

Dédicace

Cet écrit exprime ma profonde gratitude envers mes parents, spécialement mon père Moncef et ma mère Jalila, pour leur amour, leur soutien inébranlable et leurs conseils éclairés qui ont illuminé mon parcours. Ma sœur, Sondes, a joué un rôle crucial en me guidant à travers les défis. Leur présence a continuellement nourri mon inspiration. Mes frères, sœurs et l'ensemble de ma famille ont également contribué à mon cheminement. Ce document reflète l'incalculable soutien qu'ils m'ont apporté.

Je souhaite dédier ce travail à ma famille et à mes amis, en témoignage de ma gratitude pour leur soutien constant. Leur présence a conféré à chaque étape de ma progression une signification unique. Mes remerciements s'étendent également à mes enseignants pour leur enseignement précieux et leur encadrement, qui ont grandement contribué à mon développement académique et personnel.

Remerciements

Avec un grand enthousiasme, je saisis cette occasion pour exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui ont joué un rôle essentiel dans la réussite de notre projet de fin d'études.

À l'aboutissement de cette phase de stage, je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Professeur Hichem Besbes, mon encadrant à SUP'COM. Son soutien inestimable et son engagement inébranlable ont été des éléments clés pour mener à bien ce stage avec succès. Lorsque des défis se sont présentés, sa précision dans les orientations m'a été d'une grande aide. Ses conseils éclairés ont constamment nourri mon inspiration, contribuant de manière significative à la réussite de mon travail.

Je souhaite également exprimer ma gratitude particulière envers M. Walid ROUIS, Directeur Général d'ACTIA ES. C'est grâce à l'opportunité qu'il m'a offerte de rejoindre cette entreprise que j'ai pu concrétiser mon Projet de Fin d'Études.

J'adresse aussi mes remerciements et ma reconnaissance à M. Sofiane SAYAHI, mon responsable de stage, pour son soutien, sa disponibilité malgré ses charges professionnelles, ses conseils précieux et pour m'avoir guidé à travers les moments difficiles.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Votre expertise et vos commentaires sont inestimables pour mon développement académique et professionnel.

Résumé

Ce rapport plonge dans l'univers du Contrôle Actif du Bruit (ANC) et son rôle crucial dans l'amélioration de l'environnement sonore à l'intérieur des véhicules. Face aux perturbations sonores de la vie quotidienne, ce document explore comment l'ANC se présente comme une réponse novatrice pour rétablir la tranquillité dans les habitacles. En présentant les principes clés de l'ANC, en analysant les signaux sonores et en évaluant l'efficacité des filtres adaptatifs par le biais d'expérimentations concrètes, ce rapport dévoile les fondements techniques de cette solution. De la théorie à la mise en pratique, ce rapport examine également la mise en place et l'évaluation d'un système ANC, ouvrant ainsi des perspectives intéressantes pour un avenir plus paisible à l'intérieur des véhicules.

Mots-clés : Contrôle Actif de Bruit (ANC), environnement sonore, véhicules automobiles, réduction du bruit, Filtrage Adaptatif, Wiener, LMS (Least Mean Squares), SD LMS (Sign-Data LMS), SELMS (Sign Error LMS), SS LMS (Sign Sign LMS), NLMS (Normalized LMS), APA (Affine Projection Algorithm), MATLAB.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des figures	vii
Liste des tableaux	x
Introduction générale	1
1 Cadre général du projet	3
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation de l'unité d'accueil	3
1.2.1 Actia ES	3
1.2.2 Activités Actia ES	4
1.2.3 Equipe Innovation	5
1.3 Spécifications du projet	5
1.3.1 Contexte et Objectifs du Projet	5
1.3.2 Travail Envisagé	6
1.4 Contrôle Actif du Bruit	7
1.4.1 Définition	7
1.4.2 Processus du contrôle actif de bruit	7
1.4.3 Utilité du Contrôle Actif de Bruit	8
1.5 Applications du contrôle actif du bruit	9
1.6 Contrôle actif du bruit dans les véhicules automobiles	10
1.6.1 Analyse des Bruits à l'intérieur des Automobiles	10
1.6.2 Implication de l'ANC dans l'Automobile : Exemple Existant	11
1.7 Planification du projet	12

1.8	Conclusion	12
2	Étude Approfondie des Signaux Sonores et Utilisation des Filtres Adaptatifs pour la Réduction du Bruit	14
2.1	Introduction	14
2.2	Introduction aux Signaux Sonores	14
2.2.1	Définition de son	14
2.2.2	Caractéristique du son	15
2.2.2.1	Amplitude	15
2.2.2.2	Fréquence	15
2.2.2.3	Vitesse	15
2.2.2.4	Propagation	15
2.2.2.5	Analyse des Phénomènes d'Interférence	17
2.3	Génération des signaux Audio	18
2.3.1	Définition de l'audio	18
2.3.2	Caractéristiques des Environnements Audio : Stationnaire et Non Stationnaire	18
2.3.3	Caractéristiques des Codages Audio	19
2.3.4	Chaîne audio	20
2.3.5	Prétraitement, Analyse et Visualisation du signal audio	21
2.4	Généralités sur le filtrage adaptatif	23
2.4.1	Définition	23
2.4.2	Approches du Filtrage Adaptatif pour le Traitement de Signaux : Mono et Multi-sources	23
2.4.2.1	Approche du Filtrage Adaptatif pour Sources Audio Mono	23
2.4.2.2	Approche du Filtrage Adaptatif pour Sources Audio Multi	26
2.4.3	Exemples d'applications	28
2.4.3.1	Identification de systèmes	28
2.4.3.2	Prédiction	28
2.4.3.3	Modélisation inverse	29
2.4.3.4	Annulation d'interférences	30
2.4.4	Stratégies de Sélection et d'Optimisation des Filtres Adaptatifs . .	30
2.4.4.1	Analyse des Besoins	30
2.4.4.2	Évaluation des Options de Filtres Adaptatifs	30
2.4.4.3	Comparaison des Performances des Filtres Adaptatifs . .	31
2.4.4.4	Optimisation et Réglage des Paramètres	31

2.4.5	Algorithmes de filtrage adaptatif	33
2.4.5.1	Filtre Wiener	33
2.4.5.2	Filtre LMS	34
2.4.5.3	Filtre SD-LMS	35
2.4.5.4	Filtre SE-LMS	36
2.4.5.5	Filtre SS-LMS	36
2.4.5.6	Filtre NLMS	37
2.4.5.7	Filtre APA d'ordre 1	37
2.5	Application Pratique des Filtres Adaptatifs avec MATLAB	39
2.5.1	Eléments de Simulation	39
2.5.1.1	Critère d'évaluation de l'atténuation de bruit	39
2.5.1.2	Description des paramètres d'implémentation des Filtres	40
2.5.2	Etapes d'implémentation	42
2.5.3	Résultats de simulation	43
2.5.3.1	LMS	43
2.5.3.2	SD LMS	45
2.5.3.3	SE LMS	46
2.5.3.4	SS LMS	47
2.5.3.5	NLMS	48
2.5.3.6	APA	49
2.6	Évaluation Comparative des Algorithmes de Filtrage Adaptatif	50
2.6.1	MSE	51
2.6.2	Évaluation de la Fidélité des Coefficients Adaptatifs	52
2.6.3	SNR	53
2.6.4	Complexité et temps d'exécution	53
2.6.5	Analyse et Choix Préliminaire	54
2.7	Conclusion	56
3	Mise en Place et Évaluation du Système ANC	57
3.1	Introduction	57
3.2	Analyse des besoins pour la mise en place d'un Système ANC	57
3.3	Matériels utilisés	58
3.4	Paramètres Clés et Conditions Essentielles pour des Tests Pratiques Réussis du Système ANC	61
3.5	Prototype du système ANC	64

3.5.1	Test de Validation en Temps Réel des Microphones et du Filtre Adaptatif	65
3.5.1.1	Identification du Système	66
3.5.1.2	Évaluation des Performances et Résultats d'Application pour un Moteur de Voiture	67
3.5.1.3	Difficultés Rencontrées lors de la Validation en Temps Réel	68
3.5.2	Test de Contrôle Actif du Bruit avec Intégration du Haut-Parleur	70
3.5.2.1	Evaluation des Performances et Résultats d'Application pour un Moteur de Voiture	70
3.5.2.2	Difficultés Rencontrées	71
3.5.3	Stratégies d'Amélioration Envisagées	71
3.6	Système ANC pour un Véhicule	72
3.6.1	Configuration Matérielle : Éléments Audio Nécessaires	72
3.6.2	Principe de Fonctionnement	74
3.7	Conclusion	75
	Conclusion générale et Perspectives Futures du Projet	76

Table des figures

1.1	Les marchés [4]	4
1.2	Principe d'interférence du contrôle actif de bruit [20]	7
1.3	Processus du contrôle actif de bruit	7
1.4	Schéma de l'acoustique véhicule : bruit moteur, bruit de roulement et bruit aéro [29]	11
1.5	Diagramme de Gantt	12
2.1	Phénomène de retard temporel [10]	16
2.2	Phénomène de propagation [12]	16
2.3	Chaine audio	20
2.4	Flux de Prétraitement, Analyse et Visualisation du signal audio	22
2.5	Schéma général d'un système de filtrage adaptatif	24
2.6	Schéma général d'un système de filtrage adaptatif pour Sources Audio Mono	26
2.7	Schéma général d'un système de filtrage adaptatif pour Sources Audio Multi	26
2.8	Identification de systèmes	28
2.9	Principe de la prédiction	29
2.10	Principe de la modélisation inverse	29
2.11	Principe d'annulation d'interférence	30
2.12	Résumé de l'algorithme APA	38
2.13	Caractéristiques du Signal d'Entrée pour l'Application des Filtres Adaptatifs sous MATLAB	41
2.14	Étapes d'implémentation des filtres adaptatifs	42
2.15	Signal désiré, signal filtré et l'erreur pour l'algorithme LMS ($\mu=0.02$ et $M=70$)	44
2.16	Signal désiré, signal filtré et l'erreur pour l'algorithme LMS ($\mu=0.0001$ et $M=70$)	44
2.17	Signal désiré, signal filtré et l'erreur pour l'algorithme LMS ($\mu=0.02$ et $M=250$)	45
2.18	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SD-LMS pour différents pas d'adaptation	46

2.19	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SD-LMS pour différents ordres du filtre	46
2.20	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SE-LMS pour différents pas d'adaptation	47
2.21	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SE-LMS pour différents ordres du filtre	47
2.22	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SS-LMS pour différents pas d'adaptation	48
2.23	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SS-LMS pour différents ordres du filtre	48
2.24	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme NLMS pour différents pas d'adaptation	49
2.25	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme NLMS pour différents ordres du filtre	49
2.26	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme APA pour différents pas d'adaptation	50
2.27	Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme APA pour différents ordres du filtre	50
2.28	Évolution des Erreurs MSE avant Convergence	51
2.29	Évolution des Erreurs MSE après Convergence	52
2.30	Évolution des Écarts entre les Coefficients Adaptatifs et Optimaux	53
3.1	Configuration Initiale des Composants du Système ANC	59
3.2	Configuration Initiale des Composants du Système ANC	60
3.3	Configuration Initiale des Composants du Système ANC	61
3.4	Prototype du système ANC	65
3.5	Schéma de l'Évaluation de l'Interaction Microphones-Filtre Adaptatif	66
3.6	Principe de Fonctionnement à l'Instant n du Système de Validation en Temps Réel des Microphones et du Filtre Adaptatif	66
3.7	Configuration Expérimentale des Microphones	67
3.8	Résultats de l'Application des Filtres Adaptatifs APA et NLMS	68
3.9	Schéma de Contrôle Actif du Bruit avec Intégration du Haut-Parleur	70
3.10	Configuration Expérimentale d'Intégration du Haut-Parleur pour le Contrôle Actif du Bruit	71
3.11	Disposition Stratégique des Microphones pour la Captation des Sources de Bruit	73

3.12 Configuration des Microphones et des Haut-Parleurs pour l'Atténuation du Bruit dans l'Habitacle de la Voiture	73
3.13 Schéma de Fonctionnement du Système ANC pour un Véhicule	74

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre le Contrôle Actif de Bruit et le Contrôle Passif de Bruit	9
2.1	Pas optimaux pour chaque filtre	51
2.2	Mesures des Rapports Signal sur Bruit (SNR)	53
2.3	Complexités de Calcul par Itération	54
2.4	Comparaison des Avantages et des Inconvénients des Algorithmes de Fil- trage Adaptatif	55
3.1	Analyse des Résultats de Réduction du Bruit : Application des Filtres Adaptatifs APA et NLMS en Termes de SNR	68

Introduction générale

Dans un monde constamment en mouvement, le bruit s'est insidieusement infiltré dans nos vies, perturbant nos moments de tranquillité et sapant notre capacité à nous concentrer. La nécessité impérieuse de lutter contre ces intrusions sonores et de restaurer un certain équilibre a conduit au développement de solutions novatrices pour apaiser cet agaçant tumulte, en particulier à l'intérieur des véhicules. Parmi ces solutions, le Contrôle Actif du Bruit (ANC) émerge comme une réponse prometteuse à ce défi acoustique, visant à réduire de manière proactive les bruits indésirables qui envahissent les habitacles automobiles.

Lorsque nous nous glissons derrière le volant, nous aspirons à une expérience de conduite exempte de perturbations, propice à la relaxation et à la concentration. Cependant, les sources de bruit au sein des véhicules sont multiples et variées, allant des rugissements des moteurs aux vibrations induites par les imperfections de la route. Ces bruits, au-delà d'entacher notre confort, ont le pouvoir de perturber notre calme intérieur et même de compromettre notre vigilance au volant. L'ampleur de ce défi est renforcée par la réalité que le bruit n'a pas seulement un impact superficiel, mais peut également avoir des conséquences profondes sur notre santé physique et mentale.

Les effets néfastes du bruit sur la santé sont de plus en plus évidents à mesure que la recherche progresse. Des problèmes tels que le sommeil perturbé, l'élévation du niveau de stress, les troubles cardiovasculaires et même les problèmes cognitifs ont été attribués à une exposition prolongée au bruit excessif. Les enjeux sont d'autant plus aigus dans les véhicules, où les passagers sont soumis à des niveaux sonores variables, souvent au-dessus des seuils recommandés pour un environnement sain. C'est ici que le Contrôle Actif du Bruit entre en scène, offrant un moyen ingénieux de contrebalancer ces perturbations en émettant des ondes sonores antiphases pour annuler les bruits indésirables.

La nécessité de développer et de mettre en œuvre des technologies telles que le Contrôle Actif du Bruit n'est pas seulement dictée par la quête de confort. C'est aussi une question de préservation de la santé et du bien-être des individus. En effet, la création d'un environnement intérieur paisible à l'intérieur des véhicules revêt une importance cruciale pour

atténuer les effets nuisibles du bruit sur notre équilibre mental et physique. En agissant pour réduire le bruit au sein des véhicules, nous posons les jalons d'une conduite plus sereine et d'une meilleure qualité de vie pour les conducteurs et les passagers.

Afin d'explorer plus en profondeur ces défis et les solutions qu'offre le Contrôle Actif du Bruit, ce rapport est structuré en trois chapitres distincts, chacun apportant une contribution essentielle à notre compréhension du sujet. Le chapitre 1 établit le contexte en présentant Actia ES, clarifiant les objectifs et le cadre du projet, et introduit le concept d'ANC dans le contexte automobile. Le chapitre 2 plonge dans une étude approfondie des signaux sonores et des filtres adaptatifs pour la réduction du bruit, tout en démontrant leur mise en œuvre avec MATLAB. Le chapitre 3 se concentre sur la mise en place pratique et l'évaluation du système ANC, en explorant ses résultats et ses applications potentielles dans les véhicules.

Chapitre 1

Cadre général du projet

1.1 Introduction

Le présent chapitre établit les bases fondamentales du projet en examinant son contexte, ses objectifs et ses composantes clés. Il sert de point de départ pour la compréhension approfondie du contrôle actif du bruit et de ses applications dans différents domaines, en mettant l'accent sur son utilisation dans le secteur des véhicules automobiles. Ce chapitre vise à fournir un aperçu global du projet, préparant ainsi le terrain pour les sections à venir.

1.2 Présentation de l'unité d'accueil

1.2.1 Actia ES

En juillet 2005, le groupe mondial ACTIA Technologies Group, acteur majeur du diagnostic automobile et des télécommunications, a créé sa filiale à la Technopôle El Ghazela en Tunisie, qu'elle a nommée ARDIA. Cette entité représente une société franco-tunisienne spécialisée dans les services et le conseil en ingénierie, et est régie par la loi 93-120 relative aux investissements pour les sociétés non-résidentes totalement exportatrices.

En février 2019, ARDIA a changé d'appellation pour devenir ACTIA E.S [4]. Depuis lors, l'entreprise s'est impliquée dans des projets à forte valeur ajoutée. Elle est fière de son parcours, passant de seulement 5 ingénieurs en 2005 à un effectif actuel de plus de 700 employés. Fort de plus de 14 ans d'expérience dans le secteur automobile, ACTIA E.S est certifiée ISO9001 version 2008 pour l'ensemble de ses activités. Ces activités englobent la conception, le développement, les tests et la validation de logiciels embarqués, d'outils de diagnostic, de systèmes mécaniques, d'outils de production pour les applications

automobiles, ainsi que le support industriel et les tests de qualification.

1.2.2 Activités Actia ES

Le secteur d'activité d'ACTIA ES (voir figure 1.1) est principalement l'automobile et le transport mais, au fil des années, elle s'est ouverte à d'autres secteurs :



FIGURE 1.1 – Les marchés [4]

- Automobile et transport : ACTIA ES se trouve dans le domaine automobile depuis 10ans, ce qui lui permet d'intervenir aujourd'hui sur des projets complets et diversifiés à forte valeur ajoutée comme les logiciels embarqués, les logiciels applicatifs, la sûreté de fonctionnement, le développement mécatronique, etc.
- IT : ACTIA E.S considère la créativité comme étant un facteur majeur de survie surtout avec le durcissement de la concurrence. Pour cela, elle propose des solutions adaptées à l'évolution rapide au niveau des technologies et des solutions logicielles avancées en cycle de vie complet

- Industrie : ACTIA E.S assurent la conception et l'intégration des projets électroniques et mécaniques. Avec les équipes de service manufacturier et de test fonctionnel, elle travaille avec des partenaires en termes d'outillage de production et avec l'équipe laboratoire, elle assure les essais de qualification pour des équipements industriels variés.
- Multimédia et télécommunication : Projets à forte valeur ajoutée intervenant dans le développement des applications en cycle de vie court, objets connectés et Smartphone.
- Énergie : ACTIA E.S conçoit des produits et systèmes pour le contrôle commande des réseaux d'énergie maîtrisant les standards de communications (HNZ, CEI, etc...).

1.2.3 Equipe Innovation

Dans un contexte hautement concurrentiel, les entreprises ne peuvent plus se contenter d'optimiser leurs processus et leurs coûts pour proposer les prix les plus bas aux clients. La capacité à innover est également un élément clé pour conquérir de nouveaux marchés émergents, réduire les effectifs et accélérer l'adoption de nouvelles technologies. En effet, l'innovation est devenue essentielle pour attirer et fidéliser les clients dans un marché instable. C'est pourquoi ACTIA ES accorde une grande importance à l'innovation, tant dans le développement de nouveaux produits et services que dans l'amélioration des processus. L'équipe d'innovation travaille sur de nombreux projets passionnants, tels que la micromobilité, les véhicules autonomes, les respirateurs artificiels et les systèmes de mesure de la qualité de l'air connectés. Elle est en mesure de générer de nouvelles idées, d'effectuer des travaux de recherche et développement et d'améliorer les processus existants. Pendant toute la durée de mon stage, j'ai été membre de cette équipe. L'environnement de travail était agréable à la fois sur le plan social et en termes de compétences existantes.

1.3 Spécifications du projet

1.3.1 Contexte et Objectifs du Projet

Actia, un acteur établi sur le marché de l'automobile, fait face à une concurrence de plus en plus intense concernant le confort des véhicules. Afin de rester compétitif et de fidéliser sa clientèle, l'entreprise s'engage activement dans le développement de son propre système de contrôle actif du bruit. Cette initiative vise à offrir à ses clients et à leurs passagers un niveau de confort supérieur en réduisant efficacement les nuisances sonores

indésirables à l'intérieur de leurs véhicules.

L'objectif central de ce projet est de concevoir un système de contrôle actif du bruit pour son intégration à l'intérieur des véhicules. Le système aura pour mission de réduire les bruits internes tels que le bruit du moteur, le bruit de roulement et le bruit aérodynamique. Pour cela, l'utilisation de filtres adaptatifs sera privilégiée dans l'application du contrôle actif du bruit. Ce projet ambitieux reflète l'engagement d'Actia à innover dans le domaine du confort automobile en proposant une technologie de pointe pour améliorer l'expérience de conduite de ses clients. En répondant aux attentes en matière de réduction du bruit à l'intérieur du véhicule, Actia aspire à renforcer sa position concurrentielle et à maintenir sa réputation en tant que fournisseur de solutions de qualité pour l'industrie automobile.

1.3.2 Travail Envisagé

Dans le cadre de ce projet centré sur l'application de techniques de contrôle actif du bruit en vue d'améliorer le confort de conduite, l'objectif majeur de ma contribution consiste à mettre en évidence les étapes essentielles conduisant à la réalisation réussie de cette initiative. Les éléments clés de cette démarche se déclinent comme suit :

- Étude approfondie du contrôle actif du bruit : Réalisation d'une analyse poussée sur le contrôle actif du bruit en mettant en avant sa pertinence, ses multiples domaines d'application et ses spécificités distinguant cette approche des autres applications similaires.
- Exploration approfondie du filtrage adaptatif : Réalisation d'une étude approfondie sur le filtrage adaptatif, englobant l'analyse de divers types de filtres adaptatifs. Cette phase sera suivie par la mise en pratique via des simulations de ces filtres sur l'environnement MATLAB.
- Conception et mise en œuvre d'un prototype : Création d'une modélisation conceptuelle pour le prototype du projet, suivi de son implémentation pratique. Cette étape englobe la transition du modèle conceptuel vers une réalisation concrète, permettant ainsi de visualiser les aspects pratiques de l'idée.
- Élaboration d'une modélisation spécifique de système ANC pour un véhicule : Développement d'une modélisation spécifique pour un système de Contrôle Actif du Bruit (ANC) adapté à un contexte automobile.

1.4 Contrôle Actif du Bruit

1.4.1 Définition

La contrôle active de bruit (Active Noise Control ou ANC) est une technique qui permet de réduire les niveaux de bruit en utilisant des sources de bruit additionnelles. Le principe de l'ANC repose sur l'utilisation d'interférences destructives, comme illustré dans la figure 1.2.

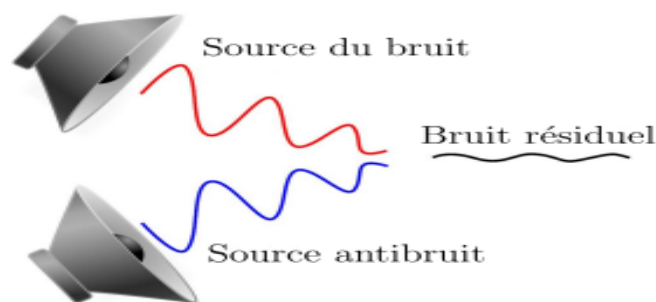


FIGURE 1.2 – Principe d'interférence du contrôle actif de bruit [20]

L'objectif est de générer en continu un anti-bruit similaire au bruit à atténuer, mais en opposition de phase. Pour ce faire, une unité de calcul est utilisée pour générer de manière adaptative l'anti-bruit afin de suivre les variations du bruit.

1.4.2 Processus du contrôle actif de bruit

Le contrôle actif de bruit repose sur une série d'étapes ingénieuses, comme illustré dans la figure 1.3, comprenant six étapes principales. Cette approche sophistiquée vise à réduire de manière efficace les bruits indésirables en utilisant des principes d'interférence destructive. Chacune de ces étapes joue un rôle essentiel dans la création d'une onde antibruit qui s'oppose et annule les bruits ambiants.



FIGURE 1.3 – Processus du contrôle actif de bruit

- **Etape 1** : capture du bruit ambiant, consiste à placer un microphone dans l'environnement où le bruit indésirable doit être réduit, comme à l'intérieur d'une voiture

par exemple. Le microphone capte les signaux sonores présents dans l'environnement et les envoie à un circuit de traitement du signal numérique (DSP) lors de l'étape suivante.

- **Etape 2** : traitement du signal, permet au DSP d'analyser les signaux sonores captés par le microphone. Suite à cette analyse, le DSP génère une onde sonore de phase opposée, également appelée onde antibruit.
- **Etape 3** : génération de l'onde antibruit, l'onde antibruit ainsi créée est diffusée dans l'environnement. Cette étape utilise les filtres adaptatifs, qui seront détaillés dans le reste du rapport. Ces filtres adaptatifs sont essentiels pour la génération du contre-bruit qui s'oppose au bruit indésirable, permettant ainsi l'annulation ou l'atténuation du bruit dans l'espace cible.
- **Etape 4** : diffusion de l'onde antibruit. Des haut-parleurs spécifiquement positionnés, par exemple, des haut-parleurs intégrés dans les sièges d'une voiture, diffusent cette onde antibruit.
- **Etape 5** : interférence destructrice, est le cur du processus. L'onde antibruit se superpose à l'onde sonore indésirable d'origine, résultant en une interférence destructrice. Les parties en phase opposée des ondes se neutralisent, ce qui réduit de manière significative le niveau global de bruit.
- **Etape 6** : évaluation du bruit réduit, procède à l'évaluation du confort acoustique résultant de l'application du contrôle actif de bruit. Cette évaluation comprend des mesures visant à tester l'efficacité de l'ANC dans la réduction du bruit indésirable. Si des ajustements sont nécessaires pour améliorer les performances, on peut revenir aux étapes initiales et effectuer des tests itératifs afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

1.4.3 Utilité du Contrôle Actif de Bruit

L'amélioration du confort acoustique dans nos environnements est un défi de taille, étant donné la présence de bruits indésirables qui peuvent perturber notre bien-être et notre productivité. Pour répondre à cette problématique, différentes approches de contrôle de bruit ont été développées, dont deux des plus courantes sont le Contrôle Actif de Bruit et le Contrôle Passif de Bruit qui repose sur des approches plus traditionnelles, telles que l'utilisation de matériaux isolants, de panneaux acoustiques, ou de barrières physiques pour bloquer le bruit. Bien que cette méthode puisse être efficace pour certains types de bruits, elle présente des limites en termes de flexibilité et d'adaptabilité à des environne-

ments changeants.

Le tableau 1.1 présente une comparaison approfondie entre l'ANC et le Contrôle Passif de Bruit, mettant en évidence leurs caractéristiques distinctives. Des aspects tels que le principe de fonctionnement, l'efficacité, la flexibilité et d'autres facteurs pertinents sont examinés pour permettre une évaluation éclairée des avantages et des inconvénients de chaque approche.

TABLE 1.1 – Comparaison entre le Contrôle Actif de Bruit et le Contrôle Passif de Bruit

Aspect	Contrôle Actif de Bruit	Contrôle Passif de Bruit
Principe de fonctionnement	Génère une onde antibruit pour annuler le bruit.	Utilise des matériaux isolants pour bloquer le bruit.
Efficacité	Efficace pour réduire les bruits indésirables.	Peut être efficace pour certains types de bruit.
Flexibilité	Peut s'adapter à différents types de bruits.	Peut nécessiter des ajustements pour différents bruits.
Réponse en temps réel	Réagit rapidement aux variations de bruit.	N/A
Confort acoustique	Améliore considérablement le confort acoustique.	Peut offrir une certaine amélioration du confort.
Intégration	Peut être intégré dans des appareils électroniques	N/A
Adaptabilité	Peut être ajusté pour différents environnements	N/A
Coûts	Peut être coûteux en fonction des applications	Peut être plus abordable selon les matériaux utilisés
Réduction des bruits spécifiques	Permet une réduction ciblée des bruits indésirables	Peut avoir une réduction plus générale du bruit

1.5 Applications du contrôle actif du bruit

Le contrôle actif de bruits est un principe largement exploité dans divers domaines, principalement :

- **Casques anti-bruit** : Ces dernières années, les casques à réduction active de bruit ont gagné en popularité sur le marché. Ils offrent la capacité d'isoler l'utilisateur des bruits extérieurs tout en préservant la qualité du signal audio transmis par le casque. Ce système utilise des microphones placés sur les coques extérieures pour capter les bruits ambiants et générer un anti-bruit en phase opposée, prenant en compte le filtrage effectué par les coques. Cette proximité entre le microphone, le haut-parleur et l'utilisateur permet d'atténuer efficacement un large spectre de fréquences.
- **Gaine d'aération** : Les bruits émis par les systèmes d'aération peuvent également être réduits de manière efficace. Généralement, ces bruits sont périodiques et leur fréquence reste assez stable, ce qui facilite leur traitement. Les systèmes de contrôle actif de bruit trouvent également des applications industrielles pour réduire les bruits périodiques émis par différentes machines.
- **Habitacle de véhicule** : L'ANC peut être utilisé pour réduire les bruits à l'intérieur de l'habitacle des véhicules, y compris pour la réduction des bruits du moteur. Il est également utilisé dans les cockpits d'hélicoptères [22] pour améliorer le confort acoustique. Le stage en question se concentre particulièrement sur l'application de l'ANC dans les voitures.

1.6 Contrôle actif du bruit dans les véhicules automobiles

1.6.1 Analyse des Bruits à l'intérieur des Automobiles

Dans le contexte automobile, un niveau de bruit excessif à l'intérieur de l'habitacle peut avoir des conséquences perturbantes pour les utilisateurs. Cela peut entraîner une fatigue accrue pour le conducteur, réduisant ainsi son niveau d'attention et sa capacité de réaction, ce qui pourrait augmenter le risque d'accidents. De plus, les bruits indésirables peuvent perturber les conversations entre les passagers, rendant les échanges difficiles voire inaudibles. L'écoute de musique ou de communications téléphoniques peut également être affectée, obligeant les utilisateurs à augmenter le volume, ce qui peut nuire à leur confort auditif et potentiellement entraîner des problèmes d'audition à long terme.

Le moteur joue un rôle crucial dans la production du bruit global du véhicule, mais il n'est pas le seul contributeur à l'aspect sonore. L'acoustique de la voiture est également influencée de manière significative par deux autres facteurs importants : le bruit de roulement et le bruit aérodynamique (Figure 1.4).

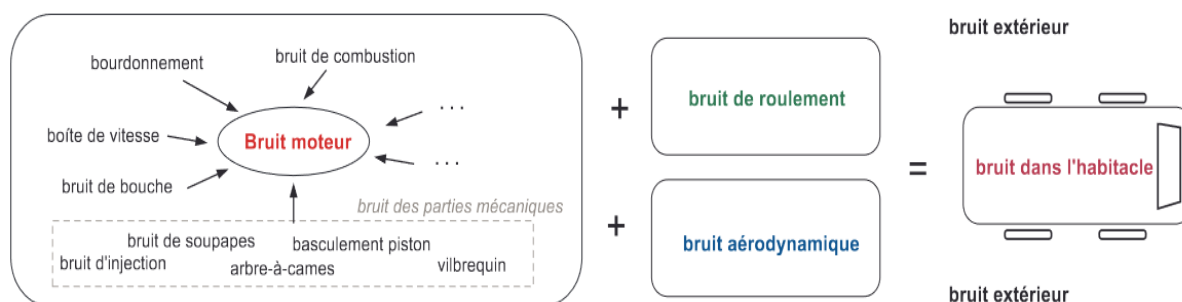


FIGURE 1.4 – Schéma de l'acoustique véhicule : bruit moteur, bruit de roulement et bruit aéro [29]

Le bruit de roulement et le bruit aérodynamique revêtent une importance capitale, surtout à des vitesses élevées, où leur impact devient prédominant par rapport au bruit émanant uniquement du moteur. À des vitesses inférieures à 50 km/h, la principale source de bruit à l'intérieur de l'habitacle est généralement le groupe moto-propulseur. Toutefois, au-delà de cette vitesse, les bruits de roulement et le bruit aéro prennent le dessus. À des vitesses supérieures à 100-120 km/h, le bruit aérodynamique devient la contribution sonore la plus significative.

1.6.2 Implication de l'ANC dans l'Automobile : Exemple Existant

L'intégration de la technologie ANC (Active Noise Cancellation ou Réduction de bruit active) dans l'industrie automobile représente une évolution significative pour le confort et l'expérience des conducteurs et des passagers. HALOsonic, issu de la collaboration entre Harman et Lotus Engineering, est un exemple remarquable de cette innovation.

HALOsonic se démarque en exploitant des techniques avancées de détection et de filtrage des bruits ambiants pour créer un environnement paisible à l'intérieur du véhicule. En allant au-delà des casques audio traditionnels, ce système offre une expérience sonore immersive en reproduisant des sons tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de la voiture. Cela permet de maintenir un niveau de silence optimal pour les occupants, même en présence de bruits extérieurs gênants. Outre HALOsonic, de nombreuses autres entreprises travaillent sur l'intégration de la réduction de bruit active dans leurs voitures. Ces entreprises cherchent à améliorer encore davantage l'isolation acoustique de l'habitacle et à offrir aux conducteurs et aux passagers une expérience de conduite plus silencieuse et plus agréable.

Ces avancements dans l'ANC automobile témoignent de l'engagement de l'industrie automobile à intégrer des technologies novatrices pour répondre aux besoins et aux attentes

des consommateurs en matière de confort et de qualité sonore. En combinant expertise en ingénierie et savoir-faire audio, ces entreprises contribuent à façonner l’avenir des véhicules plus silencieux et plus agréables à conduire.

1.7 Planification du projet

La figure 1.5 illustre un diagramme de Gantt qui permet de visualiser la répartition chronologique du temps consacré à chaque phase (ou tâche) du projet. Cette représentation minutieuse décompose la période de temps passée dans chaque phase, offrant ainsi une vue détaillée de l’évolution temporelle de chaque composante du projet.

- Tâche 1 : Étude approfondie du contrôle actif du bruit.
- Tâche 2 : Exploration approfondie du filtrage adaptatif.
- Tâche 3 : Conception et mise en uvre d’un prototype.
- Tâche 4 : Élaboration d’une modélisation spécifique de système ANC pour un véhicule.

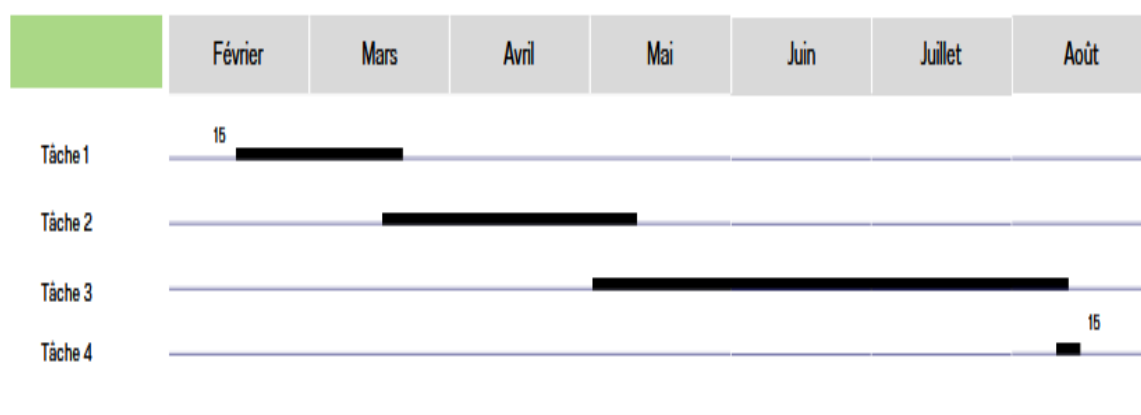


FIGURE 1.5 – Diagramme de Gantt

1.8 Conclusion

En résumé, ce chapitre jette des bases solides pour notre projet en présentant l’entreprise ACTIA ES et son équipe spécialisée dans l’ingénierie et les technologies. Nous avons exploré en détail le concept de Contrôle Actif du Bruit (ANC) et son applicabilité dans divers domaines, notamment les véhicules automobiles. Les spécifications et les objectifs du projet ont été clairement définis, avec une planification méthodique pour sa mise en

œuvre. Les prochains chapitres approfondiront les aspects techniques et méthodologiques, contribuant à notre projet de mise en uvre de l'ANC pour réduire les bruits internes et promouvoir l'innovation dans ce domaine.

Chapitre 2

Étude Approfondie des Signaux Sonores et Utilisation des Filtres Adaptatifs pour la Réduction du Bruit

2.1 Introduction

Le deuxième chapitre de ce rapport constitue une exploration approfondie des aspects théoriques et pratiques liés à l'étude des signaux sonores et à l'utilisation des filtres adaptatifs pour la réduction du bruit. Ce chapitre vise à établir les bases nécessaires à la compréhension des algorithmes de filtrage adaptatif ainsi qu'à fournir un aperçu des méthodologies utilisées pour évaluer leurs performances. En outre, il mettra en évidence les applications concrètes de ces concepts à l'aide de simulations réalisées à l'aide de l'environnement MATLAB.

2.2 Introduction aux Signaux Sonores

2.2.1 Définition de son

Le son est une onde résultant de la vibration mécanique d'un support fluide ou solide, se propageant à travers l'élasticité du milieu environnant sous forme d'ondes longitudinales [8]. Sur le plan physiologique, le son se réfère à la sensation auditive qui peut être générée par cette vibration.

2.2.2 Caractéristique du son

Les éléments essentiels qui définissent le son sont les suivants :

2.2.2.1 Amplitude

L'amplitude est la première caractéristique essentielle d'un son, également connue sous les noms d'intensité ou de volume sonore. Elle représente l'expression de la pression de l'air causée par le son, mesurée en décibels (dB).

2.2.2.2 Fréquence

La fréquence d'un signal sonore se réfère au nombre de cycles complets qu'il effectue par seconde et est généralement exprimée en Hertz (Hz). Elle représente la mesure de la rapidité avec laquelle les variations de pression se produisent dans le milieu de propagation, ce qui détermine la hauteur perçue du son.

2.2.2.3 Vitesse

La vitesse du son mesure la rapidité avec laquelle les ondes sonores se propagent dans un milieu donné. Cette vitesse est déterminée par les propriétés spécifiques du milieu.

2.2.2.4 Propagation

La propagation du signal audio est un processus complexe par lequel le son se déplace dans l'environnement, de la source sonore vers les récepteurs. Ce processus est influencé par différents paramètres .

- Dans le cas de la propagation du signal sonore, la distance entre la source sonore et les récepteurs joue un rôle crucial dans l'intensité du son perçu par chaque récepteur. À mesure que la distance entre la source sonore et les récepteurs augmente, l'énergie sonore se dissipe et l'intensité du son diminue.

Dans le cas où une source sonore unique émet un signal vers plusieurs récepteurs situés à des distances différentes, un phénomène de retard temporel se manifeste, comme illustré dans la figure 2.1. Ce retard est directement attribuable à la vitesse finie de propagation du son dans l'air. Pour déterminer avec précision le retard temporel entre la source sonore et chaque récepteur, il est possible d'utiliser la formule :

$$\text{Temps de décalage} = \frac{\text{Distance}}{\text{Vitesse du son}}$$

Ce calcul permet de synchroniser les signaux audio reçus en appliquant un retard approprié à chaque récepteur, afin de compenser les différences de temps d'arrivée des signaux sonores.

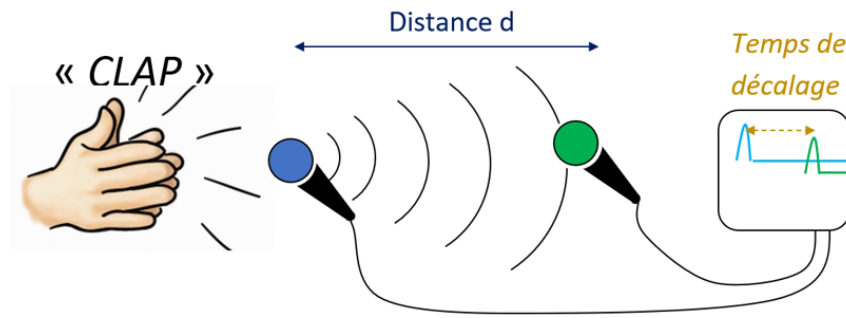


FIGURE 2.1 – Phénomène de retard temporel [10]

- La figure 2.2 présente la propagation du signal audio entre un émetteur et un récepteur, mettant en évidence les phénomènes qui peuvent se produire lors de cette propagation. Parmi ces phénomènes, on observe la réflexion, l'absorption, la réverbération, ainsi que d'autres effets tels que la diffraction, la dispersion et l'interférence. Tous ces phénomènes exercent une influence significative sur la perception du son et doivent être soigneusement pris en compte lors de la conception et de l'optimisation des systèmes audio.

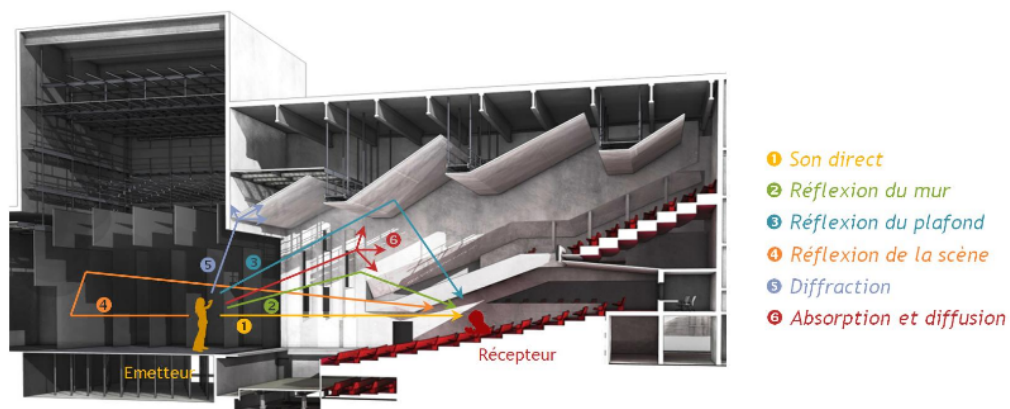


FIGURE 2.2 – Phénomène de propagation [12]

La réflexion se produit lorsque les ondes sonores rencontrent des surfaces solides, telles que les murs, les sols ou d'autres obstacles. Ces surfaces réfléchissent une partie de l'énergie sonore, créant ainsi des réflexions multiples qui peuvent engendrer des échos et altérer la qualité du son. La perception de la clarté et de la spatialité du signal audio peut également être influencée par les réflexions.

L'absorption se produit lorsque les ondes sonores interagissent avec des matériaux ou des surfaces rencontrés sur leur chemin de propagation. Certains matériaux, tels que les panneaux acoustiques, les tapis ou les rideaux, ont la capacité d'absorber une partie de l'énergie sonore. L'absorption acoustique permet de contrôler les réflexions indésirables, de réduire la résonance et d'améliorer la qualité sonore dans un espace donné. La réverbération est un phénomène qui se produit lorsque les ondes sonores se réfléchissent de manière multiple à travers les surfaces d'une pièce ou d'un environnement. Ces réflexions multiples créent un mélange de sons réverbérés qui persistent après la fin de la source sonore. La réverbération ajoute de la richesse et de la spatialité au son, mais une réverbération excessive peut rendre le signal audio moins clair et moins intelligible.

En plus de ces phénomènes, d'autres effets tels que la diffraction, la dispersion et l'interférence peuvent également influencer la propagation du signal audio. La diffraction se produit lorsque les ondes sonores se courbent autour des obstacles ou des ouvertures, leur permettant de se propager dans les zones d'ombre acoustique. La dispersion se réfère à la séparation des différentes fréquences sonores lors de leur propagation, ce qui peut avoir un impact sur la clarté et l'équilibre tonal du son. L'interférence se produit lorsque deux ondes sonores se superposent, créant des zones d'annulation ou de renforcement du son.

Lors de la conception des systèmes audio, il est essentiel de tenir compte de ces phénomènes et effets pour assurer une reproduction sonore de haute qualité.

2.2.2.5 Analyse des Phénomènes d'Interférence

L'interférence des signaux sonores survient lorsqu'au moins deux ondes sonores entrent en superposition et en combinaison. Cette interaction peut engendrer des altérations au niveau de l'amplitude, de la fréquence ou de la phase des ondes sonores individuelles. Les conséquences de ce phénomène sur la perception auditive sont diverses et peuvent se manifester de manière constructive, c'est-à-dire en augmentant l'amplitude, ou de manière destructive, en la réduisant. Ces résultats dépendent de la manière dont les ondes se fondent ensemble. Au sein de l'interférence des signaux sonores, deux catégories principales se dégagent :

- L'interférence constructive : Dans cette situation, les crêtes d'une onde sonore se superposent aux crêtes d'une autre onde sonore, tandis que les creux se superposent également. Ce phénomène se traduit par un accroissement de l'amplitude du signal composite, pouvant engendrer un son plus puissant ou plus intense. Lorsque

deux ondes de fréquence similaire et de phase identique se superposent de manière constructive, des phénomènes tels que le renforcement ou la résonance peuvent se manifester.

- L'interférence destructive : Ici, les crêtes d'une onde sonore entrent en superposition avec les creux d'une autre onde, et vice versa. Cette conjonction mène à une réduction de l'amplitude du signal résultant, pouvant aller jusqu'à l'annulation complète du son dans certains cas. Lorsque des ondes de fréquences proches mais de phases opposées s'additionnent, elles peuvent s'annuler mutuellement, créant ainsi des zones de silence ou de faible intensité sonore, appelées nuds.

2.3 Génération des signaux Audio

2.3.1 Définition de l'audio

L'audio est une représentation fidèle du son dans son état d'origine. Dès lors qu'un fichier est créé à partir d'un enregistrement et qu'il constitue une reproduction exacte de la source sonore d'origine, nous considérons qu'il s'agit d'un contenu audio.

Les signaux audio sont définis par des plages de fréquences spécifiques, telles que celles qui peuvent être perçues par l'oreille humaine, couvrant une gamme allant de 20 Hz à 20 kHz.

2.3.2 Caractéristiques des Environnements Audio : Stationnaire et Non Stationnaire

Dans le cadre des signaux audio, deux types d'environnements distincts sont identifiés : stationnaire et non stationnaire.

- L'environnement stationnaire correspond à une période de temps où les propriétés statistiques du signal audio demeurent constantes. Cela signifie que les caractéristiques telles que la fréquence, l'amplitude et la distribution des niveaux restent stables au fil du temps. Les signaux audio évoluant dans des environnements stationnaires sont plus prévisibles et stables, facilitant ainsi leur traitement et leur analyse.
- L'environnement non stationnaire fait référence à une période de temps où les propriétés statistiques du signal audio changent. Dans un environnement non stationnaire, les caractéristiques du signal varient en raison de modifications dans la source

sonore ou de changements dans l'environnement d'enregistrement. Les signaux audio dans des environnements non stationnaires présentent des défis supplémentaires pour leur traitement, car ils nécessitent une adaptation constante pour suivre les variations du signal.

Cette distinction entre environnement stationnaire et non stationnaire revêt une importance capitale pour comprendre et traiter les signaux audio dans diverses situations et applications. Une telle compréhension est essentielle pour choisir les méthodes de traitement et d'analyse adéquates, en fonction du contexte spécifique du signal audio étudié. En mettant en évidence cette différenciation, nous pouvons développer des approches adaptées pour traiter efficacement les signaux audio dans des environnements changeants, ce qui favorise une analyse plus approfondie et une prise de décision éclairée.

2.3.3 Caractéristiques des Codages Audio

Les codages audio sont déterminés par plusieurs paramètres qui exercent une influence significative sur la qualité et la représentation du son. Dans cette section, nous examinerons les principales caractéristiques de ces codages :

- Nombre de canaux sonores codés : Les codages audio peuvent être mono (1 canal), stéréo (2 canaux) ou multicanaux (plus de 2 canaux).
- Fréquence d'échantillonnage : Elle détermine le nombre d'échantillons pris par seconde pour représenter numériquement le signal audio de chaque canal. Cette caractéristique influence directement la qualité sonore et la bande passante du signal. Selon le Théorème de Shannon-Nyquist, pour obtenir une représentation numérique précise et sans perte du signal audio, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois supérieure à la fréquence la plus élevée contenue dans le signal. En d'autres termes, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois la fréquence maximale des sons présents dans le signal audio.
- Résolution de chaque échantillon en bits : La résolution en bits correspond à la précision de chaque échantillon audio numérique. Une résolution plus élevée permet de capturer les détails les plus fins du son, conduisant à une meilleure représentation de l'audio.
- Débit numérique : Le débit numérique reflète la taille du fichier audio par rapport à la durée du son. Un débit numérique plus élevé est souvent associé à une meilleure qualité audio, mais cela peut entraîner des fichiers plus volumineux, ce qui est important à prendre en compte lors de la gestion du stockage et de la transmission des

fichiers audio.

2.3.4 Chaîne audio

La chaîne audio représente le trajet parcouru par le signal sonore, depuis sa source naturelle jusqu'à sa transformation en un signal numérique traité par un DSP (Digital Signal Processor), comme illustré dans la figure 2.3. Cette figure décrit également le sens inverse du passage du signal, c'est-à-dire du DSP vers l'environnement naturel. La chaîne audio joue un rôle essentiel dans la captation, le traitement et la restitution fidèle de toute la richesse des sons qui nous entourent, ainsi que dans la diffusion des sons.

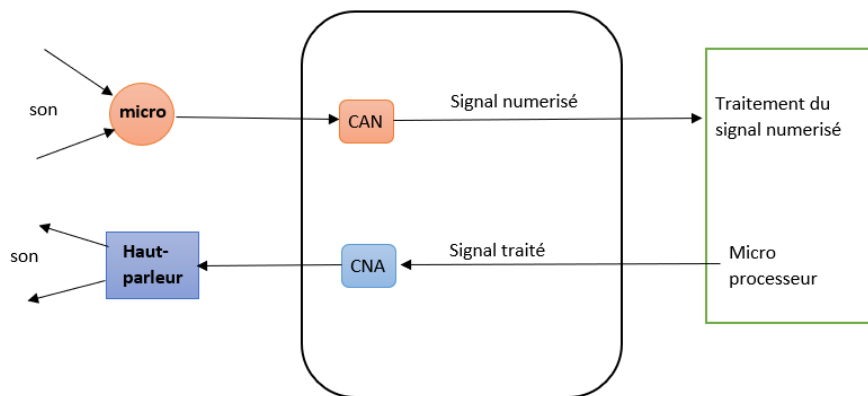


FIGURE 2.3 – Chaîne audio

- Source sonore (son) : Tout commence avec la source sonore, qui peut être une voix humaine, un instrument de musique, des bruits environnementaux ou tout autre événement sonore.
- Microphone (micro) : Un microphone est un dispositif qui transforme un signal sonore en un signal électrique, permettant ainsi de convertir l'énergie acoustique en une représentation proportionnelle électrique. Le principal avantage d'utiliser un signal électrique plutôt qu'un signal acoustique est la facilité de stockage et d'exploitation par les appareils audio. Le microphone possède plusieurs caractéristiques spécifiques qui le définissent :
 - Sensibilité et résistance interne : La sensibilité du microphone détermine sa capacité à capturer les variations de pression acoustique et à les transformer en signaux électriques.
 - Courbe de réponse en fréquence : Le microphone peut avoir une réponse en fréquence spécifique, ce qui signifie qu'il peut être plus sensible à certaines fré-

quences qu'à d'autres. Cette courbe de réponse en fréquence peut être linéaire ou adaptée pour des applications spécifiques.

- Diagramme directionnel : Le microphone peut être caractérisé par son diagramme directionnel, qui indique comment il capte les sons provenant de différentes directions. Certains microphones sont omnidirectionnels, captant le son de toutes les directions, tandis que d'autres sont unidirectionnels, captant principalement le son d'une direction spécifique.
- DSP (Digital Signal Processor) : Le signal numérique est ensuite envoyé vers un DSP, un dispositif électronique ou un logiciel capable de traiter et de manipuler les données numériques avec une grande précision. Le DSP réalise divers traitements tels que l'égalisation, la réverbération, la compression, la modulation, etc., pour améliorer, modifier ou adapter le signal sonore en fonction des besoins spécifiques.
- Conversion Numérique-Analogique (CNA ou DAC) : Après avoir été traité par le DSP, le signal numérique est converti de nouveau en un signal analogique par un convertisseur numérique-analogique (CNA ou DAC). Cette conversion permet de retransformer les données numériques en un signal électrique continu, prêt à être diffusé ou enregistré.
- Haut-parleur : Le haut-parleur, également appelé transducteur électrodynamique, est un dispositif essentiel dans la chaîne audio, permettant de convertir un signal électrique en une énergie acoustique pour reproduire le son dans l'environnement.

2.3.5 Prétraitement, Analyse et Visualisation du signal audio

Le prétraitement, l'analyse et la visualisation d'un signal audio jouent un rôle essentiel dans le traitement des données sonores, ce qui est particulièrement pertinent dans le cadre de notre projet, qui se base sur l'utilisation de signaux audio. Ces étapes permettent de nettoyer, analyser et représenter graphiquement le signal audio, ce qui facilite grandement son interprétation et son utilisation ultérieure, notamment dans la partie dédiée au filtrage adaptatif que nous présenterons dans la suite du rapport. Pour mieux illustrer le flux de traitement du signal audio, nous avons résumé ces processus dans la figure 2.4 suivante :

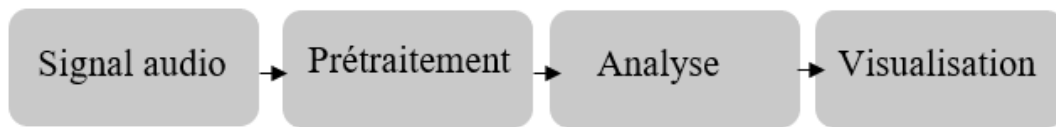


FIGURE 2.4 – Flux de Prétraitement, Analyse et Visualisation du signal audio

- Première étape : Dans le cadre de notre flux de prétraitement, d'analyse et de visualisation du signal audio, la phase initiale consiste à récupérer le signal audio brut à partir de sa source, qu'il s'agisse d'un enregistrement, d'un microphone ou d'une autre origine sonore. Ce signal est ensuite transformé en sa forme électrique lors de son passage à travers la chaîne audio, garantissant ainsi une reproduction fidèle de son environnement réel ou naturel. Ensuite, le signal audio sous forme électrique est acheminé vers le DSP (Digital Signal Processor) pour être soumis à des étapes de prétraitement et de traitement ultérieur.
- Deuxième étape : Le pré-traitement du signal audio représente une étape cruciale dans notre flux de travail, visant à préparer le signal brut pour un traitement ultérieur. Cette phase comprend un ensemble d'opérations essentielles qui visent à améliorer la qualité et la fiabilité des données audio. Parmi les étapes de prétraitement, nous avons identifié les opérations suivantes :
 - Normalisation
 - Filtrage
 - Élimination des artefacts
- Troisième étape : Après avoir effectué le prétraitement du signal audio, la troisième étape essentielle de notre processus consiste à procéder à une analyse approfondie du signal afin d'extraire des informations pertinentes. Cette phase analytique est cruciale pour comprendre et interpréter les caractéristiques du signal, ce qui nous permettra d'appliquer des traitements spécifiques et de prendre des décisions éclairées. Dans cette étape d'analyse, nous utilisons diverses techniques pour explorer en détail les caractéristiques fréquentielles, temporelles et structurelles du signal audio. Les méthodes fondamentales que nous employons comprennent :
 - L'analyse par Transformée de Fourier (FFT)
 - L'analyse par Transformée de Fourier à Court Terme (STFT)
 - L'utilisation de la corrélation

— L'utilisation de l'autocorrélation

- Quatrième étape : La quatrième étape de notre processus consiste à visualiser le signal audio après avoir effectué le prétraitement et l'analyse. Cette étape est essentielle pour mieux comprendre les résultats de l'analyse et pour identifier d'éventuelles améliorations ou ajustements à apporter au processus. La visualisation permet de représenter graphiquement les caractéristiques du signal audio, facilitant ainsi l'interprétation des données sonores. Nous utilisons différentes techniques de visualisation pour explorer et analyser le signal audio en détail, notamment : Spectrogramme, Représentation fréquentielle, Représentation temporelle et Visualisation 3D.

2.4 Généralités sur le filtrage adaptatif

2.4.1 Définition

Un filtre adaptatif est un filtre numérique qui modifie ses coefficients en fonction d'un critère donné pour s'adapter aux variations des signaux reçus. Typiquement, il utilise un vecteur d'entrée et une réponse désirée pour calculer un vecteur d'erreur, qui est ensuite utilisé pour ajuster ses coefficients au fil du temps. Deux paramètres importants caractérisent un filtre adaptatif : la longueur du filtre, notée M , qui détermine le nombre de coefficients à ajuster, et le pas d'adaptation, noté μ . Ces paramètres jouent un rôle crucial dans le fonctionnement et la performance du filtre adaptatif.

2.4.2 Approches du Filtrage Adaptatif pour le Traitement de Signaux : Mono et Multi-sources

Deux approches distinctes se démarquent dans le Filtrage Adaptatif : le Filtrage Adaptatif pour Sources Mono et le Filtrage Adaptatif pour Sources Multi. Ces approches spécifiques permettent d'appliquer efficacement cette technique dans des contextes audio différents, que ce soit pour des signaux provenant d'une seule source ou de multiples sources.

2.4.2.1 Approche du Filtrage Adaptatif pour Sources Audio Mono

L'Approche du Filtrage Adaptatif pour Sources Audio Mono repose sur l'utilisation de vecteurs \mathbf{x} et \mathbf{w} de dimensions $(M, 1)$.

Dans cette approche, le vecteur \mathbf{x} représente le signal d'entrée de taille M , tandis que le

vecteur \mathbf{w} , également de taille M , correspond aux coefficients du filtre adaptatif. L'objectif est d'ajuster de manière dynamique les valeurs des coefficients dans \mathbf{w} en fonction du signal d'entrée \mathbf{x} , afin de minimiser l'erreur entre le signal filtré \mathbf{y} et un signal de référence désiré, noté \mathbf{d} , comme illustré dans la figure 2.5.

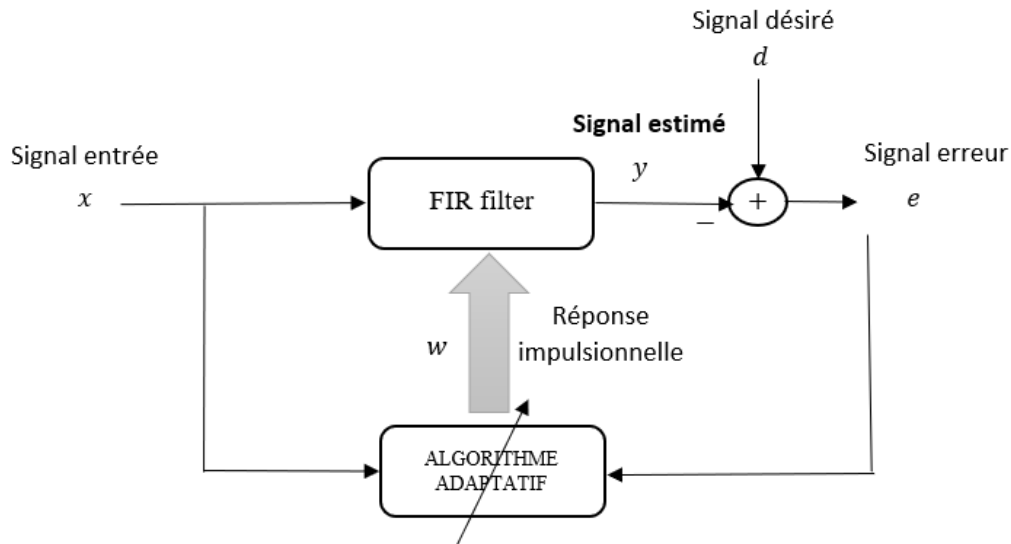


FIGURE 2.5 – Schéma général d'un système de filtrage adaptatif

À chaque itération (ou instant) n , le filtre adaptatif suit les étapes suivantes pour mettre à jour ses coefficients et améliorer son filtrage :

1. Acquisition des nouveaux échantillons du signal d'entrée (ou source) et du signal désiré : Ces nouveaux échantillons (x_{new}, d_{new}) représentent les données les plus récentes du signal à filtrer ainsi que celles du signal de référence (désiré) nécessaires pour évaluer la performance du filtre.
2. Mise à jour du signal désiré du filtre $(d(n) = d_{new})$, suivi de la mise à jour du vecteur d'entrée du filtre $x(n)$: Pour cela, nous combinons le nouvel échantillon d'entrée x_{new} avec le vecteur $x(n-1)$ provenant de l'instant précédent. Cette mise à jour se réalise en deux étapes :
 - (a) Décalage à droite d'un pas égal à 1 sur le vecteur $x(n-1)$: Cela déplace chaque élément du vecteur $x(n-1)$ d'une position vers la droite. Le nouveau vecteur résultant de cette rotation est noté $x_{rotated}(n-1)$.
 - (b) Remplacement du premier élément du vecteur $x_{rotated}(n-1)$ après la rotation par le nouvel échantillon d'entrée x_{new} . Le vecteur final $x(n)$ est ainsi constitué.

Mathématiquement, la rotation à droite est représentée comme suit :

$$\mathbf{x}_{\text{rotated}}(n-1)^T = [x(n-1)_M, x(n-1)_1, x(n-1)_2, \dots, x(n-1)_{M-1}] \quad (2.1)$$

où T représente la fonction de transposition, $x(n-1)_M$ est le dernier élément du vecteur $x(n-1)$ et $x(n-1)_1$ est le premier élément du vecteur $x(n-1)$ avant la rotation.

Le vecteur d'entrée final $x(n)$ est ainsi donné par :

$$\mathbf{x}(n)^T = [x_{\text{new}}, x(n-1)_1, x(n-1)_2, \dots, x(n-1)_{M-1}] \quad (2.2)$$

où x_{new} est le nouvel échantillon d'entrée.

Le processus de construction du vecteur d'entrée $x(n)$ permet d'incorporer les nouveaux échantillons d'entrée tout en préservant l'ordre temporel des anciens échantillons, ce qui est essentiel pour un filtrage adaptatif efficace.

3. Calcul du signal filtré $y(n)$: Cela se fait en calculant le produit scalaire entre le vecteur d'entrée $x(n)$ et le vecteur de coefficients $w(n-1)$ du filtre adaptatif :

$$y(n) = x(n)^T \cdot w(n-1) \quad (2.3)$$

où T représente la transposition du vecteur $x(n)$.

4. Calcul de l'erreur du filtre $e(n)$: Cette erreur est obtenue comme la différence entre le signal désiré $d(n)$ et la sortie du filtre $y(n)$:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.4)$$

5. Adaptation des coefficients du filtre adaptatif $w(n)$: Ces coefficients sont ajustés en fonction du vecteur d'entrée $x(n)$, de l'erreur $e(n)$, et du vecteur de coefficients précédent $w(n-1)$ comme illustré dans la figure 2.6. Il existe plusieurs algorithmes adaptatifs avec différentes fonctions d'adaptation, qui seront présentés dans le reste de ce chapitre.

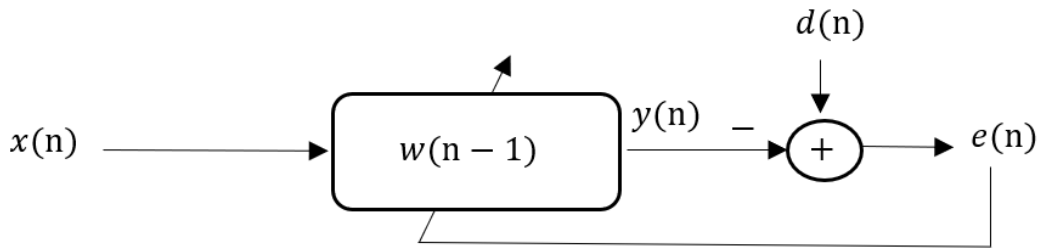


FIGURE 2.6 – Schéma général d'un système de filtrage adaptatif pour Sources Audio Mono

2.4.2.2 Approche du Filtrage Adaptatif pour Sources Audio Multi

Dans cette approche, au lieu d'avoir un seul signal d'entrée et un seul signal de sortie (comme dans l'approche pour source audio mono), nous avons plusieurs signaux d'entrée et plusieurs signaux de sortie, chacun correspondant à un canal spécifique.

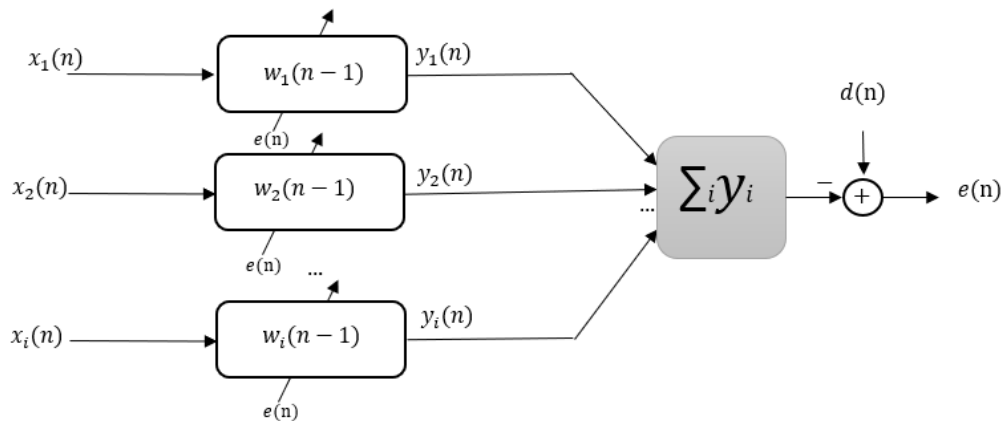


FIGURE 2.7 – Schéma général d'un système de filtrage adaptatif pour Sources Audio Multi

Les étapes du filtrage adaptatif pour sources audio multi-canal sont généralement les suivantes :

1. Acquisition des nouveaux échantillons : Les signaux d'entrée les plus récents pour chaque canal, représentés par les vecteurs $\mathbf{x}_i(n)$, sont obtenus à chaque instant n . De plus, à chaque instant n , on obtient également l'échantillon du signal désiré, noté $d(n)$.
2. Mise à jour du signal désiré et des vecteurs d'entrée pour chaque canal : Les nouveaux échantillons d'entrée sont combinés avec les vecteurs d'entrée de l'instant

précédent pour obtenir les nouveaux vecteurs d'entrée pour chaque canal. Cela peut être exprimé mathématiquement comme suit :

Pour chaque canal i :

$$\mathbf{x}_i(n)^T = [x_{i,\text{new}}(n), x_{i,1}(n-1), x_{i,2}(n-1), \dots, x_{i,M-1}(n-1)] \quad (2.5)$$

où $x_{i,\text{new}}(n)$ est le nouvel échantillon d'entrée pour le canal i à l'instant n et $x_{i,j}(n-1)$ est le j -ème élément du vecteur d'entrée pour le canal i à l'instant $(n-1)$.

3. Calcul des signaux filtrés (sorties de filtres) : Le signal filtré pour chaque canal est obtenu en effectuant le produit scalaire entre le vecteur d'entrée $\mathbf{x}_i(n)$ pour le canal i et le vecteur de coefficients du filtre adaptatif $\mathbf{w}_i(n-1)$ pour ce canal :

Pour chaque canal i :

$$y_i(n) = \mathbf{x}_i(n)^T \cdot \mathbf{w}_i(n-1) \quad (2.6)$$

où $y_i(n)$ est le signal filtré pour le canal i à l'instant n .

4. Calcul de l'erreur : L'erreur est calculée en comparant le signal désiré $d(n)$ avec la somme des signaux filtrés pour chaque canal :

$$e(n) = d(n) - \sum_i y_i(n) \quad (2.7)$$

où $e(n)$ est l'erreur à l'instant n , $d(n)$ est le signal désiré à l'instant n , et $\sum_i y_i(n)$ représente la somme des signaux filtrés pour tous les canaux à l'instant n .

5. Adaptation du vecteur de coefficients : L'adaptation du vecteur de coefficients $\mathbf{w}_i(n)$ pour chaque canal i est réalisée en fonction du vecteur d'entrée $\mathbf{x}_i(n)$ et de l'erreur $e(n)$ pour ce canal, en tenant compte des coefficients précédents $\mathbf{w}_i(n-1)$. Cette mise à jour est effectuée conformément à ce qui est illustré dans la Figure 2.7.

En utilisant ces étapes et équations, le filtrage adaptatif pour sources audio multi-canal avec plusieurs sources d'entrée et un seul signal désiré peut être réalisé pour améliorer la qualité du signal de sortie en fonction des signaux d'entrée adaptativement ajustés.

Remarque : Dans le reste du chapitre et pour des raisons de facilité de notation, nous avons opté pour l'utilisation exclusive de l'approche du filtre adaptatif pour source audio mono. Cette décision vise à améliorer la clarté et la lisibilité des équations présentées, en évitant la complexité liée à la gestion des multiples canaux présente dans l'approche pour source audio multi-canal.

2.4.3 Exemples d'applications

Le filtrage adaptatif est un outil de grande utilité dans divers domaines tels que le traitement du signal, les communications numériques et le contrôle automatique. Son application est variée, mais certaines caractéristiques le définissent clairement : il est basé sur une entrée $x(n)$ ainsi que sur la référence de réponse souhaitée $d(n)$. L'erreur $e(n)$ résulte de la différence entre $d(n)$ et la sortie du filtre $y(n)$, et elle est utilisée pour ajuster les coefficients du filtre. Ce qui distingue principalement les différentes applications réside dans la manière de définir la réponse désirée $d(n)$. On peut classer ces applications en quatre catégories principales : l'identification de systèmes, la prédiction, la modélisation inverse et l'annulation d'interférences.

2.4.3.1 Identification de systèmes

Dans cette application, le filtrage adaptatif joue un rôle crucial dans l'estimation des caractéristiques et des paramètres d'un système inconnu à partir de données d'entrée et de sortie, comme illustré dans la Figure 2.8. L'objectif est de déterminer la réponse du système à partir de sa sortie. Cette approche permet de comprendre le fonctionnement global du système en analysant les relations entre les signaux d'entrée et de sortie, ce qui permet ensuite d'adapter le filtrage de manière optimale pour répondre aux besoins spécifiques. L'identification de systèmes est largement utilisée dans divers domaines, et elle constitue l'objet central de ce rapport de projet.

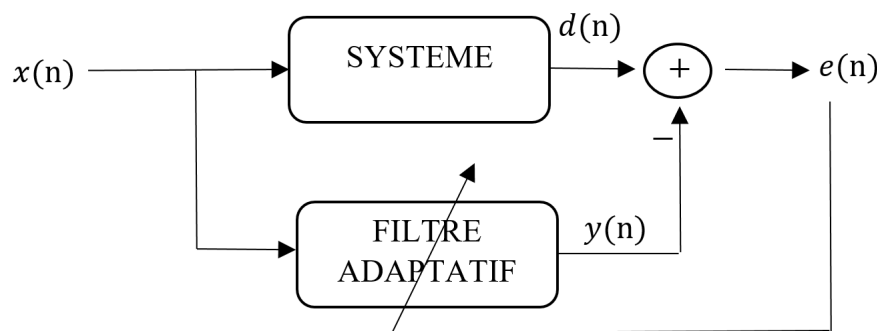


FIGURE 2.8 – Identification de systèmes

2.4.3.2 Prédiction

L'application du filtrage adaptatif en prédiction consiste à estimer les valeurs futures d'un signal $d(n)$ à partir de ses valeurs passées $d(n-1), d(n-2), \dots$, comme le montre

la Figure 2.9. Cette fonctionnalité essentielle du filtrage adaptatif trouve son utilité dans divers domaines, notamment la prédiction de séries temporelles, la compression de données et même la prédiction de trajectoires pour certains systèmes. La capacité de prédiction s'avère particulièrement avantageuse dans des scénarios où il est primordial de projeter le comportement futur d'un signal en se basant sur son historique.

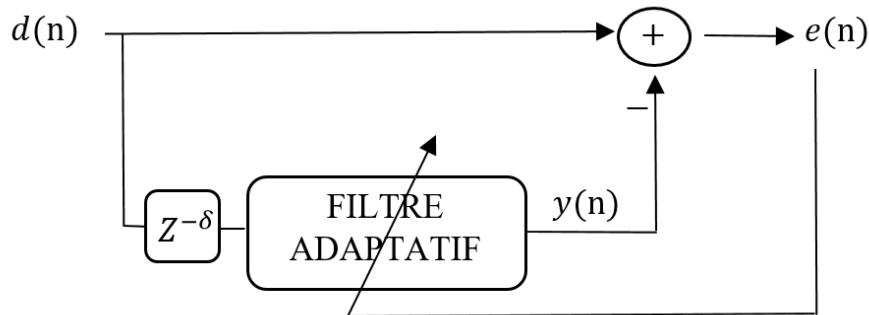


FIGURE 2.9 – Principe de la prédiction

2.4.3.3 Modélisation inverse

Dans cette application, la variable $d(n)$ représente l'entrée du système, qui est retardée de δ (comme illustré dans la Figure 2.10). L'objectif est d'inverser le comportement de ce système en utilisant le filtrage adaptatif pour générer une sortie correspondant à un signal spécifié. En d'autres termes, le filtrage adaptatif est utilisé pour obtenir une réponse inverse du système, ce qui s'avère particulièrement utile lorsque nous souhaitons obtenir un signal désiré en ajustant le comportement du système en conséquence. Cette application du filtrage adaptatif offre de multiples possibilités pour la correction ou la compensation de signaux en fonction des besoins spécifiques.

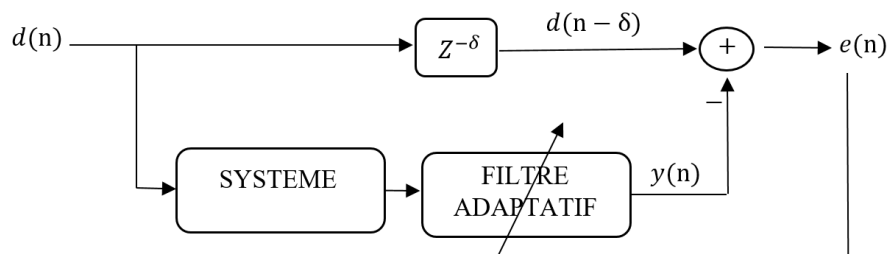


FIGURE 2.10 – Principe de la modélisation inverse

2.4.3.4 Annulation d'interférences

Dans cette application d'annulation d'interférences, le signal $d(n)$ est composé à la fois du signal utile que nous souhaitons préserver et d'interférences indésirables, comme illustré dans la Figure 2.11. Pour supprimer efficacement ces interférences, nous faisons usage du signal $x(n)$, dérivé d'un capteur situé à proximité des sources d'interférences. Bien que le signal $x(n)$ soit principalement dépourvu d'informations utiles, il contient des informations spécifiques aux interférences que nous cherchons à éliminer.

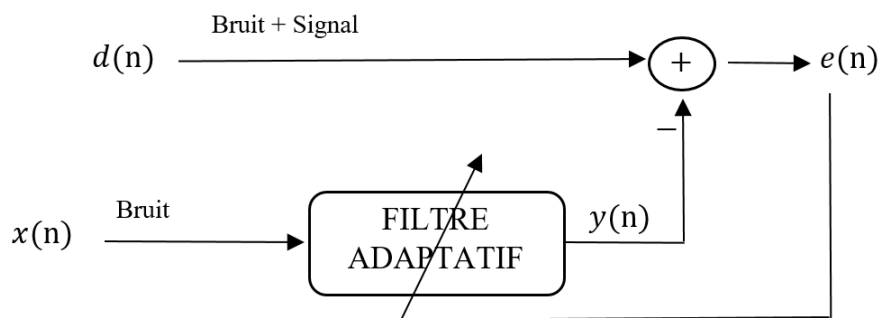


FIGURE 2.11 – Principe d'annulation d'interférence

2.4.4 Stratégies de Sélection et d'Optimisation des Filtres Adaptatifs

L'identification du filtre adaptatif le mieux adapté à une application ou à un besoin spécifique nécessite une approche méthodique en raison de la diversité des caractéristiques disponibles. Afin de mener cette sélection de manière éclairée, nous recommandons de suivre les étapes clés suivantes :

2.4.4.1 Analyse des Besoins

Tout d'abord, il est essentiel de bien comprendre les exigences et les spécifications de l'application. Cela implique d'identifier les problèmes spécifiques que le filtre adaptatif doit résoudre, les contraintes de temps réel, les performances souhaitées, et les caractéristiques importantes à prendre en compte. Cette étape permet de définir clairement les objectifs du filtre et d'orienter le processus de sélection et d'optimisation.

2.4.4.2 Évaluation des Options de Filtres Adaptatifs

Lors de l'évaluation des options de filtres adaptatifs, nous procéderons à une analyse approfondie des différentes possibilités disponibles. Cela inclut les approches classiques

ainsi que les variantes avancées, en tenant compte de leurs avantages et limites respectifs. Pour effectuer un choix éclairé, nous examinerons également les types de filtres adaptatifs disponibles sur le marché ou dans la littérature scientifique, en prenant en compte les algorithmes classiques et les approches plus spécialisées. De plus, nous nous pencherons sur des applications similaires existantes pour nous aider à sélectionner le filtre le plus approprié pour répondre aux besoins spécifiques de notre projet. Cette évaluation minutieuse nous permettra de choisir le filtre adaptatif qui répondra le mieux aux exigences de notre application.

2.4.4.3 Comparaison des Performances des Filtres Adaptatifs

Dans le cadre de cette étude, nous procéderons à une comparaison approfondie des performances des filtres adaptatifs présélectionnés. Après avoir analysé les besoins et évalué les différentes options, nous avons identifié les filtres adaptatifs les plus prometteurs pour répondre aux exigences de notre application spécifique.

Pour réaliser cette comparaison, nous utiliserons plusieurs critères de performance essentiels :

- Vitesse de Convergence : Nous évaluerons la rapidité avec laquelle chaque filtre s'adapte aux variations du signal en entrée. Une vitesse de convergence élevée est essentielle pour une adaptation rapide aux changements environnementaux.
- Finesse de Convergence : Nous analyserons la précision avec laquelle chaque filtre atteint la solution optimale. Une convergence fine garantit que le filtre parvient rapidement et avec précision à la solution souhaitée.
- Tracking (Suivi en Temps Réel) : Nous étudierons la capacité de chaque filtre à suivre efficacement les variations du signal en temps réel. Un bon tracking est indispensable pour une adaptation continue aux changements des données d'entrée.
- Complexité du Calcul : Nous évaluerons la charge de traitement requise par chaque filtre, en tenant compte des ressources computationnelles disponibles. Une complexité de calcul modérée est souhaitable pour une implémentation efficace dans des environnements avec des contraintes de ressources.

2.4.4.4 Optimisation et Réglage des Paramètres

L'optimisation des paramètres d'un filtre adaptatif est d'une importance cruciale pour améliorer ses performances en fonction des besoins spécifiques de l'application. Une fois que nous avons choisi le filtre adaptatif le plus approprié, notre prochaine étape consiste à optimiser ses paramètres pour obtenir les meilleures performances possibles.

Deux paramètres principaux du filtre adaptatif sont le pas d'adaptation (μ) et la longueur du filtre (M).

- Le pas d'adaptation (μ) détermine la rapidité avec laquelle le filtre s'ajuste aux variations du signal en entrée. Un pas élevé permet une adaptation rapide, mais peut entraîner des instabilités et des oscillations si la valeur est trop grande. En revanche, un pas plus faible assure une meilleure stabilité, mais au prix d'une convergence plus lente. L'optimisation du pas d'adaptation vise à trouver le bon compromis entre rapidité de convergence et stabilité.
- La longueur du filtre (M) détermine le nombre de coefficients utilisés pour l'ajustement du filtre. Une longueur plus grande permet une meilleure saisie des caractéristiques du signal, mais engendre une complexité accrue des calculs et de la consommation de ressources. Cependant, un choix inapproprié de la longueur du filtre peut conduire à deux problèmes :

Surdimensionnement : Si la longueur du filtre dépasse les caractéristiques du signal d'entrée, le filtre peut s'adapter excessivement. Tout en étant capable de capturer les détails et le bruit du signal, il risque de s'ajuster aux fluctuations aléatoires plutôt qu'aux caractéristiques véritables du signal. En conséquence, le filtre adaptatif peut peiner à généraliser correctement sur de nouvelles données ou dans des conditions différentes de celles de l'entraînement initial, ce qui affecte les performances en temps réel. De plus, le surdimensionnement peut accroître la complexité du filtre et nécessiter plus de puissance de calcul.

Sous-dimensionnement : Si la longueur du filtre est trop limitée par rapport aux caractéristiques du signal d'entrée, le filtre manquera de souplesse pour capturer les motifs complexes du signal. Ainsi, il pourrait ne pas réussir à modéliser efficacement les variations du signal ou à réduire le bruit de manière adéquate. Cela se traduit par une perte de précision et de performance dans la tâche pour laquelle le filtre est employé. L'optimisation de la longueur du filtre vise à déterminer la taille optimale qui assure une représentation adéquate sans compromettre la complexité.

Pour optimiser ces paramètres, différentes approches peuvent être utilisées :

- Le réglage manuel implique d'expérimenter différentes valeurs pour le pas d'adaptation et la longueur du filtre, puis de comparer les performances du filtre pour chaque combinaison. Cette méthode peut être utile pour les filtres simples ou lorsque des connaissances préalables sur le système sont disponibles.
- Les techniques d'optimisation automatique, telles que les algorithmes génétiques, les méthodes par essaim de particules ou les algorithmes bayésiens, permettent de re-

chercher automatiquement les meilleurs paramètres du filtre. Ces approches explorent efficacement l'espace des paramètres pour fournir des solutions optimales ou proches de l'optimal.

En optimisant ces paramètres, nous obtenons un filtre adaptatif performant, répondant de manière optimale aux besoins spécifiques de notre application. Cette optimisation est un processus essentiel pour assurer des performances optimales du filtre dans la résolution de problèmes complexes.

2.4.5 Algorithmes de filtrage adaptatif

2.4.5.1 Filtre Wiener

Le filtre de Wiener, nommé d'après le mathématicien Norbert Wiener, est un filtre linéaire qui vise à minimiser l'erreur de prédiction $e(n)$ entre un signal filtré $y(n)$ et un signal désiré $d(n)$ dans le domaine du traitement du signal et du filtrage adaptatif.

Le principe du filtre de Wiener consiste à réduire au minimum l'erreur quadratique moyenne (EQM ou MSE en anglais) noté J entre le processus aléatoire filtré (estimé) et le processus désiré.

$$J = \mathbb{E}(|e(n)|^2) \quad (2.8)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.9)$$

Où : J : Erreur Quadratique Moyenne (EQM) ; \mathbb{E} : Espérance mathématique.
En présentant les vecteurs de la manière suivante :

$$w(n)^T = [w_0(n), \dots, w_{M-1}(n)] \quad (2.10)$$

$$x(n)^T = [x(n), \dots, x(n - M + 1)] \quad (2.11)$$

Alors La sortie du filtre s'écrit :

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} w_k x(n - k) = \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{w} \quad (2.12)$$

Par conséquent, l'expression de l'erreur dans l'équation 2.9 se transforme en :

$$e(n) = d(n) - \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x} = d(n) - \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{w} \quad (2.13)$$

D'où l'équation 2.8 devient :

$$J = \mathbb{E}(|e(n)|^2) = \mathbb{E}((d(n) - \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{w})^2) \quad (2.14)$$

$$J = \mathbb{E}(|d(n)|^2) - \mathbf{w} \cdot \mathbb{E}(\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{d}(n)) - \mathbf{w}^T \cdot \mathbb{E}(\mathbf{x} \cdot \mathbf{d}(n)) + \mathbf{w}^T \cdot \mathbb{E}(\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}^T) \cdot \mathbf{w} \quad (2.15)$$

Le vecteur optimum \mathbf{w} est celui qui annule le gradient du critère :

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{w}} = 0 \quad (2.16)$$

Alors le vecteur des coefficients est :

$$\mathbf{w}^T = \mathbf{R}_{xx}^{-1} \cdot \mathbf{r}_{xd} \quad (2.17)$$

Avec

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbb{E}(\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}^T) \quad : \text{la matrice d'autocorrélation de l'entrée } x(n).$$

$$\mathbf{r}_{xd} = \mathbb{E}(\mathbf{d}(n) \cdot \mathbf{x}^T) \quad : \text{le vecteur d'intercorrélation entre la sortie désirée } d(n) \text{ et l'entrée } x(n).$$

L'application directe de l'algorithme de Wiener est rendue très difficile en raison de la nécessité d'une connaissance a priori des matrices d'autocorrélation \mathbf{R}_{xx} et d'intercorrélation \mathbf{r}_{xd} . Cependant, de nombreux algorithmes ont été développés pour résoudre ce problème. Ces approches cherchent à contourner la contrainte de connaissance a priori des matrices en utilisant des méthodes adaptatives et récursives pour estimer les coefficients du filtre.

2.4.5.2 Filtre LMS

L'algorithme LMS, introduit en 1959 par Widrow et Hoff sous le nom de "Moindres Carrés Récursifs" (ou "Least Mean Square" en anglais), est largement répandu dans diverses applications techniques et industrielles. Sa simplicité et sa robustesse face aux erreurs de calcul en font une méthode particulièrement attrayante.

Appartenant à la famille des algorithmes du gradient, l'algorithme LMS utilise la méthode du gradient pour le calcul et la mise à jour récursive des coefficients du filtre numérique. Grâce à ces caractéristiques, il est devenu un outil incontournable pour de nombreuses tâches d'adaptation et d'apprentissage dans divers domaines. L'algorithme LMS exploite la minimisation du critère d'erreur quadratique moyenne (EQM) pour atteindre ses performances remarquables. En effet, il peut être vu comme une version stochastique ap-

proximative de l'algorithme du gradient appliqué à la fonction de coût quadratique $J(w)$. Afin de conduire w vers sa valeur optimale, on soustrait une valeur proportionnelle au gradient de $[e(n)]^2$, ce qui se traduit par l'expression suivante :

$$w(n+1) = w(n) - \frac{\mu}{2} \nabla[J(n)] \quad (2.18)$$

Dans cette expression, $w(n)$ représente le vecteur des coefficients du filtre, μ est le pas d'itération, et $J(n)$ désigne l'Erreur Quadratique Moyenne (EQM), définie comme $J = \mathbb{E}(|e(n)|^2)$. Le dernier terme ∇ représente le gradient de l'EQM.

L'algorithme LMS repose sur un estimateur très simple du gradient de l'Erreur Quadratique Moyenne (EQM). Cette approche simplifiée évite le besoin de calculer exactement le gradient $\nabla[e(n)^2]$ qui correspond à la dérivée de $e(n)^2$ par rapport à $w(n)$:

$$\nabla[e(n)^2] = \frac{\partial}{\partial w} e(n)^2 = -2e(n)x(n) \quad (2.19)$$

En combinant l'expression 2.18 et l'équation 2.19, nous obtenons l'algorithme LMS :

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)x(n) \quad (2.20)$$

Avec $0 < \mu < 1$, une possibilité émerge pour choisir de manière avisée la valeur normalisée de μ en lien avec la longueur du filtre (M) ainsi que la puissance du signal d'entrée (source du signal). Ceci est exprimé de la manière suivante :

$$0 < \mu_{\text{normalisée}} < \frac{2}{M \times \text{puissance totale du signal } x(n)}$$

2.4.5.3 Filtre SD-LMS

L'intégration de la technique "Sign Data" avec le filtre adaptatif LMS (Least Mean Square) constitue une approche combinée visant à renforcer la résilience et l'efficacité du filtre adaptatif classique. La technique "Sign Data" se focalise exclusivement sur la direction du gradient, négligeant sa magnitude. Cette approche confère à l'algorithme une insensibilité accrue aux valeurs aberrantes et aux perturbations présentes dans les données d'entrée.

La formule de mise à jour des coefficients du filtre adaptatif LMS avec la technique "Sign Data" est la suivante :

$$w(n+1) = w(n) + \mu \cdot \text{sign}(x(n)) \cdot e(n) \quad (2.21)$$

Où $\text{sign}(\cdot)$ est la fonction de signe qui renvoie +1 si l'argument est positif, -1 si l'argument est négatif et 0 si l'argument est nul.

Cette formule de mise à jour utilise la direction du gradient (signe de $\mathbf{x}(n)$) pour ajuster les coefficients du filtre afin de minimiser l'erreur $e(n)$ entre la sortie désirée et la sortie du filtre. Cette approche permet d'améliorer la robustesse du filtre en ignorant la magnitude du gradient, ce qui le rend moins sensible aux valeurs aberrantes ou au bruit dans les données d'entrée.

2.4.5.4 Filtre SE-LMS

Le Filtre Sign Error LMS adopte le même principe que le filtre Sign Data LMS. La différence réside dans l'utilisation de la fonction de sign lors de la phase d'adaptation. Dans le filtre Sign Error, on ajuste les coefficients du filtre en utilisant le signe de l'erreur, comme indiqué dans l'expression 2.22, contrairement au filtre Sign Data qui utilise le signe des données en entrée, comme indiqué dans l'expression 2.21. Cette modification apporte une variation significative dans le processus d'adaptation, permettant au filtre Sign Error LMS de mieux s'adapter aux erreurs de prédiction et d'améliorer ainsi ses performances dans certaines applications.

$$w(n+1) = w(n) + \mu \cdot x(n) \cdot \text{sign}(e(n)) \quad (2.22)$$

2.4.5.5 Filtre SS-LMS

Le filtre adaptatif Sign-Sign LMS (Least Mean Square) est une fusion des deux filtres précédemment présentés, à savoir le filtre Sign Data LMS et le filtre Sign Error LMS. Contrairement à ces derniers, qui utilisent respectivement le signe des données et le signe de l'erreur pour ajuster les coefficients du filtre, le filtre Sign-Sign LMS combine les deux en utilisant à la fois le signe de l'erreur et le signe des données en entrée.

La formule de mise à jour des coefficients du filtre Sign-Sign LMS est la suivante :

$$w(n+1) = w(n) + \mu \cdot \text{sign}(x(n)) \cdot \text{sign}(e(n)) \quad (2.23)$$

En combinant les deux fonctions de signe, le filtre Sign-Sign LMS est capable de s'adapter de manière plus efficace aux variations rapides dans les données d'entrée, ce qui peut améliorer ses performances dans des situations où les signaux sont non stationnaires ou en présence de bruit élevé. Toutefois, il est essentiel de noter que l'utilisation de deux fonctions de signe peut également accroître la sensibilité aux valeurs aberrantes présentes dans les données d'entrée.

2.4.5.6 Filtre NLMS

Le filtre adaptatif NLMS (Normalized Least Mean Square) est une variante de l'algorithme LMS qui utilise une normalisation du pas d'itération par rapport à l'énergie du vecteur de signal de référence. Cette normalisation permet de maintenir une vitesse de convergence efficace tout en garantissant une réponse en régime permanent stable.

Dans l'algorithme NLMS, la mise à jour des coefficients du filtre est donnée par :

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{\|x(n)\|^2} \cdot x(n) \cdot e(n) \quad (2.24)$$

où : $\|x(n)\|^2$ est la norme au carré du vecteur $x(n)$.

Cette normalisation permet de réguler l'influence de la puissance du signal de référence sur la convergence de l'algorithme, améliorant ainsi sa stabilité dans des situations où la puissance du signal de référence varie. Le filtre adaptatif NLMS est largement utilisé dans diverses applications techniques et industrielles en raison de ses bonnes performances et de sa robustesse face aux variations de puissance du signal de référence.

2.4.5.7 Filtre APA d'ordre 1

Le filtre adaptatif APA (Affine Projection Algorithm) est un algorithme relativement récent, développé dans les années 1980, comme une extension de l'algorithme LMS (Least Mean Squares) pour améliorer les performances de filtrage adaptatif en présence de signaux d'entrée fortement corrélés. Le filtre adaptatif APA utilise une méthode de projection affine pour projeter les données d'entrée sur un sous-espace où l'erreur de prédiction est minimisée, et il utilise une matrice de projection affine pour ajuster les coefficients du filtre en fonction des données d'entrée et de l'erreur de prédiction. La méthode de projection affine est plus efficace que la méthode LMS dans les situations où les données d'entrée sont hautement corrélées ou lorsqu'il y a des retards de propagation importants entre les échantillons d'entrée. Le principe de base du filtre APA est de projeter l'erreur de prédiction sur un espace affine contenant les valeurs passées du signal d'entrée. L'erreur de prédiction est alors filtrée en utilisant des coefficients de filtre adaptatifs pour minimiser l'erreur quadratique moyenne.

Le filtre adaptatif APA peut être décrit mathématiquement par les équations suivantes : Projection du signal d'entrée sur l'espace affine :

$$a(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T \quad (2.25)$$

Calcul de l'erreur de prédiction :

$$e(n) = d(n) - \mathbf{a}^T(n) \cdot \mathbf{w}(n-1) \quad (2.26)$$

Où $d(n)$ est la valeur désiré, $\mathbf{w}(n-1)$ est le vecteur des coefficients de filtre à l'instant $n-1$, et T désigne la transposition. Mise à jour des coefficients de filtre :

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mu \cdot K(n) \cdot \mathbf{a}(n) \cdot e(n) \quad (2.27)$$

Où μ est le pas d'adaptation, $\mathbf{a}(n)$ est le vecteur de projection à l'instant n , $e(n)$ est l'erreur de prédiction à l'instant n , et $K(n)$ est une matrice de correction définie comme suit :

$$K(n) = \frac{P(n) \cdot \mathbf{a}(n)}{1 + \mathbf{a}^T(n) \cdot P(n) \cdot \mathbf{a}(n)} \quad (2.28)$$

$P(n)$ est une matrice de covariance de la projection à l'instant n , qui peut être calculée récursivement comme suit :

$$P(n) = P(n-1) - \frac{P(n-1) \cdot \mathbf{a}(n) \cdot \mathbf{a}^T(n) \cdot P(n-1)}{1 + \mathbf{a}^T(n) \cdot P(n-1) \cdot \mathbf{a}(n)} \quad (2.29)$$

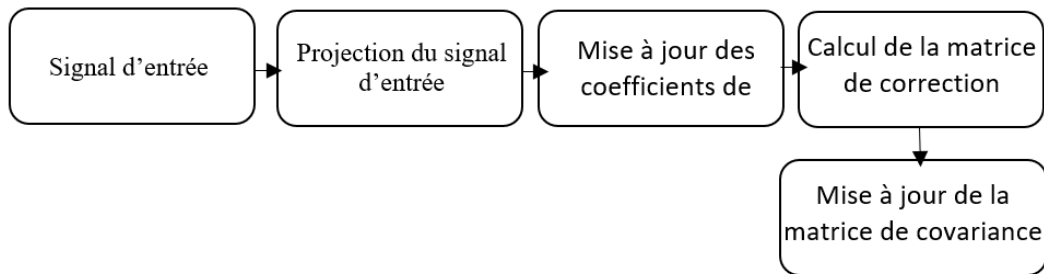


FIGURE 2.12 – Résumé de l'algorithme APA

Les équations ci-dessus permettent de décrire le processus de filtrage adaptatif APA, représenté par la figure 2.12. Le vecteur de projection $\mathbf{a}(n)$ permet de projeter le signal d'entrée sur un espace affine, tandis que l'erreur de prédiction $e(n)$ est filtrée à l'aide des coefficients de filtre adaptatifs $\mathbf{w}(n)$. Le pas d'adaptation μ contrôle la vitesse à laquelle les coefficients de filtre sont ajustés. La matrice de correction $K(n)$ permet de mettre à jour les coefficients de filtre en fonction de l'erreur de prédiction et de la projection du signal d'entrée.

2.5 Application Pratique des Filtres Adaptatifs avec MATLAB

Dans cette partie, nous mettrons en œuvre les filtres adaptatifs présentés précédemment en utilisant MATLAB. L'objectif principal de cette implémentation est d'évaluer les performances de ces filtres dans des applications pratiques. Cela nous permettra de justifier le choix des filtres adaptatifs qui seront utilisés ultérieurement dans des applications réelles.

2.5.1 Eléments de Simulation

2.5.1.1 Critère d'évaluation de l'atténuation de bruit

Dans le cadre de notre étude, l'évaluation de l'atténuation de bruit reste un élément essentiel pour faciliter le choix du filtre le plus adapté et pour évaluer ses performances. Lors des tests réalisés sous Matlab, nous avons utilisé plusieurs critères pour évaluer les filtres d'atténuation de bruit :

- Erreur Quadratique Moyenne (EQM) ou Mean Squared Error (MSE) : L'EQM mesure la différence entre le signal désiré et le signal filtré.

$$\text{MSE}(n) = 10 \log_{10} (E ((d(n) - y(n))^2)) = 10 \log_{10} (E (e(n)^2)) \quad (2.30)$$

- Évaluation de la Fidélité des Coefficients Adaptatifs : Cette évaluation a pour objectif d'analyser les variations des coefficients des filtres adaptatifs par rapport à leurs valeurs optimales. Pour réaliser cette évaluation, nous avons utilisé la métrique suivante :

$$\text{Écart}(n) = \|\text{Coefficients adaptatifs}(n) - \text{Coefficients optimaux}\| \quad (2.31)$$

, où la notation $\|\cdot\|$ représente la norme, et ' n ' représente le nombre d'itérations effectuées.

- Rapport Signal sur Bruit (RSB) ou Signal to Noise Ratio (SNR) : SNR est un critère d'évaluation qui permet de quantifier la différence en décibels entre la puissance du signal utile et la puissance du bruit résiduel dans le signal. Mathématiquement, le SNR est défini par l'équation suivante :

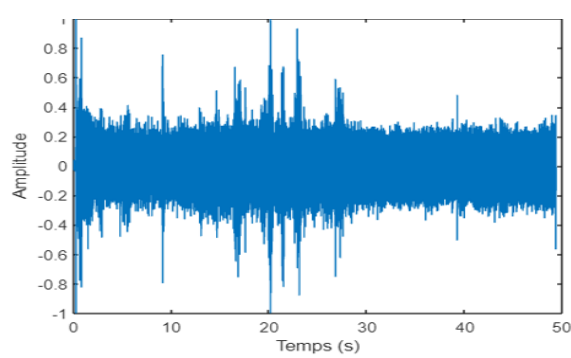
$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Puissance du bruit résiduel dans le signal}}{\text{Puissance du signal utile}} \right) \quad (2.32)$$

Dans le cadre de notre étude, nous avons calculé le SNR avant l'application du filtre adaptatif en comparant le signal source (ou signal d'entrée) avec le signal désiré. Ensuite, nous avons calculé le SNR après l'application du filtre en remplaçant le signal désiré par le bruit résiduel obtenu suite à l'application du filtre. La comparaison entre ces deux valeurs nous a permis d'évaluer la capacité du filtre à atténuer le bruit.

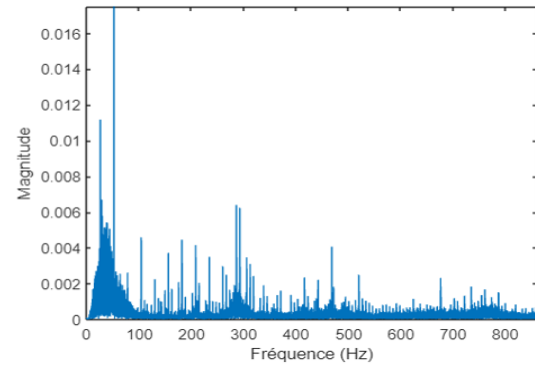
- Complexité de calcul et Temps d'exécution
- Écoute subjective : Cette évaluation subjective consiste à faire écouter les signaux traités par le filtre à des auditeurs humains qui notent la qualité perçue.

2.5.1.2 Description des paramètres d'implémentation des Filtres

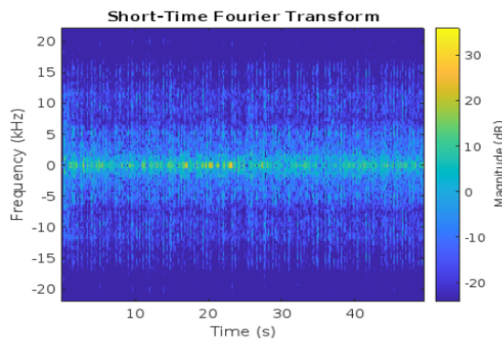
- Environnements Audio : Stationnaire.
- Signaux Audio Utilisés : Dans notre étude, nous avons utilisé un signal audio provenant d'un moteur que nous avons obtenu sur Internet [5]. Les caractéristiques de ce signal sont illustrées dans les figures suivantes. La Figure 3.8(a) présente la représentation du signal en fonction du temps, mettant en évidence sa variabilité temporelle et ses amplitudes variables. De plus, le signal présente une diversité de fréquences, comme le démontre la Figure 3.8(b), qui représente la transformée de Fourier (FFT) du signal. Enfin, la Figure 2.13(c) affiche la transformée de Fourier à court terme (STFT) du signal, permettant d'observer plus précisément les variations fréquentielles à travers le temps.



(a) Représentation en Fonction du Temps du Signal d'Entrée



(b) FFT (Transformée de Fourier) du Signal d'Entrée en Fonction du Temps



(c) STFT (Transformée de Fourier à Court Terme) du Signal d'Entrée

FIGURE 2.13 – Caractéristiques du Signal d'Entrée pour l'Application des Filtres Adaptatifs sous MATLAB

En complément du signal d'entrée, il est indispensable d'avoir à disposition un signal désiré. Pour le générer, nous avons entrepris une démarche manuelle en utilisant le signal d'entrée comme point de départ. Par la suite, nous l'avons soumis à différentes manipulations telles que l'introduction d'un bruit gaussien et son filtrage au moyen d'un vecteur aléatoire.

- Phase d'initialisation : Les coefficients des filtres adaptatifs (w) sont instaurés à une valeur nulle, de même que les coefficients du vecteur (x) d'entrée.
- La procédure d'optimisation des paramètres du filtre (μ : taux d'adaptation ($0 < \mu < 1$), M : longueur ou ordre du filtre) est effectuée manuellement par ajustements successifs.

2.5.2 Etapes d'implémentation

Lors de l'implémentation des filtres adaptatifs sous Matlab, nous avons suivi les étapes décrites dans la figure 2.14 :

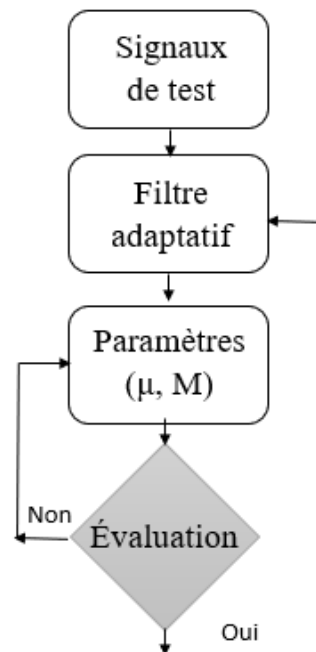


FIGURE 2.14 – Étapes d'implémentation des filtres adaptatifs

- Étape 1 : La préparation des signaux à utiliser lors du test des filtres adaptatifs.
- Étape 2 : Sélection du filtre adaptatif.
- Étape 3 : Fixation des paramètres du filtre adaptatif, Après avoir choisi le filtre adaptatif, nous avons procédé à la fixation de ses paramètres spécifiques, notamment le pas d'adaptation (μ) et la longueur du filtre (M), en utilisant une méthode manuelle. Ces paramètres jouent un rôle crucial dans les performances du filtre, et nous les avons ajustés en fonction des caractéristiques de nos données et de l'application.
- Étape 4 : Mise en œuvre et évaluation du filtre adaptatif, Après avoir défini les paramètres du filtre adaptatif, nous l'avons implémenté dans l'application. Ensuite, nous avons procédé à une évaluation approfondie des résultats obtenus en utilisant différentes mesures de performance.
- Étape 5 : Analyse des performances et prise de décision, À partir des résultats de l'évaluation, nous avons effectué une analyse approfondie des performances du

filtre adaptatif. Si les performances répondaient aux critères souhaités, nous avons envisagé de tester d'autres filtres adaptatifs ou finaliser l'implémentation du filtre actuel. En cas de performances insatisfaisantes, nous avons ajusté les paramètres du filtre à l'étape 3 et répété le processus d'évaluation pour améliorer ses performances.

Ce processus itératif nous a permis de sélectionner le filtre adaptatif le mieux adapté à notre application .

2.5.3 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous présenterons les résultats des simulations obtenus suite à l'implémentation des filtres adaptatifs sous MATLAB. Pour réaliser ces simulations, nous avons élaboré les codes nécessaires en nous appuyant sur une étude approfondie des filtres adaptatifs. Les codes complets et détaillés sont fournis en annexe pour référence.

Notre approche diffère de l'utilisation de blocs noirs prédéfinis pour les filtres, car nous avons choisi de construire nos propres codes sur mesure. Cette démarche nous a procuré une plus grande flexibilité et une meilleure visibilité sur les processus internes de chaque filtre adaptatif. En développant nos propres codes, nous avons pu examiner en détail les changements qui se produisent à chaque itération et à chaque ligne de code, facilitant ainsi notre compréhension du principe de fonctionnement de ces filtres.

2.5.3.1 LMS

La Figure 2.15 illustrera les caractéristiques temporelles du signal désiré, du signal filtré (estimé) ainsi que l'erreur associée pour le filtre LMS. On peut observer que l'erreur commence à converger vers zéro aux alentours de 10^3 itérations.

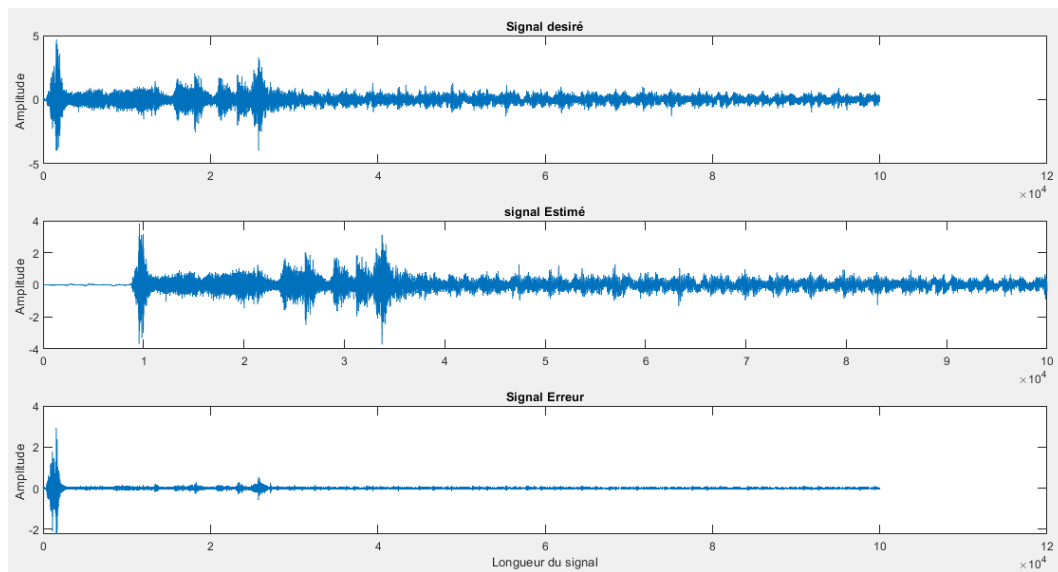


FIGURE 2.15 – Signal désiré, signal filtré et l'erreur pour l'algorithme LMS ($\mu=0.02$ et $M=70$)

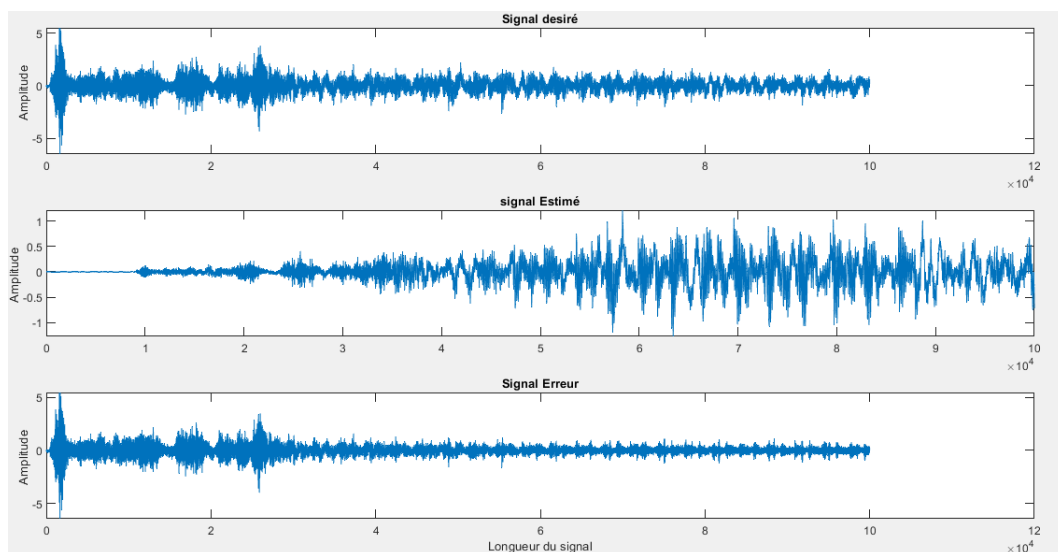


FIGURE 2.16 – Signal désiré, signal filtré et l'erreur pour l'algorithme LMS ($\mu=0.0001$ et $M=70$)

En comparant les deux figures 2.15 et 2.16, il est évident que le pas d'adaptation a un impact significatif sur la convergence de l'algorithme. En augmentant la valeur du pas d'adaptation, la convergence de l'algorithme s'accélère de manière notable. Cependant, il est important de noter que pour de grandes valeurs de pas d'adaptation, l'algorithme peut commencer à diverger, entraînant des résultats moins fiables.

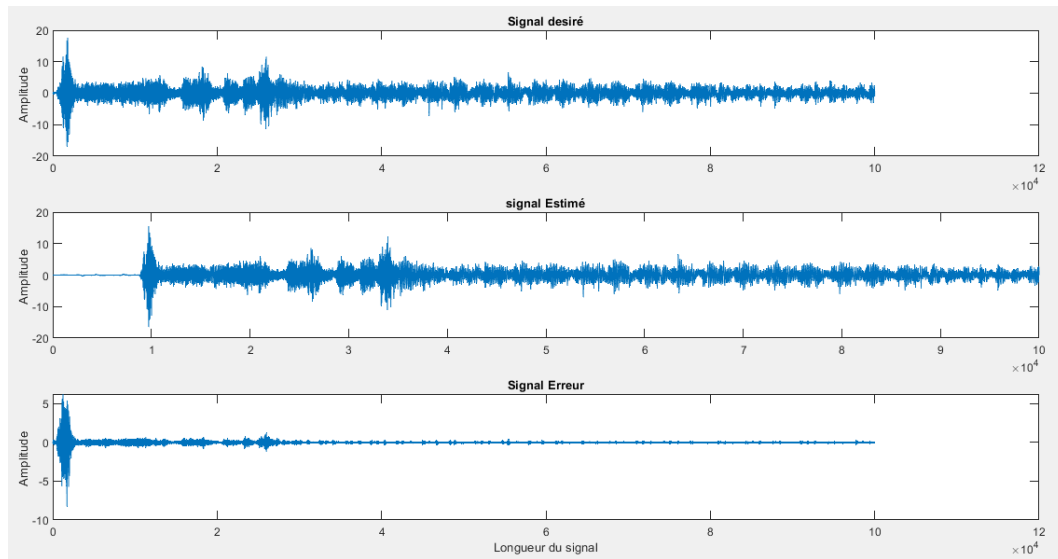


FIGURE 2.17 – Signal désiré, signal filtré et l'erreur pour l'algorithme LMS ($\mu=0.02$ et $M=250$)

Par ailleurs, en examinant les figures 2.15 et 2.17, nous pouvons observer l'effet de la longueur du filtre sur les performances du filtre LMS. La longueur du filtre influence la précision de l'adaptation et la capacité du filtre à suivre les variations du signal. Une longueur de filtre adéquate peut améliorer les performances du filtre LMS, tandis qu'une longueur inappropriée peut entraîner une dégradation de la performance.

2.5.3.2 SD LMS

Suite à l'analyse des schémas 2.18 et 2.19, il devient évident que le pas d'adaptation ainsi que l'ordre du filtre jouent un rôle crucial dans la promotion ou la limitation de la vitesse de convergence de l'algorithme SD LMS, tout en impactant sa capacité d'atténuation. Ces deux paramètres exercent une influence significative sur la célérité avec laquelle l'algorithme parvient à une solution optimale.

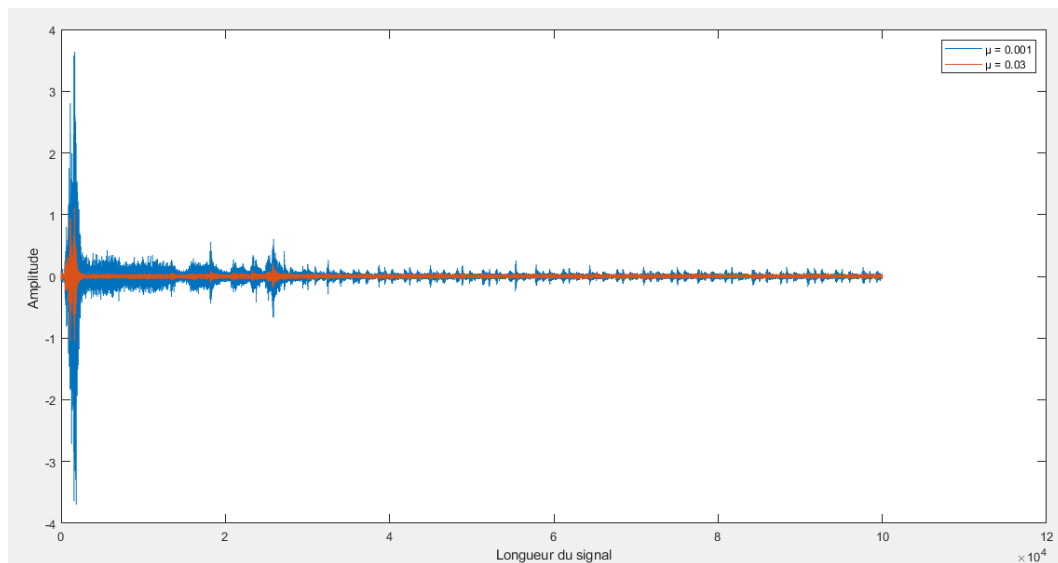


FIGURE 2.18 – Convergence de l’erreur de filtrage de l’algorithme SD-LMS pour différents pas d’adaptation

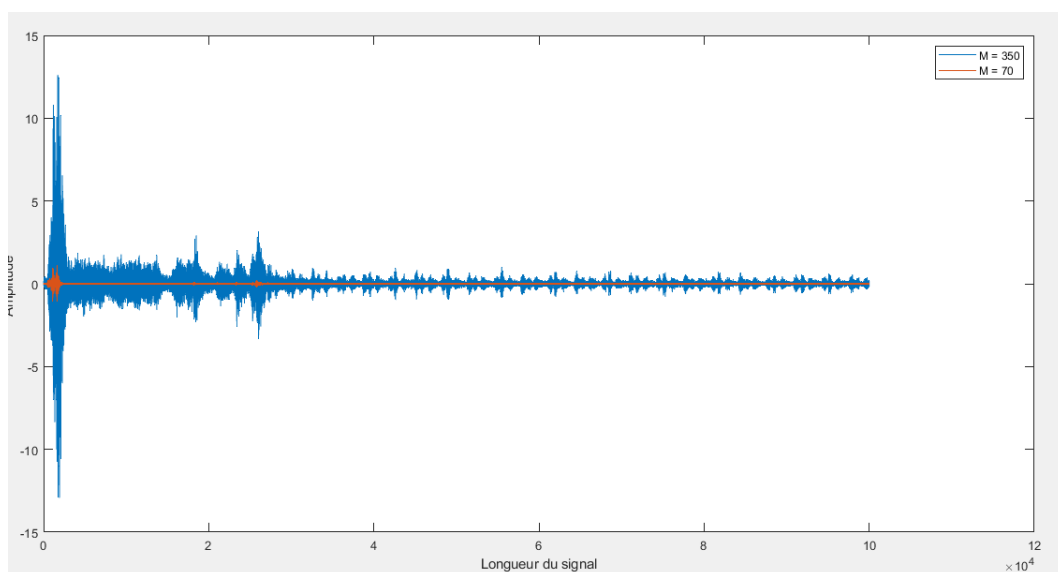


FIGURE 2.19 – Convergence de l’erreur de filtrage de l’algorithme SD-LMS pour différents ordres du filtre

2.5.3.3 SE LMS

Les graphiques 2.20 et 2.21 mettent en évidence les fluctuations de la convergence de l’erreur de filtrage après l’application du filtre SE LMS, en relation avec les modifications du pas d’adaptation et de l’ordre du filtre.

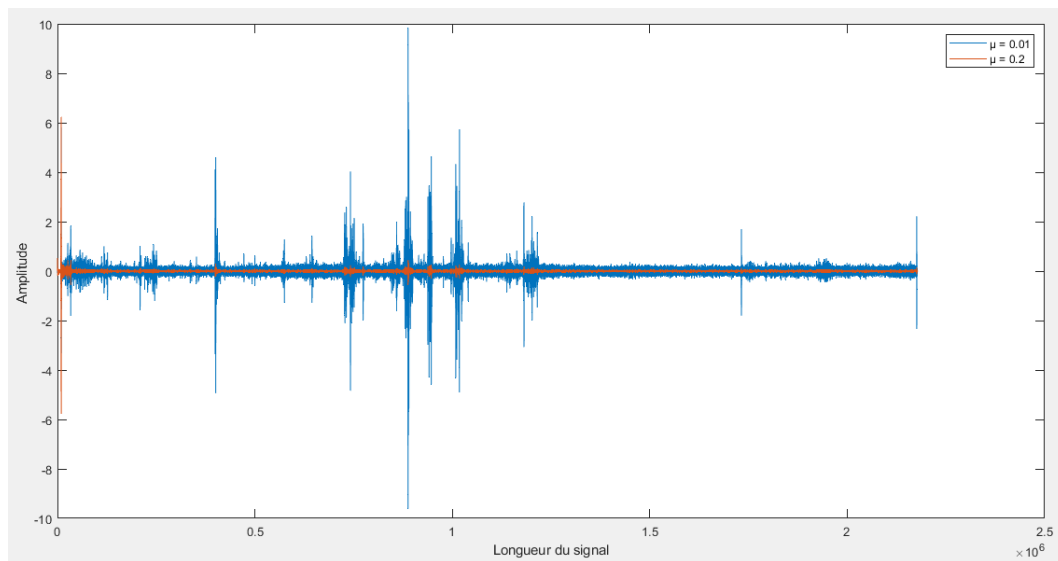


FIGURE 2.20 – Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SE-LMS pour différents pas d'adaptation

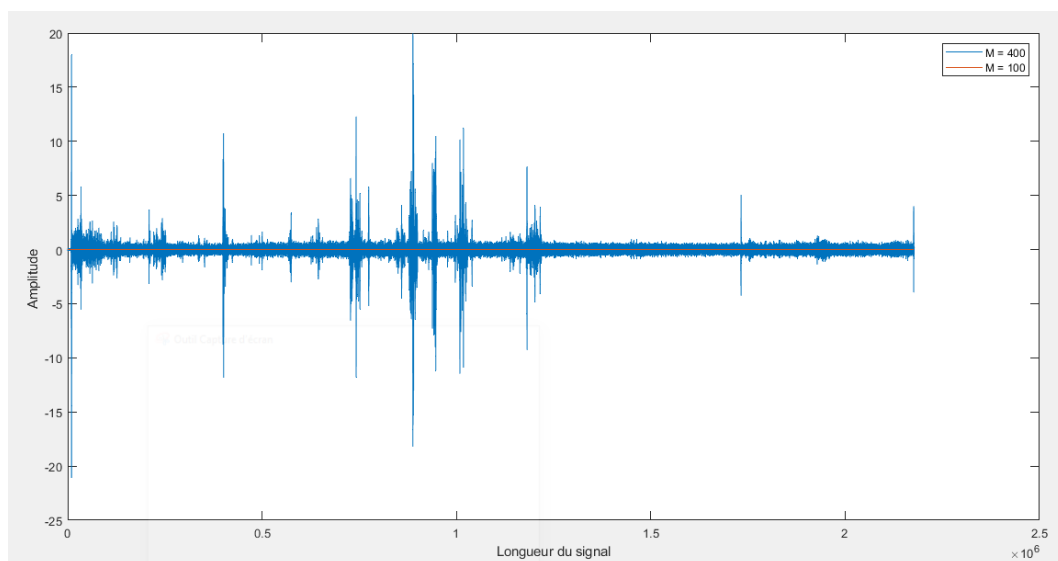


FIGURE 2.21 – Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SE-LMS pour différents ordres du filtre

2.5.3.4 SS LMS

Les résultats de l'application du filtre SS LMS sur la convergence de l'erreur de filtrage sont présentés dans les figures 2.25 et 2.26 pour diverses valeurs de pas d'adaptation ainsi que pour différentes longueurs de filtre.

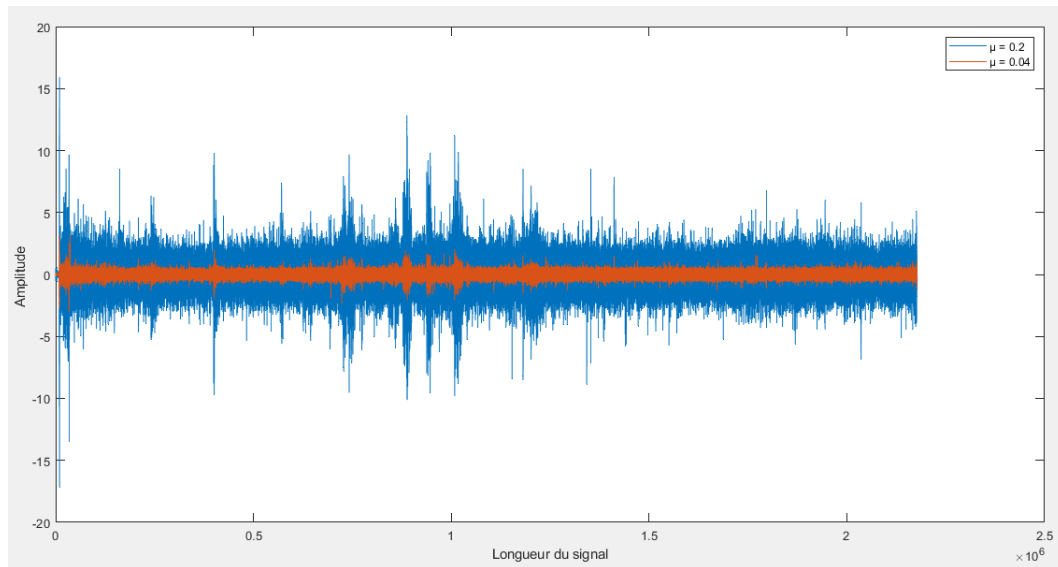


FIGURE 2.22 – Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SS-LMS pour différents pas d'adaptation

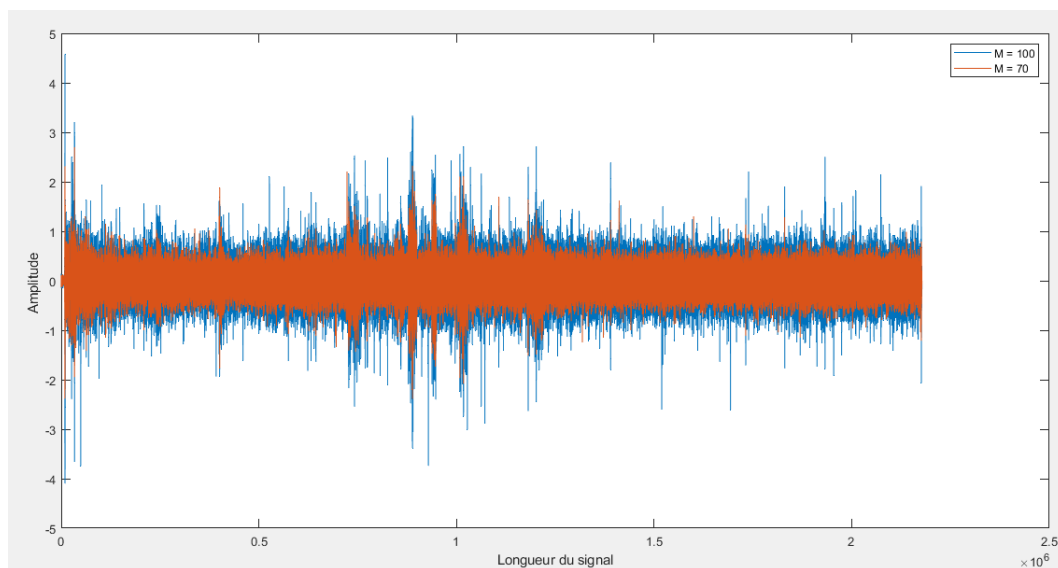


FIGURE 2.23 – Convergence de l'erreur de filtrage de l'algorithme SS-LMS pour différents ordres du filtre

2.5.3.5 NLMS

Les résultats concernant la convergence de l'erreur de filtrage du filtre NLMS en fonction des variations du pas d'adaptation et de l'ordre du filtre sont exposés dans les figures 2.24 et 2.25. Ces schémas illustrent comment la capacité de filtrage évolue en termes d'erreur en réponse aux fluctuations du pas d'adaptation et de l'ordre du filtre NLMS.

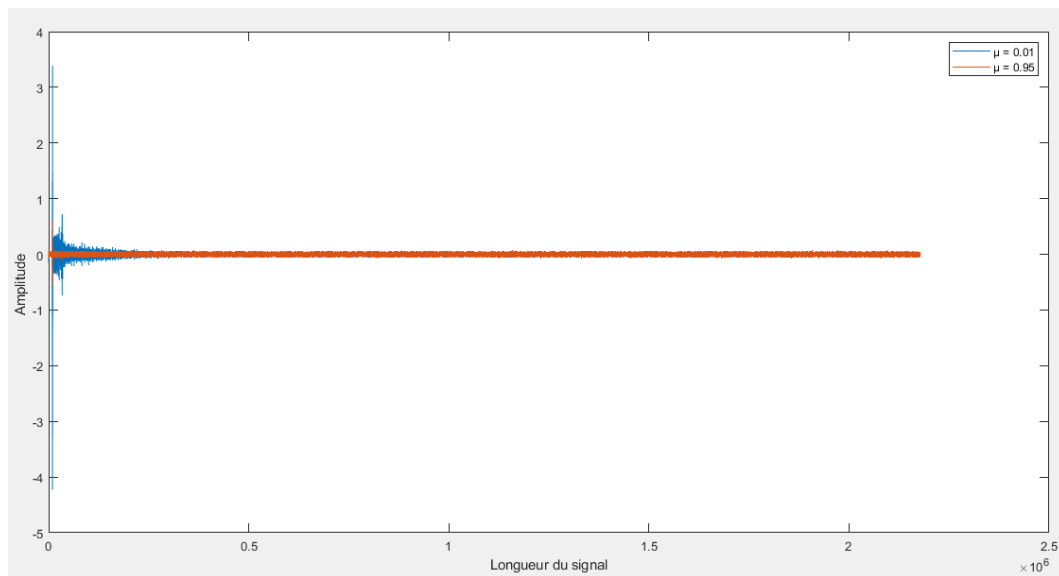


FIGURE 2.24 – Convergence de l’erreur de filtrage de l’algorithme NLMS pour différents pas d’adaptation

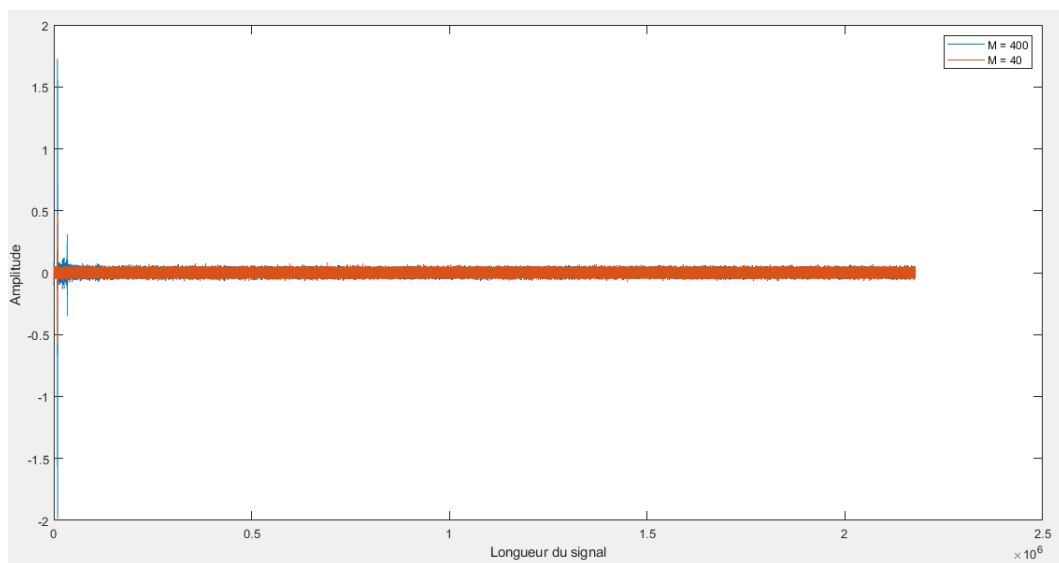


FIGURE 2.25 – Convergence de l’erreur de filtrage de l’algorithme NLMS pour différents ordres du filtre

2.5.3.6 APA

Nous avons effectué des tests sur le filtre APA, et les résultats sont illustrés dans les figures 2.26 et 2.27. Ces figures mettent en évidence les performances du filtre APA en termes de vitesse de convergence en fonction de la variation de ses paramètres.

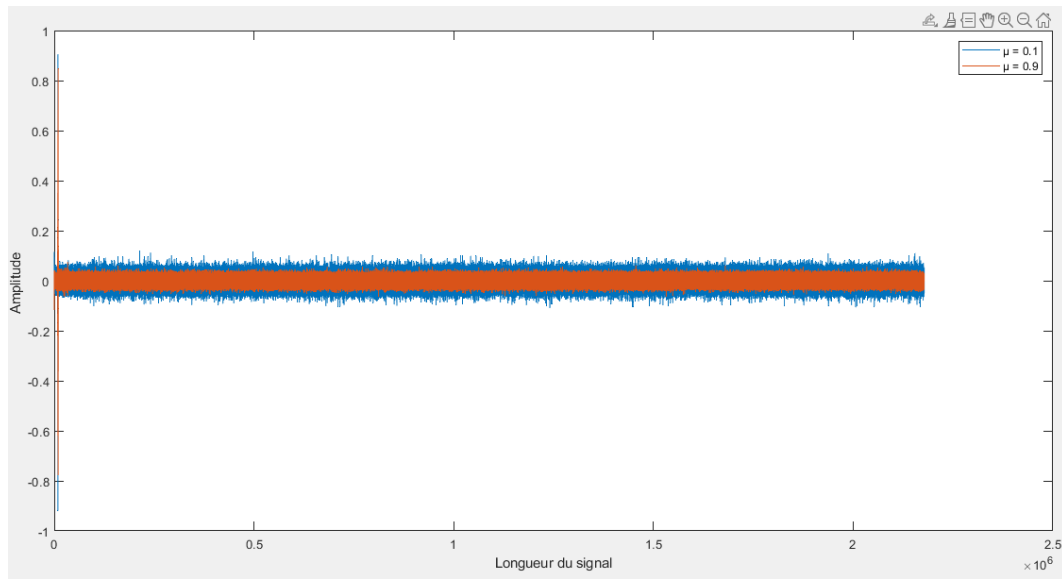


FIGURE 2.26 – Convergence de l’erreur de filtrage de l’algorithme APA pour différents pas d’adaptation

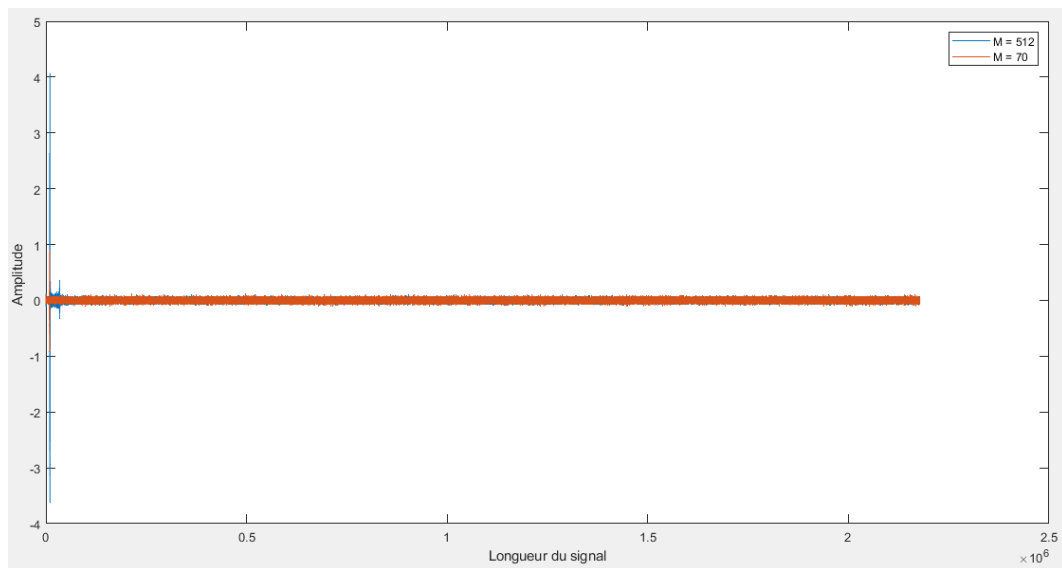


FIGURE 2.27 – Convergence de l’erreur de filtrage de l’algorithme APA pour différents ordres du filtre

2.6 Évaluation Comparative des Algorithmes de Filtrage Adaptatif

Après avoir réussi à mettre en oeuvre et à mener des tests concluants sur divers algorithmes, il devient impératif de déterminer celui qui sera retenu pour les essais en

conditions réelles. Par conséquent, l'objectif de cette section est de procéder à la sélection du filtre adaptatif le mieux adapté à l'application pratique. Avant d'entamer la comparaison, il est nécessaire d'optimiser les performances de tous les filtres adaptatifs en obtenant leurs résultats les plus performants pour les mêmes paramètres d'entrée. Suite aux tests précédemment effectués, nous avons élaboré le tableau 2.1 qui résume les pas d'adaptation optimales, fournissant les meilleures atténuations de bruit pour chaque filtre dans des conditions identiques, ainsi qu'une longueur de filtre uniforme.

TABLE 2.1 – Pas optimaux pour chaque filtre

Filter	LMS	SDLMS	SELMS	SSLMS	NLMS	AP
μ	0.02	0.012	0.085	0.013	0.9	0.95

2.6.1 MSE

Au sein de notre étude comparative des différents filtres adaptatifs, notre première évaluation repose sur l'analyse du Mean Squared Error (MSE), dont les résultats sont exposés dans les figures 2.28 et 2.29. Plus spécifiquement, la figure 2.28 nous fournit un aperçu approfondi de la vitesse de convergence et de la capacité intrinsèque des filtres à réduire le bruit indésirable. Une observation attentive de cette figure révèle clairement que les filtres APA et NLMS se démarquent nettement en termes de rapidité de convergence et d'efficacité dans la suppression du bruit. De plus, la figure 2.29 met en évidence que ces filtres présentent une finesse notable, se plaçant ainsi devant les filtres LMS et SDLMS qui sont les plus performants en termes de finesse dans cette application.

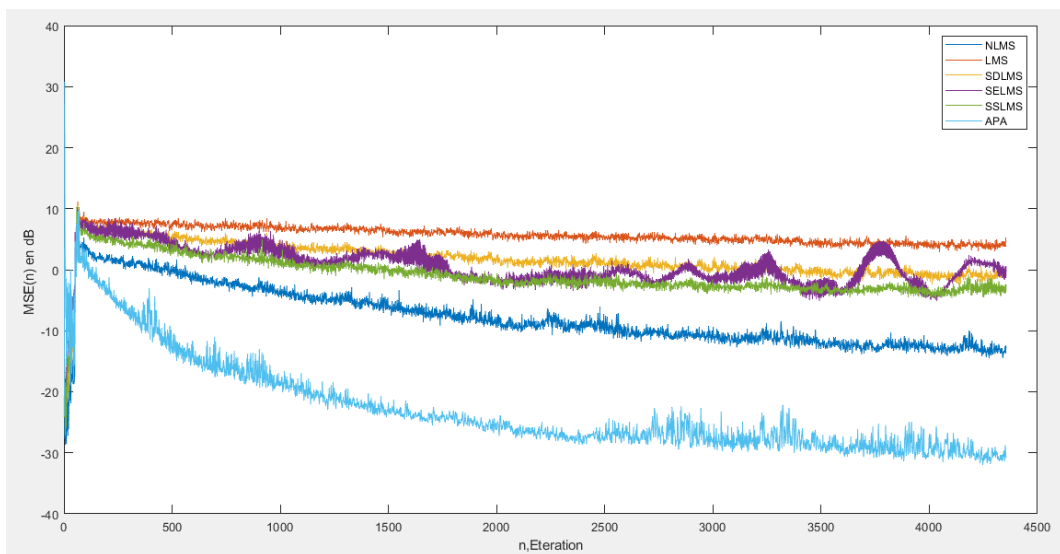


FIGURE 2.28 – Évolution des Erreurs MSE avant Convergence

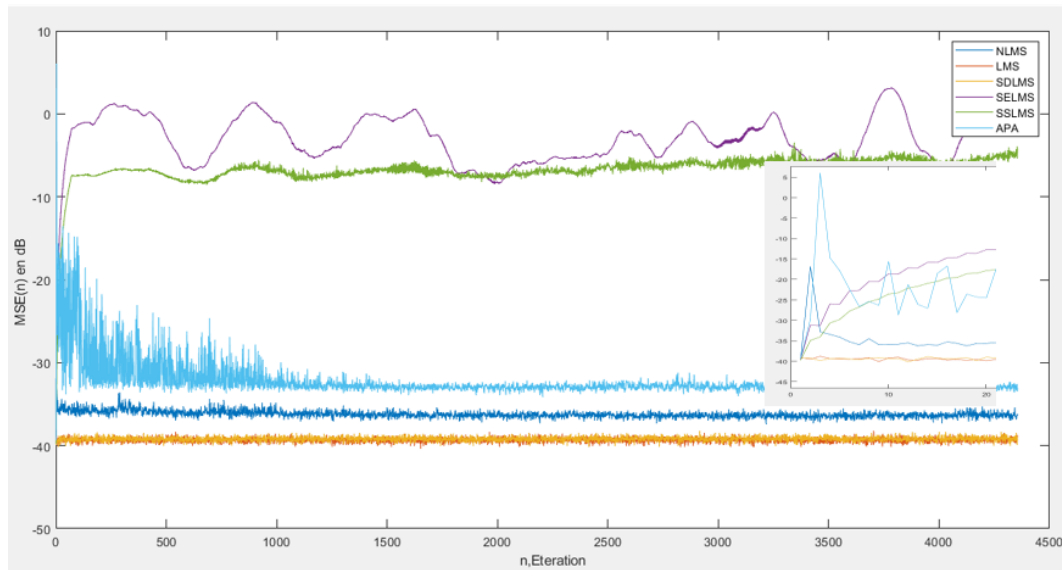


FIGURE 2.29 – Évolution des Erreurs MSE après Convergence

2.6.2 Évaluation de la Fidélité des Coefficients Adaptatifs

L'évaluation de la fidélité des coefficients adaptatifs revêt une importance centrale au sein de notre analyse. Dans cette perspective, nous avons élaboré des courbes qui tracent les écarts entre les coefficients des filtres adaptatifs et les coefficients optimaux au fil des itérations. Ces courbes permettent de saisir la dynamique de convergence des coefficients adaptatifs vers leur configuration optimale, ce qui offre un éclairage précieux sur les performances de chaque algorithme. Les résultats exposés dans la Figure 2.30 révèlent des tendances significatives. Plus spécifiquement, il est observé que les filtres NLMS, APA et SELMS se distinguent par leurs performances remarquables. Ces méthodes démontrent des écarts considérablement réduits entre les coefficients adaptatifs et les coefficients optimaux. De plus, elles parviennent à atteindre une convergence rapide vers des écarts proches de zéro, ce qui indique une vitesse de convergence notablement élevée.

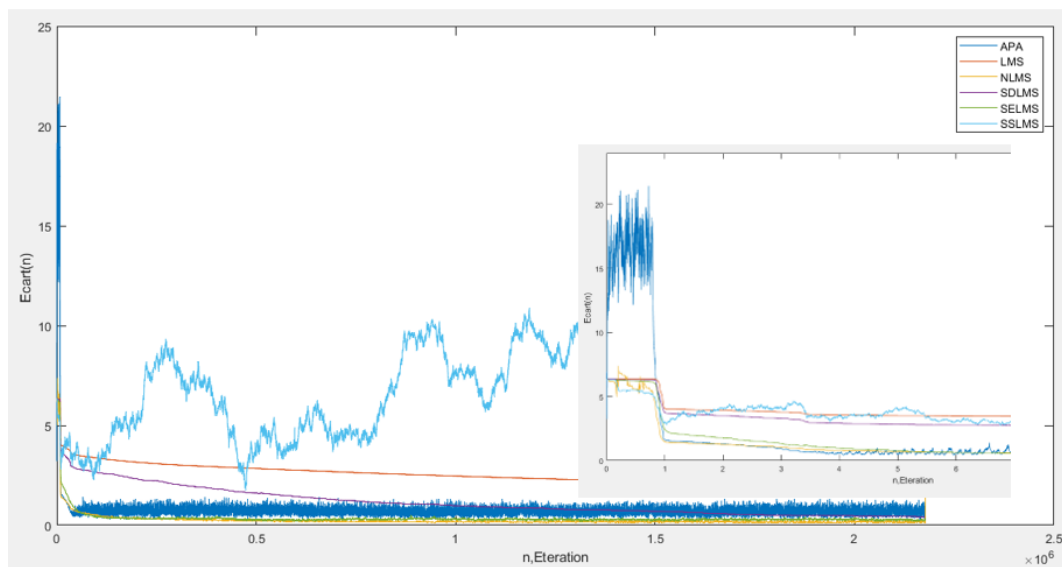


FIGURE 2.30 – Évolution des Écart entre les Coefficients Adaptatifs et Optimaux

2.6.3 SNR

Dans le cadre d'une évaluation approfondie des compétences des filtres en matière d'atténuation du bruit, une analyse comparative a été menée en examinant les rapports Signal sur Bruit (SNR) obtenus après l'application de chaque filtre. Les valeurs de SNR ainsi obtenues sont consignées dans le Tableau 2.2.

TABLE 2.2 – Mesures des Rapports Signal sur Bruit (SNR)

Filter	LMS	SDLMS	SELMS	SSLMS	NLMS	APA
SNR (dB)	20.4834	21.6038	0.9505	4.9939	19.2248	15.5280

Lorsque nous effectuons une comparaison approfondie entre les valeurs de SNR obtenues et le SNR initial (avant toute mise en œuvre du filtrage adaptatif), qui est égal à -7.8 dB, une conclusion s'impose : les filtres SDLMS, SELM et NLMS présentent des résultats particulièrement remarquables par rapport aux autres options.

2.6.4 Complexité et temps d'exécution

L'évaluation de la complexité de calcul des filtres adaptatifs revêt une importance majeure lors de la sélection éclairée d'un filtre approprié. La complexité a un impact significatif sur la durée totale de traitement, c'est-à-dire le temps d'exécution, un paramètre crucial dans les applications en temps réel où la réactivité est d'une importance primordiale. Cette évaluation se fonde à la fois sur des analyses théoriques et sur les simulations

préalablement réalisées pour ces algorithmes. Le tableau 2.3 suivant offre une comparaison de la complexité à chaque itération pour les différents filtres.

TABLE 2.3 – Complexités de Calcul par Itération

Filter	Complexité
LMS	moyenne
SDLMS	faible
SELMS	faible
SSLMS	faible
NLMS	élevé
APA	très élevé

2.6.5 Analyse et Choix Préliminaire

Après avoir mené des tests approfondis et réalisé une étude comparative sur divers algorithmes de filtrage adaptatif, nous reconnaissons que se fier uniquement à des comparaisons basées sur des simulations peut être limitatif. Cette restriction découle de la spécificité des résultats obtenus par rapport à l'application en cours, et de la variabilité significative observée en passant des environnements contrôlés aux situations réelles. Afin de traiter cette complexité et de prendre en considération les subtilités inhérentes aux applications pratiques, nous avons engagé une étude approfondie pour évaluer les avantages et les inconvénients de chaque algorithme de filtrage adaptatif. Cette étude a été menée en prenant en compte les applications réelles, où des interactions complexes entre les signaux, les conditions environnementales et les contraintes matérielles jouent un rôle critique.

TABLE 2.4 – Comparaison des Avantages et des Inconvénients des Algorithmes de Filtrage Adaptatif

Filter	Avantages	Inconvénients
LMS	<ul style="list-style-type: none"> — Facile à implémenter et à comprendre. — Faible coût de calcul par itération. 	<ul style="list-style-type: none"> — Convergence lente, spécialement dans des environnements bruités ou lorsque le rapport signal/bruit est faible. — Peut être sensible aux variations aléatoires du signal.
SDLMS	Robuste face aux valeurs aberrantes et aux impulsions dans les données d'entrée, car il utilise uniquement le signe des données.	Peut avoir une convergence lente dans les environnements à faible rapport signal/bruit en raison de l'utilisation limitée des données d'entrée.
SELMS	Peut être plus rapide à converger dans certaines situations.	Moins efficace lorsque le signal d'erreur est présent de manière continue.
SSLMS	Convergence rapide dans des environnements avec du bruit impulsionnel ou non gaussien.	Sensibilité à des conditions particulières de bruit.
NLMS	Plus stable et rapide que LMS grâce à la normalisation de la mise à jour en fonction de la puissance.	<ul style="list-style-type: none"> — Coût de calcul légèrement supérieur par itération par rapport à LMS. — Peut être plus complexe à mettre en œuvre que le LMS.
APA	<ul style="list-style-type: none"> — Performances de convergence améliorées dans les signaux hautement corrélés ou non stationnaires. — Utilisation efficace des projections pour l'adaptation. 	<ul style="list-style-type: none"> — Complexité accrue par rapport aux algorithmes plus simples comme LMS. — Peut nécessiter plus de ressources de calcul.

Les résultats de cette démarche ont été synthétisés dans le tableau 2.4. Ce tableau détaille les avantages et les inconvénients spécifiques de chaque algorithme dans des contextes pratiques. Nous avons pris en compte divers aspects, tels que les performances dans des scénarios variés, la charge de calcul associée, la capacité à résister aux variations du signal et du bruit, ainsi que d'autres paramètres pertinents propres à chaque algorithme.

Suite à cette évaluation, nous avons initialement opté pour les filtres Affine Projection Algorithm (APA) et Normalized LMS (NLMS) en tant que choix préliminaire. Toutefois, il est important de noter que ce choix pourrait être ajusté à la suite des tests en conditions réelles. Cette démarche permettra de valider et d'ajuster notre choix en fonction des performances observées dans des scénarios concrets.

2.7 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons jeté les bases fondamentales pour une compréhension approfondie des signaux sonores, de leurs caractéristiques audio et de l'application des filtres adaptatifs dans le contexte de la réduction du bruit. Notre exploration a englobé une diversité d'algorithmes de filtrage adaptatif, allant du classique Filtre Wiener aux approches plus avancées telles que le Filtre NLMS et le Filtre APA. De plus, nous avons mis en évidence les étapes cruciales pour la mise en pratique efficace des filtres adaptatifs en utilisant MATLAB, en portant une attention particulière à l'étude comparative pour sélectionner le filtre le mieux adapté.

Cette étude marque une avancée significative vers l'application concrète des filtres adaptatifs, comme nous le verrons dans les chapitres à venir.

Chapitre 3

Mise en Place et Évaluation du Système ANC

3.1 Introduction

Le chapitre introduit le concept d'un système novateur de Contrôle Actif du Bruit (ANC) conçu pour atténuer activement les bruits indésirables, en se concentrant particulièrement sur son application dans les véhicules. En combinant la théorie avec des expérimentations pratiques, ce chapitre explore les étapes essentielles du développement du système ANC, mettant en évidence son fonctionnement et les défis associés à sa mise en œuvre.

3.2 Analyse des besoins pour la mise en place d'un Système ANC

Dans le contexte de la mise en œuvre d'un système de contrôle actif du bruit, une analyse approfondie des besoins s'avère d'une importance primordiale. Cette démarche vise à garantir la performance et le succès du projet. Parmi les éléments clés indispensables à une telle application, nous identifions les éléments suivants :

- Microphones à haute sensibilité : Il est impératif de sélectionner des microphones de haute qualité et sensibles, ayant la capacité de capturer les niveaux de bruit de manière précise. Ils doivent également être adaptés aux spécificités propres au projet, afin de fournir des données fiables qui permettront au système de réagir de manière appropriée.
- Haut-parleurs de qualité optimale : L'utilisation de haut-parleurs de qualité supé-

rieure s'avère primordiale. Ils doivent être en mesure de diffuser les signaux anti-bruit de manière précise et cohérente, afin de contrebalancer efficacement les bruits indésirables.

- **Plateforme de développement performante** : Une plateforme de traitement des données audio et de calcul des signaux est une exigence incontournable. Cette plateforme doit avoir une capacité de traitement suffisante pour exécuter en temps réel les algorithmes de contrôle et de traitement du signal.

Cette liste d'éléments constitutifs offre une assise solide pour l'identification des besoins fondamentaux inhérents à la mise en place d'un système de contrôle actif du bruit. L'attention minutieuse portée à chaque composant est essentielle pour garantir que le système puisse répondre de manière adéquate aux objectifs et aux exigences propres au projet.

3.3 Matériels utilisés

Au sein du processus de sélection des matériaux pour ce projet, nous avons entrepris un cheminement itératif. À chaque phase, nous avons minutieusement examiné et analysé les choix de matériaux, évaluant leur adéquation avec les besoins du projet.

- **Sélection initiale** : Notre première sélection d'équipements a été basée sur les composants illustrés dans la figure 3.1 : une carte STM32F407 [15], un amplificateur de microphone électret Adafruit - MAX4466 avec gain réglable [ADA1063] [9], et un ensemble de haut-parleurs stéréo encastrés - 3W 4 Ohms [3].

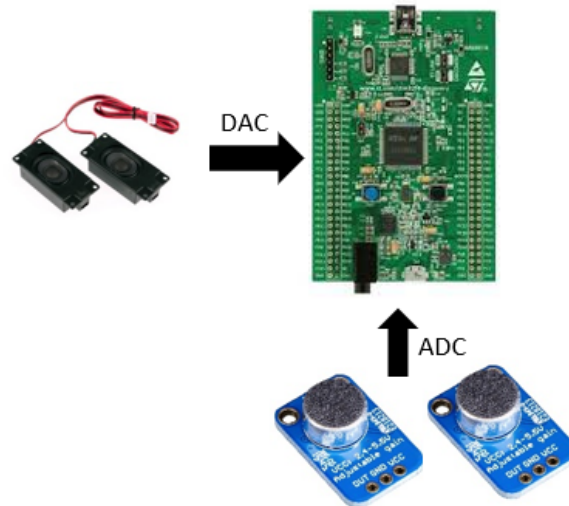


FIGURE 3.1 – Configuration Initiale des Composants du Système ANC

Dans cette configuration, les microphones étaient reliés à l'interface ADC, tandis que les haut-parleurs étaient connectés à l'interface DAC par le biais des broches GPIO. La mise en place d'une communication via UART a simplifié le transfert des données vers MATLAB. Cette communication a été essentielle pour le traitement à la fois des signaux capturés par les microphones et des signaux générés par les haut-parleurs. Cependant, une fois les composants mis en place et les tests effectués, nous avons fait face à des contraintes. Les microphones présentaient une sensibilité très limitée, ne répondant pas aux exigences de mesure des bruits, notamment ceux émis par un moteur. Parallèlement, les haut-parleurs ne pouvaient fournir qu'une qualité sonore médiocre. En conséquence, cette première sélection ne satisfaisait pas nos besoins. Une réévaluation de nos choix d'équipements s'est révélée nécessaire pour mieux s'aligner avec les objectifs du projet.

- **Deuxième sélection** : Suite à l'identification des défis rencontrés lors de notre première sélection, une nouvelle orientation a été prise. Nous avons choisi de substituer les microphones Adafruit par des modèles à double connectivité, USB [6] et jack [2], reconnus pour leur sensibilité supérieure. De même, le haut-parleur précédent a été remplacé par un modèle USB [18]. Dans ce schéma, les microphones et le haut-parleur améliorés ont été intégrés à travers l'interface USB de la carte Raspberry Pi 4 B [11], comme clairement illustré dans la figure 3.2. Il convient de noter que pour les microphones utilisant une connexion jack, nous avons employé un adaptateur



FIGURE 3.3 – Configuration Initiale des Composants du Système ANC

L'ordinateur portable a joué un rôle essentiel dans la gestion de la manipulation et de la connexion des équipements tels que les microphones et les haut-parleurs. Pour la mise en œuvre, nous avons fait appel au logiciel MATLAB sur cette plateforme. L'utilité du logiciel MATLAB a été déterminante, offrant la flexibilité nécessaire pour mettre en place des filtrages adaptatifs, effectuer des manipulations sur les signaux audio et ajuster des paramètres tels que le gain et les fréquences d'échantillonnage lors des enregistrements. Cette approche a permis de surmonter les contraintes identifiées, offrant une solution plus souple et adaptable pour la mise en place des fonctions centrales de notre système de contrôle actif du bruit.

3.4 Paramètres Clés et Conditions Essentielles pour des Tests Pratiques Réussis du Système ANC

Dans le processus de réalisation de tests pratiques pour le système de Contrôle Actif du Bruit (ANC), il revêt une importance capitale de considérer une série de paramètres clés et de prérequis. Ces éléments occupent une place cruciale en permettant d'atteindre des résultats fiables et significatifs. Ils jouent un rôle déterminant dans l'évaluation précise de l'efficacité de la technologie ANC dans des contextes réels, tout en contribuant à l'ajustement optimal de cette dernière à l'environnement particulier du projet.

- **Paramètres de Filtrage Adaptatif** : Lors de ces tests pratiques, nous avons examiné deux types de filtres adaptatifs : APA (Affine Projection Algorithm) et NLMS (Normalized Least Mean Squares). Comme mentionné précédemment, les paramètres de ces filtres jouent un rôle crucial dans leur performance. Pour le paramètre μ (taux

d'apprentissage), il est impératif de sélectionner une valeur entre 0 et 1 pour garantir la stabilité de la convergence du filtre. De plus, il est essentiel de calculer l'ordre du filtre de manière appropriée afin d'assurer une atténuation efficace du bruit. L'équation pour calculer l'ordre du filtre (M) est la suivante :

$$\text{Ordre du filtre } (M) = \frac{\text{Distance du plus long trajet}}{\text{Vitesse de propagation du son}} \times \text{Fréquence d'échantillonnage} \quad (3.1)$$

Dans cette formule, le terme "trajet" fait référence à la distance entre la source de bruit et le microphone du signal cible. Cette approche s'est avérée cruciale pour éviter les problèmes résultant d'un choix inapproprié de la longueur, tels que le surdimensionnement ou le sous-dimensionnement du filtre, comme expliqué en détail dans le chapitre 2. En prenant en considération à la fois la distance de propagation du son et la fréquence d'échantillonnage, nous avons été en mesure de déterminer précisément l'ordre optimal du filtre.

- **Paramètres de Traitement Audio (Entrée et Sortie) :** En complément des paramètres de filtrage adaptatif, la configuration précise des paramètres de traitement audio joue un rôle crucial. Dans le cadre des tests réalisés, nous avons opté pour les paramètres suivants :

- Fréquence d'échantillonnage : 8 kHz
- Résolution : 16 bits
- Nombre de canaux : 1

Ces sélections sont basées sur une analyse approfondie des signaux de bruit à atténuer ou à traiter.

- **Conditions Fondamentales pour une Évaluation Précise et Fiable du Système ANC :**

Lors de l'évaluation rigoureuse de l'efficacité du système de Contrôle Actif du Bruit (ANC) dans un contexte de réduction sonore, il est impératif de prendre en compte un ensemble de conditions environnementales et opérationnelles pour garantir des résultats à la fois précis et significatifs. Dans cette section, nous mettons en lumière les paramètres essentiels qui doivent être rigoureusement respectés lors de ces évaluations.

- Temps d'Enregistrement des Microphones : La détermination du temps d'enregistrement adéquat pour les microphones est cruciale. Il est impératif de choisir

un intervalle de temps qui permette de capturer suffisamment d'échantillons, même si, dans notre cas, un seul échantillon pourrait être nécessaire. La sélection judicieuse de ce temps d'enregistrement assure une représentation précise des signaux audio, facilitant ainsi une analyse rigoureuse.

- Uniformité du Traitement : L'harmonisation des traitements appliqués aux signaux en entrée et en sortie constitue une étape cruciale. Si des ajustements sont effectués, tels que des gains ou des traitements supplémentaires, il est impératif de les appliquer de manière cohérente pour éviter toute distorsion inutile des propriétés acoustiques des signaux.
- Injection du Signal Anti-Bruit : Pour obtenir une interférence destructive optimale, le signal anti-bruit estimé doit être introduit en opposition de phase par rapport au signal désiré. Cette configuration spécifique implique l'utilisation d'un haut-parleur. L'introduction d'un signal anti-bruit en phase opposée au bruit indésirable crée un environnement propice à l'interférence destructive, réduisant efficacement le niveau du bruit non préféré.
- Stabilité du Positionnement : Le positionnement stable des microphones, des haut-parleurs et d'autres équipements est primordial tout au long du processus d'évaluation. Tout changement dans la position peut introduire des variations dans les résultats, compromettant ainsi la comparabilité et l'interprétation des données.
- Synchronisation Temporelle : La performance d'un système de Réduction Active de Bruit (ANC) repose fondamentalement sur la synchronisation temporelle précise entre les signaux captés par le microphone et le signal anti-bruit généré par le haut-parleur. Cette coordination minutieuse est essentielle pour garantir une interaction harmonieuse entre les différentes composantes du système. En particulier, la synchronisation temporelle est calculée en prenant en compte plusieurs facteurs clés : le temps de propagation (T_p) du signal source désiré, le temps d'échantillonnage (T_e) et le temps d'exécution de l'algorithme ANC (T_{anc}).

L'objectif ultime de cette synchronisation temporelle est d'assurer une réduction optimale du bruit indésirable, contribuant ainsi à une expérience sonore nettement améliorée, notamment dans des environnements tels que les véhicules. Dans ce contexte, il est essentiel de considérer trois scénarios distincts qui peuvent se produire :

Cas 1 : Temps de Propagation Supérieur au Temps de Traitement ($T_p > T_{anc}$)

+ T_e) - Lorsque le temps de propagation du signal désiré est plus long que le temps nécessaire pour le traitement de l'algorithme ANC, une stratégie peut être envisagée pour équilibrer ces écarts. L'introduction d'une variable de temps (dt) dans le processus de traitement permettrait de compenser efficacement ce décalage, garantissant ainsi une synchronisation optimale.

Cas 2 : Synchronisation Parfaite ($T_p = T_{anc} + T_e$) - Une synchronisation parfaite entre le temps de propagation du signal capté et le temps de traitement de l'algorithme ANC est le scénario idéal. Dans de telles situations, le système est capable de fonctionner à son plein potentiel, réduisant efficacement le bruit indésirable.

Cas 3 : Temps de Propagation Inférieur au Temps de Traitement ($T_p < T_{anc} + T_e$) - Lorsque le temps de propagation est plus court que le temps de traitement, le risque d'une désynchronisation entre les signaux augmente. Cette désynchronisation peut potentiellement entraîner une amplification du bruit plutôt qu'une réduction. Dans de tels cas, il est impératif de réévaluer la configuration du système pour éviter toute détérioration de la qualité sonore.

3.5 Prototype du système ANC

Le prototype du système ANC est illustré dans la figure 3.4. Ce circuit comprend deux microphones : l'un enregistre le signal source tandis que l'autre capte le signal désiré que nous souhaitons réduire. En complément des microphones, le circuit est équipé d'un haut-parleur. Ce haut-parleur diffuse le signal estimé généré par le filtre adaptatif en opposition de phase avec le signal désiré capté par le microphone correspondant. Cette approche de l'opposition de phase permet de créer une interférence destructrice avec le bruit ambiant, conduisant ainsi à une réduction active du bruit perçu par l'utilisateur.

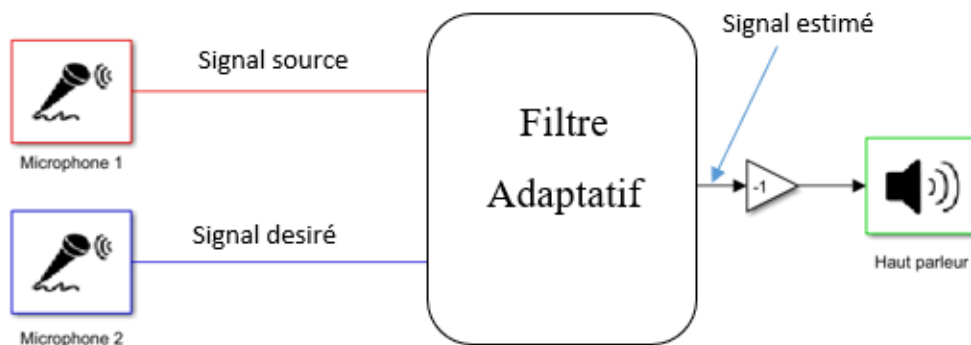


FIGURE 3.4 – Prototype du système ANC

Pour une évaluation méthodique, nous avons divisé le processus de test en deux étapes distinctes :

- Dans le premier test, nous avons examiné le fonctionnement du système sans utiliser le haut-parleur, en adoptant une approche manuelle. Cette étape a été essentielle pour confirmer le bon fonctionnement des microphones et du filtre adaptatif individuellement.
- Dans le deuxième test, nous avons intégré le haut-parleur pour réaliser une approche plus automatisée du système. En diffusant le signal estimé par le filtre adaptatif en opposition de phase avec le signal désiré, nous avons pu observer l'efficacité globale du système ANC dans la réduction active du bruit ambiant.

Ces tests itératifs ont joué un rôle crucial pour détecter toute faiblesse potentielle ou incohérence dans le fonctionnement du système. En analysant attentivement les résultats de chaque essai, nous avons pu identifier les sources potentielles de problèmes et prendre des mesures correctives ciblées.

3.5.1 Test de Validation en Temps Réel des Microphones et du Filtre Adaptatif

Dans le cadre de cette phase de validation, nous avons opté pour une méthodologie qui vise à examiner comment les microphones interagissent avec les filtres adaptatifs en temps réel, sans l'intégration du haut-parleur dans le système, comme illustré à la figure 3.5. Cette approche nous permet de mieux appréhender la réaction des microphones en collaboration avec les filtres adaptatifs, en excluant l'influence du haut-parleur.

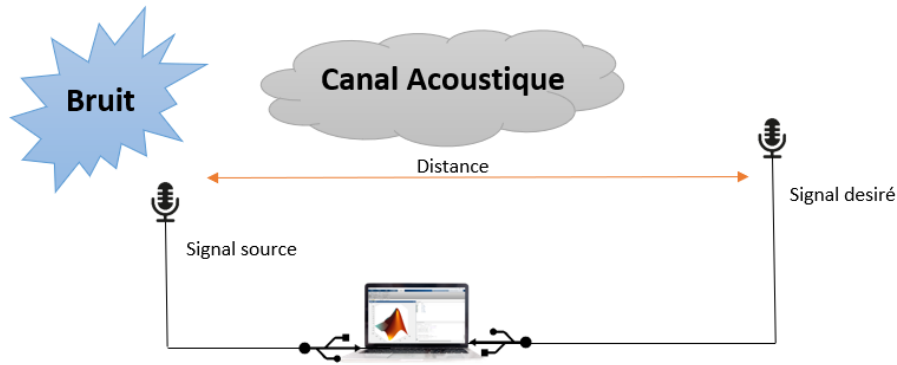
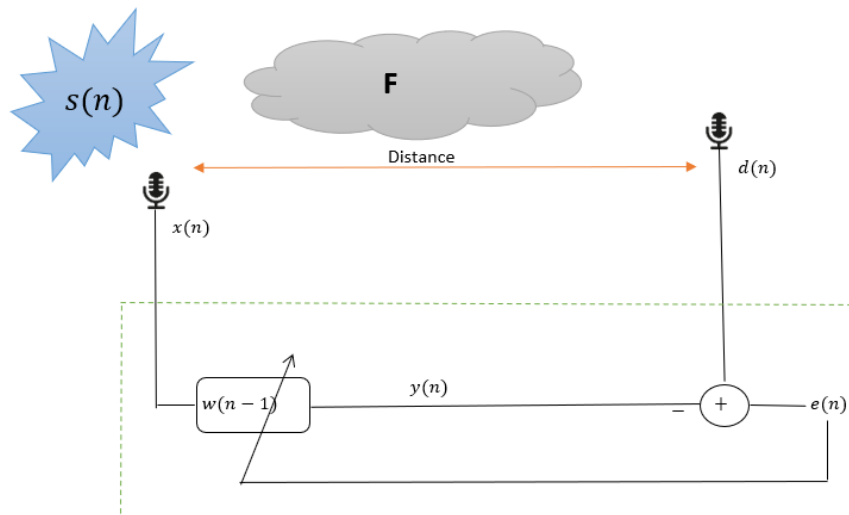


FIGURE 3.5 – Schéma de l'Évaluation de l'Interaction Microphones-Filtre Adaptatif

3.5.1.1 Identification du Système

Dans cette section, nous explorons le fonctionnement d'un système spécifique, tel qu'illustré dans la Figure 3.6. Bien qu'il partage des similitudes avec le système étudié précédemment, des modifications substantielles ont été apportées. Dans cette configuration, nous adoptons une approche en temps réel, où les signaux sont capturés et traités en temps réel pour une évaluation dynamique.

FIGURE 3.6 – Principe de Fonctionnement à l'Instant n du Système de Validation en Temps Réel des Microphones et du Filtre Adaptatif

- Le signal source, noté $x(n)$, est défini par l'équation $x(n) = s(n) + b(n)$, où $s(n)$ représente la source de bruit et $b(n)$ désigne le bruit. Cette composante de bruit englobe non seulement le bruit ambiant, mais également le bruit interne des microphones utilisés pour enregistrer le signal, ainsi que d'éventuels bruits d'interférence.

- Le signal désiré, noté $d(n)$, est exprimé par l'équation $d(n) = F \cdot s(n) + b'(n)$, où F représente le canal acoustique par lequel le signal $s(n)$ est transmis pour donner naissance au signal $y(n)$. Le terme $b'(n)$ inclut à la fois le bruit interne des microphones et d'éventuels bruits d'interférence.

Il est important de noter que le calcul du signal estimé et du signal d'erreur suit la même méthode que celle présentée dans le chapitre précédent.

3.5.1.2 Évaluation des Performances et Résultats d'Application pour un Moteur de Voiture

Dans le contexte de la validation en temps réel des microphones et du filtre adaptatif, des tests ciblés ont été entrepris pour évaluer l'efficacité du système ANC dans l'atténuation du bruit émis par le moteur d'une voiture. L'objectif principal était d'améliorer le confort acoustique à l'intérieur du véhicule en réduisant activement le bruit moteur indésirable. Pour réaliser ces essais, une configuration spécifique a été mise en place, impliquant deux microphones soigneusement positionnés. Le premier microphone a été installé dans le compartiment moteur afin de capturer la source brute du bruit directement émis par le moteur (signal source). Le deuxième microphone a été positionné à l'intérieur de la voiture pour enregistrer le signal désiré, représentant le bruit ambiant tel qu'il est perçu par les passagers. Cette disposition à double microphone a offert une opportunité de comparer et d'analyser l'efficacité des mécanismes de réduction de bruit en temps réel. Les signaux capturés par ces microphones ont ensuite été soumis aux filtres adaptatifs en temps réel, qui ont généré des signaux anti-bruit visant à annuler les bruits indésirables.



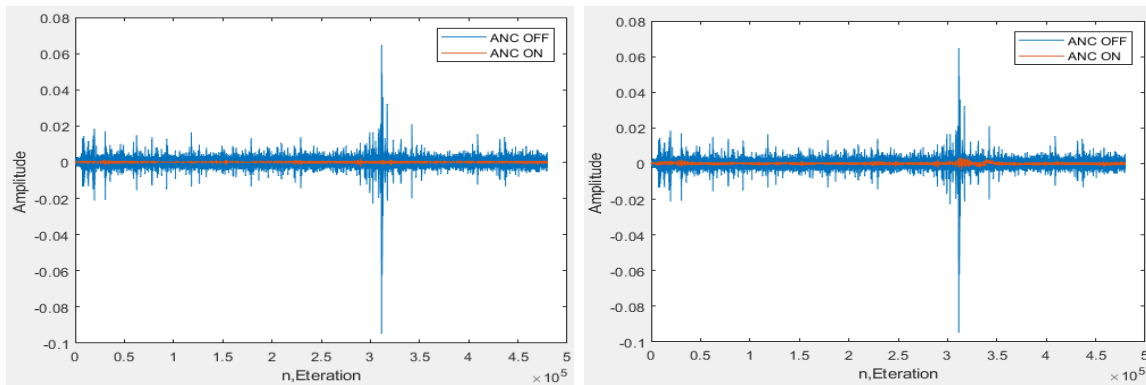
FIGURE 3.7 – Configuration Expérimentale des Microphones

La figure 3.7 illustre clairement cette configuration expérimentale. Les résultats obtenus à partir de l'application des filtres adaptatifs APA et NLMS sont présentés dans la figure 3.8. En outre, le Tableau 3.1 résume de manière concise les performances les

plus remarquables en ce qui concerne le rapport signal/bruit (SNR), à la fois avant et après l'application du système ANC. De plus, il met en évidence les améliorations (gain) en termes de réduction du bruit obtenues grâce à l'utilisation des filtres adaptatifs. Ces résultats notables consolident la démonstration de l'efficacité du système ANC dans le contexte de la réduction en temps réel du bruit moteur.

TABLE 3.1 – Analyse des Résultats de Réduction du Bruit : Application des Filtres Adaptatifs APA et NLMS en Termes de SNR

SNR (dB)	APA	NLMS
ANC OFF	42.8022	42.8022
ANC ON	68.7915	61.9974
Gain	25.9893	19.1952



(a) Résultats de l'Application du Filtre APA

(b) Résultats de l'Application du Filtre NLMS

FIGURE 3.8 – Résultats de l'Application des Filtres Adaptatifs APA et NLMS

Ces résultats prometteurs ouvrent la voie à la prochaine étape du développement : l'intégration d'un haut-parleur qui injectera en temps réel le signal anti-bruit généré par le système ANC. Cette évolution permettra de compléter le prototype du système ANC, offrant ainsi une solution plus aboutie pour améliorer l'expérience acoustique à l'intérieur du véhicule.

3.5.1.3 Difficultés Rencontrées lors de la Validation en Temps Réel

Les essais menés en conditions réelles ont mis en évidence plusieurs défis et limitations ayant eu un impact significatif sur la performance du processus de validation. Ces contraintes ont considérablement influencé le déroulement des tests.

- L'environnement de test s'est révélé être une contrainte majeure et l'obstacle principal tout au long de la réalisation de ces expériences. Les résultats de ces expérimentations ont conduit à des conclusions de grande importance.
 - Lorsque l'environnement demeure relativement stable, une observation cruciale est apparue. Les niveaux de bruit, que ce soit le bruit b ou le bruit b' intégré dans le signal désiré, demeurent relativement faibles par rapport à la source de bruit s . Cette situation mène à la solution optimale où w_{optimal} est égal à F . En d'autres termes, le système vise directement à estimer le canal acoustique F . Ces constatations sont étayées par les résultats obtenus lors des tests effectués à la fois dans un environnement automobile et dans un espace ouvert.
 - Un Environnement Non Stable : Lorsque l'environnement connaît des variations marquées, en particulier en présence d'une réverbération prononcée, la dynamique change de manière significative. Dans de telles situations, la solution optimale ne se réduit plus exclusivement à F . Au lieu de cela, elle est caractérisée par l'expression $(R_{ss} + R_{ii})^{-1} \cdot R_{ss} \cdot F$, où R_{ss} représente la matrice d'autocorrélation du signal source et R_{ii} représente la matrice d'autocorrélation du bruit d'interférence induit par la réverbération.

La réverbération introduit un bruit d'interférence qui a un impact substantiel sur la qualité du signal désiré. Ce bruit perturbateur altère la relation entre le signal source et le signal désiré, nécessitant ainsi une adaptation du filtre adaptatif pour prendre en compte ces variations. Cela implique un travail supplémentaire et une conception d'algorithme plus sophistiquée pour gérer efficacement ces situations. Les résultats de ces tests ont été observés dans des environnements spacieux tels que des salles de grande taille.

- Limitations Matérielle : En parallèle des défis inhérents à l'environnement de test, l'exécution des essais en conditions réelles a révélé des contraintes matérielles qui ont eu un impact significatif sur les performances et les résultats du processus de validation. Parmi ces limitations matérielles, la qualité des microphones utilisés s'est avérée être un facteur critique. Ces limitations matérielles ont généré des obstacles supplémentaires à la réalisation réussie des tests et à l'obtention de résultats optimaux.

3.5.2 Test de Contrôle Actif du Bruit avec Intégration du Haut-Parleur

Cette expérimentation met en lumière notre approche automatisée pour évaluer l'efficacité du système de Contrôle Actif du Bruit (ANC). Plutôt que d'adopter une méthode de calcul manuelle pour mesurer la différence entre le signal désiré $d(n)$ et le signal estimé $y(n)$, nous avons choisi une démarche plus répandue et automatisée. En temps réel, nous avons intégré un haut-parleur pour générer un signal anti-bruit en phase opposée au bruit ambiant (à réduire), provoquant ainsi une interférence destructive contrôlée. Le résultat principal de cette interférence, qui se traduit essentiellement par l'erreur résiduelle entre le bruit ambiant (à réduire) ou le signal désiré et le signal estimé injecté par le haut-parleur, représenté par $d(n)$, a été exploité pour ajuster de manière dynamique les coefficients du filtre adaptatif, comme clairement illustré dans la figure 3.9 ci-dessous.

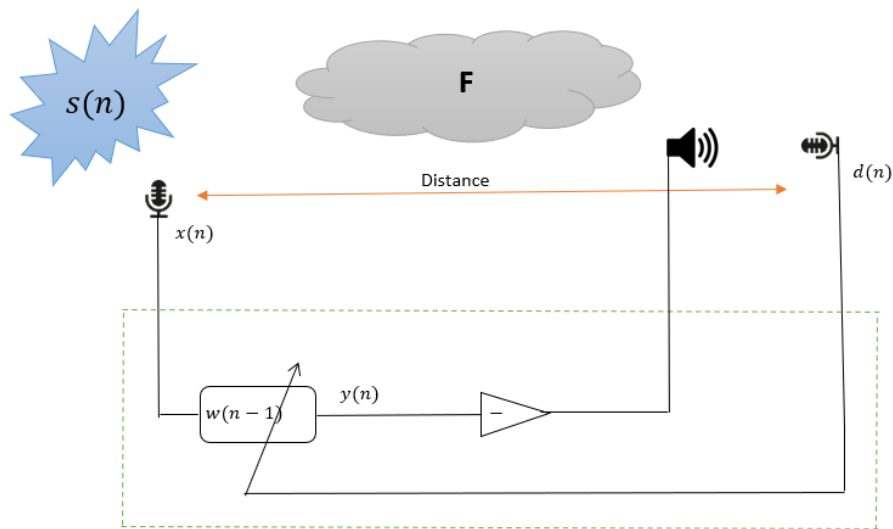


FIGURE 3.9 – Schéma de Contrôle Actif du Bruit avec Intégration du Haut-Parleur

3.5.2.1 Évaluation des Performances et Résultats d'Application pour un Moteur de Voiture

Dans le contexte de la mise en place de cette approche expérimentale, des tests ont été exécutés à l'intérieur d'un véhicule dans le but de minimiser le bruit perçu dans l'habitacle, provoqué par le fonctionnement du moteur. La configuration originale des microphones a été maintenue pendant ces essais. Dans l'optique d'assurer une atténuation optimale des sons indésirables, un haut-parleur a été judicieusement positionné près du microphone situé à l'intérieur du véhicule, comme démontré dans la figure 3.10 suivante.



FIGURE 3.10 – Configuration Expérimentale d'Intégration du Haut-Parleur pour le Contrôle Actif du Bruit

Toutefois, en dépit de l'utilisation de diverses méthodes de filtrage, notamment l'approche adaptative NLMS (Normalized Least Mean Squares) et d'autres filtres abordés précédemment, les résultats obtenus n'ont pas abouti à l'objectif primordial de réduction du bruit. Ces résultats peu satisfaisants semblent résulter des obstacles rencontrés, qui seront exposés en détail dans la section à venir.

3.5.2.2 Difficultés Rencontrées

La mise en place d'un système de contrôle actif du bruit avec haut-parleur a posé un défi essentiel : assurer une synchronisation précise entre les signaux désiré et estimé. Dans notre cas, cette synchronisation est devenue problématique lorsque le temps de traitement a dépassé le temps de propagation entre les microphones. Malgré nos tentatives, incluant l'exploration de différentes méthodes de filtrage, le déséquilibre persiste. Une part significative de cette désynchronisation découle non seulement du contexte algorithmique, mais également des limites d'efficacité des performances matérielles utilisées. En somme, cette problématique souligne l'importance critique d'une optimisation conjointe des algorithmes et du matériel pour relever ce défi de synchronisation en temps réel.

3.5.3 Stratégies d'Amélioration Envisagées

Face aux défis significatifs rencontrés au cours des essais réalisés, notre approche d'amélioration s'est concentrée sur une solution prometteuse. Nous avons décidé de remplacer la plateforme PC par la carte TMDSDSK6713 [16], spécialement conçue pour le traitement audio et les applications en temps réel. Cette transition revêtait un double objectif : atté-

nuer les limitations de performances matérielles tout en accélérant les processus critiques nécessaires pour garantir une synchronisation optimale entre les signaux.

L'intégration de la carte TMDSDSK6713 a apporté une série d'avantages notables, résultant de ses capacités avancées de traitement en temps réel et de sa spécialisation dans le domaine du traitement audio. Cependant, il convient de souligner que malgré les avancées réalisées au cours de la phase d'implémentation, les contraintes temporelles imposées par les délais prévus pour la réalisation de notre projet de fin d'études ont apporté une dimension complexe à cette transition. Ces limites temporelles ont restreint les opportunités de finaliser en totalité les ajustements nécessaires et de mettre en uvre les applications tangibles de ce système.

3.6 Système ANC pour un Véhicule

Cette section se penche sur la modélisation du système ANC (Active Noise Control) spécifiquement conçu pour être intégré dans un véhicule. Nous explorerons en détail les aspects matériels, fonctionnels et conceptuels de ce système, en mettant l'accent sur son fonctionnement au sein de l'environnement automobile.

3.6.1 Configuration Matérielle : Éléments Audio Nécessaires

Pour garantir un confort acoustique optimal à l'intérieur d'un véhicule, la captation précise des différentes sources de bruit est essentielle. C'est pourquoi l'utilisation d'un ensemble de six microphones stratégiquement positionnés s'avère nécessaire. Ces microphones sont disposés de manière à capturer les bruits provenant du moteur, des roulements et du bruit aérodynamique. La disposition de ces microphones est illustrée dans la figure 3.11, où chaque microphone est placé judicieusement afin de maximiser la captation des sources spécifiques de bruit. Les signaux capturés par ces microphones sont ensuite combinés pour former un signal source complexe qui servira de base au système de filtrage adaptatif.

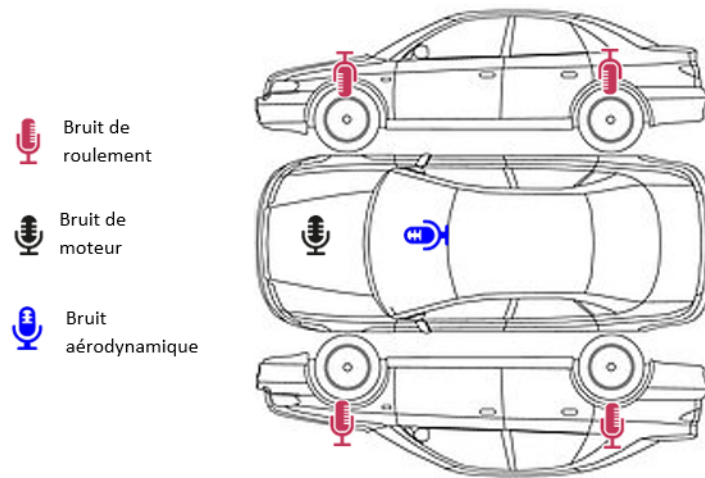


FIGURE 3.11 – Disposition Stratégique des Microphones pour la Captation des Sources de Bruit

Dans cette configuration, le système ANC vise à offrir un confort acoustique amélioré aux occupants du véhicule. Pour ce faire, une approche plus compacte est adoptée, utilisant quatre microphones pour capturer les signaux à atténuer et quatre haut-parleurs pour diffuser les anti-bruits générés par le système de filtrage adaptatif. Cette disposition est représentée dans la figure 3.12, où les microphones et les haut-parleurs sont judicieusement répartis dans l'habitacle de la voiture pour assurer une réduction efficace du bruit.

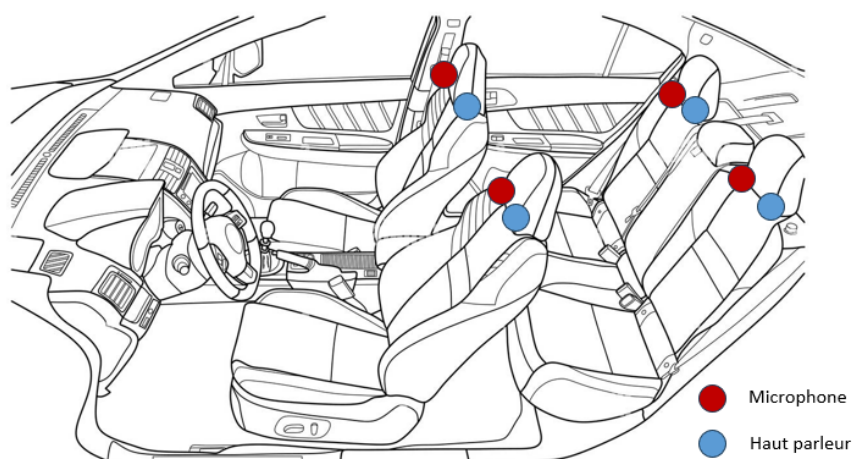


FIGURE 3.12 – Configuration des Microphones et des Haut-Parleurs pour l'Atténuation du Bruit dans l'Habitacle de la Voiture

3.6.2 Principe de Fonctionnement

Le fonctionnement du système ANC (*Active Noise Control*) dans le contexte d'un véhicule repose sur un principe essentiel. L'objectif est de réduire activement les nuisances sonores à l'intérieur de l'habitacle en générant des signaux anti-bruit pour contrer les bruits indésirables. Pour ce faire, le système utilise six microphones (notés de $i = 1$ à 6) pour capturer les sources de bruit telles que le bruit du moteur, le bruit de roulement et le bruit aérodynamique. Parallèlement, quatre autres microphones (notés de $k = 1$ à 4) enregistrent les bruits présents à l'intérieur de la voiture, que l'on cherche à atténuer.

Le fonctionnement du système peut être résumé comme suit (voir la figure 3.13) :

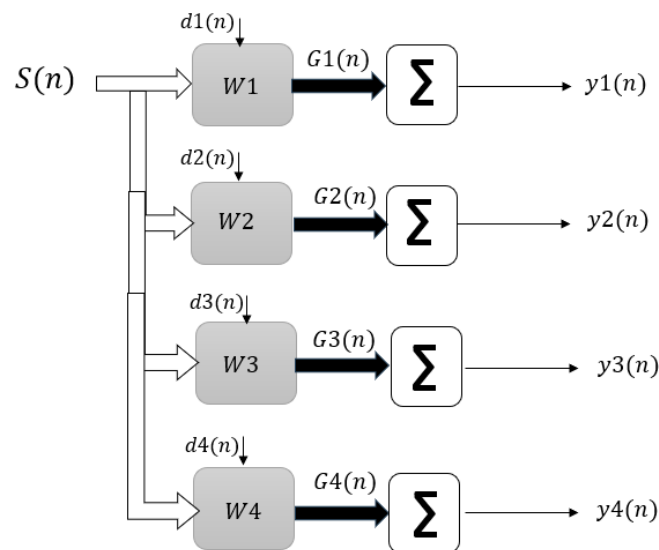


FIGURE 3.13 – Schéma de Fonctionnement du Système ANC pour un Véhicule

- Vecteur de Signaux Sources : Les signaux capturés par les microphones sont regroupés dans un vecteur appelé $S(n)$. Ce vecteur $S(n)$ est défini comme suit : $S(n)^T = [s_1(n), s_2(n), \dots, s_6(n)]$, où chaque élément $s_i(n)$ représente le signal capté par le microphone i . Chaque microphone de bruit interne (k) est associé à un filtre adaptatif, représenté par un vecteur de coefficients W_k . Ce vecteur $W_k^T = [w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{k6}]$. Les filtres adaptatifs utilisent le vecteur $S(n)$ comme entrée pour construire un vecteur de signaux estimés $G_k(n)^T = [g_{k1}(n), g_{k2}(n), \dots, g_{k6}(n)]$, où chaque élément $g_{ki}(n)$ est le signal estimé par le filtre k pour le microphone i .
- Signal Estimé Global d'Atténuation : Les signaux estimés $G_k(n)$ contribuent à la création d'un signal estimé global d'atténuation $y_k(n)$ en sommant les éléments correspondants.

- Adaptation des Coefficients : L'adaptation des coefficients du filtre k , représentés par le vecteur W_k , se fait en utilisant le signal désiré $d_k(n)$. Ce signal $d_k(n)$ représente le bruit résultant de l'environnement ambiant que l'on cherche à réduire. Il est également utilisé pour ajuster les filtres adaptatifs en fonction des signaux capturés et du bruit estimé injecté par les haut-parleurs k .

3.7 Conclusion

En récapitulation, ce chapitre nous a immergés dans le domaine du Contrôle Actif du Bruit (ANC), en mettant en avant sa mise en uvre au sein de l'environnement automobile. Cette exploration approfondie a permis de détailler la conception du système ANC, sa configuration matérielle et son mode de fonctionnement. Malgré les défis rencontrés lors des tests en conditions réelles, cette étude a renforcé notre compréhension des aspects théoriques et pratiques liés à la réduction active du bruit, tout en offrant un aperçu précieux de son application concrète.

Conclusion générale et Perspectives Futures du Projet

En parvenant à la conclusion de ce rapport, une vision approfondie et éclairante du domaine du contrôle actif du bruit se dessine. Ce projet de recherche a été conçu pour explorer en profondeur les fondements théoriques, les applications pratiques et les implications du contrôle actif du bruit dans divers contextes. Cette conclusion offre l'opportunité de récapituler les principales étapes et découvertes de ce travail, tout en jetant un regard vers l'avenir pour envisager les développements ultérieurs et les applications futures dans ce domaine.

Récapitulation des Étapes

La première partie de ce rapport a jeté les bases en introduisant l'unité d'accueil, Actia ES, et en définissant clairement les objectifs et les spécifications du projet. Le concept fondamental du contrôle actif du bruit a été exposé, soulignant son rôle crucial dans des secteurs variés, notamment au sein de l'industrie automobile.

La section suivante s'est plongée dans une exploration approfondie des signaux sonores et de l'utilisation des filtres adaptatifs pour atténuer le bruit. Cette analyse détaillée a permis une compréhension profonde des caractéristiques des signaux audio, des principes sous-jacents du filtrage adaptatif et des différentes méthodes algorithmiques employées pour le traitement des signaux sonores. Les simulations pratiques réalisées avec MATLAB ont apporté des résultats concrets quant aux performances de ces méthodes.

La dernière section a abordé la mise en place et l'évaluation d'un système d'annulation de bruit (ANC). Les besoins spécifiques pour le développement de ce système ont été identifiés, les composants matériels ont été détaillés et une implémentation concrète du prototype ANC a été fournie. Les résultats des tests en temps réel et l'intégration du haut-parleur ont confirmé l'efficacité du système dans des conditions réelles.

Perspectives Futures

Au-delà des accomplissements présentés dans ce rapport, de vastes opportunités de développement émergent pour enrichir le domaine du contrôle actif du bruit. Ces perspectives peuvent être divisées en deux volets prometteurs, chacun contribuant à l'amélioration continue et à l'innovation dans ce domaine.

La première perspective se concentre sur l'approfondissement de l'exploration du prototype du système ANC. L'intégration de la carte TMDSDSK6713 pour une expérience plus immersive, ainsi que l'optimisation au niveau matériel et algorithmique, ouvrent la voie à des tests approfondis et à une analyse plus détaillée des algorithmes adaptatifs utilisés.

La deuxième perspective s'appuie sur le succès de la première et vise à développer un système ANC final spécifiquement adapté aux véhicules. Cette direction ambitieuse vise à résoudre efficacement les sources de bruit propres à l'environnement automobile, en suivant la configuration et les principes exposés dans le chapitre 3. Des tests en situation réelle valideront l'efficacité du système dans le contexte de la conduite automobile.

Complétant ces deux perspectives, l'intégration d'une interface utilisateur conviviale via le framework Qt offre une opportunité d'améliorer l'interaction avec le système, tout en permettant une gestion intuitive des performances, des paramètres et des algorithmes adaptatifs.

En somme, ce rapport dévoile un voyage au cur du contrôle actif du bruit, tout en esquissant les chemins prometteurs à parcourir pour des développements futurs et des applications avancées.

Bibliographie

- [1] 10 vehicles with active noise cancellation. <https://www.autobytel.com/10-cars-with-active-noise-cancellation>. Accessed : May 05, 2023.
- [2] 3.5mm jack microphone for raspberry pi. <https://2betrading.com/accueil/2320-microphone-mic-jack-35mm-pour-raspberry.html>. Accessed : May 27, 2023.
- [3] 3w stereo enclosed speaker set, 4 ohms. <https://2betrading.com/accueil/1842-stereo-enclosed-speaker-set-3w-4-ohm.html>. Accessed : May 11, 2023.
- [4] Actia online platform. <https://www.actia.com/fr/>. Accessed : March 01, 2023.
- [5] Free car sound effects. <https://mixkit.co/free-sound-effects/car/>. Accessed : April 03, 2023.
- [6] High-quality rgb gaming microphone. <https://www.jumia.com.tn/gaming-microphone-rgb-haut-qualite-havit-mpg27195.html>. Accessed : May 27, 2023.
- [7] Innovative audio signal processing solutions. <https://www.analog.com/en/applications/markets/automotive-pavilion-home/cabin-electronics-and-infotainment/audio-signal-processing-solutions.html>. Accessed : March 10, 2023.
- [8] Major sensor innovations for automotive active noise cancellation. <https://www.molex.com/en-us/news/molex-unveils-major-sensor-innovations-in-automotive-anc>. Accessed : March 10, 2023.
- [9] Max4466 electret microphone amplifier module. <https://www.celectronix.com/modules-kits/99-gy-max4466-electret-microphone-amplifier-max4466-adjustable-amplifier.html>. Accessed : May 08, 2023.
- [10] Propagation speed of sound - chapter 2. <https://tube-a-essai.fr/4-chap-s2-la-vitesse-de-propagation-du-son/>. Accessed : July 18, 2023.

- [11] Raspberry pi 4 model b product brief. <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/product-briefs/README.md>. Accessed : June 07, 2023.
- [12] Room acoustics - interference phenomenon. <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/acoustique-salle-SI.xml>. Accessed : July 18, 2023.
- [13] Sound and light - chapter 2. <http://sciencesphysiques.e-monsite.com/pages/cours-4eme/chapitre-2-son-et-lumiere.html>. Accessed : July 14, 2023.
- [14] Sound intensity and doppler effect. <https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/lintensite-sonore-et-leffet-doppler/52455>. Accessed : July 18, 2023.
- [15] Stm32f407g disc1 discovery board. <https://2betrading.com/cartes-de-developpement/1398-carte-stm-discovery-stm32f407g-disc1.htm>. Accessed : May 18, 2023.
- [16] Tms320c6713 dsp starter kit (dsk). <https://www.ti.com/tool/TMDSDSK6713>. Accessed : July 26, 2023.
- [17] Understanding physical sound. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Son-physique.html>. Accessed : July 10, 2023.
- [18] Usb mini speakers for raspberry pi. <https://2betrading.com/accueil/2319-mini-haut-parleurs-usb-pour-raspberry.html>. Accessed : May 28, 2023.
- [19] Usb sound spdif adapter for raspberry pi and more. <https://2betrading.com/accueil/3165-adaptateur-usb-sound-spdif-pour-raspberry-pi-ou-autres.html>. Accessed : May 27, 2023.
- [20] M. Chaouki Nacer Boultifat. Exploring active noise control in enclosed spaces. Thesis, Mines-Télécom Atlantique, 2019.
- [21] K. Dogançay. *Partial-Update Adaptive Signal Processing : Design, Analysis and Implementation*. Academic Press, 2009.
- [22] Maxime Keller. Low-frequency active noise control inside a helicopter. PhD thesis, Université de Provence-Aix-Marseille I, 2008.
- [23] D. W. Kim, M. Lee, and P. Park. A robust active noise control system with stepsize scaler in impulsive noise environments. In *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, 2019.
- [24] Seonghyeon Kim and M. Ercan Altinsoy. Comprehensive active control of booming noise inside a vehicle caused by the engine and the driveline. *IEEE Access*,

- 10:12345–12356, May 2022. Received April 11, 2022 ; accepted April 25, 2022 ; date of publication May 5, 2022 ; date of current version May 13, 2022.
- [25] S. M. Kuo, S. Mitra, and Woon-Seng Gan. Active noise control system for headphone applications. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(2):331335, 2006.
- [26] S. M. Kuo and D. R. Morgan. Active noise control : A tutorial review. *Proceedings of the IEEE*, 87(6):943975, 1999.
- [27] Laifaoui. Implementation of adaptive filters on an fpga board for acoustic echo cancellation. Master’s thesis, Université Mohamed Larbi Ben Mhidi - Oum El Bouaghi, 2018.
- [28] A. K. Wang and B. Tse. Adaptive active noise control for headphones using the tms320c30 dsp. University of California at Berkeley, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, Berkeley, California 94720, 1997. SPRA160, January.
- [29] Irina Zhekova. Temporal-frequency analysis and granular synthesis of idle diesel engine noises : Perceptual study in complex auditory scenes. Thesis, Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2007.