


FIGURE 2.4 : Temps de convergence annoncé du Système de Mentor Graphics, comparaison avec les algorithmes LMS et NLMS.

Least Mean Square, algorithme des moindres carrés récursifs (RLS pour Recursive Least Squares). Il a aussi étudié la pertinence de la méthode prédictive (feedforward) par rapport à la méthode rétroactive (feedback). Pour des raisons de stabilité et de complexité algorithmique, son choix s'est porté sur l'algorithme FxLMS inclus dans une méthode feedforward.(fig 2.5)

Il a aussi permis de mettre en évidence les limites de son système, ce qui constitue alors les problématiques de mon travail : comportement du système en cas d'erreur de RPM ou d'estimation du chemin secondaire ; problèmes de divergence ; fonctionnement en temps réel.

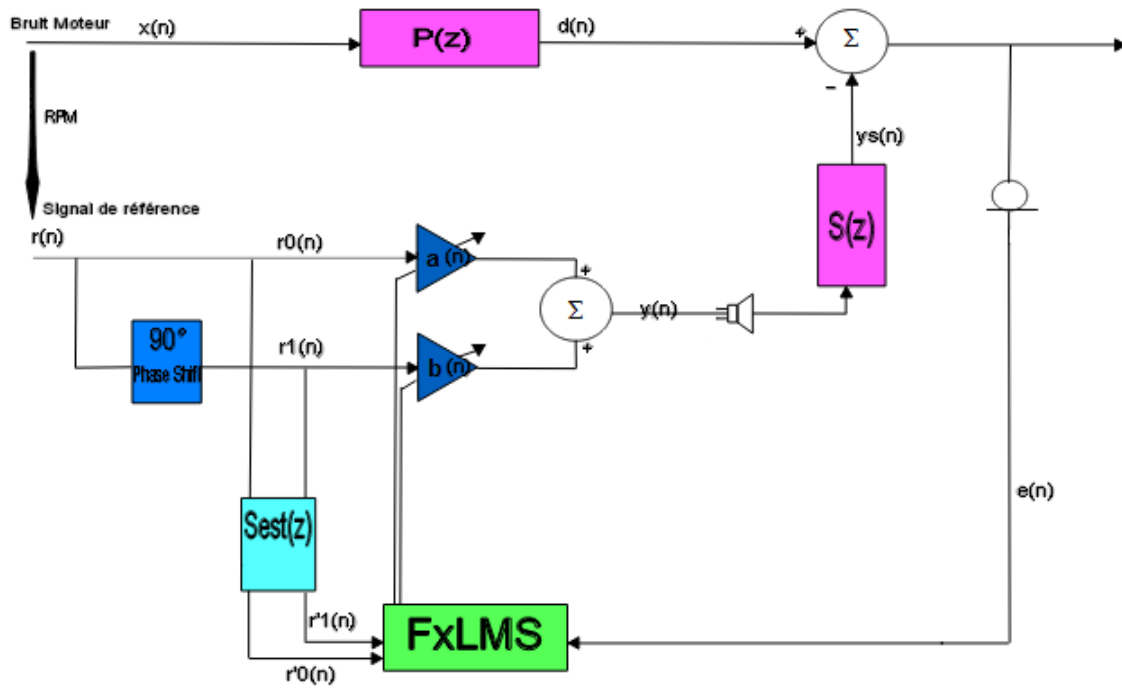


FIGURE 2.5 : Schéma bloc du système initial

Chapitre 3

Problématiques et simulations

3.1 Contexte et paramètres

Cette première section introduit les contraintes du système, ainsi que les conditions dans lesquelles les simulations ont été effectuées.

3.1.1 Contraintes du système

Puissance de calcul

La puissance de calcul embarqué dans une voiture est limitée. D'autres calculs sont effectués par l'unité de calcul embarquée et il faudra donc essayer d'avoir des algorithmes les plus légers possibles.

Largeur de bande

Le système que nous essayons de mettre en place s'apparente en fait à un filtre coupe-bande. En pratique, la largeur de la bande coupante ne sera pas nulle. La fréquence fondamentale de la parole pour un adulte varie de 85 à 255 Hertz et se situe exactement dans la zone de variation du *booming noise*. Ainsi lorsque les passagers discutent, il faudra essayer de faire en sorte que le système n'interfère pas. De même lorsque les passagers écoutent de la musique, il ne faudra pas que le système vienne couper les basses fréquences du morceau. Il faudra donc veiller à garder une bande coupante la plus étroite possible.

Capacité d'adaptation

Malgré les nombreuses perturbations qui interviendront lors de l'utilisation du système, celui-ci doit être capable de s'adapter rapidement. Ainsi, si le conducteur accélère ou freine brutalement, le bruit dans l'habitacle ne doit pas soudainement augmenter. Il est donc nécessaire de veiller à ce que la capacité de poursuite du système (souvent appelée *tracking*) soit bonne.

Surveillance des signaux émis

Il faudra mettre en place des mécanismes de surveillance stricte du système. L'ANC est un système actif qui émet des ondes sonores. En effet, un dysfonctionnement pourrait entraîner un niveau sonore élevé dans l'habitacle.

3.1.2 Environnement de simulation

Les simulations détaillées dans la section suivante ont été effectuées dans le logiciel Matlab. Les simulations effectuées portent sur la partie algorithmique du problème. En effet, modéliser un environnement acoustique fidèle au cas étudié est assez difficile. Ainsi, tous les phénomènes de propagation ou de résonance propres à l'acoustique du véhicule sont négligés dans ces simulations.

Les simulations ont été effectuées dans un contexte monocanal (un seul microphone d'erreur et un seul haut-parleur d'anti-bruit)

Signaux testés

Les différentes méthodes ont tout d'abord été testées sur des signaux de synthèse, en complexifiant progressivement les signaux :

- Sinus pur.
- Somme de sinus pour tester la sélectivité du système.
- Signal harmonique, soit une synthèse d'un bruit de moteur. (fig . 3.1)

Des variantes de ces signaux ont aussi été utilisés : bruitage plus ou moins important et variations des fréquences pour simuler les accélérations ou décélérations du moteur.

En cas de résultats satisfaisants sur des signaux de synthèse, les simulations ont ensuite été testées sur des signaux réels (bruits de moteur enregistrés) pour des fréquences fixes et pour des fréquences variables. (fig . 3.2)

Chemins Acoustiques

Les chemins acoustiques ($S(z)$ et $P(z)$ pour la configuration initiale d'ANC Arkamys) sont modélisés par des filtres numériques à réponse impulsionnelle finie. Dans un premier temps, les filtres sont de simples délais et gains. Si les résultats sont satisfaisants, les simulations sont réalisées avec des réponses impulsionnelles mesurées dans un véhicule. (fig . 3.3)

Elles ont été mesurées au niveau de la tête des différents passagers pour un signal émis de différents point du véhicule, en particulier des 4 haut-parleurs. Le temps de propagation (trajet direct) est paramétrable.

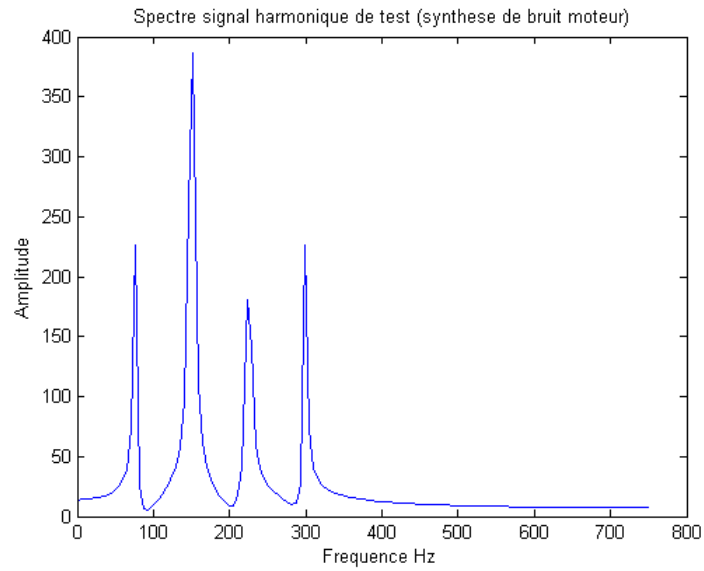


FIGURE 3.1 : Spectre du signal de test composé de plusieurs harmoniques (Synthèse du bruit moteur)

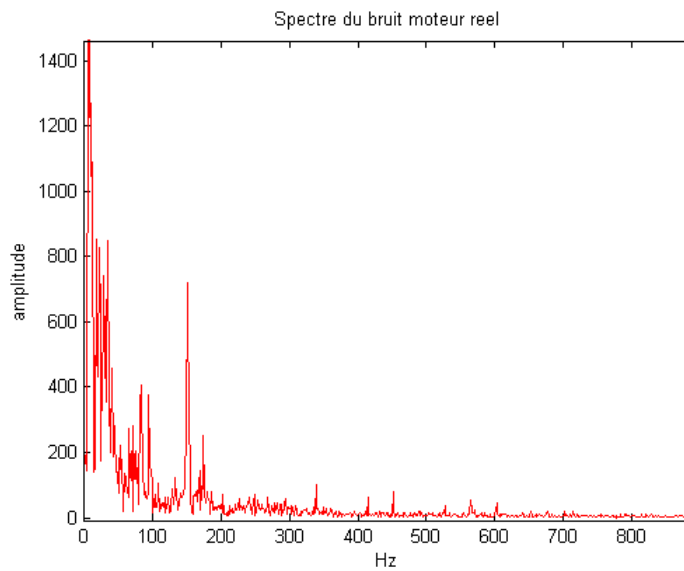


FIGURE 3.2 : Spectre du signal enregistré de bruit de moteur à régime stable (Bruit de combustion à 150 Hz)

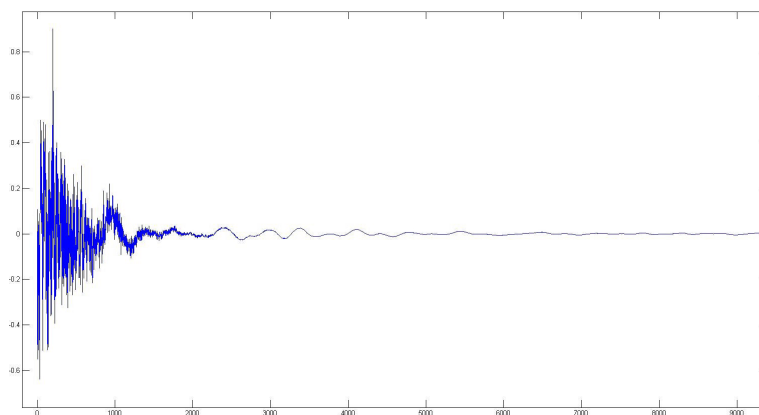


FIGURE 3.3 : Réponse impulsionnelle correspondant au chemin secondaire entre le HP avant gauche et le microphone placé au niveau de la tête du conducteur

3.2 Problématiques préalables

3.2.1 Simulation du temps réel

Le prototype initial se base sur un cas idéal, et ne prend donc pas en compte certains éléments d'une utilisation réelle, en particulier les transitions entre le domaine électrique et acoustique.

L'acquisition et la restitution des signaux au niveau du haut-parleur d'anti-bruit et du micro d'erreur vont produire des retards dans la transmission du signal. Le signal d'erreur sera acquis par trame de taille B : pendant le traitement de la trame n , la trame $n-1$ sera transmis par le haut-parleur, et la trame $n+1$ sera acquis au niveau du micro. Cela rajoute deux retards B entre la sortie y du filtrage adaptatif et le signal e utilisé pour le LMS. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces retards dans l'estimation S_{est} du chemin acoustique S (chemin acoustique entre le haut-parleur et le micro). La nouvelle estimation sera donc S_{est} (estimation de S) plus un retard de taille $2*B$. (fig . 3.4)

Pour la calibration du système, il est donc nécessaire de connaître les retards produits au niveau haut-parleur/micro pour obtenir une estimation S_{est} la plus précise possible.

3.2.2 Divergence et contrôle du niveau de l'anti-bruit

Plusieurs paramètres peuvent causer la divergence de l'algorithme (pas d'adaptation trop grand, ou erreur d'estimation des chemins acoustiques par exemple). Dans ce cas, le niveau de l'anti-bruit augmente de manière exponentielle, pouvant causer une gêne importante pour l'utilisateur. (fig . 3.5)

Il est donc important d'inclure dans le système ANC une solution pour éviter une divergence trop importante. La méthode la plus efficace pour contrer cet effet est l'arrêt de l'ANC en cas de divergence. Cela arrête temporairement l'atténuation et permet de prévenir un volume

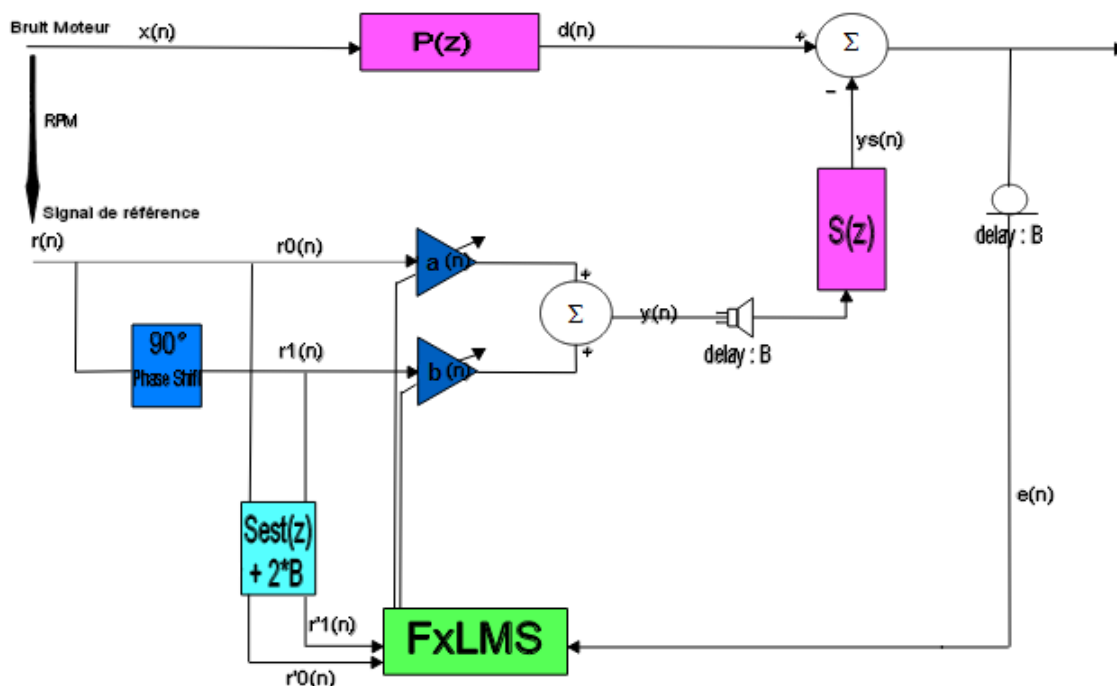


FIGURE 3.4 : Schéma incluant les retards B

sonore excessif dans l'habitacle. Il faut alors déterminer un critère d'arrêt pour l'algorithme, ici plusieurs choix sont possibles :

- Seuil d'arrêt : fixer un seuil du niveau sonore pour l'erreur captée, au-dessus duquel l'ANC serait désactivé. Cependant le micro d'erreur ne capte pas uniquement le bruit du moteur mais tous les sons environnants. Le seuil pourrait alors être dépassé par d'autres sources de bruit, par exemple en cas de paroles fortes de l'utilisateur situé à proximité du micro d'erreur.
- Moyenne sur les valeurs précédentes : Si l'erreur reçue par le micro à un instant t est supérieure à la moyenne des x échantillons d'erreur précédents, l'ANC est désactivé.
- Surveillance du niveau de l'anti-bruit : fixer un seuil que le niveau de l'anti-bruit ne peut dépasser. Par contre, pour un seuil trop bas, cela peut dégrader quelque peu les performances du système.

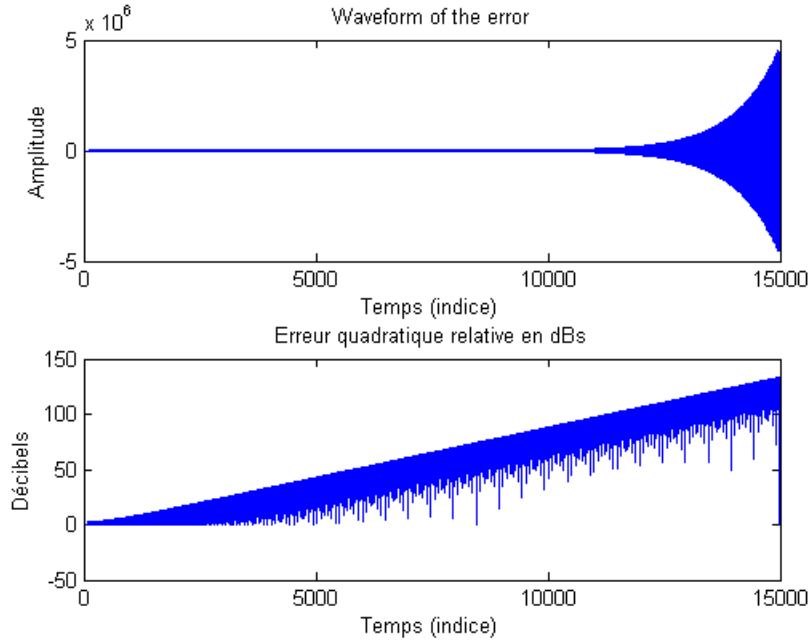


FIGURE 3.5 : Évolution de la forme d’onde et du niveau de l’anti-bruit en cas de divergence du système

3.2.3 Erreur dans l’estimation du chemin secondaire

Dans le cas initial le chemin acoustique S est estimé en un filtre S_{est} . S_{est} est modélisé par un délai et un gain, modélisation suffisante pour le bon fonctionnement de l’algorithme. Cette version est appelé *Delayed-X LMS* dans la littérature [23, 10].

En cas d’erreur dans l’estimation du gain, le filtrage adaptatif compense cette erreur. En revanche pour une erreur dans l’estimation du délai, l’algorithme risque de diverger. (animation .3.6)

Cependant une tolérance existe : l’algorithme converge si l’erreur d’estimation du délai est telle que :

$$n * \lambda - \frac{\lambda}{4} \leq \text{Erreur Délai} \leq n * \lambda + \frac{\lambda}{4} \quad , \quad n \in \mathbb{N} \quad (3.1)$$

Avec

$\lambda = \text{Longueur d'onde de la fréquence cible}$

$\text{Erreur délai} = | \text{longueur délai } S - \text{longueur délai } S_{est} |$

Dans cette zone de tolérance, l’atténuation n’est pas optimale : le temps de convergence s’allonge légèrement avec l’erreur d’estimation mais reste dans tous les cas, satisfaisante. Hors de cette zone, l’algorithme diverge.

FIGURE 3.6 : Représentation temporelle du signal d'erreur selon l'erreur d'estimation du chemin secondaire

Pour corriger cet effet des méthodes d'estimation adaptative du chemin secondaire existent dans la littérature [40, 5], ou d'autres approches permettent d'abstenir d'identifier le chemin secondaire [44, 29]. Mais ces solutions sont complexes et peuvent être sources d'erreurs.

Une approche plus simple est proposée. En cas de divergence (symptôme d'une erreur d'estimation du chemin secondaire), augmenter le délai de *Sest* est possible jusqu'à atteindre une zone de tolérance (repérable par l'arrêt de la divergence). En effet, plusieurs zones de tolérances existent autour des multiples de λ . On ne va donc pas forcément chercher à atteindre une estimation précise du chemin secondaire, mais une estimation modulo λ .

L'augmentation est ici d'un échantillon par trame d'acquisition en cas de divergence cependant le taux d'augmentation doit être réglée en fonction de la taille du trame d'acquisition et du seuil de détection de la divergence. Le délai du chemin secondaire est facilement modifiable, même pour des réponses impulsionnelles mesurées dans un habitacle. Le temps d'adaptation

peut alors atteindre quelques secondes en cas d'erreur importante, mais cela reste préférable à un risque de divergence.

3.3 Problématique principale : Erreur dans l'information RPM

Dans la configuration initiale de la solution ANC, l'anti-bruit est généré à partir d'une information de RPM (Rotations Par Minutes du moteur), provenant du CAN du véhicule. Le CAN (Controller Area Network) est un bus série qui permet de transmettre les informations nécessaires aux différentes unités de calcul du véhicule (informations de sécurité, de confort, de détection des anomalies, ...)

Cependant cette approche, très efficace dans un cas idéal, perd son intérêt en cas d'erreur dans l'information RPM.

Ce signal peut être imprécis ou retardé, principalement à cause de sa fréquence de rafraîchissement variable : De nombreuses informations transitent par le CAN et l'information RPM n'est pas prioritaire. Cette information peut alors ne pas être transmise, ou être retardé en cas de besoin plus prioritaire dans le CAN (informations de sécurité par exemple). On peut envisager d'extrapoler l'information RPM pour contrer l'effet de retard, mais cela reste imprécis et produit de nombreuses erreurs. La fréquence du *booming noise* peut varier rapidement (en cas d'accélération ou de décélération), un retard de l'information RPM peut donc rapidement créer une différence entre la fréquence du *booming noise* réel et la fréquence de l'anti-bruit généré.

L'article de Y.Hinamoto et H.Sakai apporte une analyse de ce phénomène et détaille les effets produits. [19] (fig . 3.7)

Par exemple, pour le FxLMS (soit la configuration initiale du système), au-delà d'une erreur de 30 RPM, le système n'atténue plus le bruit, et en dessous l'atténuation est moindre (10 dB d'atténuation pour une erreur de 10 RPM sur un sinus pur, 5 dB pour 20 RPM et 1,5 dB pour 30 RPM). On observe une augmentation si l'erreur RPM augmente trop. (animation .3.8)

La problématique principale est donc de contrer cette différence de fréquence pour permettre une atténuation constante. Cette problématique en contient en réalité deux :

- L'atténuation en présence de *Frequency Mismatch*, soit en cas de différence de fréquence entre le bruit réel et l'anti-bruit produit.
- Le *tracking*, soit la capacité du système à suivre des variations de fréquences rapides (en cas d'accélération ou de décélération), malgré un potentiel retard de l'information RPM.

Le travail réalisé ici porte surtout sur le *frequency mismatch*. Pour ce faire différentes approches ont été étudiées et testées.

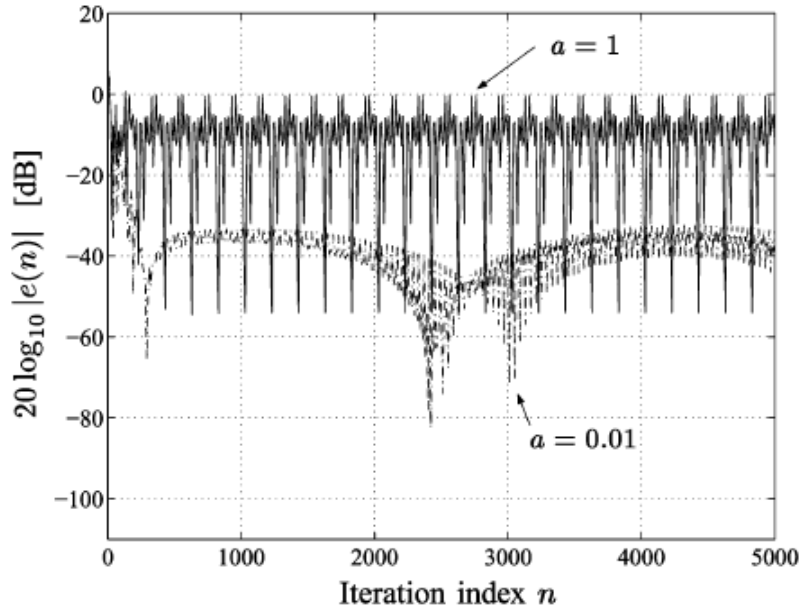


Fig. 2. Learning curves in decibels when the frequency mismatch exists. (True signal frequencies: $\omega_{s1} = \pi/4 + a \times 10^{-2}\pi$, $\omega_{s2} = \pi/2 + 3a \times 10^{-2}\pi$, $\omega_{s3} = 3\pi/5 + a \times 10^{-2}\pi$. User-specified frequencies: $\omega_1 = \pi/4$, $\omega_2 = \pi/2$, $\omega_3 = 3\pi/5$).

FIGURE 3.7 : Effet du *Frequency Mismatch*- Article de Y.Hinamoto et H.Sakai [19]

3.3.1 Tolérance selon le pas μ

Des articles [25, 42] mettent en avant le fait que la tolérance au *frequency mismatch* soit plus importante si le pas du LMS est plus grand. Cet effet se vérifie en simulation. (fig . 3.9) Le pas μ permet aussi une convergence plus rapide de l'algorithme, on cherche à utiliser le pas le plus grand possible.

Cependant si le pas est trop important, l'algorithme diverge. La tolérance pour $\mu = \mu_{max}$ convergence est faible (environ 1 Hz, soit 30 RPM).

3.3.2 Estimation de la fréquence à annuler

Pour éviter les erreurs de RPM, il est pertinent d'envisager de s'affranchir de cette information en estimant directement la fréquence à atténuer, en se basant sur une analyse fréquentielle des signaux captés. [43]

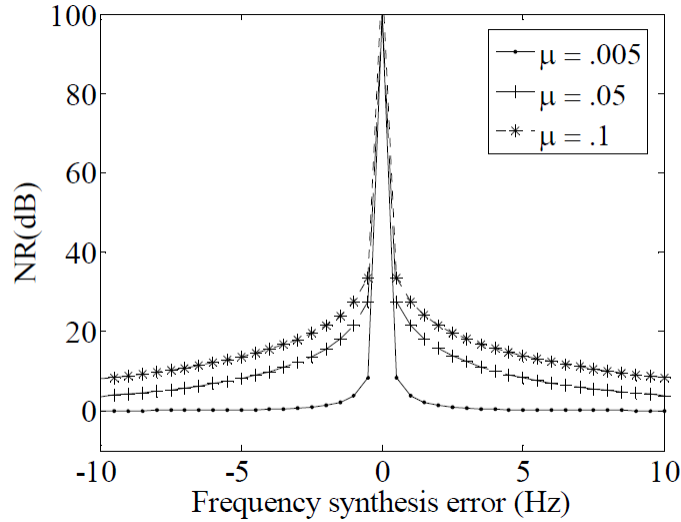
Pour cela, il est possible de capter préalablement le bruit produit par le moteur à un autre endroit de l'habitacle où aucune atténuation n'est effectuée. A partir de ce bruit capté, il serait possible d'estimer la fréquence fondamentale du bruit.

Cependant cette approche n'est pas réellement intéressante dans l'optique d'estimer ensuite

FIGURE 3.8 : Representation temporelle du signal d'erreur selon l'erreur dans l'information RPM

la fréquence. En effet, si un signal de bruit est capté, on pourrait envisager d'utiliser ce signal capté comme signal de référence (à la place du signal généré). Dans ce cas, une estimation de fréquence n'est plus nécessaire.

Pour connaître la fréquence du signal de bruit sans le capter directement, on peut envisager d'estimer cette fréquence grâce au signal d'erreur. Le *booming noise* correspond ici à la seconde harmonique du son produit par le moteur. On peut envisager une estimation de la fréquence fondamentale du signal d'erreur, puis obtenir la fréquence du *booming noise* par multiplication. Le problème est le temps de traitement nécessaire pour estimer la fréquence fondamentale. Ce temps sera relativement long : la fréquence fondamentale estimée sera en retard sur le son réel et ne correspondra plus au bruit du moteur, surtout lorsque le véhicule est dans une phase d'accélération ou de décélération. De plus, le signal capté est très bruité et parasité par d'autres bruits (vibrations de la voiture par exemple), l'estimation peut alors s'avérer


 FIGURE 3.9 : Tolérance au *Frequency Mismatch* selon le pas μ - Article de S.M.Kuo [25]

imprécise.

3.3.3 Modulation du signal

Dans le système initial, le signal d'anti-bruit est construit de la manière suivante :

$$y(n) = a(n) \cos(2\pi n F_{\text{porteuse}}) + b(n) \sin(2\pi n F_{\text{porteuse}}) \quad (3.2)$$

Ce signal correspond à une modulation d'amplitude en quadrature de phase (modulation QAM) : avec F_{porteuse} la fréquence des deux porteuses en quadrature de phase (fréquence obtenue grâce à l'information RPM), et a et b les signaux modulateurs.

En cas de différence entre F_{porteuse} et F_{bruit} , l'algorithme FxLMS crée des signaux a et b périodiques avec une fréquence $|F_{\text{porteuse}} - F_{\text{bruit}}|$ qui permet de produire des bandes latérales aux fréquences F_{bruit} , avec une phase opposée au bruit de combustion et $F_{2 * \text{porteuse} - \text{bruit}}$. (fig . 3.10)

On peut alors envisager de fixer la fréquence de la porteuse sur une valeur haute par rapport à l'ambitus du bruit de moteur et d'utiliser la bande latérale comme anti-bruit.

Une fois ce signal produit, il faut alors isoler cette bande du reste du signal. Pour cela, l'option retenue est de filtrer ce signal à l'aide d'un filtre passe bande, avec des fréquences de coupure situées autour de la fréquence obtenue avec l'information RPM.

Cette méthode est robuste aux erreurs du signal RPM : la modulation permet de créer un anti-bruit sans apport d'information RPM et le filtrage, dépendant de cette information, peut être paramétré pour admettre une tolérance assez large sur la précision du RPM.

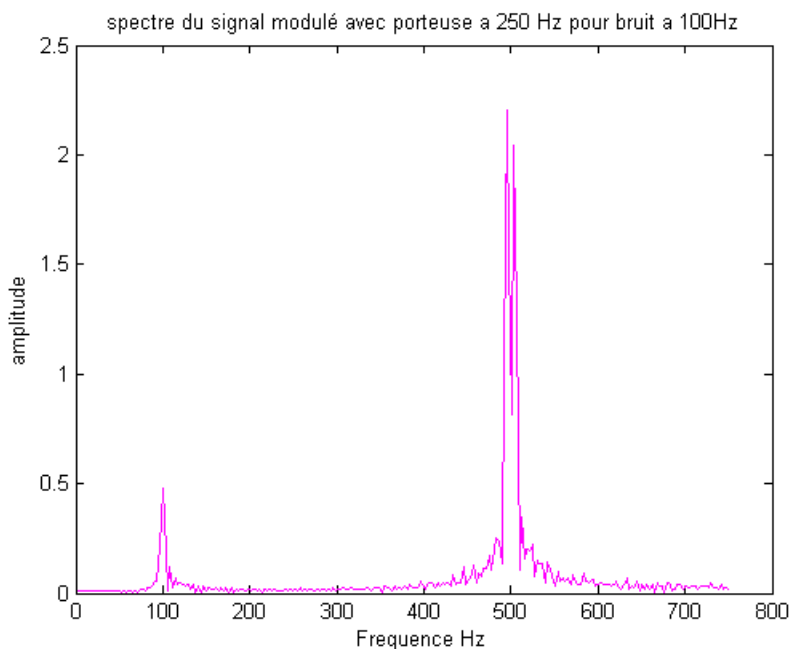


FIGURE 3.10 : Spectre de l’anti-bruit créé par modulation de porteuse. Porteuse à 300 Hz et bruit à annulé : Sinus à 100Hz

Cependant deux problèmes existent. Premièrement l’amplitude de la bande latérale créée est très faible et l’amplification nécessaire pour rendre l’anti-bruit efficace amplifie aussi des éléments indésirables présents dans le signal.(figure 3.10)

Deuxièmement, malgré l’efficacité de cette approche dans des cas idéaux, elle reste très sensible aux bruits parasites.

Dans le cas réel, le micro d’erreur va capter d’autres informations que l’erreur résiduelle du LMS. Devant ces autres informations, la bande latérale d’anti-bruit va s’enrichir de nouvelles fréquences correspondant à ces informations parasites. Cela peut conduire à une atténuation de fréquences utiles, ou à une divergence de l’algorithme. Cet effet sera exacerbé en cas d’amplification de l’anti-bruit (dans le but de la rendre utilisable).

A partir de cette idée, d’autres tests ont été effectués avec d’autres types de modulation (FM, AM) mais aucun de ces différents tests n’a produit de résultats utilisables.

3.3.4 LMS basé sur le filtrage de Kalman

Dans la littérature, on retrouve des articles traitant de l’utilisation des filtres de Kalman pour un système ANC, ou de variantes de l’algorithme LMS basées sur des filtres de Kalman. [28, 27] Cette approche devrait contrer les approximations dues au bruit des signaux et aux retards des mesures. Les articles de P.A.C Lopes en particulier proposent un algorithme de *Kalman Based LMS*(KLMS) permettant un meilleur *tracking*. Ils utilisent un signal de référence réel (captation du bruit à l’origine) mais peuvent être adaptés au cas d’un signal de référence de

synthèse. [27]

L'algorithme KLMS se présente de la manière suivante :

Initialisation

$$w(0) = 0$$

$$P_T = 0$$

Itération

$$e(n) = d(n) - y(n)$$

$$P(n) = u^H(n)u(n)$$

$$w(n+1) = w(n) + \frac{u(n)e(n)}{P(n) + P_T(n) + q\nu}$$

$$P_T(n+1) = P_T(n) + P(n)$$

Avec :

- $w(n)$, l'échantillon courant du filtre adaptatif (assimilable au coefficients a et b du système initial).
- $e(n)$, le signal d'erreur capté.
- $d(n)$, le bruit capté au niveau du signal d'erreur, soit le bruit filtré par le chemin acoustique $P(z)$.
- $y(n)$, l'anti-bruit, soit $u(n)$ filtré par w .
- $u(n)$, le signal de référence.
- $q\nu$ la matrice d'auto-corrélation du bruit de mesure. Cette valeur est difficilement mesurable dans le cas actuel.

Cette méthode a été implémentée et testée dans une simulation.

On retrouve alors les performances annoncées dans les articles. Par exemple le *tracking* est bien meilleur qu'avec le FxLMS. Cela permet un meilleur suivi en cas d'informations RPM interpolées (ou extrapolées) mais surtout une atténuation plus constante et plus importante en cas de variations rapides de la fréquence.

Malgré ces performances de *tracking*, cet algorithme ne présente pas de tolérance aux erreurs de l'information RPM : pour une erreur d'une valeur de RPM (génération d'un signal à partir de 4501 rotations par minutes pour un bruit correspondant à 4500 rotations par minute), il n'y a plus aucune atténuation de bruit. On observe au contraire une légère augmentation du niveau de l'erreur. Cette approche peut alors être très avantageuse pour combler les imprécisions de l'information RPM et les informations manquantes (en cas de signal prioritaire sur le RPM dans le CAN). Cependant, en cas de retard de cette information, on observera une erreur persévérante sur l'information RPM et dans ce cas le KLMS permet moins d'atténuation que le FxLMS.

3.3.5 Méthode hybride FeedBack/FeedForward

La méthode feedforward (pro-active) est la méthode utilisée dans le système initial : l'algorithme LMS se base sur un signal de référence et un capteur d'erreur.

La méthode feedback (rétro-active) permet de s'affranchir de l'information de RPM. Cette méthode consiste à créer un signal de référence en sommant le signal d'erreur capté et l'anti-bruit produit à l'itération précédente. Cette technique permet alors d'avoir une référence plus proche du bruit réel mais ne permet pas une sélectivité fréquentielle dans le bruit à atténuer. Cet algorithme ne permettrait donc pas d'atténuer seulement l'harmonique correspondant au *booming noise* : cela peut produire une meilleure atténuation du bruit moteur en atténuant d'autres harmoniques . Cependant cela risque d'atténuer d'autres bruits captés par le micro d'erreur (parole, musique), ce qui s'avère assez problématique. La méthode feedback offre de bonne performance de suivi de fréquence.Cependant la convergence est moins rapide que pour un algorithme feedforward. Le principal problème de cette méthode est le suivant : lorsque qu'une "atténuation maximale" est atteinte, l'algorithme tente d'atténuer une autre fréquence (qui est alors la plus présente) et on observe donc une augmentation périodique du niveau de l'erreur.(fig . 3.11)

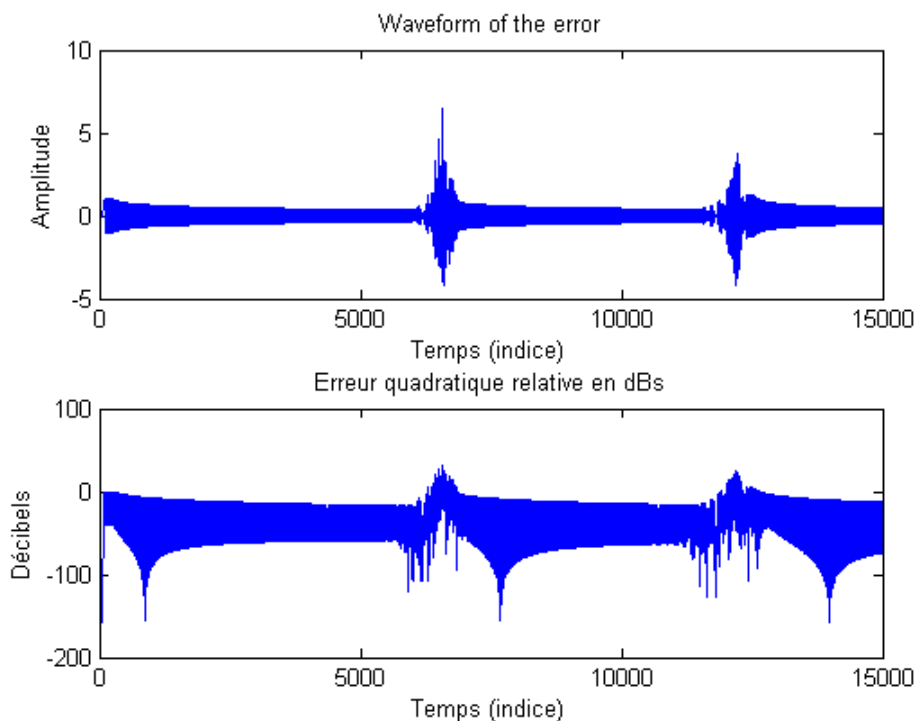


FIGURE 3.11 : Evolution du niveau de l'erreur avec la méthode *feedback*

La méthode hybride consiste à utiliser simultanément les méthodes feedback et feedforward.

Elle produit alors deux anti-bruits qui sont alors sommés (et pondérés) afin d’obtenir un anti-bruit hybride. [34] Le but de cette méthode est de mixer les performances des deux différents algorithmes : la sélectivité de la méthode feedforward, le meilleur suivi de fréquence de la méthode feedback, ainsi que de contrer les *frequency mismatch* en se basant sur l’anti-bruit de la méthode feedback.(fig .3.12)

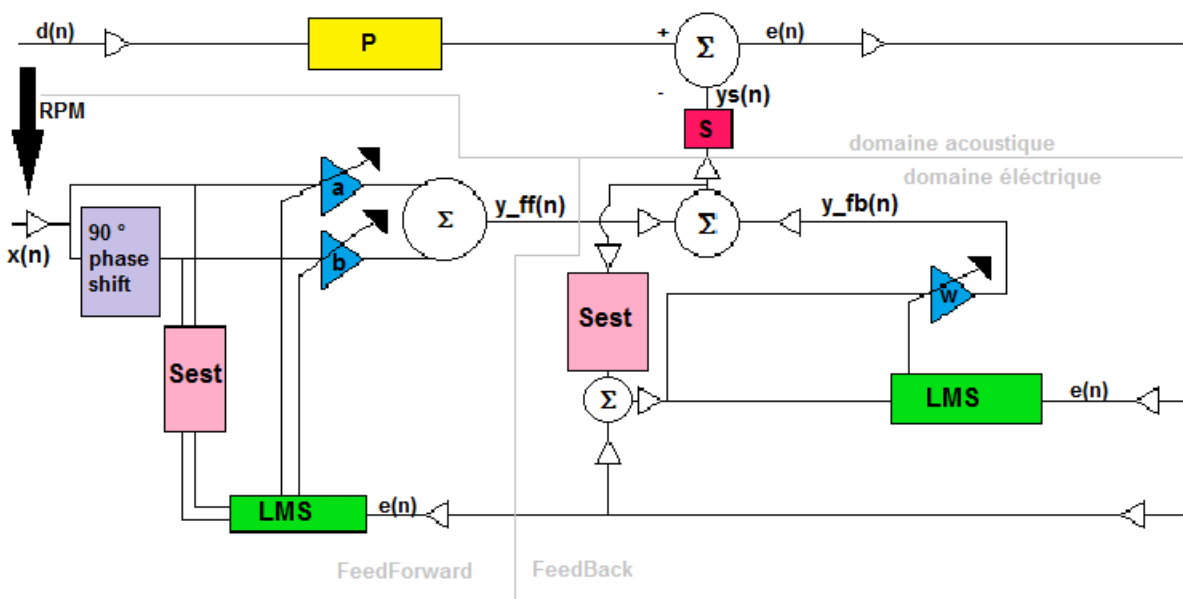


FIGURE 3.12 : Schéma de la méthode hybride

Les résultats sont globalement cohérents avec l’hypothèse de départ. La tolérance de l’erreur est plus grande que pour l’algorithme feedforward : atténuation possible pour une erreur allant jusqu’à 300 RPM. La convergence est également plus rapide (pour des conditions identiques) que pour la méthode feedback. Cependant, l’effet indésirable de l’algorithme rétroactif est présent en cas d’erreur trop importante : au-delà de 50 RPM d’erreur, on observe une atténuation périodique (atténuation d’environ 20 dB, puis arrêt de l’atténuation).(fig .3.13)

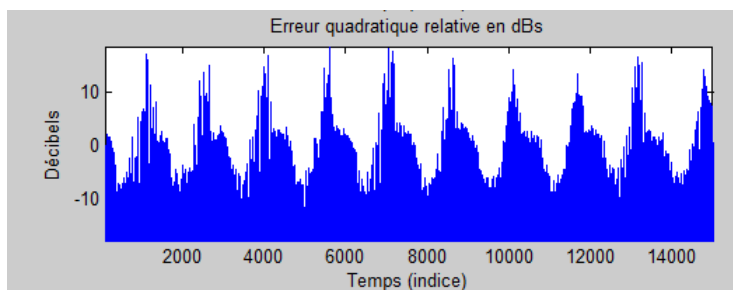


FIGURE 3.13 : Evolution du niveau de l’erreur pour la méthode hybride sur un sinus pur avec un *Frequency mismatch* de 100 RPM

Les performances de cette méthode sont meilleures que la méthode feedback pour un RPM correct (sans erreur). En cas d'erreur de l'information RPM, la tolérance est meilleure que la méthode feedforward mais présente des désagréments incontournables qui peuvent rendre inintéressant le système. En effet le but est d'obtenir une atténuation continue.

Les légers avantages de la méthode hybride ne justifient pas de favoriser son utilisation (par rapport à la méthode feedforward seule). De plus la méthode hybride est plus complexe que le système initial (deux algorithmes LMS en parallèle contre un seul).

3.3.6 Suivi adaptatif de la fréquence

Dans son article [41], Y.Xiao propose une méthode, s'inspirant de la méthode feedback, permettant grâce au signal d'erreur de générer un signal de référence à la fréquence voulue : *A Robust Narrowband ANC System* (PNR ANC). Le but est d'évaluer de manière adaptative, à l'aide d'un algorithme LMS, la fréquence de référence pour éviter les effets de "frequency mismatch" et surtout pour permettre un bon suivi fréquentiel.(fig . 3.14)

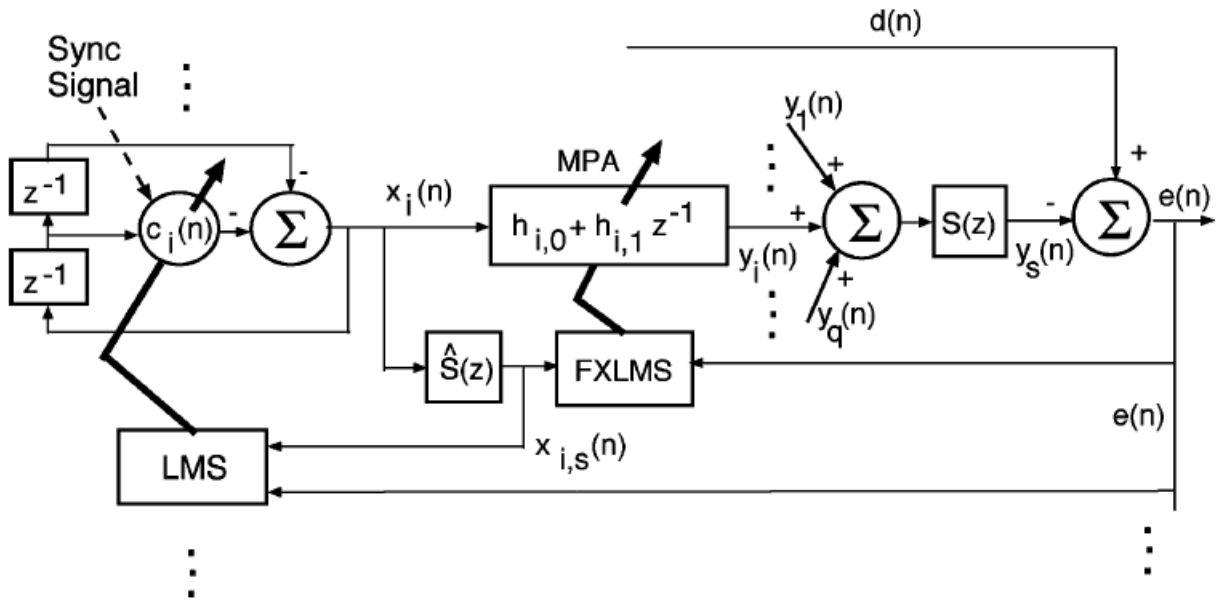


Fig. 5. Proposed robust narrowband ANC system (*i*th channel).

FIGURE 3.14 : Schéma d'ANC avec suivi adaptatif de la fréquence PNR ANC- Article de Xiao [41]

Cette technique a été implémentée dans Matlab et testée. Le *tracking* est en effet satisfaisant : même pour des variations rapides la fréquence dominante de l'anti-bruit suit la fréquence du

bruit à annuler. Cependant l'anti-bruit produit est à un niveau très faible, donc pas utilisable.

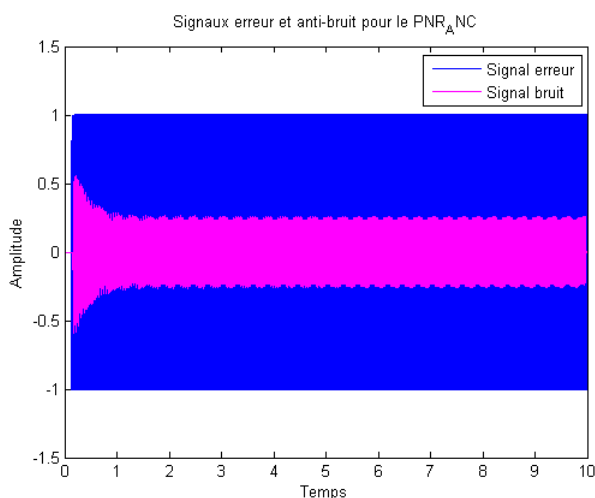


FIGURE 3.15 : Représentation temporelle des signaux d'erreur et d'anti-bruit générés grâce au PNR ANC

Devant les performances mitigées de cette approche, ainsi que son instabilité (au différents paramètres : pas des deux LMS, estimations des chemins acoustiques, ...) cette approche a rapidement été abandonnée.

3.3.7 Captation du signal de référence

Pour se passer du signal RPM imprécis, une autre approche consiste à utiliser un signal de référence capté. Dans le contexte automobile, il n'est pas envisageable de capter le bruit moteur à sa source : placé à proximité du moteur, le microphone serait soumis à des conditions de température extrêmes et risque de capter les bruits environnants qui rendraient le signal inutilisable.

On peut alors envisager de capter un signal de référence au sein de l'habitacle du véhicule en plaçant le microphone de référence le plus loin possible du microphone d'erreur. (fig . 3.16) Cette approche nécessite de prendre en compte le retour de l'anti-bruit dans le micro de référence. Connaissant l'anti-bruit produit, on peut le soustraire au signal de référence capté pour éviter un effet de boucle. (fig . 3.17)

On peut raisonner de la même manière pour la musique (ou tout autre contenu) diffusée dans les haut-parleurs : connaissant le signal produit, on peut le soustraire du signal de référence. Cela permet alors de ne pas atténuer le signal de divertissement produit par les haut-parleurs.

Cette méthode a été implémentée et testée en simulation : dans un premier temps avec des chemins acoustiques (P, S et R) constitués de délais et de gains et dans un second temps

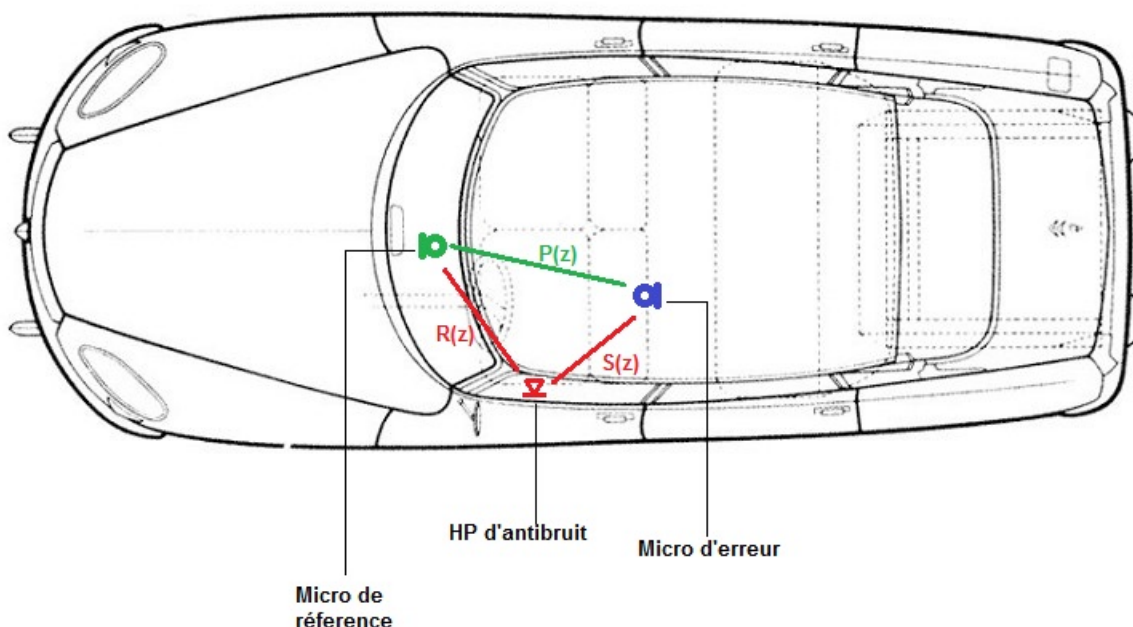


FIGURE 3.16 : Placement microphones et haut parleur dans le véhicule

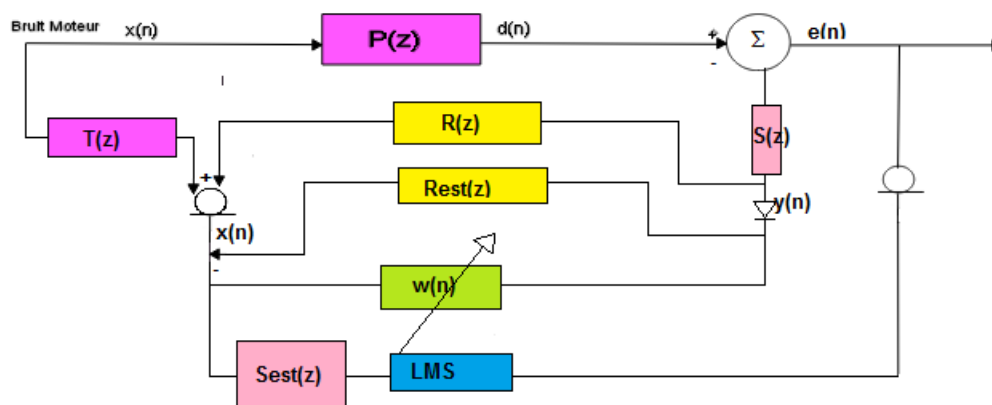


FIGURE 3.17 : Schéma du système ANC avec captation du signal de référence

avec des réponses impulsionnelles réelles enregistrées, correspondant aux différents chemins acoustiques. Ce système a été préalablement testé sur des signaux générés (sinus pur, somme de sinus, sinus à fréquences variables,...), puis testé sur des signaux réels (enregistrement de bruit de moteur). Les résultats suivants correspondent à des tests faits sur un enregistrement de bruit de moteur à fréquence fixe, avec un *booming noise* à 150 Hz (4500 RPM). Ces tests donnent des résultats intéressants : environ 12 dB d'atténuation globale. Cependant ces atténuations sont effectuées sur les fréquences dominantes du signal, soit ici les très basses

fréquences. (animation . 3.18)

FIGURE 3.18 : Evolution du spectre des signaux bruit, anti-bruit et erreur au cours du temps

Même si le *booming noise* est légèrement atténué, d'autres fréquences le sont aussi. Dans cette configuration, il existe un risque d'atténuer d'autres fréquences. Pour éviter cet effet on peut alors filtrer le signal de référence afin de cibler les fréquences à atténuer. Pour cela, on utilise l'information RPM qui va fournir la fréquence supposée du moteur.

On peut alors appliquer un filtre passe bande autour de cette fréquence sur le signal de référence. En augmentant la largeur du filtre, on évite les effets de potentielles erreurs dans le signal RPM.

On obtient alors une atténuation d'environ 6 dB sur la bande choisie (largeur de bande de 5 Hz centrée autour de la fréquence obtenue grâce a l'information RPM). L'atténuation globale est moindre sur ce signal, mais la réduction du *booming noise* correspond aux performances recherchées.

Cette méthode permet de suivre la fréquence réelle sans risques d'erreur, permet également une atténuation correcte, et une bonne stabilité avec peu de matériel supplémentaire (seulement un micro pour capter la référence) et sans ajouter de charge CPU. Cette méthode est aussi facilement adaptable à un cas multi canal (plusieurs haut-parleurs d'anti-bruit et plusieurs microphones d'erreur). Dans ce cas, un unique signal de référence peut être utilisé pour calculer les différents anti-bruits. Pour toutes ces raisons, cette méthode fut celle retenue pour la suite du travail.

Chapitre 4

Résultats et perspectives

4.1 Cas des références générées

Pour le cas d'un système ANC avec références de synthèse, les meilleures performances sont obtenues avec le système initial. Un tel système sera alors composé de :

- Deux signaux de références : deux sinus en quadrature de phase dont la fréquence dépend de l'information RPM provenant du véhicule.
- Une pondération de ces deux signaux de référence grâce aux deux coefficients a et b , mise à jour de manière adaptative.
- Un algorithme adaptatif FxLMS permettant la mise à jour des coefficients a et b .

Par rapport au système initial, on peut rajouter une détection de la divergence comme expliquée au chapitre précédent, pour stopper la divergence en cas de dysfonctionnement et pour permettre une correction dans l'estimation du chemin secondaire.

On obtient une annulation totale pour un sinus pur.(fig . 4.1)

Pour un signal réel, on observe environ 5 dB d'atténuation sur l'harmonique cible.

Cependant ces résultats supposent que l'information RPM permette à tout moment de générer une fréquence égale à celle du bruit. Pour éviter les erreurs de RPM, on peut envisager d'utiliser des capteurs indépendants de ceux du véhicule pour obtenir l'information RPM. En augmentant le nombre de capteurs, on pourrait tout d'abord réduire la probabilité d'erreur dans l'information RPM. De plus en utilisant des capteurs indépendants, on peut éviter des effets de retard : en effet, si l'information RPM est transmise par un canal dédié, elle ne risque pas d'être retardée par des informations plus prioritaires. Cela permettrait aussi de s'affranchir des normes des constructeurs automobiles et d'avoir une meilleure fréquence de mise à jour de cette information.

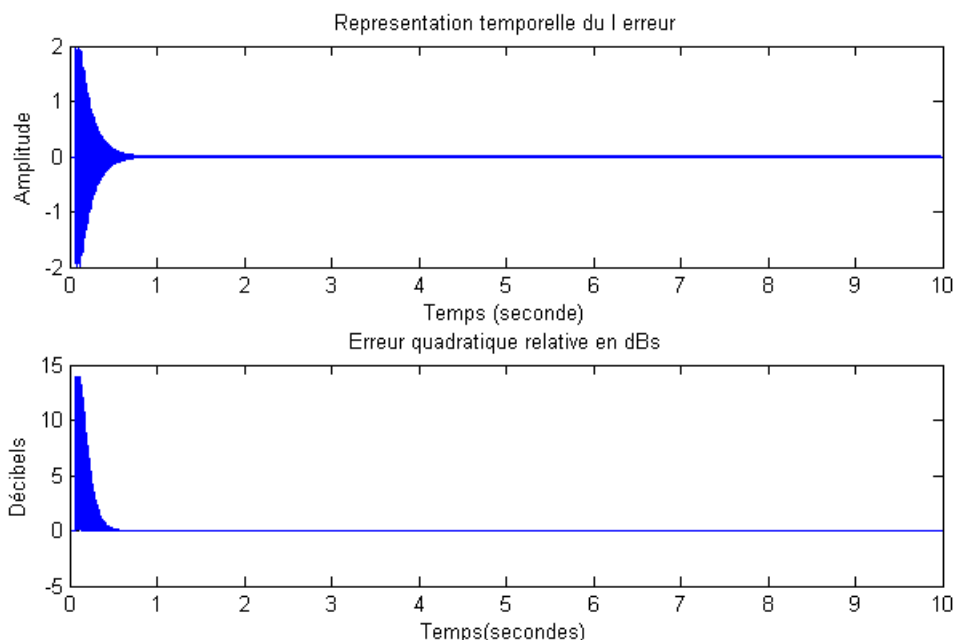


FIGURE 4.1 : Niveau de l'erreur captée pour une annulation de sinus pur avec une référence de synthèse

Cependant cette approche nécessite beaucoup de matériel supplémentaire (capteurs, câbles et connectiques) et sera donc plus coûteuse. Dans ce cas, il faut aussi prévoir une installation du système en amont, au niveau constructeur, pour placer les différents capteurs (sur le moteur) et des câblages.

4.2 Cas des références captées

Ce cas correspond au système ANC où le signal de référence est capté par un microphone situé dans l'habitacle du véhicule.

Un tel système sera alors composé d' :

- Un microphone pour capter la référence, un microphone pour capter l'erreur dans la zone d'atténuation et d'un haut parleur d'anti-bruit.
- Un filtre W à réponse impulsionnelle finie dont les coefficients sont mis à jour de manière adaptative.
- Un algorithme adaptatif FxLMS permettant la mise à jour des coefficients de W à chaque échantillon.

Utilisé tel quel, et bien calibré, ce système permet une atténuation globale jusqu'à 12 dB. (fig . 4.2)

Ce résultat est intéressant mais ne correspond pas précisément aux attentes du système. En effet, l'atténuation s'effectue sur les fréquences prédominantes dans le signal d'erreur, qui ne correspondent pas forcément aux fréquences du bruit de combustion. Dans les signaux testés, le système annule particulièrement les très basses fréquences, et ne se concentre pas uniquement sur le bruit de combustion.

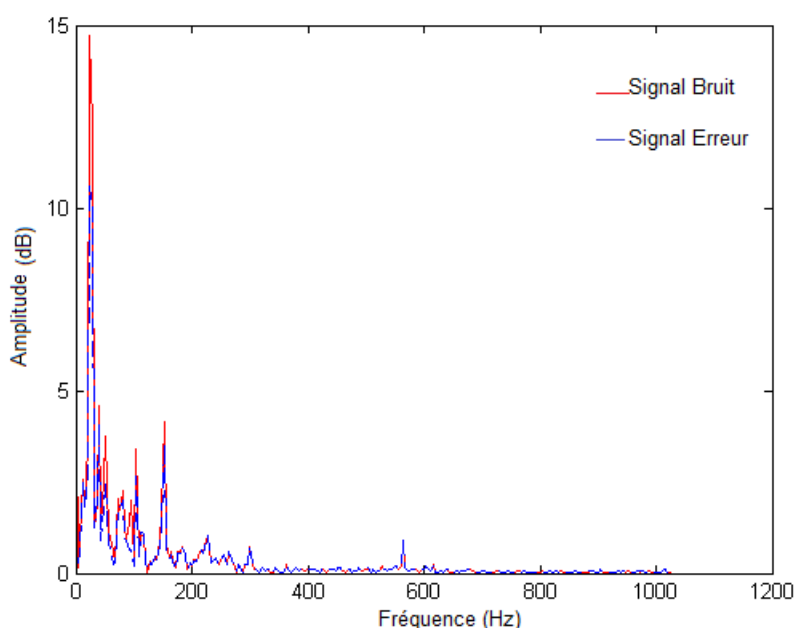


FIGURE 4.2 : Transformée de Fourier des signaux d'erreur et bruit pour un système ANC à référence captée, pour une atténuation globale sur bruit réel (fréquence cible = 150 Hz)

Le système ne permet initialement pas de sélectivité fréquentielle. Le risque est d'atténuer des éléments utiles du bruit ambiant présent dans la voiture.

Pour contrer cet effet, on peut alors filtrer le signal de référence autour de la fréquence cible pour permettre une atténuation ciblée sur cette fréquence. Dans ce cas, on peut observer une atténuation de 6 dB sur la fréquence cible et pas d'atténuation sur les autres fréquences. (fig . 4.3)

Il faut, malgré tout, noter une légère problématique dans ce système. Malgré une atténuation satisfaisante sur l'harmonique cible, l'atténuation globale est très faible (quelques dixièmes de décibels). Le but initial du système est atteint (atténuation du niveau du bruit de combustion) mais le résultat n'est pas forcément perceptible par l'utilisateur.

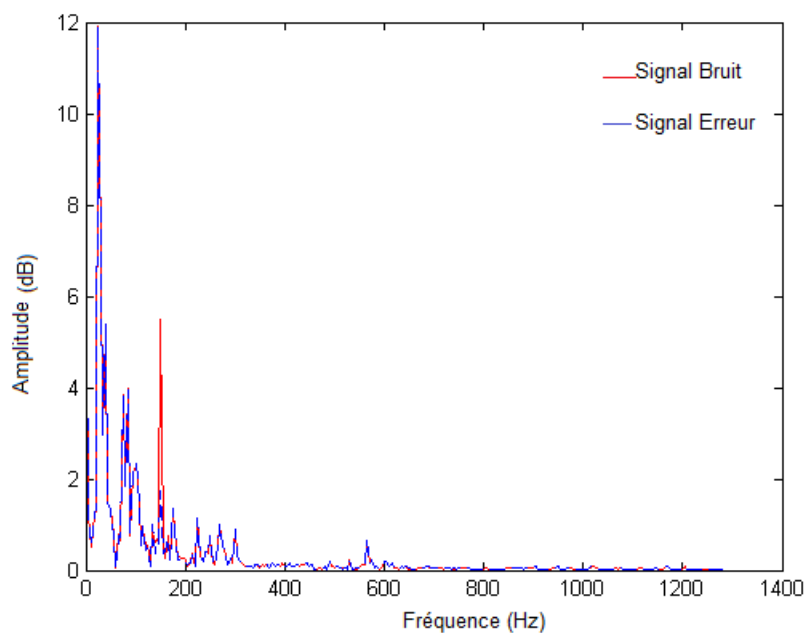


FIGURE 4.3 : Transformée de Fourier des signaux d'erreur et bruit pour un système ANC à référence captée, pour une atténuation globale sur une fréquence cible (fréquence cible = 150 Hz)

Malgré tout, cette approche remplit donc les attendus du projet : annulation du bruit de combustion sans dégradation du reste du signal ; simplicité algorithmique ; peu de matériel nécessaire pour l'installation dans un véhicule.

4.3 Suite du travail

Suite aux simulations réalisées sous Matlab, l'objectif est de tester le système dans un environnement plus proche de la réalité.

La méthode retenue est donc un système ANC fonctionnant autour d'un algorithme FxLMS, avec un signal de référence capté dans l'habitacle de la voiture. Le prototype réalisé sous Matlab a donc été réécrit en langage C. Le but étant de contrôler grâce à ce programme une carte son permettant l'acquisition des signaux d'erreur et de référence, ainsi que la diffusion de l'anti-bruit. Grâce à cela la sommation du bruit et de l'anti-bruit pourra être testée de manière "réelle", ou acoustique, et non plus simulée par une différence d'échantillons.

Plusieurs codes en C permettent de reprendre les étapes de simulations pour s'assurer d'un bon fonctionnement du système :

- Simulation avec des chemins acoustiques représentés par des délais et des gains.
- Simulation avec des chemins acoustiques enregistrés.

- Test avec signaux acoustiques : En labo avec 2 haut-parleurs (pour simuler le bruit moteur et pour générer l'anti-bruit) et 2 microphones (pour capter la référence et l'erreur) puis en voiture.

Les particularités du langage C et du contexte "réel" entraînent quelques difficultés pour la transition Matlab/C. En effet l'acquisition des signaux par trame impose un traitement des signaux par fenêtres. Ce mode de fonctionnement nécessite une mise en mémoire des divers filtres utilisés lors des changements de trame. Cet aspect avait déjà été traité dans la simulation Matlab (en prévision du portage du code en C). Cela s'avère plus laborieux en langage C, et peut donc être source d'erreur.

4.4 Perspectives du projet

Suite à ce travail, des améliorations restent possibles pour rendre le système ANC réellement utilisable dans un véhicule.

Systeme multicanal

Tout d'abord ce système est encore mono-canal, soit un microphone d'erreur et un haut parleur d'anti-bruit. Cela permet donc de produire une zone atténuée à proximité d'un utilisateur. Ce système peut être étendu à plusieurs utilisateurs, en plaçant différents microphones d'erreur au plus près des têtes de chaque passager. Un système multi canal serait très proche du cas mono-canal : l'algorithme reste le même mais est utilisé plusieurs fois en parallèle.

Pour cela chaque haut-parleur du véhicule (deux haut-parleurs avant et deux haut-parleurs arrière) produira son anti-bruit. La voiture sera alors équipée de quatre systèmes LMS indépendants qui calculeront chacun un anti-bruit.

L'anti-bruit produit variera, bien entendu, selon le haut-parleur qui le diffuse. Chaque anti-bruit sera alors dépendant des erreurs reçues. Avec alors plusieurs microphones d'erreurs, il sera nécessaire de choisir comment effectuer une pondération de ces signaux d'erreur pour chaque unité LMS. On peut envisager plusieurs méthodes :

- Aucune pondération : chaque LMS utilisera uniquement le signal en provenance du microphone d'erreur le plus proche.
- Une Pondération en fonction de la distance microphone d'erreur / haut-parleur d'anti-bruit.

Dans le cas d'un système avec signal de référence capté, une seule et même référence peut être utilisée ; il est donc possible de n'utiliser qu'un seul microphone pour capter ce signal de référence. Un tel système nécessiterait une étude plus approfondie de l'acoustique modale de l'habitacle d'une voiture, afin de produire des zones d'atténuation autour des passagers sans créer d'interférences constructives (où le niveau sonore augmenterait à cause de la sommation

de bruit et d'anti-bruit en phase). Il faudrait aussi étudier la pertinence du placement des haut-parleurs, l'idée étant d'utiliser les haut-parleurs présents dans la voiture.

Atténuation de plusieurs harmoniques

Le système étudié ici a pour objectif d'atténuer une harmonique d'un bruit de moteur. Cependant, comme expliqué dans la section 4.2, l'atténuation de cette unique harmonique n'est pas forcément perceptible par l'utilisateur. Pour améliorer les performances perceptives de ce système, on pourrait envisager d'atténuer plusieurs harmoniques du bruit moteur.

Durant ce stage, j'ai essayé d'atténuer simultanément plusieurs harmoniques, en créant un signal de référence contenant ces diverses harmoniques (ou en filtrant une référence captée pour ne laisser que les harmoniques du moteur). Les résultats étaient peu convaincants, une harmonique étant atténuée au détriment des autres.

Il serait envisageable d'utiliser un algorithme LMS pour produire un anti-bruit pour une harmonique choisie, et d'autres algorithmes en parallèle pour créer des anti-bruits pour les autres harmoniques. Ensuite en sommant les différents anti-bruits, on pourrait alors atténuer simultanément différentes fréquences. Cependant une telle configuration augmente rapidement la complexité du système : 1 LMS pour chaque harmonique à atténuer, puis multiplié par le nombre de zones de calme souhaitées.

Conclusion

Durant ce stage, nous avons étudié un système d'atténuation active de bruit pour l'automobile. Le système a pour but d'atténuer une harmonique particulièrement présente dans le son produit par un moteur de voiture grâce à un anti-bruit. En se basant sur un système existant préalablement au sein de l'entreprise, des tests ont permis d'identifier les limites de ce système, et donc les problématiques à traiter durant le stage. Par la suite, une recherche bibliographique a aussi permis de confirmer la pertinence des choix effectués pour ce système initial puis d'identifier des méthodes existantes pour contrer ses faiblesses.

Après avoir déterminé des approches pouvant contrer les différentes limites du système (erreur de RPM, erreur d'estimation des chemins acoustiques, divergences, ...), ces approches ont été implémentées dans Matlab et testées dans différentes situations.

Suite aux tests, une solution a été retenue. Il s'agit d'un système ANC pro-actif (*feedforward*) se basant sur un signal de référence capté au sein du véhicule. Ce système présente des performances satisfaisantes, au niveau des temps de convergence observés, des atténuations possibles et de la stabilité du système. Le système peut aussi être agrémenté "d'options" permettant de le rendre moins sensible aux erreurs (adaptation de l'estimation des chemins acoustiques et arrêt du système en cas de divergence). De plus ce système utiliserait du matériel déjà présent dans le véhicule (hauts-parleurs intégrés à la voiture), et ne nécessite que peu de matériel supplémentaire (1 microphone de référence et un ou plusieurs microphones d'erreur et une carte de traitement de signal).

Cette solution a ensuite été implémentée en langage C dans le but d'être testée en conditions "réelles", c'est à dire en temps réel avec des signaux acoustiques.

Les résultats, très satisfaisants sur le plan algorithmique, ne prennent cependant pas en compte les aspects acoustiques d'un réel habitacle de véhicule. Les effets acoustiques ne seront pas particulièrement problématiques dans le cas mono-canal, mais très importants pour transposer le système au cas multi-canal. Pour développer un système ANC totalement fonctionnel et permettant une atténuation pour les différents passagers d'une voiture, une phase d'étude acoustique est nécessaire. Il semble difficile de mettre en place un environnement de simulation acoustique précis, donc de tels tests devraient certainement être effectués directement dans un véhicule.

Annexe A

Analyse de l'algorithme FxLMS pour un signal de référence déterministe - Cas de la référence générée

Cette analyse est tirée de l'article de Luis Vicente et Enrique Masgrau [37] : *A novel FxLMS convergence condition with deterministic reference*.

Pour étudier le comportement de ce filtre, on considère dans un premier temps que la fréquence ciblée $f_{boomingnoise}$ est fixée. On note alors $\omega_0 = 2\pi \frac{f_{boomingnoise}}{f_{echantillonnage}}$. On peut alors étudier sa fonction de transfert pour déterminer la capacité du filtre à atténuer la fréquence ciblée. Pour cela, on analyse la propagation du signal depuis l'entrée $d(n)$ du système jusqu'à la sortie $e(n)$.

$$H(z) = \frac{E(z)}{D(z)}$$

Avec

$$D(z) = E(z) + Y'(z)$$

Soit

$$H(z) = \frac{1}{1 + G(z)}$$

avec $G(z) = \frac{Y'(z)}{E(z)}$

Les signaux de références peuvent être écrit de la manière suivante :

$$r_0(n) = \frac{A}{2}(e^{j\omega_0 n} + e^{-j\omega_0 n})$$

$$r_1(n) = \frac{A}{2j}(e^{j\omega_0 n} - e^{-j\omega_0 n})$$

Sachant que le coefficient $\omega_0(n)$ est la convolution du système décrit par la fonction de transfert $U(z) = \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}}$ et du signal $\mu e(n)r'_0(n)$

$$W_0(z) = \mu \frac{A}{2} [\hat{S}(ze^{-j\omega_0} + \hat{S}(e^{-j\omega_0})E(ze^{j\omega_0}))]U(z)$$

ANNEXE A. ANALYSE DE L'ALGORITHME FXLMS POUR UN SIGNAL DE RÉFÉRENCE DÉTERMINISTE - CAS DE LA RÉFÉRENCE GÉNÉRÉ

De même

$$W_1(z) = \mu \frac{A}{2j} [\hat{S}(ze^{-j\omega_0} + \hat{S}(e^{-j\omega_0})E(ze^{j\omega_0}))]U(z)$$

Soit

$$Y(z) = \frac{A}{2} [W_0(ze^{-j\omega_0}) + [W_0(ze^{j\omega_0})] + \frac{A}{2j} [W_1(ze^{-j\omega_0}) - [W_1(ze^{j\omega_0})]$$

Donc

$$Y(z) = \frac{A^2\mu}{4} [\hat{S}(e^{j\omega_0})E(ze^{-2j\omega_0}) + \hat{S}(e^{-j\omega_0})E(z)]U(ze^{-j\omega_0}) + \frac{A^2\mu}{4} [\hat{S}(e^{j\omega_0})E(z) + \hat{S}(e^{-j\omega_0})E(ze^{2j\omega_0})]U(ze^{j\omega_0}) - \frac{A^2\mu}{4} [\hat{S}(e^{j\omega_0})E(ze^{-j\omega_0}) + \hat{S}(e^{-j\omega_0})E(ze^{j\omega_0})]U(z)$$

Avec $U(z) = \frac{1}{z-1}$, on a :

$$Y(z) = \frac{A^2\mu}{2} \left[\frac{\hat{S}(e^{-j\omega_0})E(z)}{ze^{-j\omega_0} - 1} + \frac{\hat{S}(e^{j\omega_0})E(z)}{ze^{j\omega_0} - 1} \right]$$

Le signal d'anti-bruit $y(n)$ est ensuite filtré par le chemin acoustique $S(z)$

$$Y'(z) = \frac{A^2\mu}{2} \left[\frac{\hat{S}(e^{-j\omega_0})E(z)}{ze^{-j\omega_0} - 1} + \frac{\hat{S}(e^{j\omega_0})E(z)}{ze^{j\omega_0} - 1} \right] S(z)$$

Le chemin secondaire est un système réel, donc $\hat{S}(e^{j\omega_0}) = \hat{S} \star (e^{-j\omega_0})$. En définissant $\hat{S}(e^{j\omega_0}) = \hat{S}_{\omega_0} e_{j\phi_0}$, on a alors

$$G(z) = A^2\mu\hat{S}_{\omega_0} \left[\frac{\cos(\omega_0 - \phi_0)z - \cos(\phi_0)}{z^2 - 2\cos(\omega_0)z + 1} \right] S(z)$$

On peut donc en déduire la fonction de transfert du système complet.

Annexe B

Script Matlab de l'ANC avec référence captée

```
%% Script ANC
%% Utilisation du signal de reference enregistre
%% Test sur signaux moteurs reels
%% Chemin acoustic —> reponses impulsionnelles enregistrees

% Parametres fixes

taille_buffer = 16 ;
mu = 0.0005;
ordre_filtre = 500 ;

% Signal moteur reel

[son , fs] = wavread('4500rpm') ;

time = [1:length(son)] ;

% Creation des chemins acoustiques

[P,S,T,R] = Ri(fs);
% P : source -> micro erreur
% S : HP anti-bruit -> micro erreur
% T : source -> micro reference
% R : HP anti bruit -> micor reference

% Chemin Rest : R + delay conversion (B niveau HP + B niveau mic
ref)
```

```
Rest = [zeros(taille_buffer*2,1) ; R];

%Chemin Sest : S + delay conversion (B niveau HP + B niveau mic ref
)
Sest = [zeros(taille_buffer*2,1) ; S];

x_c = filter(T,1,son) ;
x_c = x_c ;
d = filter(P,1,son) ;
d = d ;

%%%%%%%%%% Iterations

y = zeros(length(d),1) ;
ys = zeros(length(d),1) ;
yr = zeros(length(d),1) ;
yrest = zeros(length(d),1) ;

w1 = zeros(length(d),ordre_filtre) ;
w2 = zeros(length(d),ordre_filtre) ;

%% Memoire de filtre entre buffer
Ci_eb = [] ;
Ci_xb = [] ;
Ci_xbs = [] ;
Ci_yb = [] ;
Ci_ys = [] ;
Ci_yr = [] ;
Ci_yrest = [] ;
Ci_xpb = [] ;
Ci_eb = [] ;
Ci_y = [] ;

for n = ordre_filtre:length(d)

    e(n) = d(n) - ys(n) ; % Sommation bruit et anti bruit

    [eb(n),Cf_eb] = filter(B,1,e(n),Ci_eb) ; % retard de trame

    x_c(n) = x_c(n) + yr(n) ; % Effet de boucle HP/micro
    reference
```

```
[xb(n), Cf_xb] = filter(B,1,x_c(n),Ci_xb) ;  
xb(n) = xb(n) - yrest(n) ;
```

```
[xbs(n), Cf_xbs] = filter(Sest,1,xb1(n),Ci_xbs) ; % filtrage par  
Sest
```

```
[y(n), Cf_y1] = filter(w1(n,:),1,xb1(n),Ci_y1) ; % filtrage  
adaptatif
```

```
for i = 1:ordre_filtre  
pas = mu/(xbs(n)^2 + eps) ;
```

```
    % Mise a jour des coefficients du filtre w  
    w(n+1,i) = w(n,i) + pas*eb(n)*xbs(n - i + 1);
```

```
end
```

```
[yb(n), Cf_yb] = filter(B,1,y(n),Ci_yb) ;  
[ys(n), Cf_ys] = filter(S,1,yb(n),Ci_ys) ;
```

```
[yr(n), Cf_yr] = filter(R,1,yb(n),Ci_yr) ;  
[yrest(n), Cf_yrest] = filter(Rest,1,y(n),Ci_yrest) ;
```

```
ys(n+1) = ys(n) ;  
yr(n+1) = yr(n) ;  
yrest(n+1) = yrest(n) ;
```

```
%% Reecriture de la nouvelle memoire de filtre
```

```
Ci_eb = Cf_eb ;  
Ci_xb = Cf_xb ;  
Ci_xbs = Cf_xbs ;  
Ci_y = Cf_y ;  
Ci_yb = Cf_yb ;  
Ci_ys = Cf_ys ;  
Ci_yr = Cf_yr ;  
Ci_yrest = Cf_yrest ;  
Ci_xpb = Cf_xpb ;
```

```
end
```

Bibliographie

- [1] Mentor graphics xse anc system. [[Site internet](#)].
- [2] Neosonic panc system. [[Site internet](#)].
- [3] Site officiel d'arkamys. [[Site internet](#)].
- [4] Toyota crown hybrid anc systeme. [[Site internet](#)].
- [5] Muhammad Tahir Akhtar, Masahide Abe, and Masayuki Kawamata. A new variable step size lms algorithm-based method for improved online secondary path modeling in active noise control systems. *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, 14(2) :720–726, 2006.
- [6] I Tabatabaei Ardekani and Waleed H Abdulla. Theoretical convergence analysis of fxlms algorithm. *Signal Processing*, 90(12) :3046–3055, 2010.
- [7] Elias Bjarnason. Analysis of the filtered-x lms algorithm. *Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on*, 3(6) :504–514, 1995.
- [8] Patrick Boussard, Rakesh Khurana, Gael Guyader, Francois Orange, and Jeffrey Orzechowski. Implementing digital engine sound enhancement techniques to define and refine vehicle interior sound image/quality. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 247, pages 5866–5875. Institute of Noise Control Engineering, 2013.
- [9] Jordan Cheer. *Active control of the acoustic environment in an automobile cabin*. PhD thesis, University of Southampton, 2012.
- [10] G Chen, T Sone, N Saito, M Abe, and S Makino. The stability and convergence characteristics of the delayed-x lms algorithm in anc systems. *Journal of sound and vibration*, 216(4) :637–648, 1998.
- [11] C.J. Cheng D. Pan and E. Salvador. Active noise reduction adaptive filter leakage adjusting, 5 2012. US Patent 8,194,873.
- [12] Leopoldo PR De Oliveira, Bert Stallaert, Karl Janssens, Herman Van der Auweraer, Paul Sas, and Wim Desmet. Nex-lms : A novel adaptive control scheme for harmonic sound quality control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(6) :1727–1738, 2010.

- [13] Stephen J Elliott. A review of active noise and vibration control in road vehicles. 2008.
- [14] Stephen J Elliott and Philip A Nelson. Active noise control. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 10(4) :12–35, 1993.
- [15] Emmanuel Friot. Une introduction au contrôle acoustique actif. 2005.
- [16] Tajuddeen R Gwadabe, Mohammad Shukri Salman, and Hasan Abuhilal. A modified leaky-lms algorithm. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 6(3) :222, 2014.
- [17] Simon Haykin. *Adaptive Filter Theory (3rd Ed.)*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1996.
- [18] C.M. Hera and D.Y. Pan. Vehicle engine sound enhancement, November 27 2012. US Patent 8,320,581.
- [19] Yoichi Hinamoto and Hideaki Sakai. A filtered-x lms algorithm for sinusoidal reference signals anc —effects of frequency mismatch. *Signal Processing Letters, IEEE*, 14(4) :259–262, 2007.
- [20] H. Illy and B. Andro. Method and device for controlling an active noise reduction system, 2012. Patent WO 2013/076137 A1, Renault S.A.S.
- [21] Jari Kataja. *Development of a robust and computationally-efficient active sound profiling algorithm in a passenger car*. PhD thesis, Technical research Centre of Finland, 2012.
- [22] Maxime Keller. *Contrôle actif du bruit basses fréquences à l'intérieur d'un hélicoptère*. PhD thesis, Université de Provence-Aix-Marseille I, 2008.
- [23] H-S Kim and Y Park. Delayed-x lms algorithm : An efficient anc algorithm utilizing robustness of cancellation path model. *Journal of sound and vibration*, 212(5) :875–887, 1998.
- [24] Sen M Kuo and Dennis R Morgan. Active noise control : a tutorial review. *Proceedings of the IEEE*, 87(6) :943–973, 1999.
- [25] Sen M Kuo and Shyam P Nallabolu. Analysis and correction of frequency error in electronic mufflers using narrowband active noise control. In *Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on*, pages 1353–1358. IEEE, 2007.
- [26] Sen M Kuo and Karunakar POTTIM. Active snore control system integrated with apnea detector. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 249, pages 1211–1217. Institute of Noise Control Engineering, 2014.
- [27] Paulo AC Lopes and José B Gerald. New normalized lms algorithms based on the kalman filter. In *Circuits and Systems, 2007. ISCAS 2007. IEEE International Symposium on*, pages 117–120. IEEE, 2007.

- [28] Paulo AC Lopes and Moises Piedade. The kalman filter in active noise control. In *Proc. of ACTIVE*, volume 99, pages 1111–1122, 1999.
- [29] Yutaka Maeda and Takao Yoshida. An active noise control without estimation of secondary path — anc using simultaneous perturbation. In *Active*, volume 99, pages 985–994, 1999.
- [30] A.M. McDonald, D.C. Quinn, and D.C. Perry. Sound synthesizer in a vehicle, November 1 1990. WO Patent App. PCT/GB1990/000,597.
- [31] Y. Nakaji. System for reducing noise level in vehicular cabin, May 5 1992. US Patent 5,111,507.
- [32] Harry F Olson. Electronic sound absorber, May 9 1961. US Patent 2,983,790.
- [33] Lueg Paul. Process of silencing sound oscillations, June 9 1936. US Patent 2,043,416.
- [34] Laura R Ray, Jason A Solbeck, Alexander D Streeter, and Robert D Collier. Hybrid feedforward-feedback active noise reduction for hearing protection and communication. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4) :2026–2036, 2006.
- [35] Ma Shengqian, Xu Guowei, Ma Zhifeng, Wei Shuping, and Fan Manhong. Research on adaptive noise canceller of an improvement lms algorithm. In *Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on*, pages 1611–1614. IEEE, 2011.
- [36] Laszlo Sujbert. A new filtered lms algorithm for active noise control. In *Proceedings of the Active'99-The International EAA Symposium on Active Control of Sound and Vibration*, pages 1101–1110, 1999.
- [37] Luis Vicente and Enrique Masgrau. Novel fxlms convergence condition with deterministic reference. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 54(10) :3768–3774, 2006.
- [38] Bernard WIDROW, Marcian E HOFF, et al. Adaptive switching circuits. 1960.
- [39] Yegui Xiao, Akira Ikuta, Liying Ma, and Khashayar Khorasani. Stochastic analysis of the fxlms-based narrowband active noise control system. *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, 16(5) :1000–1014, 2008.
- [40] Yegui Xiao, Liying Ma, and Koji Hasegawa. Properties of fxlms-based narrowband active noise control with online secondary-path modeling. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 57(8) :2931–2949, 2009.
- [41] Yegui Xiao, Liying Ma, Khashayar Khorasani, and Akira Ikuta. A new robust narrowband active noise control system in the presence of frequency mismatch. *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, 14(6) :2189–2200, 2006.

- [42] Yegui Xiao and Yoshiaki Tadokoro. Lms-based notch filter for the estimation of sinusoidal signals in noise. *Signal Processing*, 46(2) :223–231, 1995.
- [43] Yegui Xiao, Rabab Kreidieh Ward, Liying Ma, and Akira Ikuta. A new lms-based fourier analyzer in the presence of frequency mismatch and applications. *Circuits and Systems I : Regular Papers, IEEE Transactions on*, 52(1) :230–245, 2005.
- [44] Dayong Zhou and Victor DeBrunner. Anc algorithms that do not require identifying the secondary path. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. Proceedings.(ICASSP'05). IEEE International Conference on*, volume 3, pages iii–125. IEEE, 2005.