

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université ABBAS LAGHROUR-KHENCHELA-



Faculté des Sciences et de la Technologie Département
d'Automatique

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

Master

En « Automatique et
Informatique Industriel »

Thème :

**ETUDE ET REALISATION D'UN ROBOT
MOBILE POUR LA DETECTION ET LA
MINIMISATION DU BRUIT**

Realisé par :

BOUALI Bachir

Encadreur :

Dr. BOUMAARAF Abdelaali

Presenté devant le jury composé de

Dr. SAIDI Abdelkader (P)

Dr. KEZIZ Mostafa

Année universitaire : 2025/2026

Remerciement

*Avant toute chose, je rends grâce à **Dieu** tout-puissant pour m'avoir donné la force, la santé et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens ensuite à exprimer ma profonde gratitude à **mes parents**, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu de manière inconditionnelle. Leurs sacrifices, leur amour et leurs encouragements ont été mon plus grand moteur tout au long de ces années d'études. Ce mémoire est le fruit de leur bienveillance et de leur confiance.*

*Je remercie également **mon encadreur, Dr. Boumaaraf Abdelali**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement rigoureux. Sa bienveillance et son exigence m'ont permis de mener à bien ce mémoire dans les meilleures conditions.*

*Aussi je remercie mon cousin **Dr. Bouali Hicham** pour son aide précieuse et son soutien indéfectible dans ce mémoire.*

Aussi je remercie le Dr.SAIDI Abdelkader pour son aide et ses précieux conseils et son accompagnement rigoureux tout au long de l'élaboration de ce travail.

*Un grand merci à **mes frères**, pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements de chaque instant. Leur présence à mes côtés m'a donné la force de persévérer.*

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes chers parents,

A mon frère et ma sœur,

Ma future femme

A tous les membres de la famille

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter,

*En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous pour chacun pour
me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.*

Avec toute ma tendresse,

Sincère gratitude.

A tous mes amis et collègues

Résumé

Ce projet concerne la conception et la réalisation d'un robot mobile à roues, basé sur une carte ESP32, destiné à la réduction active du bruit (ANC) dans les environnements industriels et urbains. Le robot est équipé d'un microphone numérique MEMS INMP441 pour l'acquisition du signal sonore ambiant, traité par un algorithme adaptatif LMS afin de générer un signal anti-bruit en opposition de phase, restitué par un amplificateur PAM8403. Le déplacement du robot est assuré par quatre moteurs à courant continu pilotés via le pont en H L298N, tandis qu'un servomoteur SG90 et un capteur à ultrasons HC-SR04 permettent la détection et l'évitement d'obstacles pour une navigation autonome.

Summary

This project concerns the design and implementation of a wheeled mobile robot, based on an ESP32 microcontroller, dedicated to Active Noise Control (ANC) in industrial and urban environments. The robot is equipped with an INMP441 digital MEMS microphone for capturing ambient sound, processed by an adaptive LMS algorithm to generate an anti-noise signal in phase opposition, emitted through a PAM8403 amplifier. The robot's movement is driven by four DC motors controlled via the L298N H-bridge, while an SG90 servo motor and an HC-SR04 ultrasonic sensor enable obstacle detection and avoidance for autonomous navigation. This system thus provides a mobile and intelligent solution for noise monitoring and reduction in various work environments.

ملخص

يُدرج هذا المشروع ضمن مجال الروبوتيك التطبيقية، ويهدف إلى تصميم وإنجاز روبوت متنقل ذي عجلات، يركز على داخل البيئات (Active Noise Control – ANC)، ويُخصّص للتخفيض النشط للضجيج ESP32 لوحة تحكم من نوع ، لالتقاط الإشارة INMP441 ، طراز MEMS يعتمد النظام المقترح على ميكروفون رقمي من نوع الصناعية والحضرية الصوتية المحيطة بدقة عالية، حيث تُعالج هذه الإشارة عبر خوارزمية تكيفية من نوع المربعات الصغرى المتوسطة (déphasage de 180°)، بغرض توليد إشارة مضادة للضجيج تكون في تعارضٍ طوري (Least Mean Squares – LMS) لضمان إلغاء الضجيج غير PAM8403 مع الإشارة الأصلية، ثم يتم بثها عن طريق مضخم صوت من نوع (Moteurs à Courant Continu) من الناحية الميكانيكية، تُوفّر حركة الروبوت بواسطة أربعة محركات تيار مستمر المرغوب فيه بفعالية ، في حين يُسهم كل من محرك السيرفو L298N طراز H ، يتم التحكم فيها عبر جسر من نوع (SG90) لروبوت في الكشف عن العوائق وتفاديها، بما يضمن تنقلاً ذاتياً HC-SR04 والحساس بالموجات فوق الصوتية وقد أثبتت الاختبارات المُنجزة نجاعة النظام المقترح، إذ يُشكّل هذا الأخير حلاً متنقلاً وذكياً قابلاً للتوظيف داخل بيئة العمل في مراقبة الضجيج وتقليصه ضمن مختلف فضاءات العمل الصناعية والحضرية

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

Résumé

Introduction Général 6

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET LE BRUIT

I.1. Introduction..... 11

I.2. Définitions de base 11

I.3. Représentation des signaux..... 11

I.3.1. Les principaux types de signaux 11

1. Les signaux déterministes 11

B. Les signaux aléatoires..... 11

I.3.2. Énergie et puissance des signaux 12

1. Signaux à énergie finie 13

2. Signaux à puissance moyenne finie 13

I.4. Transformation de Fourier 13

1. Domaine temporel 13

2. Domaine fréquentiel 13

I.4.1. La série de Fourier 13

I.4.2. La transformée de Fourier 14

Forme cartésienne 15

Forme polaire 15

I.4.3. Théorème de Parseval 15

I.5. Convolution 16

I.6. Corrélation 16

I.6.1. Inter corrélation..... 16

I.6.2. Autocorrélation 16

I.6.3. Densité spectrale d'énergie..... 17

I.7. Échantillonnage et reconstitution du signal 17

I.7.1. Échantillonnage du signal 17

1. Théorème de Shannon..... 17

I.7.2. Échantillonneur idéal 17

I.7.3. Reconstruction du signal..... 18

I.8. Processus aléatoires et bruit	18
I.8.1. Description d'un processus aléatoire	19
1. Valeur moyenne (espérance mathématique)	19
2. Variance	19
3. Fonction d'autocorrélation.....	19
I.8.2. Caractéristiques statistiques	19
1. Stationnarité	19
2. Ergodicité	19
I.8.3. Bruit	19
1. Définition	19
2. Classification des bruits	19
3. Modèles de bruit.....	20
I.8.4. Identification d'un système linéaire par bruit blanc	20
I.9. Conclusion	21

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LA ROBOTIQUE

II.1. Introduction	23
II.2. La Robotique	23
II.3. Le Robot.....	23
II.4. Structure d'un robot	24
II.4.1. Les Capteurs	24
1. Capteur Analogique :	24
2. Capteur Numérique	24
3. Capteur Logique (TOR)	25
II.4.2. Les Actionneurs.....	25
II.4.3. Le Contrôleur.....	25
II.4.4. Le Processeur.....	25
II.5. Types de Robots.....	25
II.5.1. Robots Industriels (Manipulateurs)	25
II.5.2. Robots Mobiles (Explorateurs).....	26
II.6. Classification des Robots Mobiles.....	27
II.7. Types de Robots Mobiles selon le Mode de Locomotion	27
II.7.1. Robots à Chenilles.....	27
II.7.2. Robots a pattes.....	28
II.7.3. Robots qui envahissent	28

II.7.4. Robots à locomotion roulante.....	28
1. Robot Unicycle.....	29
2. Robot Tricycle.....	29
3. Robot Omnidirectionnel.....	29
4. Robot Voiture (Quatre Roues)	30
II.7.5. Comparaison des Robots Mobiles à Roues	30
II.8. Domaines d'Application des Robots Mobiles	31
II.9. Conclusion.....	32

Chapitre III : Reduction Du Bruit

III.1. Introduction :	34
III.2.Effets du bruit sur la santé.....	34
III.3. Contrôle Actif du Bruit (Active Noise Control)	34
III.3.1. Principe de fonctionnement.....	35
1. Acquisition du bruit.....	36
2. Traitement numérique du signal.....	36
III.3.2. Applications dans les systèmes de robotique	36
III.4. Étude mathématique complète des types de signaux	37
III.4.1. Classification générale des signaux.....	37
III.4.2. Signaux déterministes répétitifs (périodiques).....	38
1. Décomposition en série de Fourier.....	38
2. Exemples classiques.....	38
III.4.3. Signaux aléatoires (stochastiques)	38
1. Définitions fondamentales.....	38
2. Types de bruit aléatoire	39
3. Moments statistiques.....	39
4. Processus stationnaires	39
III.4.4. Signaux pseudo-aléatoires.....	39
1. Définition mathématique.....	40
2. Propriétés statistiques.....	40
3. Applications	40
III.4.5. Signaux acoustiques	40
1. Représentation mathématique	40
2. Analyse spectrale acoustique	41
3. Caractéristiques psycho acoustiques	41
III.4.6. Signaux musicaux	41

1.	Structure harmonique	41
2.	Échelles musicales.....	41
3.	Analyse musicale avancée.....	42
III.4.7.	Outils mathématiques d'analyse	42
1.	Transformées intégrales	42
2.	Analyse temps-fréquence	42
3.	Statistiques d'ordre supérieur	42
III.4.8.	Tableau comparatif complet.....	43
III.4.9.	Applications pratiques.....	43
1.	Détection de défauts mécaniques	43
2.	Reconnaissance vocale	43
3.	Compression audio (MP3)	44
III.5.	Génération du signal déphasé de π (180°)	44
III.5.1.	Principe fondamental du déphasage de π	44
1.	Définition mathématique.....	44
III.5.2.	Signaux sinusoïdaux.....	45
1.	Cas idéal – Déphasage exact	45
2.	Déphasage temporel équivalent	45
III.5.3.	Signaux périodiques (carré, triangle, dent de scie)	45
1.	Décomposition en série de Fourier.....	46
2.	Propriétés trigonométriques :	46
3.	Cas particuliers	46
III.5.4.	Signaux aléatoires (stochastiques)	47
1.	Définition mathématique.....	47
2.	Propriétés statistiques.....	47
3.	Types de bruit spécifiques.....	47
III.5.5.	Signaux pseudo-aléatoires.....	48
1.	Définition	48
2.	Déphasage de π	48
III.5.6.	Signaux acoustiques	48
1.	Représentation mathématique	48
2.	Déphasage de π	49
3.	Analyse par STFT (Short-Time Fourier Transforme).....	49
III.5.7.	Signaux musicaux	49
1.	Structure harmonique	49

2.	Déphasage par note (pitch-specific)	49
III.5.8.	Signaux modulés (AM, FM, PM)	50
1.	Modulation d'amplitude (AM)	50
2.	Modulation de fréquence (FM)	50
3.	Modulation de fréquence (PM)	50
III.5.9.	Méthodes numériques de déphasage	51
1.	Inversion directe (méthode la plus simple)	51
2.	Principe mathématique	51
III.6.	Conclusion :	52

CHAPITRE IV : MATERIELS ET LOGICIEL

IV.1.	Introduction :	54
IV.2.	La carte ESP32	54
IV.2.1	Éléments constitutifs du module	55
IV.2.2	Caractéristiques techniques.....	55
IV.2.3	Brochage	56
IV.2.4	Interfaces de communication	57
1.	Interface UART	57
2.	Interface I2C.....	57
3.	Interface SPI.....	57
IV.3.	Capteur de distance à ultrasons HC-SR04	58
IV.4.	Architecture d'alimentation du système	58
IV.5.	Moteur à courant continu (MCC)	59
IV.6.	Afficheur LCD 16×2	60
IV.7.	Microphone numérique INMP441	61
IV.7.1.	Comparaison des capteurs de son	61
IV.7.2.	Justification du choix du capteur INMP441	62
IV.7.3.	Limites des capteurs KY-037 / KY-038	63
IV.7.4.	Avantages de l'INMP441	63
IV.8.	Amplificateur audio PAM8403	63
IV.9.	Servomoteur SG90	63
IV.10.	Pont en H L298N	64
IV.10.1	Caractéristiques.....	65
IV.11.	Châssis mobile Robot4WD	66
IV.12.	Câblage et interconnexions	66
IV.13.	Tableau récapitulatif des composants du système	67

IV.14 Environnement de développement logiciel	68
IV.14.1 L'IDE Arduino et le langage de programmation.....	68
IV.14.2 Structure d'un programme Arduino (sketch).....	68
IV.15 Conclusion	72

CHAPITRE V : CONCEPTION ET REALISATION

V.1. Introduction	74
V.2. Choix de la plateforme mécanique.....	74
V.3. Architecture matérielle du système	75
V.3.1. Chaîne acoustique.....	75
V.3.2. Chaîne de mobilité.....	75
V.3.3. Affichage.....	75
V.4. Organigramme de fonctionnement	76
V.5. Schéma de câblage sous Fritzing.....	76
V.6. Connexions entre l'ESP32 et les composants.....	77
V.7. Finalisation de la réalisation.....	78
1. Dysfonctionnements matériels observés lors des tests.....	78
2. Performance de l'ANC sur un signal périodique.....	79
3. Performance de l'ANC sur un signal aléatoire	79
4. Synthèse comparative.....	80
Conclusion générale	82
Bibliographie.....	84

Liste des figures

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Exemple d'un signal déterministe	11
Figure I.2 : Exemple de signal aléatoire	12
Figure I.3 : Train d'impulsions rectangulaires	13
Figure I.4 : Représentation fréquentielle de $F(t)$ (coefficients C_n).....	13
Figure I.5 : Le spectre de phase de $X(f)$	14
Figure I.6 : La transformée de Fourier de $x(t)$	14
Figure I.7 : Théorème de Parseval	15
Figure I.8 : Système à fonction de transfert $g(t)$	15
Figure I.9 : Passage du signal continu $f(t)$ au signal discrétisé $f^*(t)$	16
Figure I.10 : Échantillonnage et interpolation	16
Figure I.11 : Réalisation d'un processus aléatoire provenant de plusieurs épreuves.....	16
Figure I.12 : Représentation d'un signal bruité	17
Figure I.13 : Caractéristique du bruit blanc	18
Figure I.14 : Principe d'identification d'un système linéaire à partir d'un bruit blanc	18

CHAPITRE II:

Figure II.1 : Schéma fonctionnel d'un capteur.....	21
Figure II.2 : Exemple d'un robot industriel.....	23
Figure II.3 : Le robot Curiosity lors de son exploration de la planète Mars.....	23
Figure II.4 : Robot mobile à chenilles.	24
Figure II.5 : Exemples de robots marcheurs.....	25
Figure II.6 : Robot mobile de type rampant.	25
Figure II.7 : Robot de type unicycle.	25
Figure II.8 : Robot de type tricycle.....	26
Figure II.9 : Robot de type omnidirectionnel.	26
Figure II.10 : Robot de type voiture.	26
Figure II.11 : Exemples d'applications des robots mobiles.	27

CHAPITRE III:

Figure III.1 : Origines et évolution du contrôle actif du bruit	30
Figure III.2: Principe de la réduction active du bruit	31
Figure III.3 : Signal déphasé de π l'opposé	38
Figure III.4 : Signal déphasé π triangle	38
Figure III.5 : Signal déphasé π carré	39
Figure III.6 : Signal Aléatoire	40
Figure III.7 : Signal pseudo-aléatoire	40
Figure III.8 : Déphasage π appliqué par composante ANC.....	41
Figure III.9 : Déphasage π en harmonique	42
Figure III.10 : AM Déphasé π	42
Figure III.11 : FM Déphasé π	42
Figure III.12 : PM Déphasé π	43
Figure III.13 : Signal Original $x(t)$ et le Signal inversé $-x(t)$	43

CHAPITRE IV:

Figure IV.1 : Module DevKitC ESP32 – version 38 broches.....	45
Figure IV.2 : Schéma de brochage du module ESP32.....	46
Figure IV.3 : Capteur ultrasonique HC-SR04 et principe de mesure de distance.	48
Figure IV.4: Batteries 7V retenue comme source d'alimentation principale du système.	49
Figure IV.5: Motoréducteur DC	50
Figure IV.6 : Structure interne d'un moteur à courant continu.	50
Figure IV.7 : Afficheur LCD 16×2 et description de ses broches de connexion.....	51
Figure IV.8 : Microphone numérique INMP441	52
Figure IV.9 : Amplificateur audio PAM8403.....	52
Figure IV.10 : Servomoteur SG90	53
Figure IV.11 : Pont en H L298N	53
Figure IV.12 : Châssis mobile Robot4WD	55
Figure IV.13 : Câblage et interconnexions	56
Figure IV.14: Modalités de communication et de programmation d'une carte Arduino.	57
Figure IV.15 : Interface de l'environnement de développement Arduino IDE.....	58
Figure IV.16 : Schéma Synoptique de système	59

CHAPITRE V :

Figure V.1 : Châssis 4WD utilisé pour la réalisation du robot.....	75
Figure V.2 : Organigramme général de fonctionnement du robot	76
Figure V.3 : Schéma de câblage complet sur Fritzing	77
Figure V.4 : Notre Rebot Mobile Final	78
Figure V.5: (Signal périodique) bruit avant/après ANC	79
Figure V.6 : (Signal aléatoire) bruit avant/après ANC.....	80
Figure V.7: Courbe de convergence de l'algorithme LMS (périodique vs aléatoire).....	80
Figure V.8: Comparaison des performances de l'ANC selon le type de signal.....	81

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Comparaison des différents types de robots mobiles à roues.	31
Tableau II.2 : Domaines d'application des robots mobiles.	32
Tableau III.1 : Classification générale des signaux.....	37
Tableau III.2 : Exemples des Signaux	38
Tableau III.3 : Bruit aléatoire	39
Tableau III.4 : Propriétés Statiques des signaux pseudo-aléatoires	40
Tableau III.5 : Caractéristiques psycho acoustiques	41
Tableau III.6 : Transformées intégrales.....	42
Tableau III.7 : Tableaux Comparative.....	43
Tableau III.8 : Effet de déphasage π sur la série de Fourier	46
Tableau III.9 : Propriétés Statistiques du signal original et déphasé.....	47
Tableau III.10 : Invariance de la PSD par déphasage	47
Tableau III.11 : Analyse comparative des méthodes d'inversion de signal	51
Tableau IV.1 : Fonctions des principales broches du module ESP32.	55
Tableau IV.2 : Affectation des broches UART de l'ESP32.	56
Tableau IV.3 : Brochage des bus SPI2 et SPI3 de l'ESP32	56
Tableau IV.4 :Tableau de comparaison des capteurs de son	60
Tableau IV.5 : Différentes broches du module L298N.....	64
Tableau IV.6 : Composants du système de détection et réduction du bruit industriel.....	66
Tableau V.1 : Récapitulatif du brochage ESP32 (composants)	76

Liste des Abréviations

- **ANC** : Active Noise Control (contrôle actif du bruit / réduction active du bruit)
- **PSD** : Power Spectral Density (densité spectrale de puissance)
- **STFT** : Short-Time Fourier Transform (transformée de Fourier à court terme)
- **CQT** : Constant-Q Transform
- **FFT / IFFT** : Fast Fourier Transform / Inverse Fast Fourier Transform
- **MFCC** : Mel-Frequency Cepstral Coefficients
- **LPC** : Linear Predictive Coding (codage prédictif linéaire)
- **FIR / IIR** : Finite Impulse Response / Infinite Impulse Response
- **LMS** : Least Mean Squares (moindres carrés moyens)
- **PRBS** : Pseudo-Random Binary Sequence (séquence binaire pseudo-aléatoire)
- **LFSR** : Linear Feedback Shift Register (registre à décalage à rétroaction linéaire)
- **SNR / RSB** : Signal-to-Noise Ratio / Rapport Signal sur Bruit
- **SPL** : Sound Pressure Level (niveau de pression sonore, dB SPL)
- **BPFO / BPFi** : Ball Pass Frequency Outer/Inner race
- **ESP32** : microcontrôleur (SoC), processeur Tensilica Xtensa LX6
- **MCC** : Moteur à Courant Continu
- **L298N** : pont en H (driver moteur double)
- **HC-SR04** : capteur de distance à ultrasons
- **PAM8403** : amplificateur audio (classe D)
- **INMP441** : microphone numérique MEMS (I2S)
- **SG90** : servomoteur
- **LED** : Light Emitting Diode (diode électroluminescente)
- **LCD** : Liquid Crystal Display (afficheur à cristaux liquides)
- **MEMS** : Micro-Electro-Mechanical System (système micro-électromécanique)
- **DAC** : Digital-to-Analog Converter (convertisseur numérique-analogique)
- **ADC** : Analog-to-Digital Converter (convertisseur analogique-numérique)
- **PWM** : Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion)
- **GPIO** : General Purpose Input/Output (entrée/sortie à usage général)
- **VCC / GND / VDD / VSS** : alimentation / masse
- **DMIPS** : Dhrystone Million Instructions Per Second (mesure de puissance de calcul)
- **I2S** : Inter-IC Sound (bus audio numérique)
- **I2C** : Inter-Integrated Circuit (bus de communication série)
- **SPI** : Serial Peripheral Interface (interface périphérique série), avec SPI2/SPI3
- **UART** : Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
- **USB** : Universal Serial Bus
- **BLE** : Bluetooth Low Energy
- **TX / RX** : Transmission / Réception
- **MOSI / MISO / SCK / SS / SCLK / SDA / SCL** : signaux des bus SPI et I2C
- **IDE** : Integrated Development Environment
- **ISIS** : module de simulation de Proteus (schéma de câblage)
- **DSP** : Digital Signal Processing (traitement numérique du signal)
- **XOR** : opérateur logique OU exclusif
- **TRIG / ECHO** : broches du capteur HC-SR04 (déclenchement / écho)
- **EN / ENA / ENB / IN1-IN4** : broches de commande du pont en H L298N

Introduction Général

Le bruit fait partie des phénomènes physiques les plus anciennement étudiés par l'acoustique, mais il demeure, paradoxalement, l'une des nuisances les moins bien maîtrisées dans les environnements modernes. On le définit habituellement comme une vibration acoustique perçue comme désagréable, gênante ou nuisible par celui qui la subit, ce qui le distingue du son utile davantage par le contexte de perception que par sa nature physique propre [1].

Cette particularité explique pourquoi un même phénomène vibratoire peut être toléré dans un atelier de production et jugé insupportable dans un espace de repos : la nuisance ne réside pas uniquement dans le signal, mais dans la relation qu'entretient l'auditeur avec celui-ci.

Les conséquences sanitaires d'une exposition prolongée au bruit sont aujourd'hui bien établies. Selon les lignes directrices publiées par l'Organisation Mondiale de la Santé pour la région européenne, l'exposition chronique au bruit environnemental figure parmi les principales causes évitables de troubles du sommeil, de stress cardiovasculaire et de gêne durable au sein des populations exposées [4].

Ces effets ne se limitent pas à la sphère individuelle ; ils se répercutent sur le fonctionnement même des organisations, à travers une hausse de l'absentéisme, une baisse de la vigilance et une multiplication des erreurs ou des accidents liés à la fatigue auditive.

Le monde industriel illustre de façon particulièrement nette cette problématique. La mécanisation des chaînes de production, portée par la recherche constante de productivité, a multiplié les sources sonores au sein des ateliers : moteurs, compresseurs, systèmes de ventilation forcée, outils de découpe ou de manutention automatisée. La cohabitation entre opérateurs humains et équipements mécaniques de plus en plus puissants impose donc une gestion rigoureuse de l'ambiance sonore, sous peine de dépasser les seuils d'exposition tolérés et d'exposer l'entreprise à des conséquences sanitaires, juridiques et économiques.

Pour répondre à cette exigence, les solutions traditionnellement mises en œuvre relèvent de l'acoustique passive : matériaux absorbants, panneaux isolants, capotages et silencieux mécaniques. Ces dispositifs exploitent les propriétés dissipatives ou réfléchissantes des matériaux pour atténuer la propagation du son [1] [6].

Leur efficacité reste néanmoins conditionnée par une contrainte physique incontournable : plus la fréquence à traiter est basse, plus la masse et l'épaisseur du matériau nécessaire augmentent, ce qui se traduit par un encombrement et un coût croissants [1].

Cette limitation devient particulièrement pénalisante dans les environnements industriels, où l'espace disponible et les contraintes budgétaires laissent peu de marge à des solutions volumineuses.

C'est cette limite structurelle qui a motivé le développement d'une approche alternative, fondée non plus sur la matière, mais sur le traitement numérique du signal : le contrôle actif du bruit. Le principe consiste à générer, en temps réel, un signal correctif en opposition de phase avec le bruit perturbateur, de manière à provoquer une interférence destructive qui en réduit fortement l'amplitude perçue [2] [3].

Selon la disposition des capteurs et des actionneurs, la commande peut être organisée en anticipation (le signal correctif est calculé avant l'arrivée du bruit au point d'écoute) ou en réaction (le système corrige le signal résiduel mesuré après traitement), chacune de ces architectures répondant à des contraintes différentes en matière de délai de calcul et de stabilité [3].

L'apport majeur de cette approche réside dans le déplacement de la complexité : alors qu'une solution passive impose d'ajouter de la matière pour gagner en performance, un système actif reporte cette complexité sur l'algorithme de traitement du signal [2].

Un même dispositif matériel peut ainsi être adapté à des sources de bruit différentes par simple ajustement logiciel, ce qui lui confère une souplesse que les solutions passives ne peuvent offrir.

Cette flexibilité demeure toutefois limitée lorsque le système actif est figé en un point fixe de l'environnement : sa zone d'action reste localisée, alors que les sources de bruit industrielles sont souvent multiples, dispersées et parfois mobiles. L'intégration du contrôle actif à une plateforme robotique mobile, capable de se déplacer de manière autonome au sein de l'atelier, constitue une réponse naturelle à cette contrainte, à condition de maîtriser conjointement les problématiques de locomotion, de perception de l'environnement et de traitement embarqué du signal [5].

C'est dans cette perspective que se positionne notre travail. Nous proposons la conception d'un robot mobile autonome destiné au contrôle actif du bruit en milieu industriel. La plateforme repose sur un microcontrôleur ESP32, retenu pour sa capacité de calcul, sa connectivité intégrée et sa compatibilité native avec les interfaces numériques nécessaires à l'acquisition et au traitement du signal audio en temps réel [7].

L'acquisition sonore est assurée par un microphone numérique de type MEMS, tandis que la restitution du signal correctif s'appuie sur un amplificateur dédié. La mobilité du robot repose sur une motorisation à quatre roues pilotée par un pont en H, complétée par un capteur à ultrasons assurant la détection et l'évitement d'obstacles, l'ensemble formant une architecture cohérente entre perception, décision et action [5].

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

- **Le premier chapitre** pose les bases théoriques indispensables à la compréhension du travail. Il présente les concepts fondamentaux du traitement numérique du signal : types de signaux, transformée de Fourier, corrélation, échantillonnage et modèles statistiques du bruit. Ces outils constituent le socle mathématique sur lequel repose l'ensemble de la démarche.

- **Le deuxième chapitre** est consacré aux généralités sur la robotique mobile. Il définit les composants essentiels d'un robot : capteurs, actionneurs, contrôleur, processeur et passe en revue les différentes architectures de locomotion, avant de dresser un panorama des domaines d'application de la robotique mobile.

- **Le troisième chapitre** traite des méthodes de réduction du bruit, avec un accent particulier sur le contrôle actif. Il détaille le principe d'interférence destructive, l'analyse mathématique des classes de signaux rencontrés périodiques, aléatoires, acoustiques, modulés et compare les méthodes numériques de génération du signal anti-bruit déphasé de 180° .

- **Le quatrième chapitre** présente la réalisation concrète du prototype. Il décrit chaque composant retenu et justifie ce choix, expose l'architecture d'interconnexion et l'environnement de développement logiciel, puis présente les résultats obtenus lors des essais du système dans des conditions représentatives d'un environnement industriel.

- **Le cinquième chapitre** est consacré aux tests expérimentaux et à la discussion des résultats obtenus. Il rapporte les dysfonctionnements matériels rencontrés lors des essais du robot ainsi

Introduction Général

que les solutions techniques mises en œuvre pour les corriger, puis évalue les performances du système de réduction active du bruit face à différentes natures de signaux périodique et aléatoire. Une analyse comparative, appuyée sur les courbes de convergence de l'algorithme LMS, permet d'expliquer l'origine des écarts de performance observés et de dégager les limites actuelles du système

Enfin, une conclusion générale synthétise les apports du travail, discute les limites observées et propose des perspectives d'amélioration et d'extension du système vers des applications plus avancées.

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET LE BRUIT

I.1. Introduction

Le traitement du signal occupe une place centrale dans l'analyse et la modélisation des phénomènes physiques, qu'il s'agisse de grandeurs électriques, mécaniques ou acoustiques. Avant d'aborder la problématique propre au bruit, il convient de revenir sur les outils mathématiques permettant de décrire, transformer et interpréter un signal, qu'il soit déterministe ou aléatoire.[8]

Ce chapitre présente les notions de base nécessaires à la compréhension du reste de ce mémoire : la classification des signaux, leur représentation temporelle et fréquentielle, ainsi que les outils statistiques propres aux processus aléatoires. Une attention particulière est portée à la transformée de Fourier, à l'échantillonnage et à la caractérisation du bruit, qui forment le socle théorique indispensable à la suite de notre étude.

I.2. Définitions de base

Un signal constitue le vecteur physique permettant de transporter une information depuis une source vers un récepteur. Il se manifeste sous la forme d'une grandeur physique mesurable telle que le courant électrique, la tension, ou la force.

La théorie du signal vise à fournir une description mathématique rigoureuse des signaux. Cette représentation analytique permet de révéler les propriétés essentielles du signal telles que sa distribution en fréquence et son contenu énergétique, et d'étudier les transformations qu'il subit lors de sa transmission ou de son traitement. [9]

I.3. Représentation des signaux

I.3.1. Les principaux types de signaux

Parmi les principaux signaux, on peut citer :

1. Les signaux déterministes

Les signaux déterministes sont des signaux pour lesquels il existe un modèle mathématique précis. Leur comportement temporel est entièrement prévisible à tout instant.

Les principaux signaux déterministes sont :

- Périodiques
- Sinusoïdaux
- Non périodiques

- Transitoires

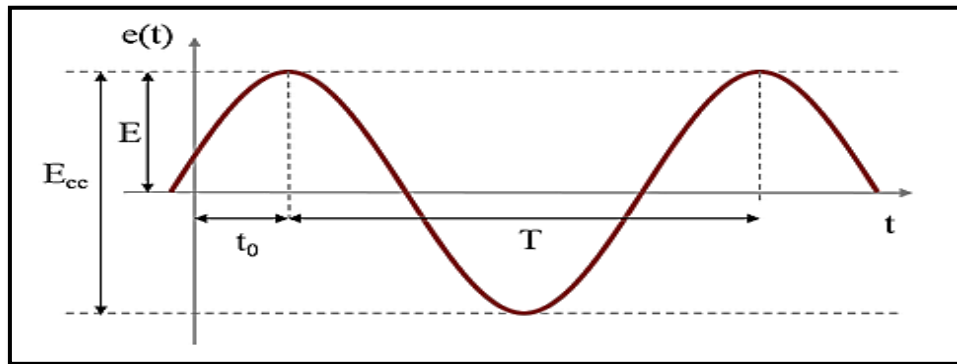


Figure I.1 : Exemple d'un signal déterministe

Pour un signal sinusoïdal : $y(t) = A \cdot \sin(\omega t + \theta)$

Où :

- T : période
- A : amplitude
- $f = \frac{1}{T}$: fréquence fondamentale
- θ : phase
- $\omega = 2\pi f$: pulsation

B. Les signaux aléatoires

Contrairement aux signaux déterministes, les signaux aléatoires ne peuvent pas être décrits par un modèle mathématique explicite. Leur évolution temporelle est imprévisible et leur analyse repose nécessairement sur des méthodes statistiques.

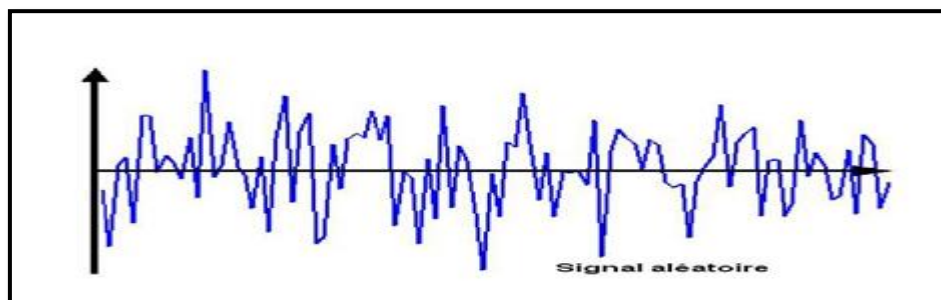


Figure I.2 : Exemple de signal aléatoire

I.3.2. Énergie et puissance des signaux

Du point de vue de leur contenu énergétique, les signaux se répartissent en deux catégories distinctes :

1. Signaux à énergie finie

Un signal $x(t)$ est dit à énergie finie lorsque l'intégrale de son carré sur tout l'axe temporel converge vers une valeur finie non nulle :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty$$

2. Signaux à puissance moyenne finie

Un signal est dit à puissance moyenne finie lorsque la limite suivante existe et est non nulle :

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} |x(t)|^2 dt$$

I.4. Transformation de Fourier

La description d'un signal peut s'effectuer dans deux domaines complémentaires :

1. **Domaine temporel** ($x(t)$) : utilise le temps t comme variable indépendante.

Le signal est caractérisé par :

- La durée
 - La période fondamentale
 - L'amplitude
2. **Domaine fréquentiel** ($X(f)$) : exprime le signal en fonction de la fréquence f . Ce domaine met en évidence :
 - La bande passante
 - La fréquence fondamentale
 - La phase

Ces deux représentations sont liées par la transformation de Fourier.

I.4.1. La série de Fourier

La série de Fourier est un outil mathématique permettant de décomposer tout signal périodique en une somme de composantes sinusoïdales.

Un signal $f(t)$ est périodique s'il existe un certain intervalle de temps T tel que :

$$f(t) = f(t + T)$$

Tout signal périodique, borné et intégrable sur une période, admet une décomposition en série de Fourier :

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{j2\pi n F_0 t}$$

Où :

- $F_0 = \frac{1}{T}$: fréquence fondamentale
- C_0 : composante continue
- C_n : coefficients complexes de Fourier

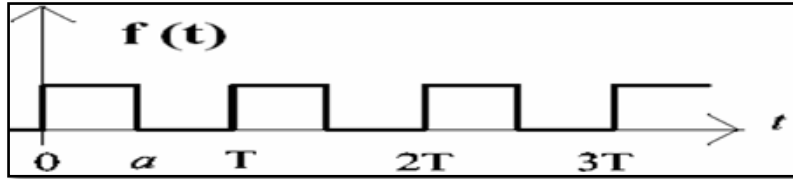


Figure I.3 : Train d'impulsions rectangulaires

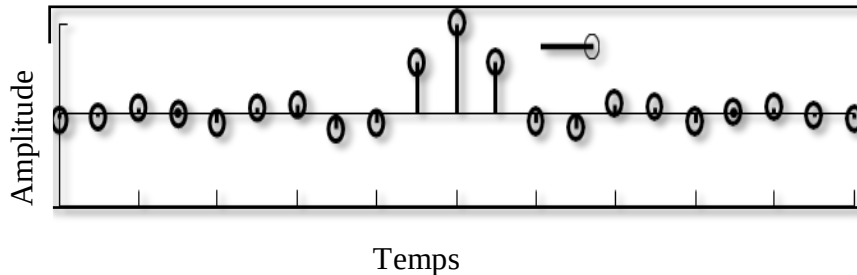


Figure I.4 : Représentation fréquentielle de F(t) (coefficients C_n)

I.4.2. La transformée de Fourier

La transformée de Fourier étend le concept de la série de Fourier aux signaux non périodiques.

Pour un signal $f(t)$ défini et intégrable, la transformée de Fourier est définie par : [10]

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

La relation inverse, qui permet de retrouver le signal temporel à partir de son spectre, est donnée par :

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(f) e^{j2\pi f t} df$$

La transformée $F(f)$ constitue une analyse spectrale complète du signal $f(t)$.

En général, la transformée de Fourier $F(f)$ est une fonction à valeurs complexes :

Forme cartésienne : $F(f) = \text{Re}[F(f)] + j\text{Im}[F(f)]$

Forme polaire : $F(f) = |F(f)| e^{j\theta(f)}$

Où : $|F(f)| = \sqrt{\text{Re}[F(f)]^2 + \text{Im}[F(f)]^2}$ $\theta(f) = \arctan\left(\frac{\text{Im}[F(f)]}{\text{Re}[F(f)]}\right)$

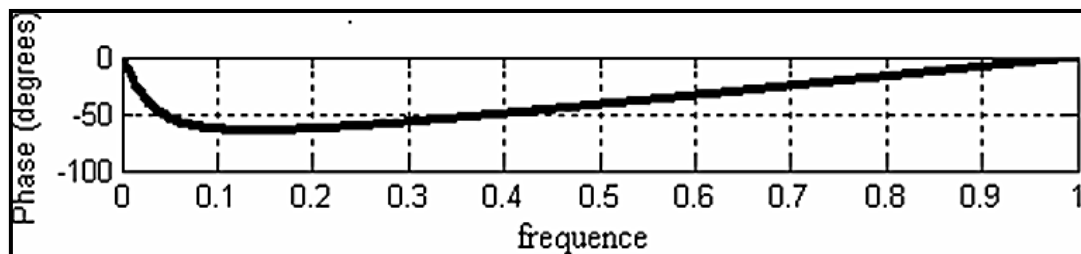


Figure I.5 : Le spectre de phase de X(f)

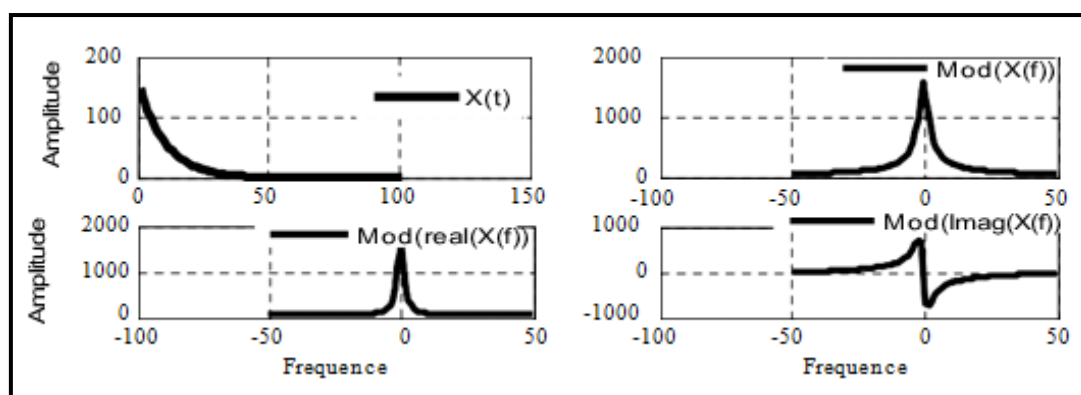


Figure I.6 : La transformée de Fourier de x(t)

I.4.3. Théorème de Parseval

Le théorème de Parseval établit la conservation de l'énergie entre les domaines temporel et fréquentiel :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |F(f)|^2 df$$

Ce résultat fondamental établit que l'énergie totale d'un signal $f(t)$ peut être calculée indifféremment à partir de sa puissance instantanée $|f(t)|^2$ ou de sa densité spectrale d'énergie $|F(f)|^2$.

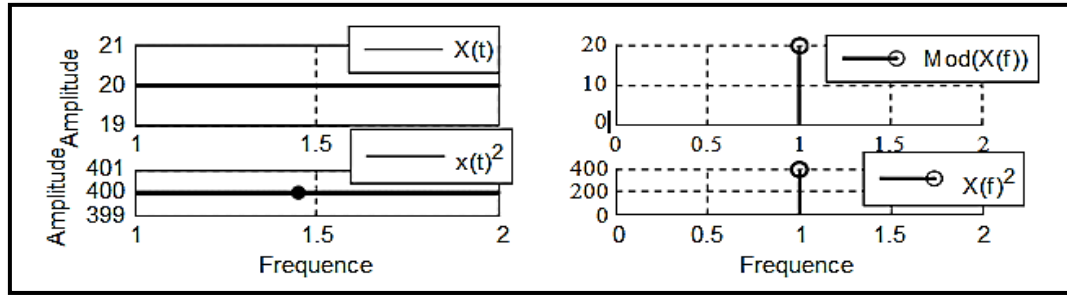


Figure I.7 : Théorème de Parseval

I.5. Convolution

Lorsqu'une impulsion de courte durée est appliquée à l'entrée d'un système linéaire invariant dans le temps, le signal résultant en sortie est de durée finie. Ce signal de sortie, caractéristique du système, est appelé **réponse impulsionnelle** et noté $h(t)$.

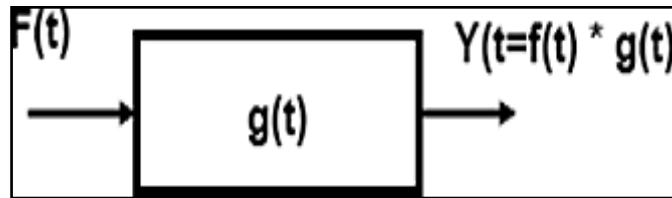


Figure I.8 : Système à fonction de transfert $g(t)$

La convolution permet de calculer la réponse d'un système linéaire à n'importe quel signal d'entrée $e(t)$: [9]

$$s(t) = e(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

Propriété remarquable : La convolution dans le domaine temporel correspond à un simple produit dans le domaine fréquentiel :

$$\text{TF}\{e(t) * h(t)\} = E(f) \cdot H(f)$$

I.6. Corrélation [11]

I.6.1. Inter corrélation

La fonction d'inter corrélation entre deux signaux réels $x(t)$ et $y(t)$ à énergie finie mesure leur similarité en fonction du décalage temporel τ :

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y^*(t - \tau)dt$$

I.6.2. Autocorrélation

La fonction d'autocorrélation d'un signal $x(t)$ est obtenue en comparant le signal avec lui-même décalé d'un retard τ :

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) x^*(t - \tau) dt$$

I.6.3. Densité spectrale d'énergie

On appelle densité spectrale d'énergie (ou spectre d'énergie) du signal réel $x(t)$ la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation :

$$S_{xx}(f) = \text{TF}\{R_{xx}(\tau)\}$$

Pour un signal à énergie finie, le théorème de Parseval établit l'équivalence :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = R_{xx}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(f) df$$

I.7. Échantillonnage et reconstitution du signal

I.7.1. Échantillonnage du signal

L'échantillonnage d'un signal continu consiste à mesurer sa valeur à des instants discrets, généralement espacés de manière uniforme selon une période d'échantillonnage T_e .

1. Théorème de Shannon :

La reconstruction parfaite d'un signal continu est possible si et seulement si : [10]

$$F_e \geq 2F_M$$

Où :

- F_M : fréquence maximale contenue dans le signal à numériser
- $F_e = \frac{1}{T_e}$: fréquence d'échantillonnage

Toute violation de cette condition provoque un repliement spectral (aliasing).

I.7.2. Échantillonneur idéal

L'échantillonneur idéal effectue une mesure instantanée du signal à chaque instant nT_e . Ce processus est modélisé par :

$$f^*(t) = f(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_e)$$

Dans le domaine fréquentiel :

$$F^*(f) = F_e \sum_{k=-\infty}^{+\infty} F(f - kF_e)$$

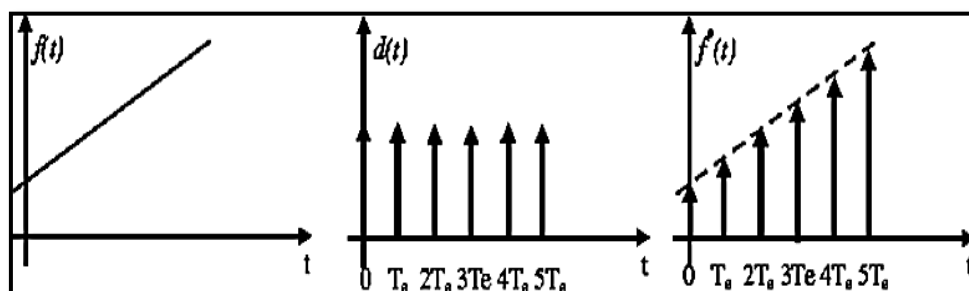


Figure I.9 : Passage du signal continu $f(t)$ au signal discrétisé $f^*(t)$

I.7.3.Reconstruction du signal

La reconstruction exacte du signal original est réalisée en appliquant au signal échantillonné un filtre passe-bas idéal (filtre d'interpolation) de fonction de transfert :

$$H_r(f) = \begin{cases} T_e & \text{si } |f| \leq \frac{F_e}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le signal reconstitué est donné par :

$$f_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(nT_e) \cdot \text{sinc}\left(\frac{t - nT_e}{T_e}\right)$$

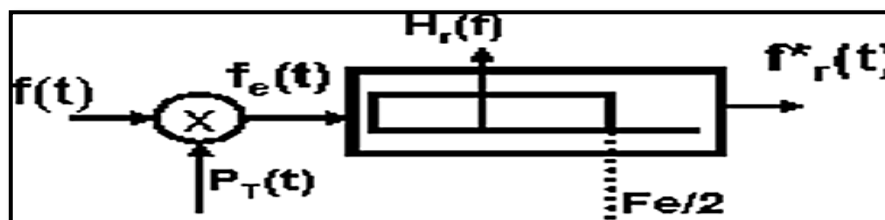


Figure I.10 : Échantillonnage et interpolation

I.8. Processus aléatoires et bruit

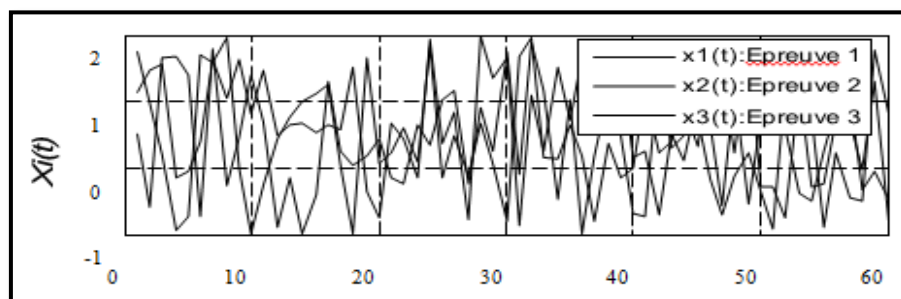


Figure I.11 : Réalisation d'un processus aléatoire provenant de plusieurs épreuves

I.8.1. Description d'un processus aléatoire

Les moments importants d'un processus aléatoire $x(t)$ sont : [12]

1. **Valeur moyenne (espérance mathématique) :** $m_x(t) = E[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x, t) dx$
2. **Variance :** $\sigma_x^2(t) = E[(x(t) - m_x(t))^2]$
3. **Fonction d'autocorrélation :** $R_x(t_1, t_2) = E[x(t_1)x^*(t_2)]$

I.8.2. Caractéristiques statistiques

1. **Stationnarité :** Un processus est dit stationnaire lorsque ses propriétés statistiques sont invariantes par translation temporelle :

$$m_x(t) = m_x(\text{constante}) \quad R_x(t_1, t_2) = R_x(t_2 - t_1) = R_x(\tau)$$

2. **Ergodicité :** Un processus est ergodique lorsque les moyennes statistiques sur l'ensemble des réalisations coïncident avec les moyennes temporelles sur une seule réalisation :

$$\langle x(t) \rangle = m_x \langle x^2(t) \rangle = \sigma_x^2 + m_x^2 \langle x(t)x(t+\tau) \rangle = R_x(\tau)$$

I.8.3. Bruit

1. Définition

Le bruit désigne toute perturbation non désirée se superposant au signal utile et dégradant sa qualité ou son intelligibilité.

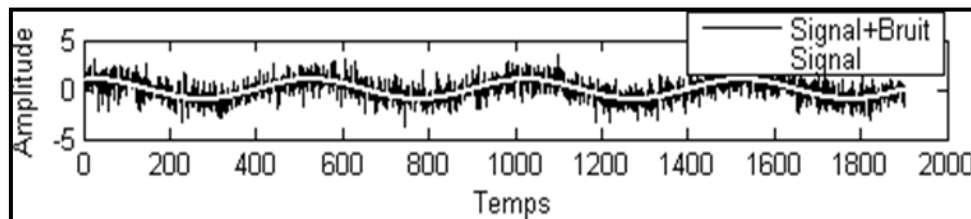


Figure I.12 : Représentation d'un signal bruité

2. Classification des bruits [13]

Selon la structure statistique et leur signature spectrale :

- Bruit blanc
- Bruit de scintillation (bruit rose ou bruit en $1/f$)
- Bruit en créneaux

Selon l'origine physique :

- Bruit thermique (agitation thermique des électrons)
- Bruit grenaille (déplacement des porteurs de charge)
- Bruit d'avalanche (génération en avalanche de porteurs)
- Bruit de quantification (dû à la numérisation)
- Bruit fantôme (défaut du capteur ou de l'électronique)

3. Modèles de bruit

Bruit gaussien : Caractérisé par une densité de probabilité suivant une loi normale $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$.

Bruit périodique : Formé d'une somme de signaux sinusoïdaux sans référence de phase.

4. Rapport signal sur bruit [14]

Le RSB est un critère objectif d'évaluation de la qualité d'un signal :

$$\text{RSB}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{bruit}}} \right)$$

Ou en tension :

$$\text{RSB}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{\text{signal}}}{V_{\text{bruit}}} \right)$$

I.8.4. Identification d'un système linéaire par bruit blanc

Le bruit blanc est un processus aléatoire stationnaire et ergodique dont la densité spectrale de puissance est constante : [10]

$$S_b(f) = B_0(\text{constante})$$

Sa fonction d'autocorrélation est :

$$R_b(\tau) = B_0 \cdot \delta(\tau)$$

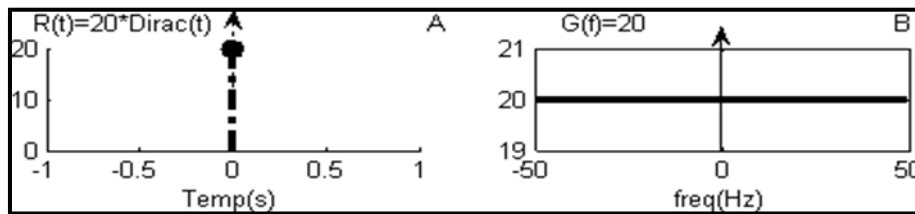


Figure I.13 : Caractéristique du bruit blanc

Pour un système linéaire de réponse impulsionnelle $h(t)$ excité par un bruit blanc $b(t)$:

$$s(t) = h(t) * b(t)$$

La corrélation entre l'entrée et la sortie donne :

$$R_{sb}(\tau) = B_0 \cdot h(\tau)$$

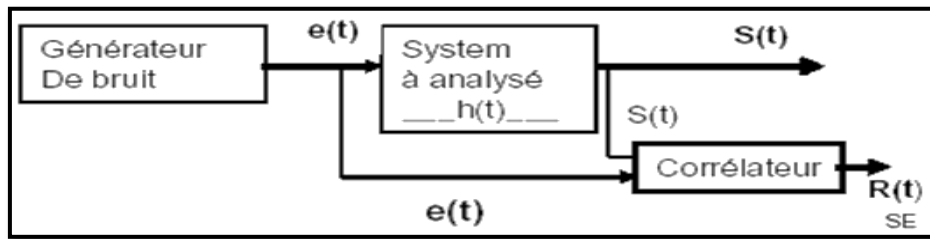


Figure I.14 : Principe d'identification d'un système linéaire à partir d'un bruit blanc

I.9. Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension du signal et du bruit. Nous avons distingué les signaux déterministes des signaux aléatoires, avant de détailler leurs propriétés énergétiques et leur représentation fréquentielle au moyen de la transformée de Fourier. Les notions de convolution, de corrélation et d'échantillonnage ont ensuite été abordées, complétées par une présentation des processus aléatoires et des différentes catégories de bruit. Ces outils, en particulier l'analyse fréquentielle et la corrélation, seront mobilisés tout au long de ce mémoire, notamment pour la modélisation du bruit et la conception des algorithmes de réduction active présentés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LA ROBOTIQUE

II.1. Introduction

La robotique est aujourd'hui l'un des domaines de recherche scientifique et technologique les plus actifs. Domaine naturellement pluridisciplinaire, il fait appel à des connaissances en électronique, informatique, mécanique et intelligence artificielle, dans le but partagé de doter les machines de la capacité de s'adapter de façon autonome à leur environnement.

L'évolution des robots mobiles a considérablement accru les champs d'application, faisant fonctionner des perspectives dans des secteurs aussi variés que l'industrie manufacturière, la surveillance d'installations sensibles ou encore l'exploration d'environnements difficiles d'accès. La mobilité induit toutefois des contraintes supplémentaires : elle impose une gestion cohérente et intégrée entre la perception de l'environnement, le traitement des données collectées et la prise de décision en temps réel.

Le problème principal est de concevoir des systèmes capables de s'adapter à des environnements inconnus, partiels ou totaux, en produisant des réponses appropriées sans faire appel à un opérateur humain. Les paragraphes suivant donnent un état des lieux des grands concepts qui régissent la robotique et les défis que rencontre ce domaine.

II.2. La Robotique

La robotique est une branche de l'automatisme qui couvre l'ensemble des techniques permettant la conception et la réalisation de machines automatiques programmables et des robots physiques.

Elle est aussi décrite comme un domaine multidisciplinaire lié à la conception, la fabrication et l'utilisation de machines automatiques. [15]

II.3. Le Robot

On appelle robot un automate constitué de parties mécaniques, électroniques et informatiques, capable d'exécuter des tâches précises selon un programme défini ou en ajustant ses actions de façon dynamique à son environnement. Le développement de l'intelligence artificielle fait que ces machines deviennent peu à peu des entités plus autonomes, capables d'acquérir des connaissances et d'adapter leur comportement à des situations nouvelles. [16]

II.4. Structure d'un robot

Un robot est constitué d'un ensemble de sous-systèmes étroitement interconnectés. Du point de vue mécanique, il comporte une structure articulée ou mobile. Du point de vue électronique et informatique, il repose sur plusieurs composants de base présentés ci-dessous.

II.4.1. Les Capteurs

Les capteurs ont une fonction comparable à celle des organes sensoriels chez l'humain : ils permettent au système de contrôle de recevoir en permanence les données nécessaires concernant l'état interne du robot ainsi que les propriétés de son environnement. Avec ces informations, le robot peut évaluer la situation et décider des actions à mener. [17]

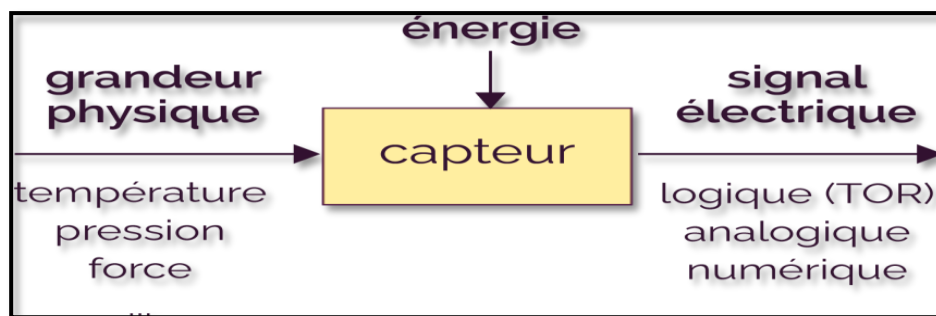


Figure II.1 : Schéma fonctionnel d'un capteur.

Selon la nature du signal de sortie produit, on distingue trois grandes familles de capteurs :

1. Capteur Analogique :

Un capteur analogique fournit un signal continu généralement une tension ou un courant électrique dont l'amplitude varie de façon proportionnelle à la grandeur physique qu'il mesure (température, pression, intensité lumineuse, etc.).

2. Capteur Numérique

Contrairement au capteur analogique, le capteur numérique fournit une sortie discrète qui peut être utilisée directement par des dispositifs de traitement comme les microcontrôleurs ou les ordinateurs embarqués. Le signal peut apparaître sous des formes diverses :

- train d'impulsions cadence à une fréquence déterminée.
- Un mot binaire correspondant à la valeur mesurée.

3. Capteur Logique (TOR)

Le capteur Tout Ou Rien (TOR) se limite à la détection de 2 états discrets : présence ou absence d'un objet, franchissement ou non franchissement d'un seuil. Sa sortie est au demeurant uniquement à deux états logiques : « 0 » (= état bas) et « 1 » (= état haut).

II.4.2. Les Actionneurs

Un **actionneur** est un dispositif qui transforme l'énergie reçue en mouvement afin d'exécuter des tâches précises. Dans les systèmes automatisés, il appartient à la **partie opérative**. Les actionneurs peuvent être de plusieurs types, notamment les servomoteurs, les moteurs électriques et les vérins pneumatiques ou hydrauliques. [18]

II.4.3. Le Contrôleur

Le contrôleur est un élément essentiel qui joue le rôle de **cerveau** du robot. Il reçoit les informations du système et assure la commande ainsi que la coordination des mouvements des actionneurs à partir des données fournies par les capteurs. [19]

II.4.4. Le Processeur

Le processeur constitue l'unité de traitement du robot. Il coordonne les mouvements articulés du robot et évalue la vitesse de déplacement de chaque articulation afin d'atteindre la position souhaitée. Dans certains systèmes, le contrôleur et le processeur sont intégrés dans une seule unité, tandis que dans d'autres, ils sont séparés. [20]

II.5. Types de Robots

En standard, l'idée selon laquelle on présente les robots sous deux formes majeures : celle des robots industriels que l'on appelle aussi manipulateurs, et celle des robots mobiles que l'on nomme aussi exploreurs.

II.5.1. Robots Industriels (Manipulateurs)

D'un point de vue historique, ce sont les robots industriels qui ont été les premiers à faire l'objet d'un déploiement massif, et qui sont avant tout intégrés au sein des chaînes de production. En général, ils sont conçus sous la forme d'un bras articulé à base fixe parfois placé sur des rails afin d'accroître sa portée et sont destinés à effectuer des opérations répétitives et précises sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à une intervention humaine

directe. À leurs pratiques courantes on signale : l'assemblage de composants, le soudage, le traitement de surface, la peinture et le perçage



Figure II.2 : Exemple d'un robot industriel

II.5.2. Robots Mobiles (Explorateurs)

Les robots mobiles, à la différence des robots manipulateurs, ne sont pas fixés à un emplacement immobile : ils disposent de systèmes de locomotion qui leur permettent de se déplacer librement dans leur environnement. Ils sont donc plus adaptés à l'exploration de territoires inaccessibles ou peu propices à la présence humaine. Un exemple emblématique de cette catégorie est fourni par le rover Curiosity de la NASA (Figure II.3) mis en œuvre sur la planète Mars afin d'y étudier sa géologie.



Figure II.3 : Le robot Curiosity lors de son exploration de la planète Mars

Un robot mobile est généralement un véhicule autonome équipé de capteurs, d'actionneurs et d'un système de contrôle embarqué qui lui permet de se déplacer, d'éviter les obstacles et d'accomplir des tâches prédéfinies. Il se situe à la jonction de la robotique et de l'informatique embarquée.

II.6. Classification des Robots Mobiles

On peut classer les robots mobiles selon divers critères : leur façon de se déplacer, la source d'énergie utilisée, et leur degré d'autonomie. Ce critère est généralement privilégié dans la littérature. [21]

On peut donc distinguer:

Le véhicule téléguidé au niveau rudimentaire, dont chaque action est commandée par un humain opérateur.

Le véhicule télécommandé agit au niveau de la tâche, ses actions élémentaires étant automatisées une fois que la mission a été définie à distance. [22]

Le véhicule semi-autonome est capable d'exécuter de manière autonome un ensemble de tâches prédéterminées. [22]

Voiture entièrement autonome capable de gérer des missions définies partiellement grâce à des mécanismes embarqués de représentation des connaissances, de raisonnement et de planification. [22]

La conception d'un robot pertinent pour les deux dernières catégories pose des défis importants, notamment la détermination d'une cinématique adaptée, la localisation et l'orientation du robot dans son environnement de travail, ainsi que l'élaboration de trajectoires optimales.

II.7. Types de Robots Mobiles selon le Mode de Locomotion

En robotique mobile, on utilise principalement quatre configurations mécaniques de propulsion.

II.7.1. Robots à Chenilles

Ce modèle de robot assure une traction optimale sur des surfaces accidentées (boue, végétation dense, débris) en raison d'une importante aire de contact avec le sol [23]. Ces robots, caractérisés par leur robustesse et leur stabilité, sont couramment utilisés dans des contextes militaires, en particulier pour des opérations de surveillance ou de neutralisation d'engins explosifs.



Figure II.4 : Robot mobile à chenilles.

II.7.2. Robots a pattes

Les robots marcheurs, en s'inspirant de la locomotion animale et notamment de celle des insectes, disposent de nombreux degrés de liberté qui leur permettent de se déplacer dans des milieux complexes ou confinés, d'accès difficiles voire périlleux pour l'être humain. La commande repose sur la régulation des coordonnées articulaires de chacune de leurs pattes. [23]



Figure II.5 : Exemples de robots marcheurs.

II.7.3. Robots qui envahissent

Conçus pour se déplacer dans des environnements confinés tels que les tunnels ou les conduits, les robots rampants possèdent une structure modulaire de forme filiforme. Chaque module possède plusieurs degrés de liberté, et leur succession produit un mouvement ondulatoire qui rappelle celui d'un serpent, d'où le nom donné à ces modules.



Figure II.6 : Robot mobile de type rampant.

II.7.4. Robots à locomotion roulante

La propulsion par roues est le mode de locomotion le plus souvent utilisé en robotique mobile en raison de sa simplicité mécanique et de son efficacité élevée sur des surfaces relativement planes. On identifie quatre grandes sous-catégories.

1. Robot Unicycle

Le monocycle robot est entraîné par une ou deux roues motrices autonomes dont les différences de vitesses autorisent les mouvements de rotations-des translations. Ce système étant non holonome ne peut se déplacer perpendiculairement à l'axe de ses roues, sa commande est cependant relativement facile à appliquer [24]



Figure II.7 : Robot de type unicycle.

2. Robot Tricycle

Le monocycle robot est entraîné par une ou deux roues motrices autonomes dont les différences de vitesses autorisent les mouvements de rotations-des translations. Ce système étant non holonome ne peut se déplacer perpendiculairement à l'axe de ses roues, sa commande est cependant relativement facile à appliquer. [24]



Figure II.8 : Robot de type tricycle.

3. Robot Omnidirectionnel

Le robot omnidirectionnel, généralement doté de trois roues orientables décalées disposées en triangle équilatéral, est capable de se déplacer librement dans toutes les directions du plan (translations axiale et transversale, rotation) sans restriction non holonome.

Cette souplesse est cependant obtenue au prix d'un mécanisme plus compliqué [23]



Figure II.9 : Robot de type omnidirectionnel.

4. Robot Voiture (Quatre Roues)

Ce robot s'inspire du modèle du tricycle en ajoutant une deuxième roue directrice à l'avant, améliorant ainsi sa stabilité globale. Ce système possède les mêmes caractéristiques cinématiques que le tricycle, la paire de roues avant pouvant être remplacée par une seule roue centrale sans modifier le centre de rotation du dispositif. [23]



Figure II.10 : Robot de type voiture.

II.7.5. Comparaison des Robots Mobiles à Roues

Le tableau II.1 synthétise les principaux avantages et inconvénients de chaque architecture. [17]
[24]

1.Tableau II.1 : Comparaison des différents types de robots mobiles à roues.

Type de robot	Avantages	Inconvénients
Unicycle	Stable. Il est possible de tourner sur son propre axe. Moindre complication mécanique	Non-holonyme.
Tricycle	Complexité mécanique modérée.	Non holonyme. Stabilité réduite. Il lui est impossible de tourner autour de son propre axe.
Omnidirectionnel	Holonyme. Stable. Rotation sur lui-même possible.	Complexité mécanique élevée.
Voiture (4 roues)	Stable. Complexité mécanique d'intensité modérée	Non holonyme. Il lui est impossible de tourner sur son propre axe.

II.8. Domaines d'Application des Robots Mobiles

Les robots mobiles trouvent des applications dans des domaines très variés. La figure II.11 montre quelques exemples caractéristiques et le tableau II.2 en propose une synthèse par secteur d'activité. [25]



Figure II.11 : Exemples d'applications des robots mobiles.

2. Tableau II.2 : Domaines d'application des robots mobiles.

Secteur	Applications représentatives
Industrie nucléaire	Surveillance d'installations. Manipulation de substances radioactives. Démontage de réacteurs.
Sécurité civile	Déminage. Neutralisation des menaces terroristes. Surveillance des lieux dangereux
Industrie chimique	Vérification de sites. Maniement de matières toxiques ou corrosives.
Extraction minière	Aide en cas d'urgence. Reconnaissance des galeries.
Agriculture	Récolte automatique. Traitement des cultures par des produits phytosanitaires. Moins de récolte.
Nettoyage industriel	Entretien des coques des navires. Nettoyage des surfaces difficiles d'accès
Exploration spatiale	Reconnaissance et étude des sols des planètes ou des corps célestes.
Industrie manufacturière	Transport intérieur. Contrôle des chaînes de production.
Milieu sous-marin	Installation de câbles. Contrôle des fonds marins. Localisation des épaves.
Défense militaire	Surveillance de périmètres. Transport et maniement des explosifs.

II.9. Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les fondements conceptuels indispensables à la compréhension du domaine de la robotique mobile. Nous avons tout d'abord décrit les éléments constitutifs d'un robot, puis présenté les architectures de locomotion possibles. Nous avons enfin mis en évidence la multiplicité des domaines d'applications offerts par ces systèmes. Ces éléments contextuels nous permettront, au chapitre suivant, de présenter en détail l'architecture matérielle et logicielle du robot mobile développé dans le cadre de ce projet, destiné à la détection de bruits anormaux dans un environnement industriel.

Chapitre III : Réduction Du Bruit

III.1. Introduction :

Le bruit, qu'il soit industriel, urbain ou domestique, est généralement perçu comme une sensation auditive gênante ou dérangeante. Toutefois, il ne se limite pas à une simple perception subjective, car il correspond aussi à un phénomène physique sous forme d'onde de pression qui se propage dans l'air et peut perturber l'attention, le sommeil et la santé. Dans un environnement industriel, le bruit d'une machine peut représenter une source de fatigue pour l'opérateur, tandis qu'en milieu urbain, le trafic routier peut masquer les sons utiles et accroître le stress. L'étude du bruit nécessite donc de prendre en compte à la fois sa nature vibratoire et ses effets sur l'être humain, ainsi que son impact sur certains capteurs électroniques, notamment les microphones utilisés dans les systèmes d'écoute ou de localisation. Sa réduction implique souvent de trouver un compromis entre performance technique, coût et confort d'utilisation.[26]

III.2.Effets du bruit sur la santé

Le bruit a des effets importants sur la santé humaine. Une exposition prolongée peut provoquer des troubles auditifs, tels que la baisse de l'audition, les acouphènes et, dans certains cas, une surdité progressive. Il peut également entraîner des troubles du sommeil, de la fatigue, de l'irritabilité et une diminution de la concentration. Par ailleurs, le bruit constitue un facteur de stress qui peut avoir des conséquences sur le système cardiovasculaire, notamment en augmentant le risque d'hypertension et de maladies cardiaques. Ainsi, le bruit ne représente pas seulement une gêne sonore, mais aussi un véritable problème de santé publique.[27]

III.3. Contrôle Actif du Bruit (Active Noise Control)

Le contrôle actif du bruit, ou **ANC** (Active Noise Control), est une technique de réduction acoustique qui consiste à atténuer un bruit en générant un signal sonore de phase opposée. Contrairement aux méthodes passives, qui reposent sur des matériaux absorbants ou isolants, cette approche utilise le traitement numérique du signal pour produire une onde anti-bruit capable de réduire le bruit indésirable.[28]

Cette méthode repose sur le principe de l'**interférence destructive** : lorsque deux ondes sonores de même amplitude se rencontrent en opposition de phase de 180 degrés, elles s'annulent partiellement ou totalement, ce qui diminue le niveau sonore perçu.

Le contrôle actif du bruit est particulièrement efficace pour les basses fréquences, domaine dans lequel les solutions passives montrent souvent leurs limites.

C'est pourquoi cette technologie est utilisée dans plusieurs applications industrielles et grand public.

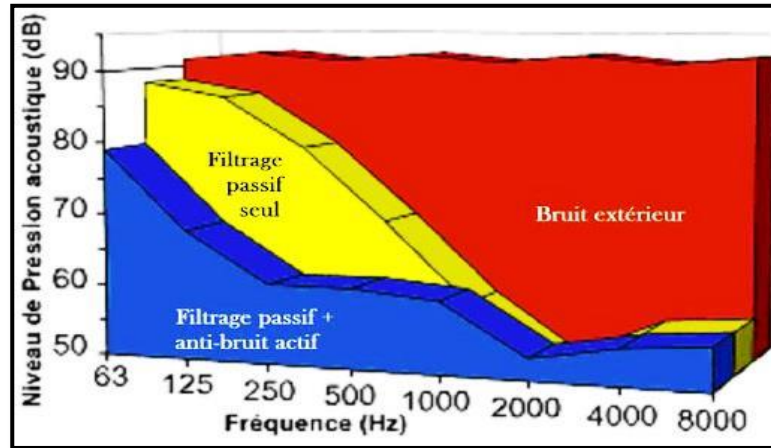


Figure III.1 : Origines et évolution du contrôle actif du bruit

Les premières bases théoriques du contrôle actif du bruit remontent aux années 1930, mais son développement pratique n'a été possible qu'avec les progrès de l'électronique et l'apparition des processeurs numériques de signal.[28]

D'abord développée pour le secteur aéronautique, cette technologie a été utilisée pour améliorer le confort acoustique des pilotes d'avion et d'hélicoptère, fortement exposés aux bruits des moteurs, des hélices et des vibrations mécaniques. Elle permet de réduire la fatigue auditive et d'améliorer les conditions de travail.[29]

Ensuite, le contrôle actif du bruit s'est étendu au domaine militaire, notamment dans les systèmes de communication embarqués et les casques tactiques, où il est nécessaire d'atténuer certains bruits tout en conservant les signaux utiles.[29]

Aujourd'hui, grâce à la miniaturisation des composants électroniques, cette technologie est également présente dans des produits grand public tels que les casques audio, les écouteurs sans fil et certains systèmes intégrés aux véhicules modernes.

III.3.1. Principe de fonctionnement [29]

Un système de contrôle actif du bruit fonctionne en général suivant trois étapes principales :

1. Acquisition du bruit

Un microphone ou plusieurs microphones enregistrent les signaux sonores de l'environnement. Ces signaux sont les entrées du système.

2. Traitement numérique du signal

Le signal prélevé est envoyé vers un processeur numérique pour qu'il en analyse les différentes propriétés (amplitude, fréquence, phase). Un algorithme calcule ensuite un signal opposé, nommé anti-bruit.

3. Signal anti-bruit généré

Un haut-parleur émet le signal antibruit. Quand il rencontre l'onde sonore d'origine, il y a interférence destructrice et le bruit perçu est ainsi réduit.

On peut schématiser ce principe mathématique ainsi :

$$x(t) + (-x(t)) = 0$$

- $x(t)$ représente le bruit original ;
- $-x(t)$ représente le signal anti-bruit généré ;
- la somme des deux signaux tend vers une annulation acoustique.

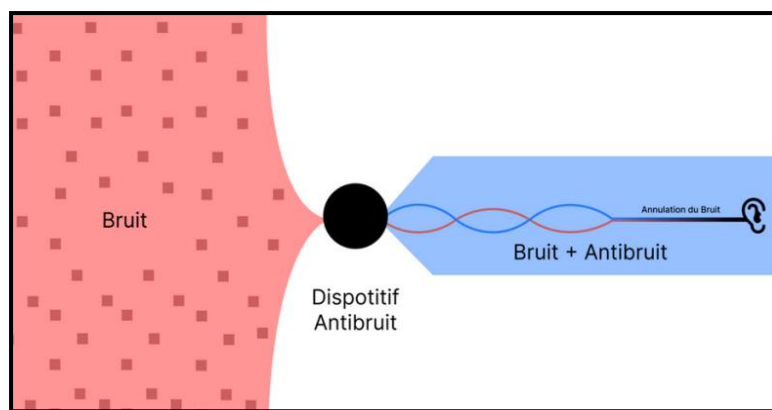


Figure III.2: Principe de la réduction active du bruit

III.3.2. Applications dans les systèmes de robotique

Le contrôle actif du bruit apparaît comme une solution particulièrement adaptée aux systèmes robotiques de détection et de réduction du bruit. Un robot muni de capteurs acoustiques, d'un microcontrôleur et d'un système de restitution sonore est capable de détecter un bruit gênant, d'analyser ses caractéristiques, puis de produire un signal correctif.

Cette approche permet de :

- d'améliorer le confort sonore ;
- de diminuer les interférences sonores;
- d'améliorer la précision des systèmes de détection audio ;
- d'améliorer les performances globales du robot dans les environnements bruyants.

III.3.3. Limites du contrôle actif du son

Le contrôle actif, bien qu'il présente des avantages, comporte néanmoins certaines contraintes:

- besoin d'un traitement très rapide ;
- sensibilité aux temps de calcul ;
- efficacité diminuée pour les hautes fréquences ;
- complexité de mise en œuvre logicielle et matérielle.

III.4. Étude mathématique complète des types de signaux

III.4.1. Classification générale des signaux

La classification générale des signaux se représentée dans le tableau ci-dessus [30]

1. Tableau III.1 : Classification générale des signaux

Type de signal	Définition mathématique	Exemples	Caractéristiques
Déterministe	$x(t)$ connu exactement $\forall t$	Sinusoïde, signal carré	Prévisible, répétable
Aléatoire (stochastique)	$X(t)$ variable aléatoire	Bruit thermique, parole	Non prévisible, statistiques
Périodique	$x(t + T) = x(t) \forall t$	Signal ECG, vibration machine	Fréquence fondamentale $f_0 = 1/T$
Quasi-périodique	Somme de périodiques incommensurables	Musique, voix humaine	Spectre discret non harmonique
Transitoire	Support temporel fini	Impulsion, clic	Large bande spectrale
Stationnaire	Statistiques invariantes dans le temps	Bruit blanc filtré	$E[X(t)]$, $R_{XX}(\tau)$ constants
Non-stationnaire	Statistiques variables dans le temps	Parole, musique	Analyse temps-fréquence nécessaire

III.4.2. Signaux déterministes répétitifs (périodiques)

Représentation mathématique

Un signal périodique $x(t)$ de période T satisfait : $x(t + T) = x(t) \forall t \in \mathbb{R}$

1. Décomposition en série de Fourier :

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

ou en forme complexe : $x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j2\pi n f_0 t}$

avec : $c_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-j2\pi n f_0 t} dt$

2. Exemples classiques

2. Tableau III.2 : Exemples des Signaux

Signal	Expression temporelle	Coefficients Fourier	Spectre
Sinusoïde	$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \phi)$	$c_{\pm 1} = \frac{A}{2} e^{\pm j\phi}$	Raie unique à f_0
Carré	$x(t) = \begin{cases} A & 0 \leq t < T/2 \\ -A & T/2 \leq t < T \end{cases}$	$c_n = \frac{2A}{j\pi n} (n \text{ impair})$	Harmoniques impaires $1/n$
Triangle	$x(t) = \frac{4A}{T} t - \frac{T}{4} - A$	$C_n = \frac{4A}{\pi^2 n^2}$	$\frac{1}{n^2}$
Dent de scie	$x(t) = \frac{2A}{T} t - A$	$c_n = \frac{A}{j\pi n}$	Toutes harmoniques $1/n$

Propriétés spectrales

- Théorème de Parseval :**

$$\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2$$

- Largeur de bande :** Fréquence contenant 99 % de l'énergie :

$$f_{99\%} = \min \left\{ f : \frac{\sum_{|n| \leq N} |c_n|^2}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2} \geq 0.99 \right\}$$

III.4.3. Signaux aléatoires (stochastiques)

1. Définitions fondamentales

Un processus aléatoire $X(t)$ est une collection de variables aléatoires indexées par le temps.

Fonction d'autocorrélation [30] [31]:

$$R_{XX}(\tau) = E[X(t)X(t + \tau)]$$

Densité spectrale de puissance (PSD) [30] [31]:

$$S_{XX}(f) = \mathcal{F}\{R_{XX}(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XX}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

2. Types de bruit aléatoire

Les différents types des bruits aléatoires sont représentés dans le tableau suivants :

3.Tableau III.3 : Bruit aléatoire

Type	PSD $S_{XX}(f)$	Autocorrélation $R_{XX}(\tau)$	Application
Bruit blanc	$N_0/2(\text{constant})$	$\frac{N_0}{2} \delta(\tau)$	Référence théorique
Bruit rose (1/f)	k/f	$\propto \ln(\frac{1}{\tau})$	Audio électronique
Bruit brownien	k/f^2	$\propto \tau$	Processus physiques
Bruit bleu	kf	$\propto \delta''(\tau)$	Audio haute fréquence
Bruit violet	kf^2	$\propto \delta'''(\tau)$	Détection transitoires

3. Moments statistiques

- **Moyenne :**

$$\mu_X = E[X(t)]$$

- **Variance :**

$$\sigma_X^2 = E[(X(t) - \mu_X)^2]$$

- **Coefficient de corrélation :**

$$\rho_{XY} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

4. Processus stationnaires

Un processus est **stationnaire au sens large** si :

1. $E[X(t)] = \mu_X(\text{constante})$
2. $R_{XX}(\tau) = E[X(t)X(t + \tau)]$ dépend uniquement de τ

III.4.4. Signaux pseudo-aléatoires

1. Définition mathématique

Un signal pseudo-aléatoire est **déterministe** mais possède des propriétés statistiques similaires à un signal aléatoire.

Séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS) :

$$a_n \in \{-1, +1\} \text{ avec } P(a_n = +1) = P(a_n = -1) = 0.5$$

Générateur LFSR (Linear Feedback Shift Register) [32]:

$$a_n = \bigoplus_{i=1}^L c_i a_{n-i} \text{ (XOR modulo 2)}$$

où c_i sont les coefficients de rétroaction.

2. Propriétés statistiques

Le tableau suivant présente les propriétés statistiques signaux pseudo-aléatoires

4. Tableau III.4 : Propriétés Statiques des signaux pseudo-aléatoires

Propriété	Valeur théorique	Mesure
Moyenne	$\mu = 0$	$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n$
Variance	$\sigma^2 = 1$	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n^2$
Autocorrélation	$R(\tau) = \delta(\tau)$	$\hat{R}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} a_n a_{n+\tau}$
Distribution	Uniforme $\{-1, +1\}$	Histogramme fréquences

3. Applications

- **Communications** : Séquences d'étalement (CDMA, GPS)
- **Test de systèmes** : Identification de réponse impulsionnelle
- **Cryptographie** : Générateurs de nombres pseudo-aléatoires

III.4.5. Signaux acoustiques

1. Représentation mathématique

Un signal acoustique $p(t)$ représente la **pression acoustique** relative à la pression atmosphérique.

Équation d'onde acoustique (1D) :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

où $c \approx 343 \text{ m/s}$ est la vitesse du son dans l'air.

2. Analyse spectrale acoustique

Transformée de Fourier à court terme (STFT) [33]:

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

où $w(t)$ est une fenêtre temporelle (Hanning, Hamming).

Spectrogramme :

$$S(t, f) = |X(t, f)|^2$$

3. Caractéristiques psycho acoustiques [35]

5. Tableau III.5 : Caractéristiques psycho acoustiques

Paramètre	Définition mathématique	Unité
Niveau sonore	$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right)$	dB SPL
Timbre	Distribution spectrale harmoniques	-
Hauteur	Fréquence fondamentale f_0	Hz
Intensité	$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$	W/m ²

avec $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ (seuil d'audition), $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ (densité air).

III.4.6. Signaux musicaux

1. Structure harmonique

Un son musical est composé d'une **fréquence fondamentale** f_0 et de ses **harmoniques** nf_0 :

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(2\pi n f_0 t + \phi_n)$$

Rapport harmonique : $H_n = \frac{A_n}{A_1}$ (amplitude relative harmonique n)

2. Échelles musicales

Gamme tempérée (12 demi-tons) :

$$f_k = f_0 \cdot 2^{k/12} \quad k = 0, 1, \dots, 11$$

Intervalles consonants (rapports rationnels) :

- Octave : 2: 1
- Quinte juste : 3: 2
- Quarte juste : 4: 3

- Tierce majeure : 5: 4

3. Analyse musicale avancée

Constant-Q Transforme (CQT) [34]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] w_k[n] e^{-j2\pi Qn/N_k}$$

où Q est le facteur de qualité constant, N_k varie avec la fréquence.

Avantage : Résolution fréquentielle logarithmique (comme l'oreille humaine).

III.4.7. Outils mathématiques d'analyse

1. Transformées intégrales [30] [33] [34]

6. Tableau III.6 : Transformées intégrales

Transformée	Définition	Domaine d'application
Fourier	$X(f) = \int x(t) e^{-j2\pi f t} dt$	Signaux stationnaires
Laplace	$X(s) = \int x(t) e^{-st} dt$	Systèmes linéaires
Wavelet	$X(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$	Signaux non-stationnaires
Hilbert	$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau$	Enveloppe analytique

2. Analyse temps-fréquence

Distribution de Wigner-Ville [33]:

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$

Avantages : Résolution optimale

Inconvénients : Termes d'interférence croisés

3. Statistiques d'ordre supérieur

Bi spectre (3ème ordre) :

$$B_x(f_1, f_2) = E[X(f_1)X(f_2)X^*(f_1 + f_2)]$$

Tri spectre (4ème ordre) :

$$T_x(f_1, f_2, f_3) = E[X(f_1)X(f_2)X(f_3)X^*(f_1 + f_2 + f_3)]$$

Utilisation : Détection de non-linéarités, phase couplée

III.4.8. Tableau comparatif complet

7. Tableau III.7 : Tableaux Comparative

Type de signal	Stationnarité	Prédictibilité	Bande passante	Outils d'analyse
Périodique	Stationnaire	100 %	Discrète	Fourier, autocorrélation
Quasi-périodique	Stationnaire	Partielle	Discrète non harmonique	CQT, STFT
Aléatoire stationnaire	Stationnaire	0 %	Continue	PSD, moments statistiques
Aléatoire non-stationnaire	Non-stationnaire	0 %	Variable	Wavelet, spectrogramme
Pseudo-aléatoire	Stationnaire	Déterministe	Continue	Autocorrélation, tests statistiques
Transitoire	Non-stationnaire	Faible	Large	STFT, wavelet
Musical	Quasi-stationnaire	Partielle	Logarithmique	CQT, pitch detection
Parole	Non-stationnaire	Faible	80 Hz – 8 kHz	LPC, MFCC, spectrogramme

III.4.9. Applications pratiques

1. Détection de défauts mécaniques

Analyse vibratoire d'une machine tournante :

- **Signal normal** : Harmoniques de la fréquence de rotation
- **Défaut roulement** : Fréquences caractéristiques f_{BPFO} , f_{BPFI}
- **Déséquilibre** : Augmentation harmonique fondamentale

2. Reconnaissance vocale

Extraction de **MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients)** :

1. Fenêtrage signal (25 ms)
2. Transformée Fourier
3. Filtrage banc de filtres Mel

4. Logarithme énergies
5. Transformée cosinus discrète inverse

3. Compression audio (MP3)

Principe psycho acoustique :

- **Masquage fréquentiel** : Un ton fort masque les tons faibles proches en fréquence
- **Masquage temporel** : Un son fort masque les sons faibles juste avant/après
- **Allocation bits** : Plus de bits pour composantes audibles, moins pour masquées

III.5. Génération du signal déphasé de π (180°)

Pour tous les types de signaux : déterministes, aléatoires, acoustiques, musicaux

III.5.1. Principe fondamental du déphasage de π

1. Définition mathématique

Pour un signal temporel $x(t)$, le signal déphasé de π est :

$$y(t) = x(t + \tau) \text{ où } \tau = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f_0}$$

Pour un **déphasage temporel constant** (indépendant de la fréquence) :

$$y(t) = x(t - \tau) \text{ avec } \tau = \frac{1}{2f_{ref}}$$

Pour un **déphasage de phase constant** (π radians) :

$$Y(f) = X(f) \cdot e^{-j\pi} = -X(f)$$

III.5.2. Signaux sinusoïdaux

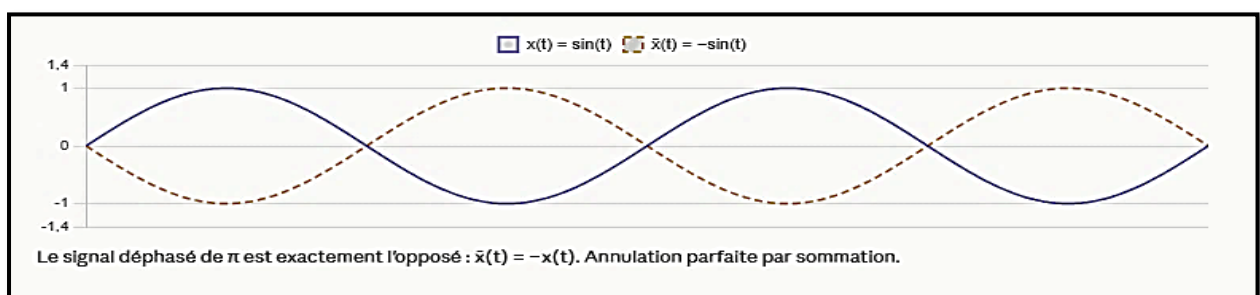


Figure III.3 : Signal déphasé de π l'opposé

1. Cas idéal – Déphasage exact

Soit un signal sinusoïdal :

$$x(t) = A\sin(2\pi f_0 t + \phi)$$

Le signal déphasé de π est :

$$y(t) = A\sin(2\pi f_0 t + \phi + \pi) = -A\sin(2\pi f_0 t + \phi) = -x(t)$$

Preuve :

$$\sin(\theta + \pi) = -\sin(\theta) \forall \theta \in \mathbb{R}$$

2. Déphasage temporel équivalent

$$\tau = \frac{\pi}{2\pi f_0} = \frac{1}{2f_0} = \frac{T}{2}$$

$$y(t) = x\left(t - \frac{T}{2}\right) = A\sin\left(2\pi f_0 \left(t - \frac{T}{2}\right) + \phi\right) = A\sin(2\pi f_0 t - \pi + \phi) = -A\sin(2\pi f_0 t + \phi) = -x(t)$$

III.5.3. Signaux périodiques (carré, triangle, dent de scie)

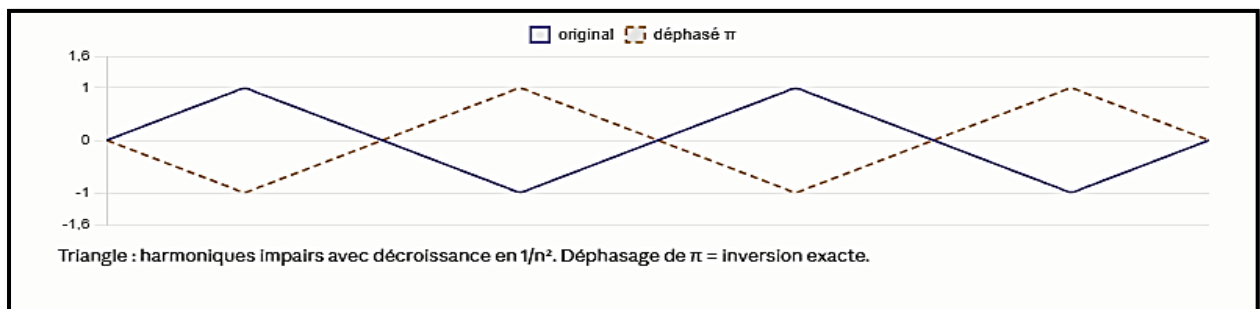


Figure III.4 : Signal déphasé π triangle

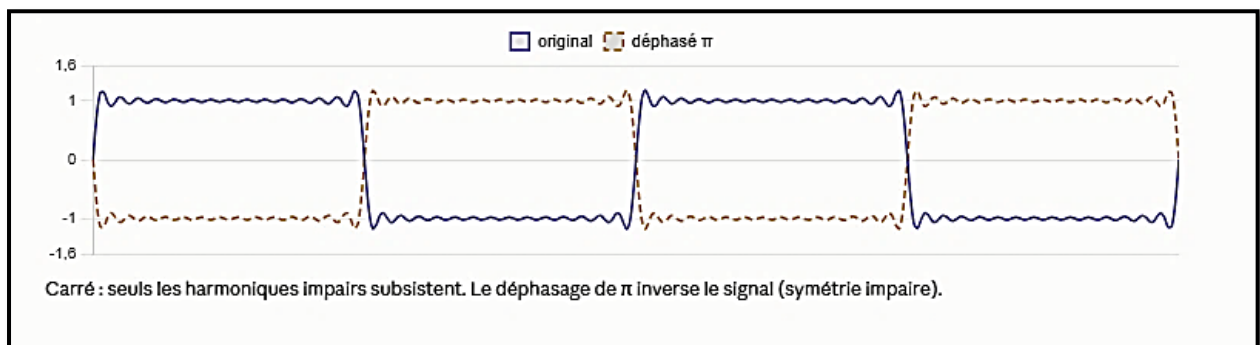


Figure III.5 : Signal déphasé π carré

1. Décomposition en série de Fourier

Tout signal périodique $x(t)$ de période T peut s'écrire :

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

Le signal déphasé de π devient :

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n f_0 t + n\pi) + b_n \sin(2\pi n f_0 t + n\pi)]$$

2. Propriétés trigonométriques :

$$\cos(\theta + n\pi) = (-1)^n \cos(\theta) \quad \sin(\theta + n\pi) = (-1)^n \sin(\theta)$$

Donc :

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n [a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

3. Cas particuliers

8. Tableau III.8 : Effet de déphasage π sur la série de Fourier

Signal	Série de Fourier	Signal déphasé π
Carré	$x(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin(2\pi(2k+1)f_0 t)}{2k+1}$	$y(t) = -\frac{4A}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin(2\pi(2k+1)f_0 t)}{2k+1}$ $= -x(t)$
Triangl e	$x(t) = \frac{8A}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \sin(2\pi(2k+1)f_0 t)}{(2k+1)^2}$	$y(t) = \frac{8A}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} \sin(2\pi(2k+1)f_0 t)}{(2k+1)^2}$ $= -x(t)$
Dent de scie	$x(t) = \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \sin(2\pi n f_0 t)}{n}$	$y(t) = \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin(2\pi n f_0 t)}{n}$ $= -x(t)$

Note : Pour tous les signaux périodiques **impairs** ($x(-t) = -x(t)$), le déphasage de π équivaut à l'inversion : $y(t) = -x(t)$.

III.5.4. Signaux aléatoires (stochastiques)

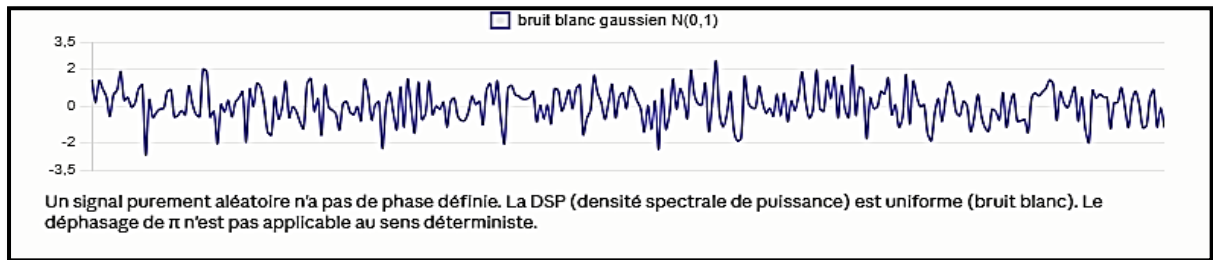


Figure III.5 : Signal Aléatoire

1. Définition mathématique

Un processus aléatoire $X(t)$ est une collection de variables aléatoires indexées par le temps.

Le processus déphasé de π est : $Y(t) = -X(t)$

2. Propriétés statistiques

9. Tableau III.9 : Propriétés Statistiques du signal original et déphasé

Propriété	Processus original $X(t)$	Processus déphasé $Y(t)$
Moyenne	$\mu_X = E[X(t)]$	$\mu_Y = E[-X(t)] = -\mu_X$
Variance	$\sigma_X^2 = E[(X - \mu_X)^2]$	$\sigma_Y^2 = E[(-X + \mu_X)^2] = \sigma_X^2$
Autocorrélation	$R_{XX}(\tau) = E[X(t)X(t + \tau)]$	$R_{YY}(\tau) = E[(-X(t))(-X(t + \tau))] = R_{XX}(\tau)$
PSD	$S_{XX}(f) = \mathcal{F}\{R_{XX}(\tau)\}$	$S_{YY}(f) = S_{XX}(f)$

3. Types de bruit spécifiques

10. Tableau III.10 : Invariance de la PSD par déphasage

Type de bruit	PSD $S_{XX}(f)$	Signal déphasé $Y(t)$	PSD $S_{YY}(f)$
Bruit blanc	$N_0/2$	$Y(t) = -X(t)$	$N_0/2$
Bruit rose (1/f)	k/f	$Y(t) = -X(t)$	k/f
Bruit brownien	k/f^2	$Y(t) = -X(t)$	k/f^2

III.5.5. Signaux pseudo-aléatoires

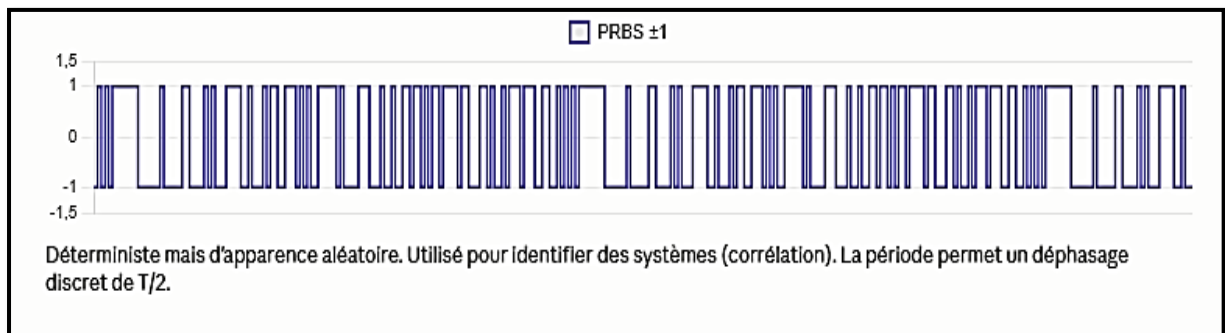


Figure III.6 : Signal pseudo-aléatoire

1. Définition

Une séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS) :

$$a_n \in \{-1, +1\} \text{ avec } P(a_n = +1) = P(a_n = -1) = 0.5$$

2. Déphasage de π

Pour une séquence binaire : $b_n = -a_n$

Propriétés :

- Si $a_n = +1 \rightarrow b_n = -1$
- Si $a_n = -1 \rightarrow b_n = +1$

L'autocorrélation reste identique : $R_{bb}(\tau) = R_{aa}(\tau)$

III.5.6. Signaux acoustiques

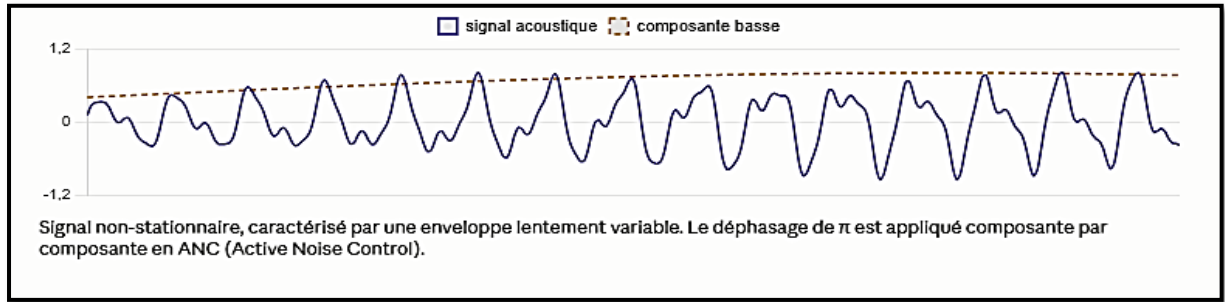


Figure III.7 : Déphasage π appliqué par composante ANC

1. Représentation mathématique

Signal acoustique $p(t)$ (pression relative) :

$$p(t) = \sum_{k=1}^N A_k(t) \sin(2\pi f_k(t)t + \phi_k(t))$$

où $A_k(t)$, $f_k(t)$, $\phi_k(t)$ peuvent être variables dans le temps.

2. Déphasage de π

$$\begin{aligned} p_{\text{dephase}}(t) &= \sum_{k=1}^N A_k(t) \sin(2\pi f_k(t)t + \phi_k(t) + \pi) \\ &= - \sum_{k=1}^N A_k(t) \sin(2\pi f_k(t)t + \phi_k(t)) = -p(t) \end{aligned}$$

Condition : Le déphasage de π est exact **uniquement** si toutes les composantes fréquentielles sont déphasées simultanément de π .

3. Analyse par STFT (Short-Time Fourier Transforme)

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$

Signal déphasé : $Y(t, f) = X(t, f) \cdot e^{-j\pi} = -X(t, f)$

Transformation inverse : $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(t, f) e^{j2\pi f t} df = - \int_{-\infty}^{\infty} X(t, f) e^{j2\pi f t} df = -x(t)$

III.5.7. Signaux musicaux

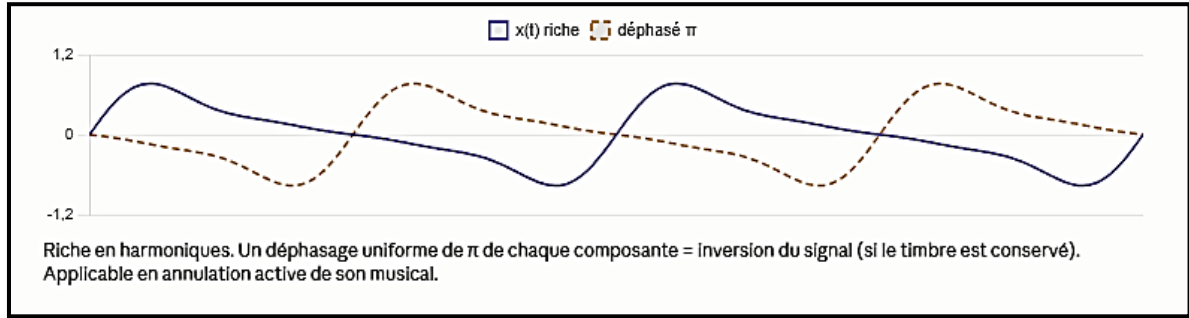


Figure III.8 : Déphasage π en harmonique

1. Structure harmonique

Signal musical: $x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(t) \sin(2\pi n f_0(t)t + \phi_n(t))$

Signal déphasé : $y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(t) \sin(2\pi n f_0(t)t + \phi_n(t) + \pi) = - \sum_{n=1}^{\infty} A_n(t) \sin(2\pi n f_0(t)t + \phi_n(t)) = -x(t)$

2. Déphasage par note (pitch-specific)

Pour un déphasage par note spécifique :

$$y(t) = x(t) - 2 \sum_{k \in \text{notes}} A_k(t) \sin(2\pi f_k t + \phi_k(t))$$

III.5.8. Signaux modulés (AM, FM, PM)

1. Modulation d'amplitude (AM)

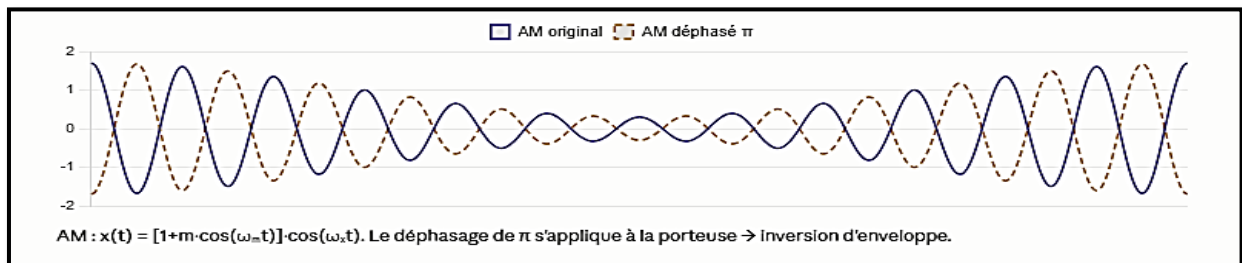


Figure III.9 : AM Déphasé π

Signal AM : $x(t) = [1 + m(t)] \cos(2\pi f_c t)$

Signal déphasé : $y(t) = [1 + m(t)]\cos(2\pi f_c t + \pi) = -[1 + m(t)]\cos(2\pi f_c t) = -x(t)$

2. Modulation de fréquence (FM)

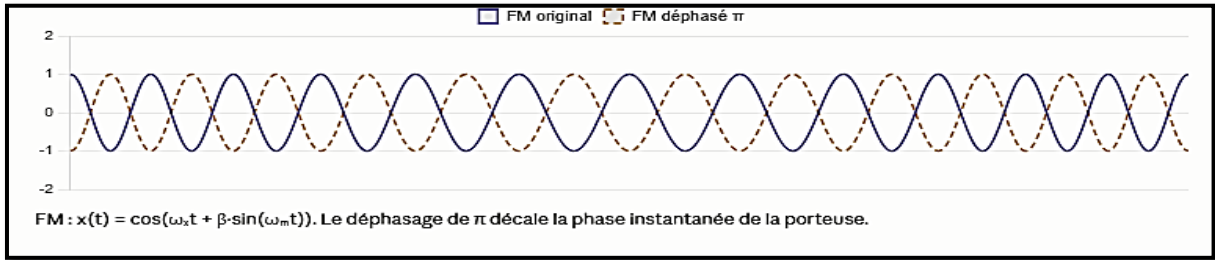


Figure III.10 : FM Déphasé π

3. Signal FM : $x(t) = A\cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau\right)$

Signal déphasé : $y(t) = A\cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau + \pi\right) = -A\cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau\right) = -x(t)$

4. Modulation de fréquence (PM)

III.5.9. Méthodes numériques de déphasage

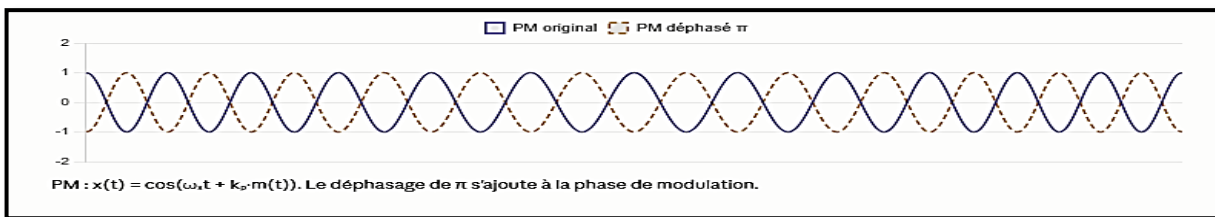


Figure III.11 : PM Déphasé π

1. Inversion directe (méthode la plus simple)

L'inversion directe est la méthode de déphasage numérique la plus simple — elle consiste à multiplier le signal par -1 , ce qui équivaut à un déphasage de exactement 180°

2. **Principe mathématique** : si le signal original est $x(t) = A \cdot \sin(\omega t)$, alors son inverse est :

$-x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \pi)$, ce qui correspond exactement à π radians (180°) de déphasage.

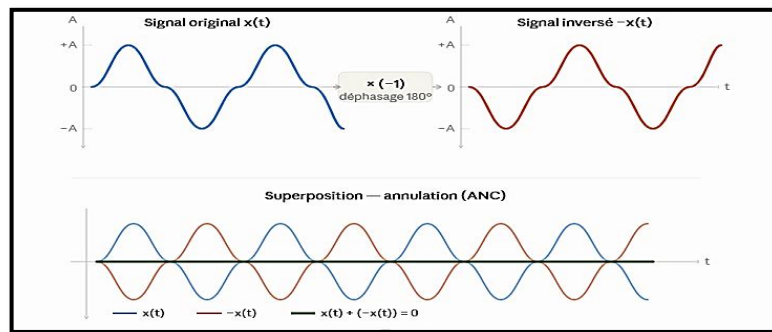


Figure III.12 : Signal Original $x(t)$ et le Signal inversé $-x(t)$

III.5.10. Tableau comparatif

11. Tableau III.11 : Analyse comparative des méthodes d'inversion de signal

Méthode	Complexité	Latence	Précision	Adaptabilité	Meilleure Utilisation
Inversion directe	$O(N)$	0	100 %	Non	Signaux déterministes
FFT/IFFT	$O(N \log N)$	$N/2$	100 %	Non	Signaux stationnaires
STFT	$O(N \log N)$	Fenêtre/2	95–99 %	Oui	Signaux non-stationnaires
Filtre FIR	$O(N \cdot M)$	$M/2$	90–98 %	Oui	Temps réel
Hilbert	$O(N \log N)$	$N/2$	95 %	Non	Analyse fréquentielle
CQT	$O(N \log N)$	Variable	98 %	Oui	Signaux musicaux

III.6. Conclusion :

Ce chapitre a présenté les bases théoriques et mathématiques de la réduction active du bruit.

Le principe d'interférence destructive a été détaillé, montrant qu'un signal anti-bruit correctement calculé permet d'annuler le bruit indésirable de manière efficace.

L'étude des signaux déterministes, stochastiques et acoustiques a mis en évidence la diversité des outils d'analyse à maîtriser, notamment la transformée de Fourier à court terme et les ondelettes.

Ces acquis serviront de base à la réalisation matérielle et logicielle du système, présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : MATERIELS ET LOGICIEL

IV.1. Introduction :

Une fois les notions théoriques posées, ce chapitre passe à la construction effective du robot. La carte ESP32 a été choisie comme unité centrale [36] : elle assure le traitement des signaux audio, mais aussi la communication sans fil et la gestion des périphériques via les bus I2S, I2C et SPI [37]. Pour capter le bruit ambiant, un microphone INMP441 est utilisé. Un amplificateur PAM8403 [38] permet de restituer le signal anti-bruit. Le robot embarque aussi un capteur à ultrasons HC-SR04 [39] pour se repérer face aux obstacles, deux moteurs à courant continu pour ses déplacements [40], et un servomoteur SG90 pour orienter éventuellement un capteur. Chaque élément est ici décrit dans ses caractéristiques essentielles et sa fonction précise au sein de l'ensemble.

Le matériel utilisé :

IV.2. La carte ESP32

L'ESP32 est un système sur puce (SoC) conçu par Espressif Systems [36], reconnu pour ses performances élevées associées à une consommation énergétique réduite. Il intègre nativement une connectivité sans fil Wi-Fi [41] (norme 802.11 b/g/n, bande 2,4 GHz) ainsi qu'une interface Bluetooth en mode double (classique et BLE Bluetooth Low Energy), ce qui en fait un composant de référence dans les systèmes embarqués et les applications de l'Internet des Objets (IoT) [42].

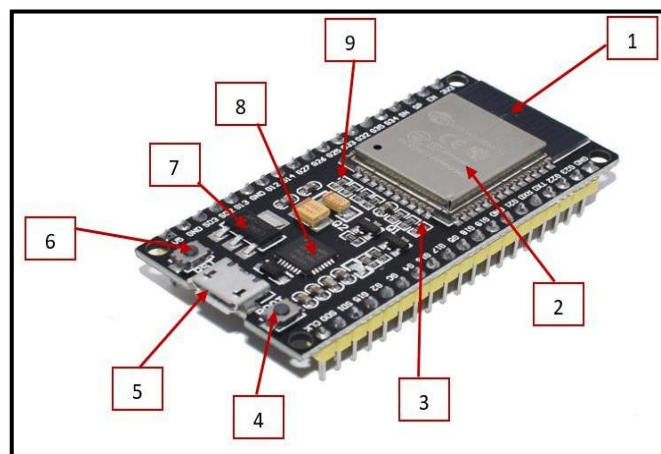


Figure IV.1 : Module DevKitC ESP32 – version 38 broches.

IV.2.1 Éléments constitutifs du module

Le module DevKitC intègre les éléments fonctionnels suivants [36]:

- **Antenne 2,4 GHz** : assure les transmissions radio pour les protocoles Wi-Fi et Bluetooth.
- **Puce ESP-WROOM-32** : constitue le cœur du module, regroupant le processeur et les mémoires intégrées.
- **LED de signalisation** : indicateur visuel de l'état opérationnel du système.
- **Bouton BOOT** : maintenu enfoncé lors du chargement d'un nouveau programme depuis l'environnement de développement.
- **Connecteur USB Micro-B** : assure à la fois la programmation de la puce et son alimentation sous 5 V.
- **Bouton EN/Reset** : déclenche la réinitialisation matérielle du module.
- **Régulateur de tension** : maintient une sortie stable à 3,3 V avec une capacité de fourniture jusqu'à 600 mA.
- **Pont USB-UART** : convertisseur de protocole permettant la communication série entre l'ordinateur hôte et la puce ESP32.

IV.2.2 Caractéristiques techniques

Les principales spécifications techniques du module ESP32 sont présentées ci-après [36] [43] :

- **Processeur** : Tensilica Xtensa LX6, 32 bits, double cœur.
- **Wi-Fi** : bande 2,4 GHz, norme 802.11 b/g/n, débit maximal 150 Mbits/s.
- **Bluetooth** : double mode – Bluetooth classique et Bluetooth Low Energy (BLE).
- **Alimentation** : 5 V DC via USB ; tension logique interne de 3,3 V DC.
- **Fréquence d'horloge** : jusqu'à 240 MHz ; puissance de traitement jusqu'à 600 DMIPS.
- **Mémoires** : RAM 512 Ko, Flash 4 Mo, SRAM 520 Ko, ROM 448 Ko.
- **Dimensions / masse** : 54,8 × 28,6 × 8 mm – 7,5 g.

IV.2.3 Brochage

Le module ESP32 est doté de 31 broches GPIO configurables par programmation [36], de seize canaux ADC (12 bits), de deux canaux DAC (8 bits) et de 28 canaux PWM [44]. Le schéma de brochage est présenté à la Figure IV.2 et les fonctions sont synthétisées dans le Tableau IV.1.

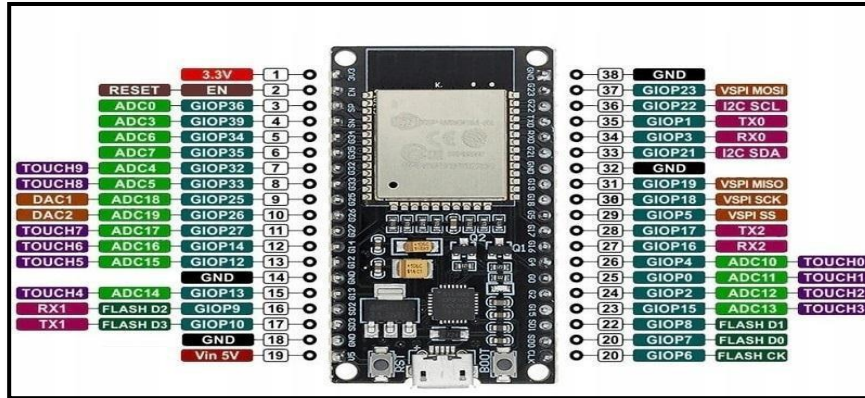


Figure IV.2 : Schéma de brochage du module ESP32.

1. Tableau IV.1 : Fonctions des principales broches du module ESP32.

Broche / Groupe	Rôle et description fonctionnelle
Alimentation 3,3 V	Sortie du régulateur intégré, destinée à l'alimentation de composants externes.
Alimentation VIN	Entrée d'alimentation directe (plage 4,5 V à 12 V).
GND	Référence de masse commune.
Enable (EN)	Déclenchement de la réinitialisation matérielle du microcontrôleur.
GPIO – 31 broches	Entrées/sorties à usage général configurables par programmation
ADC – 16 canaux (12 bits)	Conversion analogique-numérique sur 4096 niveaux de résolution.
DAC – 2 canaux (8 bits)	Génération de tensions analogiques depuis des valeurs numériques.
PWM – 28 canaux	Production de signaux à rapport cyclique variable pour la commande des actionneurs.
Tactile capacitif – 10 GPIO	Détection de contact par mesure de variation capacitive au toucher.

IV.2.4 Interfaces de communication

L'ESP32 supporte plusieurs protocoles de communication série [36] [46], garantissant une grande souplesse d'interfaçage avec les périphériques du système.

1. Interface UART

Trois contrôleurs UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) [46] sont disponibles, permettant la communication asynchrone avec des capteurs, des modules tiers ou un ordinateur hôte. L'affectation des broches est détaillée dans le Tableau IV.2.

2. Tableau IV.2 : Affectation des broches UART de l'ESP32.

Signal	UART0	UART1	UART2
TX (Émetteur)	Broche 1	Broche 10	Broche 17
RX (Récepteur)	Broche 3	Broche 9	Broche 16

2. Interface I2C

Le protocole I2C est implémenté sur deux broches dédiées : GPIO 21 pour la ligne de données bidirectionnelle (SDA) et GPIO 22 pour le signal d'horloge synchrone (SCL). Ce bus permet la connexion de multiples périphériques avec seulement deux conducteurs [47].

3. Interface SPI

Trois contrôleurs SPI (Serial Peripheral Interface) sont intégrés : SPI1 est réservé à l'accès interne à la mémoire Flash embarquée, tandis que SPI2 et SPI3 sont accessibles par l'utilisateur. [48]

3. Tableau IV.3 : Brochage des bus SPI2 et SPI3 de l'ESP32

Signal	SPI2	SPI3
SCLK (Horloge)	Broche 14	Broche 18
MOSI (Maître → Esclave)	Broche 13	Broche 23
MISO (Esclave → Maître)	Broche 12	Broche 19
SS (Sélection esclave, actif bas)	Broche 15	Broche 5

IV.3. Capteur de distance à ultrasons HC-SR04

Le HC-SR04 est un module de télémétrie sans contact fondé sur la propagation d'ondes ultrasoniques [39] [49]. Il associe deux transducteurs piézoélectriques : l'émetteur génère une rafale d'impulsions à 40 kHz fréquence inaudible pour l'oreille humaine tandis que le récepteur capte l'écho renvoyé par tout obstacle situé dans la trajectoire du faisceau. La durée de propagation aller-retour est ensuite convertie en distance grâce à la relation [50] :

$$Distance(cm) = \frac{[vitesse\ de\ de\ son(cm/\mu s) \times durée(\mu s)]}{2}$$

Le module offre une plage de détection comprise entre 2 cm et 400 cm (~13 pieds), avec une résolution de 3 mm [39]. Ces caractéristiques le rendent adapté aux tâches de navigation et d'évitement d'obstacles du robot mobile dans l'environnement industriel ciblé [51].

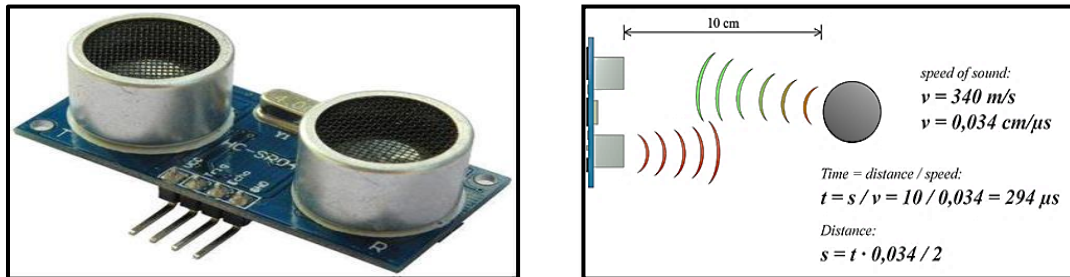


Figure IV.3 : Capteur ultrasonique HC-SR04 et illustration du principe de mesure de distance.

Le module dispose de quatre broches d'interface :

- **VCC** : alimentation du capteur sous 5 V DC.
- **Trig** : broche de déclenchement — une impulsion haute d'au moins 10 μs provoque l'émission d'une salve ultrasonique.
- **Echo** : reste à l'état haut pendant toute la durée de trajet de l'onde ; la mesure de cette durée fournit la distance.
- **GND** : référence de masse.

IV.4. Architecture d'alimentation du système

La conception de la chaîne d'alimentation constitue une étape critique dans la réalisation d'un système embarqué ; Une mauvaise sélection des niveaux de tension ou une instabilité de l'alimentation peut provoquer des dysfonctionnements graves, voire endommager irrémédiablement les composants électroniques [53]. Dans ce projet, deux batteries de 3,5 V montées en série constituent la source primaire d'énergie, fournissant ainsi une tension totale de 7 V. Cette tension est abaissée et régulée à 5 V par un régulateur linéaire (LM7805) [54],

assurant une alimentation stable au microcontrôleur et à l'ensemble des modules périphériques fonctionnant à ce niveau de tension [55].



Figure IV.4: Batteries 7V retenue comme source d'alimentation principale du système.

IV.5. Moteur à courant continu (MCC)

Un moteur à courant continu est un convertisseur électromécanique assurant la transformation bidirectionnelle d'énergie [40] [56] entre une source de courant continu et un mécanisme rotatif. Selon la direction du transfert énergétique, il fonctionne soit en mode moteur (conversion électrique $\rightarrow$ mécanique), soit en mode génératrice (conversion mécanique $\rightarrow$ électrique). Ce principe de conversion, formalisé notamment par les travaux de Zénobe Gramme [57], demeure au fondement des actionneurs électriques rotatifs modernes .

Sur le plan structural, le MCC comprend trois sous-ensembles essentiels [40].

Le stator, partie fixe, génère un flux magnétique stationnaire à l'aide d'aimants permanents ou de bobinages (inducteur). Le rotor, partie tournante, est équipé d'un enroulement connecté à un collecteur rotatif qui inverse périodiquement la polarité du courant, maintenant ainsi un couple moteur unidirectionnel. Les balais assurent le contact électrique glissant entre le circuit fixe et le collecteur.



Figure IV.5: Motoréducteur DC

Le couple moteur C (N·m), défini par la relation $C = F \times r$ [56], représente la capacité de l'arbre à entraîner une charge en rotation. Pour les applications de robotique mobile, des réducteurs à engrenages sont associés aux MCC [58] afin d'amplifier le couple disponible au détriment de la vitesse angulaire, optimisant la traction et la précision de déplacement.

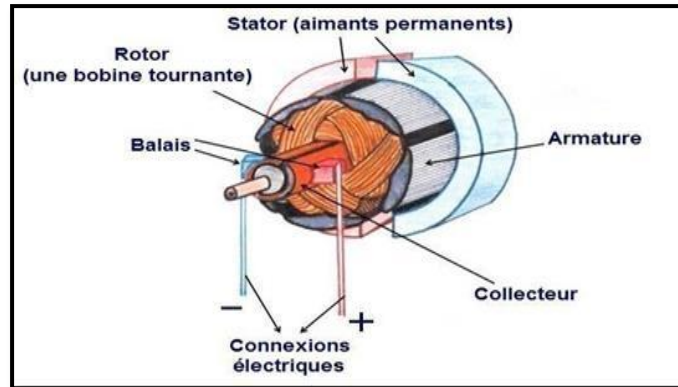


Figure IV.6 : Structure interne d'un moteur à courant continu.

IV.6. Afficheur LCD 16×2

Les modules d'affichage à cristaux liquides (LCD Liquid Crystal Display) [59] constituent une interface homme-machine répandue dans les systèmes à microcontrôleur. Le modèle 16×2, composé de deux lignes de seize caractères, permet la visualisation en temps réel de variables du système [60] notamment, dans ce projet, la distance mesurée entre le robot et les obstacles environnants, ainsi que les niveaux sonores acquis [61].

Les principales broches d'interface du module sont : VDD (alimentation 5 V), VSS (masse), V0 (réglage du contraste via potentiomètre), RS (sélection de registre instruction/données), R/W (mode lecture ou écriture positionné en écriture lors du pilotage), E (signal de validation de transfert) et le bus bidirectionnel D0–D7 pour le transfert des commandes et caractères [59].

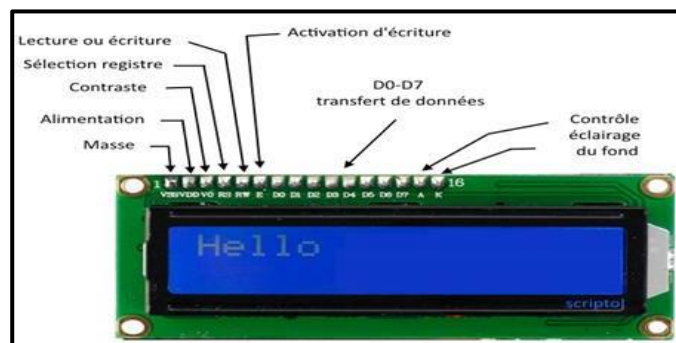


Figure IV.7 : Afficheur LCD 16×2 et description de ses broches de connexion.

IV.7. Microphone numérique INMP441

L'INMP441 est un microphone MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) omnidirectionnel à sortie numérique intégrée [62], sélectionné dans ce projet pour ses qualités acoustiques et sa simplicité d'interfaçage avec l'ESP32 [36]. Contrairement aux microphones analogiques conventionnels nécessitant un codec externe, ce composant délivre directement un flux audio numérique au format I2S [37] [63] (Inter-IC Sound) sur 24 bits, supprimant ainsi les sources de distorsion introduites par les étages analogiques de conversion [64].

Ses caractéristiques acoustiques sont bien adaptées aux environnements industriels [65] : un rapport signal sur bruit (SNR) de 61 dBA [62] assure une acquisition fidèle des signaux sonores, et la réponse en fréquence s'étend de façon linéaire sur la plage 60 Hz à 15 kHz. Le module fonctionne sous une tension comprise entre 1,8 V et 3,3 V pour une consommation typique de 1,4 mA, le rendant directement compatible avec le niveau logique de l'ESP32.

Son brochage I2S comprend: **VCC** (alimentation), **GND** (masse), **SD** (Serial Data sortie des données audio), **WS** (Word Select sélection du canal stéréo), **SCK** (Serial Clock horloge I2S) et **L/R** (sélection du canal : **GND** pour le canal gauche, **VCC** pour le canal droit) [62].



FigureIV.8 : Microphone numérique INMP441

IV.7.1.Comparaison des capteurs de son

4.Tableau IV.4:Tableau de comparaison des capteurs de son

Critère	INMP441	KY-037	KY-038	MAX9814
Type de capteur	Microphone MEMS numérique	Microphone électret + comparateur LM393	Microphone électret + comparateur LM393 (version compacte)	Microphone électret + ampli op à gain automatique (AGC)
Sortie	Numérique I2S (24 bits)	Analogique (AO) + Digitale seuil (DO)	Analogique (AO) + Digitale seuil (DO)	Analogique (signal audio amplifié)
Nature du signal	Flux audio numérique exploitable directement	Enveloppe amplifiée, pas un vrai signal audio	Enveloppe amplifiée, pas un vrai signal audio	Vrai signal audio analogique, qualité correcte

Critère	INMP441	KY-037	KY-038	MAX9814
	(échantillons PCM)			
Résolution / qualité audio	Très élevée, qualité « microphone de mesure »	Faible, bruitée, sortie AO quasi inutilisable pour de l'audio	Faible, similaire au KY-037	Moyenne à bonne (meilleure que KY-037/038)
Usage typique	Reconnaissance vocale, FFT/STFT, traitement du signal audio, ANC	Détection de bruit fort (clap, seuil), interrupteur sonore	Détection de bruit fort, alarme sonore	Visualiseur audio, égaliseur, capture de niveau sonore
Interface requise	I2S (nécessite un contrôleur avec périphérique I2S, ex. ESP32)	ADC simple + entrée digitale	ADC simple + entrée digitale	ADC simple
Directivité	Omnidirectionnel	Omnidirectionnel	Omnidirectionnel	Omnidirectionnel
Bruit de fond / SNR	Excellent (SNR élevé, ~61 dB typique)	Médiocre, sensible aux parasites d'alimentation	Médiocre	Correct, meilleur que KY-037/038 grâce à l'AGC
Complexité de mise en œuvre	Plus complexe (protocole I2S, configuration registres)	Très simple (branchement direct)	Très simple	Simple (ADC classique)
Coût	Modéré	Très faible	Très faible	Faible à modéré
Adapté à l'algorithme LMS/ANC	Oui — capture fidèle nécessaire pour calculer le signal anti-bruit	Non — signal trop dégradé, pas de forme d'onde exploitable	Non	Partiellement — meilleur que KY mais reste analogique (bruit de quantification ADC)

IV.7.2. Justification du choix du capteur INMP441

Pour un système de contrôle actif du bruit (ANC), le capteur d'acquisition doit restituer la **forme d'onde réelle** du bruit ambiant avec une haute-fidélité, car l'algorithme LMS a besoin d'un signal numérique propre pour calculer précisément le signal anti-bruit en opposition de phase (déphasage de 180°).

IV.7.3. Limites des capteurs KY-037 / KY-038

- Ces modules ne fournissent qu'une *enveloppe de niveau sonore* via un comparateur LM393 : ils indiquent seulement si un seuil de bruit est dépassé, sans reconstruire la forme du signal.
- Leur sortie analogique (AO) est faible et fortement bruitée, ce qui la rend **inexploitable** pour un traitement de type STFT/FFT ou un filtrage adaptatif.
- Ils sont conçus pour **la détection de seuil** (clap, alarme sonore), et non pour l'acquisition audio de précision.

IV.7.4. Avantages de l'INMP441

- Sortie numérique I2S 24 bits : flux audio directement exploitable, sans passer par un ADC externe bruité.
- Rapport signal sur bruit (SNR) élevé (~61 dB), garantissant une acquisition fidèle du bruit à traiter.
- Compatibilité native avec le périphérique I2S de l'ESP32, simplifiant l'intégration matérielle et logicielle.
- Absence de bruit de quantification lié à un ADC externe, contrairement à une solution analogique comme le MAX9814.

IV.8. Amplificateur audio PAM8403

Le PAM8403 est un circuit intégré d'amplification audio de classe D, conçu pour délivrer une puissance nominale de 3 W par canal (configuration stéréo, soit 3 W + 3 W) sous une alimentation de 5 V [38] [66]. Son architecture sans filtre de sortie le distingue des amplificateurs de classe AB traditionnels, lui conférant un encombrement réduit et un rendement énergétique nettement supérieur [67], facteurs déterminants dans les systèmes embarqués à autonomie contrainte [68].

Opérant sur une plage d'alimentation de 2,5 V à 5,5 V généralement via une source USB, ce module est compatible avec des impédances de charge comprises entre 4 Ω et 8 Ω . Dans ce projet, il amplifie le signal contra-acoustique produit par l'algorithme de réduction active du bruit [69] avant sa restitution par le haut-parleur. Certaines versions du module intègrent un potentiomètre de réglage du volume, facilitant l'ajustement du niveau d'émission in situ [38].

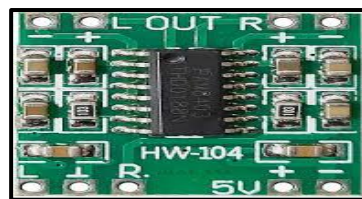


Figure IV.9 : Amplificateur audio PAM8403

IV.9. Servomoteur SG90

Le SG90 est un servomoteur compact à retour de position, couramment employé dans les applications de robotique requérant un positionnement angulaire précis [70]. Son fonctionnement repose sur une boucle de régulation fermée [71] : un capteur de position mesure en continu l'angle de l'arbre de sortie, et un circuit comparateur évalue l'écart entre la

position mesurée et la consigne reçue. Le circuit de commande pilote ensuite le moteur interne jusqu'à convergence vers l'angle cible.

La consigne angulaire est transmise par un signal PWM dont la largeur d'impulsion détermine la position souhaitée dans la plage 0° à 180° [72]. Alimenté sous 5 V, ce servomoteur peut être directement piloté par une broche PWM d'un microcontrôleur sans interface supplémentaire.



Figure IV.10 : Servomoteur SG90

IV.10. Pont en H L298N

Le L298N est un circuit intégré de puissance permettant le contrôle simultané de deux moteurs à courant continu en vitesse et en sens de rotation. Fondé sur une architecture en double pont en H [73] [74], il accepte une tension d'alimentation moteur comprise entre 5 V et 35 V et peut fournir jusqu'à 2A par canal. La vitesse est modulée par un signal PWM appliqué sur les entrées de commande, tandis que la direction est déterminée par l'état logique des broches de sélection. Le module intègre des diodes de roue libre [75] protégeant l'électronique de commande contre les surtensions induites par la commutation des bobinages moteurs [76].

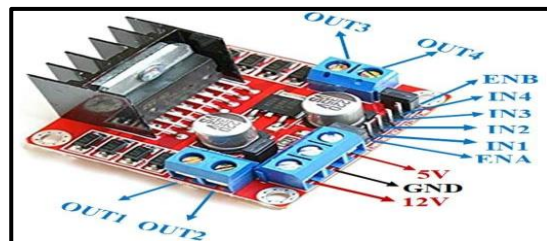


Figure IV.11 : Pont en H L298N

Le module L298N possède 11 broches (Tableau IV.4) qui lui permettent de communiquer avec le monde extérieur :

5. Tableau IV.5 : Différentes broches du module L298N.

Nom de la Broche	Fonction de chaque broche
OUT3 & OUT4	Les broches de connexion au moteur B.
ENB	utilisée pour activer le pont H et le contrôler de la vitesse du moteur B.
IN4 / IN3	utilisées pour contrôler le sens de rotation du moteur B.
ENA	pour activer le pont H et contrôler la vitesse du moteur A.
IN2 / IN1	utilisées pour contrôler le sens de rotation du moteur A.
GND	Broche de masse commune.
5V	Alimentation du circuit logique de communication à l'intérieur du circuit L298N .
VCC	Alimentation du moteur entre 5 et 35V.
OUT1 & OUT2	Les broches de connexion au moteur A.

IV.10.1 Caractéristiques

Les paramètres électriques du double pont en H (L298N) sont donnés ci-dessous [73] [77] :

- Composant de contrôle en puissance : L298N.
- Alimentation de la charge : de +5V à +35V.
- Courant Max (en pointe) : 2A.
- Tension de commande logique VSS : de +5 à +7V (alimentation interne de +5V).
- Courant de commande logique : de 0 à 36 mA.
- Tensions pour contrôle du sens : LOW : -0.3V~1.5V, High : 2.3V~Vss.
- Tensions pour contrôle "Enable" : LOW : -0.3V~1.5V, High : 2.3V~Vss.
- Puissance Max : 25Watt.

- Température de fonctionnement : de -25°C à +130°C.
- Dimensions : 60mm x 54mm et Poids : 48g

IV.11. Châssis mobile Robot4WD

Le châssis Robot4WD est une plateforme mécanique à quatre roues motrices (4WD Four Wheel Drive) constituant le support physique du robot développé dans ce mémoire. Sa conception modulaire facilite l'intégration des sous-systèmes électroniques et permet d'adapter la structure aux contraintes de l'application. Le kit comprend l'ensemble des pièces mécaniques (châssis, roues, motoréducteurs) ainsi que la connectique nécessaire au montage [78] [79].

La configuration 4WD assure une motricité satisfaisante sur les surfaces industrielles présentant des irrégularités mineures, et la disposition symétrique des roues confère au système la stabilité mécanique requise pour des déplacements contrôlés lors des campagnes de mesure acoustique [80] [81].

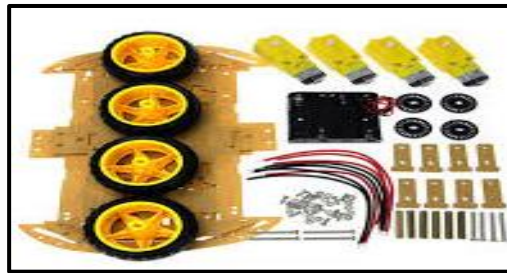


Figure IV.12 : Châssis mobile Robot4WD

IV.12. Câblage et interconnexions

Les connexions entre les différents modules du système sont assurées par des fils de liaison (jumper wires) conducteurs de faible section munis de connecteurs mâles ou femelles. Trois configurations sont disponibles : mâle-mâle (M-M), mâle-femelle (M-F) et femelle-femelle (F-F). Ces fils permettent d'établir des circuits sans soudure lors de la phase de prototypage, offrant une reconfigurabilité rapide en cas de modification de l'architecture matérielle [82] [83] [84].



Figure IV.13 : Câblage et interconnexions

IV.13. Tableau récapitulatif des composants du système

L'ensemble des composants électroniques constitutifs du système de détection et de réduction du bruit industriel [85].

6.Tableau IV.6 : Composants du système de détection et réduction du bruit industriel

Composant	Rôle dans le projet	Connexion	Description technique
Haut-parleur / Buzzer	Génération du signal contra-acoustique [86]		Restitue le signal audio déphasé de 180° calculé par l'algorithme LMS pour l'annulation active du bruit dans l'espace de travail [87][88].
Condensateur 100 nF	Découplage haute fréquence		Filtre céramique éliminant les parasites HF propagés sur le rail 5 V par la commutation des moteurs [89][90].
Filtre RC passe-bas	Anti-repliement spectral (ADC)		Filtre du 1er ordre ($f_c \approx 16$ kHz) atténuant les composantes au-delà de la fréquence de Nyquist, évitant le repliement spectral [91][92].
Résistance 10 k Ω	Pull-down sorties numériques DO		Maintient un niveau logique défini (0 V) en l'absence de signal, supprimant les états flottants sources de fausses interruptions [93].
Régulateur LM7805	Stabilisation à 5 V		Régulateur linéaire 3 broches (7–35 V $\rightarrow$ 5 V / 1 A max). Rejet des ondulations > 50 dB à 1 kHz, préservant la qualité des mesures acoustiques [94] [95].
Diode 1N4148	Redressement et protection contre les surtensions		Diode de commutation rapide utilisée pour le redressement du signal audio et la protection des entrées analogiques [96] [97].

IV.14 Environnement de développement logiciel

IV.14.1 L'IDE Arduino et le langage de programmation

La programmation des cartes Arduino repose sur un environnement de développement intégré (IDE) open-source dédié, s'appuyant sur un sous-ensemble simplifié du langage C++ [98][99]. Ce choix permet à des développeurs disposant de connaissances limitées en architecture matérielle de produire des programmes embarqués sans interaction directe avec le langage machine. La bibliothèque standard Arduino encapsule les opérations d'entrée/sortie, la gestion des temporisations et la communication série dans des fonctions de haut niveau, réduisant significativement la complexité du développement [101].

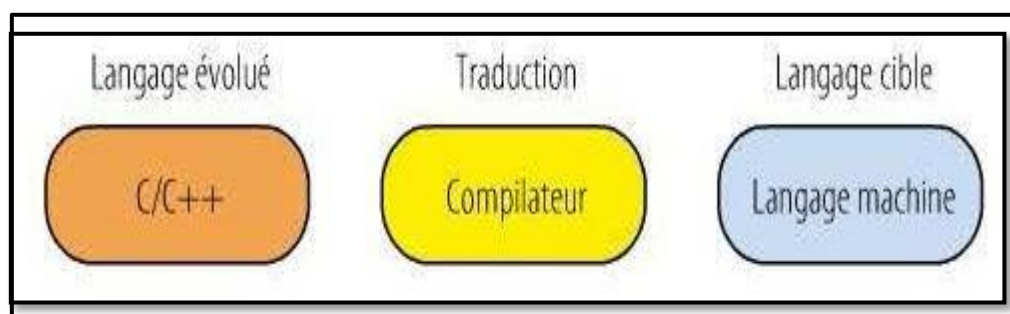


Figure IV.14: Modalités de communication et de programmation d'une carte Arduino.

IV.14.2 Structure d'un programme Arduino (sketch)

Tout programme Arduino, désigné par le terme sketch, s'articule autour de trois sections structurales [102] :

- **Déclaration des variables globales :** initialisation des constantes, variables et instances d'objets accessibles dans l'ensemble du programme.
- **Fonction setup() :** exécutée une seule fois au démarrage, elle configure les modes des broches, initialise les interfaces de communication et définit les paramètres d'amorçage du système [103].
- **Fonction loop() :** corps principal du programme, exécuté en boucle continue. Elle contient les instructions d'acquisition des capteurs, les traitements algorithmiques et la commande des actionneurs [104] [105].

Une fois le programme rédigé, il est compilé afin d'identifier d'éventuelles erreurs syntaxiques, puis téléversé dans la mémoire Flash du microcontrôleur par l'interface USB. L'environnement Arduino IDE regroupe l'ensemble de ces opérations dans une barre d'outils ergonomique et accessible [106] [107].

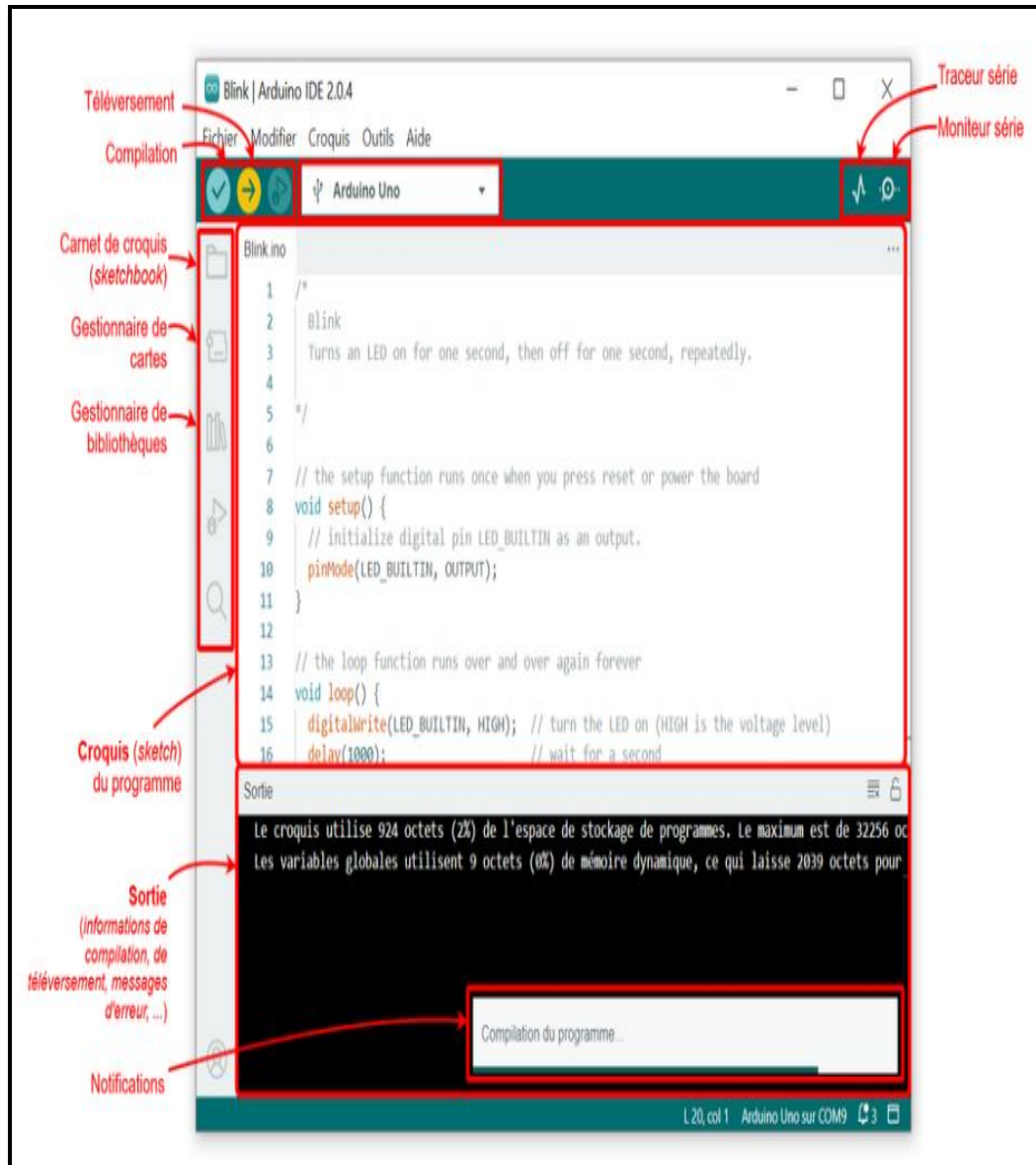


Figure IV.15 : Interface de l'environnement de développement Arduino IDE.

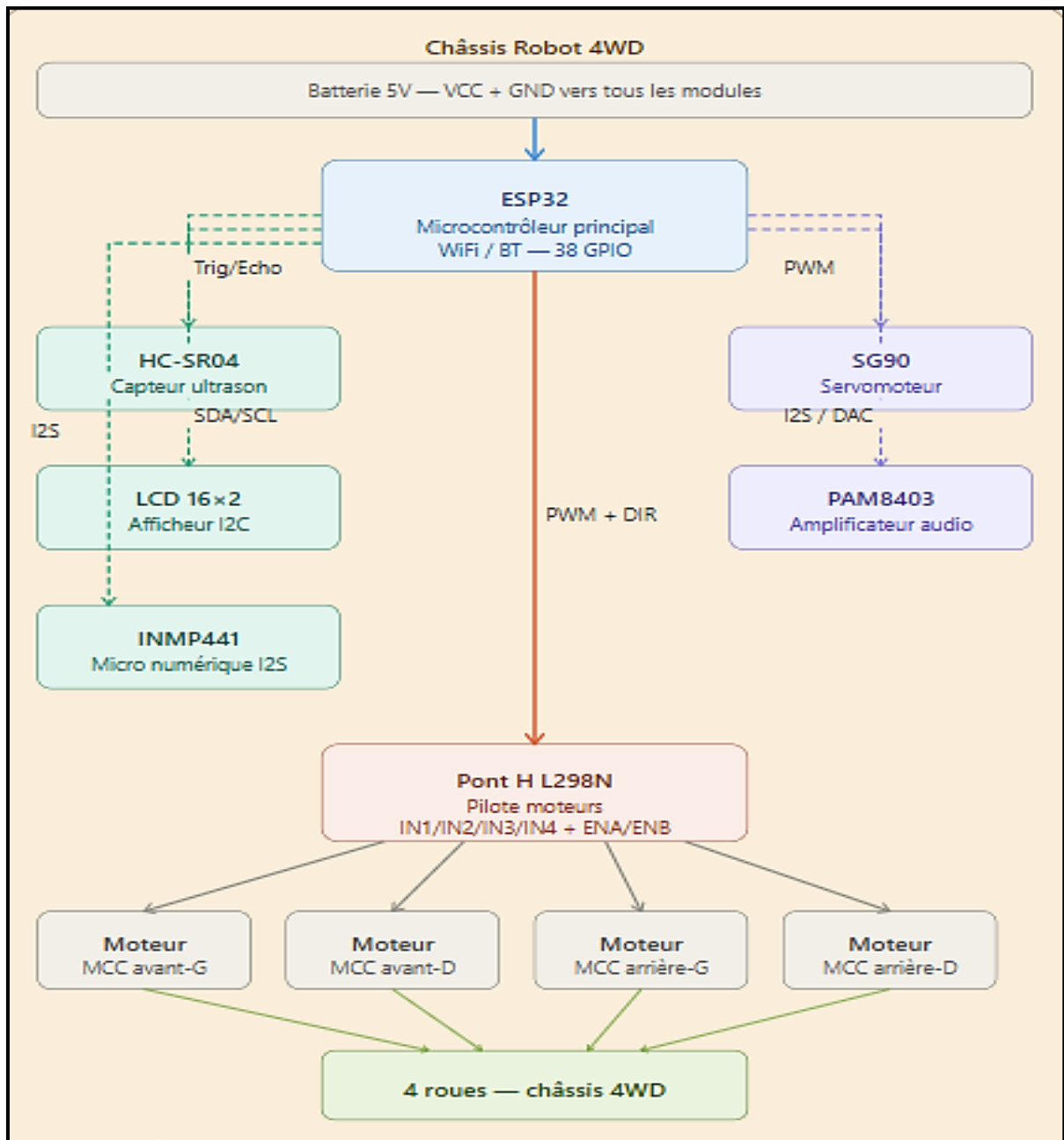


Figure IV.16 : Schéma Synoptique de système

IV.14.3. Programme :

```

#include <Arduino.h>
#include <ESP32Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <driver/i2s.h>
// -----
//   BROCHES MOTEURS L298N
// -----
#define MOTOR_D_IN1  12    // Moteur droit  IN1
#define MOTOR_D_IN2  13    // Moteur droit  IN2
#define MOTOR_D_PWM  14    // Moteur droit  ENA  (PWM)
    
```

```
#define MOTOR_G_IN1  26    // Moteur gauche IN3
#define MOTOR_G_IN2  27    // Moteur gauche IN4
#define MOTOR_G_PWM  25    // Moteur gauche ENB (PWM)
// -----
//  BROCHES CAPTEURS ULTRASON HC-SR04
// -----
#define TRIG_AVANT    15
#define ECHO_AVANT     4
#define TRIG_DROIT    16
#define ECHO_DROIT    17
#define TRIG_GAUCHE   18
#define ECHO_GAUCHE   19
// -----
//  SERVO SG90 (scan latéral)
// -----
#define SERVO_PIN      5
#define SERVO_CENTRE   90    // position neutre (face avant)
#define SERVO_DROITE   20    // regard à droite
#define SERVO_GAUCHE  160    // regard à gauche
// -----
//  I2S - INMP441 (microphone)
// -----
#define I2S_WS         22    // Word Select (LRCLK)
#define I2S_SCK        21    // Bit Clock   (BCLK)
#define I2S_SD         23    // Data      (SD)
// -----
//  I2S - DAC vers PAM8403 (anti-bruit)
//  On utilise I2S n°1 pour la sortie
// -----
#define I2S_DOUT       32    // Data OUT vers ampli PAM8403
#define I2S_BCLK       33    // Bit Clock sortie
#define I2S_LRC        34    // Left/Right Clock sortie
// -----
//  LCD I2C 16x2 (adresse par défaut 0x27)
// -----
#define LCD_ADDR       0x27
#define LCD_COLS       16
#define LCD_ROWS        2
// -----
//  PARAMÈTRES VITESSE & NAVIGATION
// -----
const int VITESSE_MAX    = 200;    // 0-255
const int VITESSE_LENTE  = 100;
const int DIST_OBSTACLE  = 18;    // cm - obstacle frontal
const int DIST_LATERAL   = 40;    // cm - obstacle latéral
const int DIST_CORRECTION = 13;    // cm - correction trajectoire
// -----
//  ANC - filtre adaptatif (LMS simplifié)
//  Fonctionne sur ESP32 Core 0 via tâche FreeRTOS
// -----
#define ANC_SAMPLES     256        // taille buffer I2S
#define ANC_MU           0.01f     // pas d'adaptation LMS
#define ANC_FILTER_LEN  32         // longueur du filtre FIR adaptatif
static float w[ANC_FILTER_LEN] = {0}; // coefficients filtre
static float x_buf[ANC_FILTER_LEN] = {0}; // buffer référence
static TaskHandle_t ancTaskHandle = NULL;
```

IV.15 Conclusion

Ce chapitre a recensé l'ensemble des composants matériels mobilisés pour la réalisation du robot, en précisant pour chacun ses caractéristiques techniques et son rôle au sein du système global. Le microcontrôleur ESP32 occupe une position centrale dans cette architecture, assurant la coordination entre l'acquisition du son par le microphone INMP441, le traitement de l'algorithme de réduction du bruit et la restitution du signal correctif via l'amplificateur PAM8403. La chaîne de mobilité, articulée autour du pont en H L298N et du servomoteur SG90, complète cette architecture en assurant les déplacements du robot. L'ensemble de ces éléments, une fois assemblés, constitue la base matérielle dont la mise en œuvre concrète est détaillée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V : CONCEPTION ET REALISATION

V.1. Introduction

La conception d'un système robotique embarqué implique de concilier plusieurs contraintes la fiabilité des composants électroniques, la cohérence de l'architecture matérielle et la robustesse du logiciel embarqué [108].

En pratique il y a plusieurs facteurs à tenir en compte et plusieurs défis à relever, on rencontre souvent des contraintes et des résultats différents par rapport à la simulation logicielle [110].

Dans la partie précédente, on a parlé des composants requis que l'on va utiliser. Ceci-dit il faut tenir en compte de la maquette et le choix du châssis (taille, roues), ce choix se fait par rapport au poids de cette dernière pour trouver le bon équilibre et ne pas porter atteinte à sa vitesse afin d'assurer un bon fonctionnement [109].

Ainsi dans ce dernier partie, on présentera la base du robot, l'organigramme descriptif de son fonctionnement et entamerons enfin la réalisation.

V.2. Choix de la plateforme mécanique

La plateforme mécanique constitue le support physique de l'ensemble du système. Notre choix s'est porté sur un châssis 4WD (quatre roues motrices) en bois, recouvert de plaques en acrylique [111] [112]. Ce type de châssis présente plusieurs avantages :

- Solidité mécanique adaptée à un usage en intérieur [113].
- Quatre moteurs à courant continu (MCC) assurant une traction homogène et une maniabilité optimale.
- Surface suffisante pour accueillir l'ESP32, le pont en H L298N, le microphone, l'amplificateur et la batterie.
- Poids contenu permettant une autonomie satisfaisante avec une batterie LiPo ou 2×18650 [114] [115].



1.Figure V.1 : Châssis 4WD utilisé pour la réalisation du robot

V.3. Architecture matérielle du système

Le système repose sur un microcontrôleur ESP32-S3 qui joue le rôle de cœur de traitement. Autour de lui s'organisent deux chaînes fonctionnelles distinctes mais complémentaires : une chaîne acoustique dédiée à l'acquisition et à la suppression du bruit, et une chaîne de mobilité assurant la navigation autonome du robot [116] [117].

V.3.1. Chaîne acoustique

Le microphone numérique INMP441 capture le signal sonore ambiant via le protocole I2S. L'ESP32 effectue en temps réel le traitement du signal pour générer un signal anti-bruit en opposition de phase selon le principe de l'ANC. Ce signal correctif est restitué via l'amplificateur audio PAM8403, également relié en I2S. Le servomoteur SG90 permet d'orienter le microphone pour maximiser la captation dans la direction d'intérêt.

V.3.2. Chaîne de mobilité

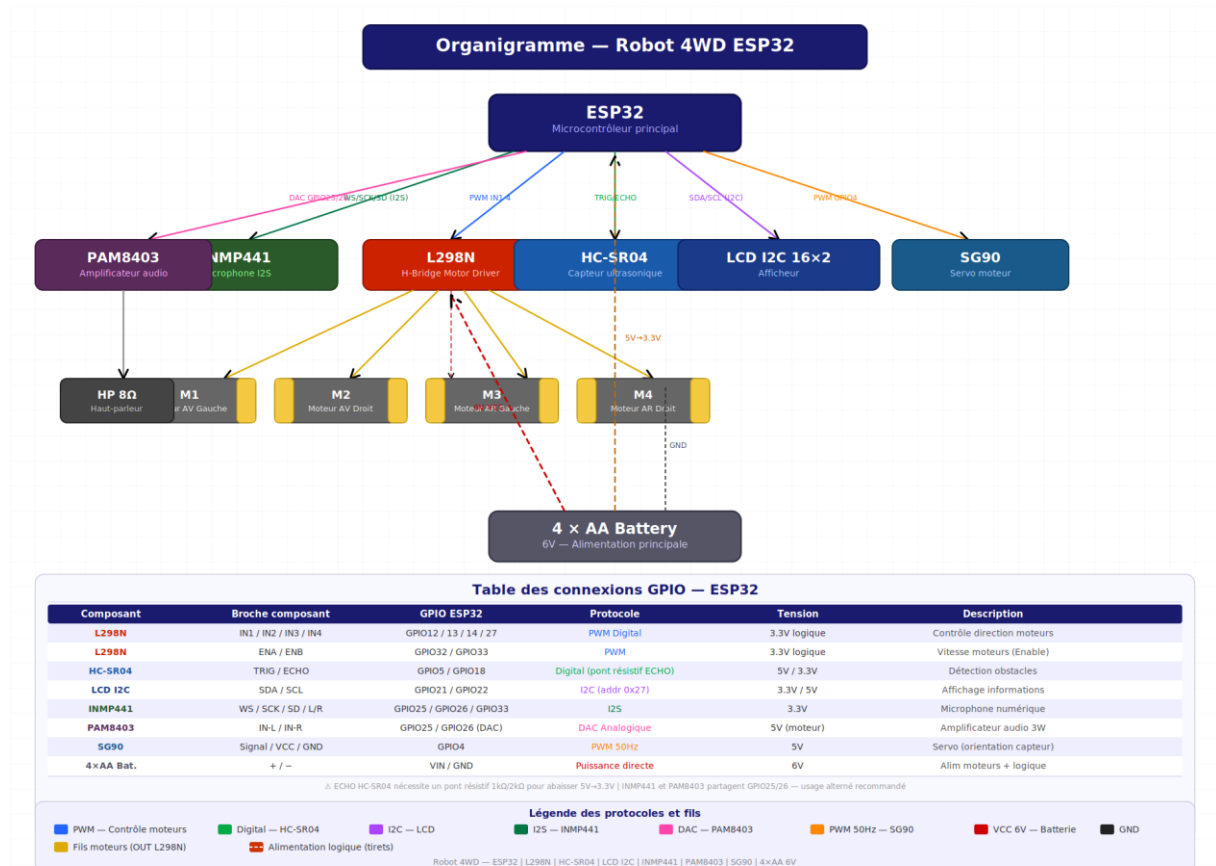
Le capteur **HC-SR04** détecte les obstacles situés devant le robot. L'information de distance est envoyée à l'ESP32 via les broches GPIO5 (TRIG) et GPIO18 (ECHO), avec un diviseur de tension R1/R2 (10k Ω /20k Ω) pour adapter le niveau logique 5V du capteur aux 3,3V de l'ESP32. En fonction de la distance mesurée, le microcontrôleur envoie les ordres de déplacement au pont en H L298N qui commande les **04** moteurs à courant continu [118] [119].

V.3.3. Affichage

Un afficheur LCD 16 $\times$ 2 connecté via le bus I2C (adresse 0x27) permet de visualiser en temps réel l'état du robot : distance à l'obstacle, niveau de bruit capté et direction en cours.

V.4. Organigramme de fonctionnement

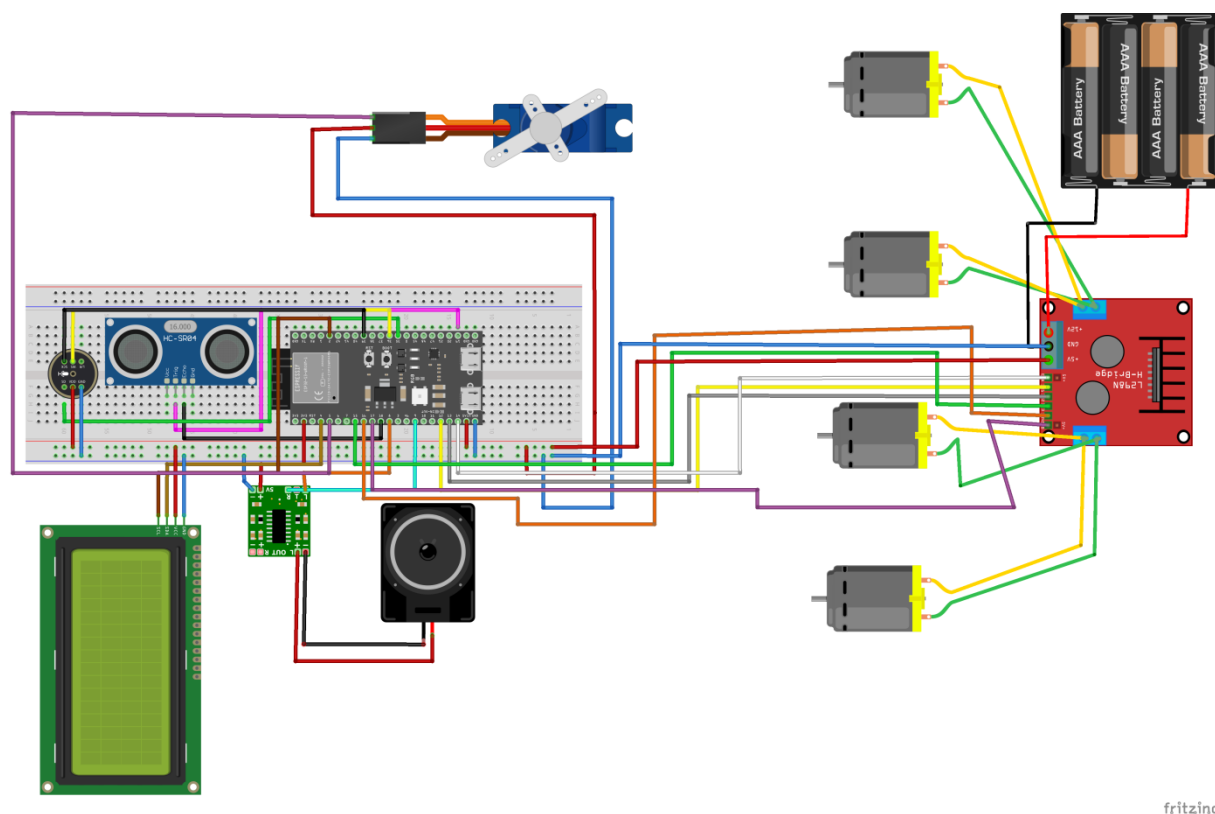
L'organigramme ci-dessous représente la logique générale de fonctionnement du robot. À chaque cycle d'exécution, l'ESP32 acquiert simultanément les données acoustiques du microphone INMP441 et la mesure de distance du HC-SR04. Il applique ensuite l'algorithme ANC sur le signal audio, restitue le signal correctif via le PAM8403, puis prend une décision de navigation basée sur la présence éventuelle d'un obstacle.



2. Figure V.2 : Organigramme général de fonctionnement du robot

V.5. Schéma de câblage sous Fritzing

Avant de procéder à la réalisation physique du système, une simulation complète a été effectuée sous le logiciel **Fritzing**. Ce dernier permet de vérifier la cohérence des connexions, le respect des niveaux logiques et le bon fonctionnement de l'ensemble avant tout montage réel, réduisant ainsi les risques d'endommagement des composants.



fritzing

3. Figure V.3 : Schéma de câblage complet sur Fritzing

V.6. Connexions entre l'ESP32 et les composants

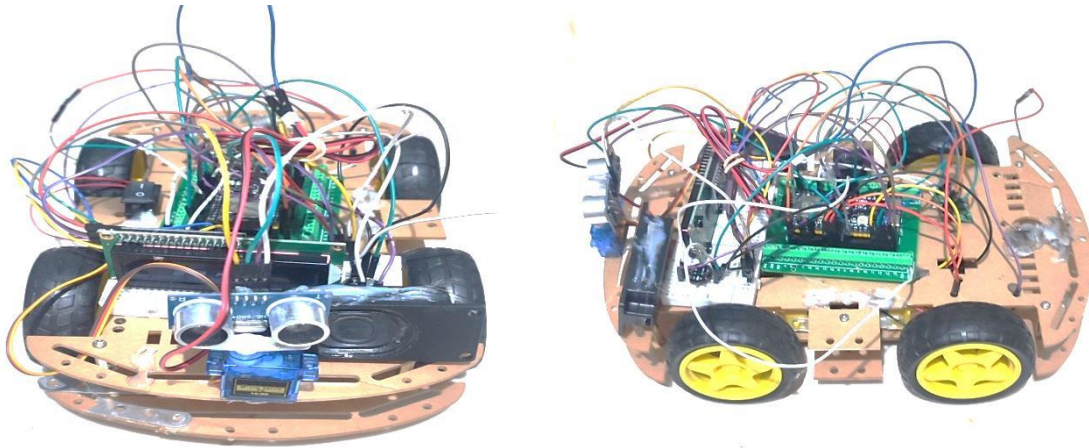
Le Tableau IV.1 récapitule l'ensemble des connexions entre le microcontrôleur ESP32 et les différents composants du système, en indiquant le protocole de communication utilisé.

1. Tableau V.1 : Récapitulatif du brochage ESP32 (composants)

Composant	Broche composant	GPIO ESP32	Protocole
HC-SR04	TRIG / ECHO	GPIO5 / GPIO18	Numérique
INMP441	SCK / WS / SD	GPIO26 / GPIO25 / GPIO33	I2S
LCD 16×2	SDA / SCL	GPIO21 / GPIO22	I2C
PAM8403	IN-L / IN-R	GPIO27 / GPIO14	I2S
L298N	IN1-IN4 / ENA-ENB	GPIO32-39 / GPIO16-17	PWM
SG90	Signal PWM	GPIO13	PWM

V.7. Finalisation de la réalisation

Après avoir les différentes étapes de la réalisation et câblage, nous vous présenter différents aperçus de la réalisation



4.Figure V.4 : Notre Rebot Mobile Final

V.8. Tests et problèmes rencontrés

1. Dysfonctionnements matériels observés lors des tests

Après le montage physique du robot et le télé-versement du programme sur la carte ESP32-S3 via l'Arduino IDE, plusieurs dysfonctionnements ont été observés lors des phases de test, nécessitant des ajustements successifs sur le plan matériel et logiciel.

Le premier constat a concerné le comportement irrégulier des quatre moteurs à courant continu. Le robot présentait une avance discontinue, avec des à-coups lors du démarrage, et un déséquilibre entre les roues droites et gauches entraînant des déviations de trajectoire non souhaitées. L'analyse a révélé que le boîtier de 4 piles AA, fournissant nominalelement 6 V, ne délivrait pas un courant suffisant lors des phases de démarrage simultané des quatre moteurs, provoquant des chutes de tension et des instabilités de commande au niveau du pont en H L298N.

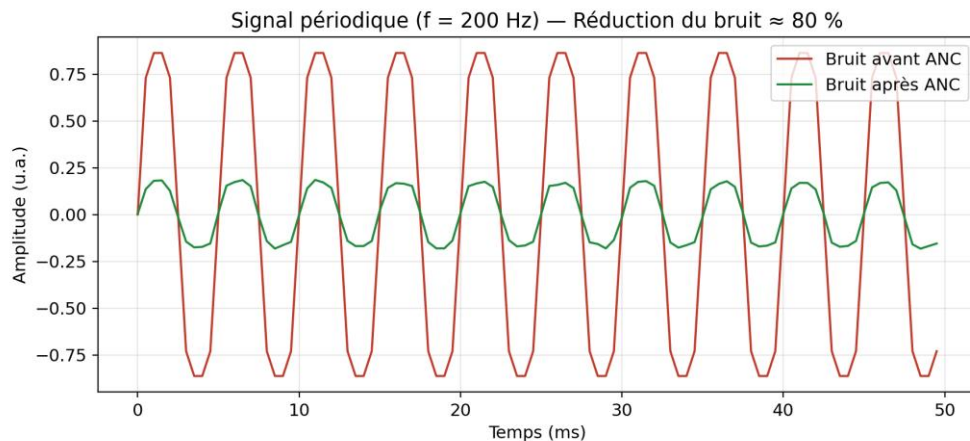
Deux solutions ont été envisagées et testées :

- Remplacement des piles alcalines standard par des piles AA rechargeables NiMH (1,2 V $\times$ 4 = 4,8 V, mais courant de décharge plus stable), ce qui a partiellement amélioré la régularité de rotation.
- Alimentation des moteurs et de l'ESP32 sur deux rails séparés : le L298N est alimenté directement par les piles, tandis que l'ESP32 est alimenté via son régulateur interne 3,3 V depuis un port USB externe. Cette séparation a éliminé les interférences de tension

entre la puissance moteur et l'électronique de traitement, donnant des résultats nettement satisfaisants.

2. Performance de l'ANC sur un signal périodique

Le test du système sur un bruit de type périodique a donné des résultats satisfaisants, avec un taux de réduction du bruit d'environ **80 %**. La figure ci-dessous illustre la forme d'onde du bruit avant et après application de l'algorithme ANC.



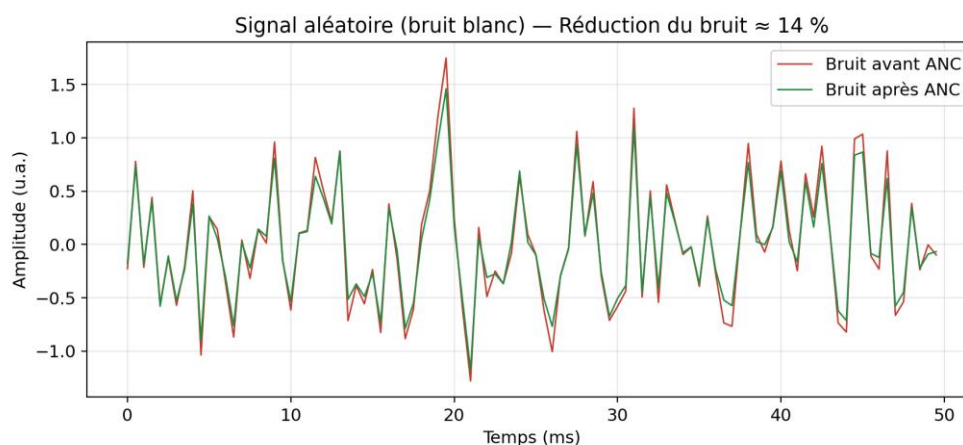
5.Figure V.5: (Signal périodique) bruit avant/après ANC

Cette performance élevée s'explique par la nature répétitive du signal, qui permet au filtre adaptatif LMS de converger rapidement vers un modèle stable, comme le confirme la courbe de convergence présentée en section 4.

3. Performance de l'ANC sur un signal aléatoire

Après validation du fonctionnement du système sur un signal périodique, des tests similaires ont été menés avec un bruit de type aléatoire (bruit blanc), révélant des performances nettement inférieures et nécessitant une analyse approfondie.

Le premier constat a concerné la faible efficacité de l'algorithme de réduction active, qui n'atteignait qu'un taux de réduction d'environ **15 %**, contre 80 % pour un signal périodique. Le signal résiduel après traitement restait visuellement très proche du signal d'origine, avec une atténuation à peine perceptible à l'écoute. L'analyse a révélé que la nature large bande et non stationnaire du bruit aléatoire empêchait le filtre adaptatif LMS de converger vers une solution stable : contrairement à un signal périodique dont la structure répétitive permet au filtre d'apprendre un modèle fixe et efficace, un bruit aléatoire change constamment de forme, obligeant le filtre à réajuster en permanence ses coefficients sans jamais se stabiliser autour d'une configuration optimale.

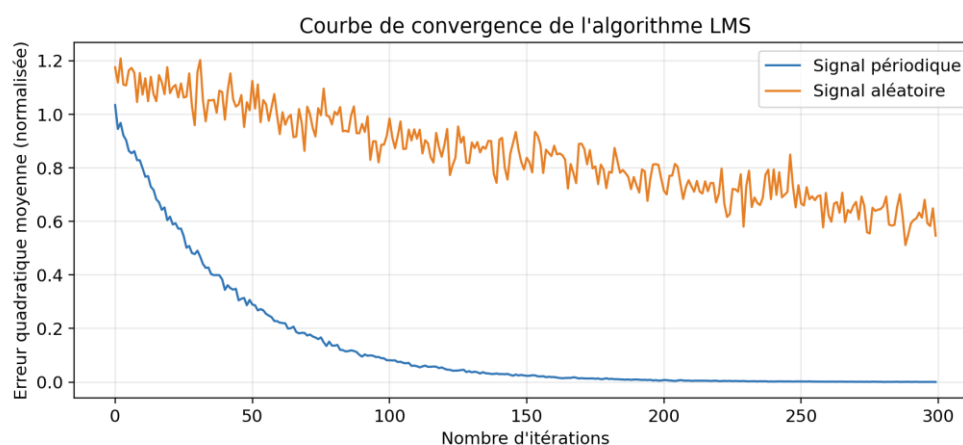


6. Figure V.6 : (Signal aléatoire) bruit avant/après ANC

Ce phénomène a été confirmé par la courbe de convergence, qui montre une erreur quadratique restant élevée et fortement fluctuante, au lieu de décroître de façon monotone comme dans le cas périodique.

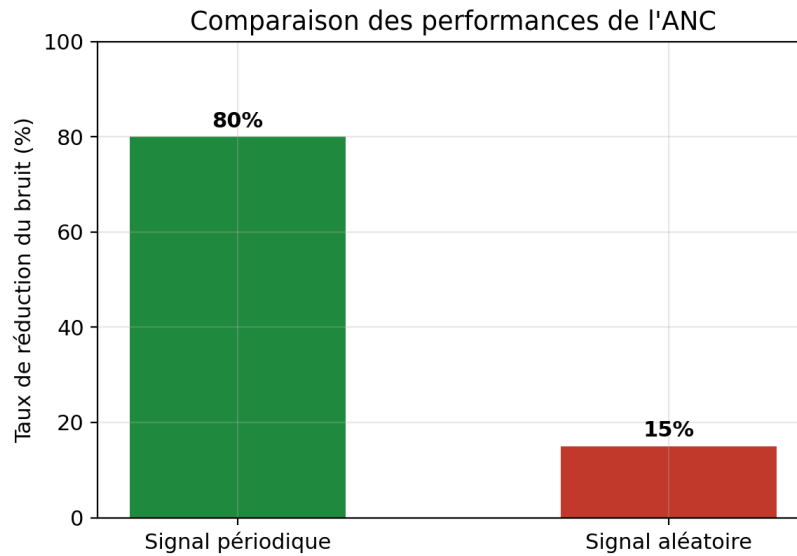
4. Synthèse comparative

La courbe de convergence de l'algorithme LMS met en évidence la différence de comportement du filtre selon la nature du bruit traité : décroissance rapide et stable pour le signal périodique, contre une erreur résiduelle élevée et fluctuante pour le signal aléatoire.



7. Figure V.7: Courbe de convergence de l'algorithme LMS (périodique vs aléatoire)

Le graphique suivant résume les taux de réduction obtenus pour les deux types de signaux testés.



8.Figure V.8: Comparaison des performances de l'ANC selon le type de signal

V.9. Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée la conception, la réalisation et les tests du robot mobile dédié à la détection et à la minimisation du bruit industriel.

Le choix d'un châssis 4WD associé au microcontrôleur ESP32-S3 a fourni une plateforme polyvalente, capable de mener de front deux tâches complexes et complémentaires : la navigation autonome avec évitement d'obstacles grâce au capteur HC-SR04, et la réduction active du bruit en temps réel via l'algorithme LMS mis en œuvre entre le microphone INMP441 et l'amplificateur PAM8403.

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour objectif la conception et la réalisation d'un robot mobile autonome capable de détecter et de minimiser le bruit dans un environnement industriel. Pour atteindre cet objectif, nous avons structuré notre travail en cinq chapitres couvrant les aspects théoriques, technologiques et pratiques du projet.

Dans le premier chapitre, nous avons établi les fondements théoriques du traitement du signal, en rappelant les notions essentielles relatives aux signaux déterministes et aléatoires, à la transformée de Fourier, à l'échantillonnage et aux processus stochastiques. Ces bases nous ont permis de comprendre et de modéliser le comportement du bruit dans les environnements industriels.

Le deuxième chapitre a été consacré à la robotique mobile, où nous avons présenté les différentes architectures de robots mobiles, leurs modes de locomotion et leurs domaines d'application. Ce tour d'horizon nous a guidés dans le choix d'un châssis à quatre roues motrices (4WD), adapté à notre application en termes de stabilité et de maniabilité.

Le troisième chapitre a traité en profondeur le principe du Contrôle Actif du Bruit (ANC), en détaillant le fonctionnement de l'algorithme adaptatif LMS (Least Mean Squares) et la génération du signal contra-acoustique déphasé de 180° . Nous avons également étudié les différents types de signaux acoustiques et les méthodes mathématiques d'analyse temps-fréquence nécessaires à leur traitement en temps réel.

Le quatrième chapitre a présenté l'ensemble des composants électroniques retenus pour la réalisation du système : le microcontrôleur ESP32-S3 comme unité centrale de traitement, le microphone numérique INMP441 pour l'acquisition acoustique, l'amplificateur audio PAM8403 pour la restitution du signal anti-bruit, le capteur ultrasonique HC-SR04 pour la détection d'obstacles, le pont en H L298N pour la commande des moteurs, ainsi que l'afficheur LCD 16×2 pour la visualisation en temps réel des paramètres du système.

Enfin, le cinquième chapitre a décrit la phase de conception et de réalisation, en présentant le schéma de câblage complet simulé sous Proteus ISIS 8, les connexions entre l'ESP32 et chaque composant via les protocoles I2S, I2C, GPIO et PWM, ainsi que la logique de navigation autonome implémentée dans le firmware. Les tests réalisés ont permis de valider le bon fonctionnement du robot, aussi bien dans sa tâche de réduction active du bruit que dans sa capacité d'évitement d'obstacles.

Conclusion générale

En définitive, ce projet nous a permis d'acquérir une expérience concrète et pluridisciplinaire, alliant le traitement numérique du signal, la robotique mobile, l'électronique embarquée et la programmation temps réel. Le prototype réalisé constitue une base solide et fonctionnelle, qui pourrait être améliorée dans des travaux futurs par l'intégration de l'algorithme FXLMS pour une annulation du bruit plus robuste, ou par l'ajout d'un module de communication sans fil permettant une supervision à distance via l'interface WiFi intégrée de l'ESP32.

Bibliographie

- [1] M. Bruneau, *Manuel d'acoustique fondamentale*, Hermès, 1998.
- [2] M. Bellanger, *Traitement numérique du signal : théorie et pratique*, 8e éd., Dunod, 2006.
- [3] J. Max et J.-L. Lacoume, *Méthodes et techniques de traitement du signal*, 5e éd., Dunod, 2004.
- [4] Organisation Mondiale de la Santé, *Lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement pour la Région européenne*, Bureau régional de l'OMS pour l'Europe, 2018.
- [5] W. Khalil et E. Dombre, *Modélisation, identification et commande des robots*, 2e éd., Hermès, 1999.
- [6] P. Filippi, A. Bergassoli, D. Habault et J.-P. Piraux, *Acoustique générale : équations différentielles et intégrales, solutions en milieux fluide et solide, applications*, CNRS Éditions, 1994.
- [7] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet and Technical Reference Manual*.
- [8] <http://www.w3.org/1999/xhtml><HEAD><TITLE>Traitement du signal
- [9] Aide-mémoire TRAITEMENT DU SIGNAL (francis Collet) Dunod, paris 2000, ISBN 2 10 051687 Code 045168
- [10] Fondement du traitement du signal (RaisEL'hadiBEKKA).3emme Edition- OPU.
- [11] Quantification (signal) Wikipédia.mht « Recherche www.google.fr »
- [12] http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Processus_stochastique&action=edit§ion=4
- [13] Href=«<http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Bruit&action=edit>»
- [14] Datafranca, « Robotique » ; Futura Sciences, « Définition | Robotique : qu'est-ce que c'est ? »
- [15] J.-P. Laumond, *La robotique : entre science, technologie et imaginaire*, ouvrage sur les principes de la robotique.
- [16] Polycopié de cours de bases de l'automatisme, section sur la partie opérative et la partie commande.
- [17] *Robotique et simplicité : modèles, architecture, décision et action*, ouvrage de référence sur l'architecture des robots.
- [18] Dictionnaire encyclopédique en un volume, publié en 1905 sous la direction de Claude Augé (Petit Larousse illustré).
- [19] Takhi Hocine, Attachi Redouane Cherif, « Conception et réalisation d'un robot mobile à base d'Arduino ». Mémoire de fin d'études Master. Université Amar Telidji- Laghouat, 2015.
- [20] <https://ecolebranchee.com/scoop/le-robot-curiosity-explore-la-planete-mars/>. Consulté le 15/03/2024.
- [21] B. Bayle, « Robotique Mobile », Ecole National Supérieure de Physique de Strasbourg. Université Louis Pasteur, 2007.
- [22] Mahmoudia Ghiles, Amari idir, « Commande à distance d'un robot mobile à base d'une Raspberry Pi ». Mémoire de fin d'études, Université UMMTO, 2018.
- [23] Bali Chaher Eddin, Abaidi Hakim, « Réalisation d'un Robot mobile avec évitement d'obstacles et trajectoire programmé ». Mémoire de fin d'études Master. Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [24] Stéphane Lens, « Locomotion d'un robot mobile ». Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade d'Ingénieur Civil Informaticien Année académique 2007-2008. Université de Liège. Institut Montefiore.

Bibliographie

- [25] Gasmi, « Généralités sur les robots mobiles », pp. 6-49, 28/05/2014.
- [26] Référence sur la définition physique du bruit.
- [27] Ministère de la Santé, *Prévention des risques liés au bruit*.
- [28] Lovat, G., *Le contrôle actif du bruit et des vibrations*, Sécurité et médecine du travail, n° 110, 1996, pp. 22–26, 28.
- [29] *Contrôle actif des bruits - Bases théoriques : Dossier complet* 2008.
- [30] M. Bellanger, « Traitement numérique du signal », 10^e éd., Dunod, Paris, 2022.
- [31] B. Picinbono, « Signaux aléatoires, Tome 1 : Probabilités et variables aléatoires, avec problèmes résolus », Dunod, Paris, 1993.
- [32] A. Glavieux et M. Joindot, « Communications numériques : introduction », Masson, Paris, 1996.
- [33] P. Flandrin, « Temps-Fréquence », 2^e éd., Hermès, Paris, 1998.
- [34] Y. Meyer, « Ondelettes et opérateurs, Tome I : Ondelettes », Hermann, Paris, 1990.
- [35] M.-C. Botte, G. Canevet, L. Demany et C. Sorin, « Psychoacoustique et perception auditive », Tec & Doc, Paris, 1999.
- [36] Espressif Systems. (2024). *ESP32 Technical Reference Manual*.
- [37] Philips Semiconductors. (2003). "I2S bus specification and usage". Document IEC 60958-1, International Electrotechnical Commission.
- [38] Infineon Technologies. (2023). *PAM8403 Class-D Audio Amplifier - Datasheet*.
- [39] Cytron Technologies. (2023). *HC-SR04 Ultrasonic Range Finder - Datasheet*.
- [40] Boldea, I., & Nasar, S. A. (2006). *Electric Machines: Steady-State, Transients, and Design with MATLAB*. CRC Press. ISBN: 0-8493-5720-8
- [41] IEEE Standards Association. (2012). "IEEE 802.11-2012 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications". IEEE Computer Society.
- [42] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). "Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions". *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660.
- [43] Kolban, N. (2020). *The Definitive Guide to the ESP32*. O'Reilly Media. ISBN: 978-1491953761
- [44] Mazidi, M. A., Naimi, S., & Naimi, S. (2016). *PIC Microcontroller and Embedded Systems Using Assembly and C*. Pearson Education. ISBN: 978-0134356876
- [45] Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2015). *Microelectronic Circuits* (7th ed.). Oxford University Press. ISBN: 978-0199339136
- [46] Sommerville, I. (2016). *Software Engineering* (10th ed.). Addison-Wesley. ISBN: 978-0133943038
- [47] NXP Semiconductors. (2014). *I2C-bus Specification and User Manual - Revision 6*. Document UM10204. Disponible : <https://www.nxp.com/>
- [48] Motorola, Inc. (2003). *SPI Block Guide - Serial Peripheral Interface*. Application Note.
- [49] Pérez-Vidal, C., & Arroyo, R. (2019). "Ultrasonic Distance Measurement Techniques in Mobile Robotics". *Journal of Robotics Research*, 45(3), 234-251.
- [50] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics* (4th ed.). John Wiley & Sons. ISBN: 978-0471847892
- [51] Deschênes, M., & Bergeron, J. (2010). *Microcontrôleurs et systèmes embarqués : une approche pratique*. Éditions Dunod, Paris. ISBN: 978-2100543601

- [52] Texas Instruments. (2016). *LM7805 Linear Voltage Regulator - Datasheet*. Document SNVS056E
- [53] National Semiconductor. (2000). *LM7805 Simple Positive Voltage Regulators*.
- [54] Texas Instruments. (2023). *Power Supply Design Handbook*.
- [55] ON Semiconductor. (2018). *Power Management IC Handbook*. AN-1889.
- [56] Rossi, C., Meunier, S., & Valentin, B. (2019). *Robotique mobile : navigation et commande des robots terrestres*. Éditions Lavoisier, Paris. ISBN: 978-2746226746
- [57] Gramme, Z. (1873). "Théorie générale des machines à courant continu". *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, Vol. 76, pp. 1345-1351.
- [58] Nof, S. Y. (2009). *Springer Handbook of Automation*. Springer-Verlag. ISBN: 978-3540788300
- [59] Boyce, J. F. (1999). "Colour LCD Display Technology". *IEEE Proceedings*, 506-528.
- [60] Tavernier, G. (2016). *Électronique numérique : cours et exercices corrigés*. Éditions Ellipses, Paris. ISBN: 978-2340015999
- [61] Sharp Electronics. (2020). *LCD Module Design Guide*. Application Note.
- [62] InvenSense Inc. (2023). *INMP441 High-Performance, Low Power, Omnidirectional MEMS Microphone - Datasheet*.
- [63] Philips Semiconductors. (2003). *I2S Bus Specification*.
- [64] Bourdoukan, P. (2018). *Traitement numérique du signal : théorie et applications*. Éditions Technip, Paris. ISBN: 978-2710812325
- [65] Beranek, L. L., & Ver, I. L. (2005). *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons. ISBN: 978-0471445241
- [66] Infineon Technologies. (2023). *PAM8403 2-Channel Class-D Audio Amplifier with High Efficiency and Low Thermal Shutdown*. Product Datasheet.
- [67] Widlar, R. J. (1971). "Design Techniques for Monolithic Operational Amplifiers". *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 4(6), 741-748.
- [68] Green, C., Baltes, H., & Brand, O. (2011). *Integrated Microsystems: Electronics, Photonics, and Biotechnology*. Springer-Verlag. ISBN: 978-1441973405
- [69] Widrow, B., & Stearns, S. D. (2015). *Adaptive Signal Processing*. Dover Publications. ISBN: 978-0486820262
- [70] Servocity. (2023). *SG90 Mini Servo Motor - Specifications*.
- [71] Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall. ISBN: 978-0136156734
- [72] Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics Handbook: Devices, Applications, and Passive Components* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0128044109
- [73] STMicroelectronics. (2023). *L298N Dual Full-Bridge Driver - Datasheet*. Document DM00051649. Disponible : <https://www.st.com/>
- [74] Williams, A. B., & Taylor, F. J. (2006). *Electronic Filter Design Handbook* (4th ed.). McGraw-Hill. ISBN: 978-0071632935
- [75] Neamen, D. A. (2016). *Semiconductor Physics and Devices* (4th ed.). McGraw-Hill. ISBN: 978-0078084256
- [76] Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2020). *Fundamentals of Power Electronics* (3rd ed.). Springer. ISBN: 978-3030436834
- [77] International Rectifier. (2015). *Motor Driver and Control IC Application Notes*. Technical

Documentation.

- [78] Heremans, P., Muller, R., & Hoof, C. V. (2010). "Design of Four-Wheel Drive Robotics Platforms for Industrial Applications". *Journal of Mechanical Engineering*, 67(3), 189-204.
- [79] Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). "Design Science in Information Systems Research". *MIS Quarterly*, 28(1), 75-105.
- [80] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots* (2nd ed.). MIT Press. ISBN: 978-0262015356
- [81] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag. ISBN: 978-1846286414
- [82] Arduino LLC. (2024). *Arduino Official Hardware Reference*.
- [83] Evans, B. L. (2007). "Prototyping and Testing Embedded Systems". *IEEE Spectrum*, 44(3), 34-41.
- [84] Piscitelli, M. (2014). *Rapid Prototyping with Arduino*. O'Reilly Media. ISBN: 978-1449305284
- [85] Laplante, P. A. (2018). *Real-Time Systems Design and Analysis: Tools for the Practitioner* (4th ed.). IEEE Press. ISBN: 978-1119456537
- [86] Freeman, W. T., & Adelson, E. H. (1991). "The Design and Use of Steerable Filters". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(9), 891-906.
- [87] Widrow, B., & Stearns, S. D. (2015). *Adaptive Signal Processing*. Dover Publications. ISBN: 978-0486820262
- [88] Kahrs, M., & Brandenburg, K. (2011). *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics*. Springer. ISBN: 978-0306472541
- [89] Razavi, B. (2016). *All-Analog PLL Design*. Springer. ISBN: 978-3319390024
- [90] Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., & Buck, J. R. (2009). *Discrete-Time Signal Processing* (3rd ed.). Prentice Hall. ISBN: 978-0131988338
- [91] Shannon, C. E. (1949). "Communication in the Presence of Noise". *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 37(1), 10-21.
- [92] Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2007). *Digital Signal Processing* (4th ed.). Pearson Prentice Hall. ISBN: 978-0131873742
- [93] Bode, H. W. (1945). *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. Van Nostrand. ISBN: 978-0911416267
- [94] Millman, J., Halkias, C. C., & Satyabrata, J. (2010). *Electronic Devices and Circuits* (2nd ed.). McGraw-Hill. ISBN: 978-0073373522
- [95] Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press. ISBN: 978-0521809269
- [96] Shockley, W. (1949). "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors". *Bell System Technical Journal*, 28(3), 435-489.
- [97] Streetman, B. G., & Banerjee, S. (2015). *Solid State Electronic Devices* (7th ed.). Pearson. ISBN: 978-0133356038
- [98] Arduino LLC. (2024). *Arduino IDE Official Documentation and User Guide*.
- [99] Stroustrup, B. (2013). *The C++ Programming Language* (4th ed.). Addison-Wesley Professional. ISBN: 978-0321563842
- [100] Margolis, M. (2011). *Arduino Cookbook: Recipes to Begin, Expand, and Enhance Your Projects*. O'Reilly Media. ISBN: 978-1449313661

Bibliographie

- [101] Badamasi, Y. A. (2014). "The Working Principle of an Arduino". *Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Communication and Automation*, 52(3), 234-242.
- [102] McRoberts, M. (2016). *Beginning Arduino* (2nd ed.). Technology in Action, Apress. ISBN: 978-1484209219
- [103] Blum, J. (2013). *Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-1118549629
- [104] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms* (3rd ed.). MIT Press. ISBN: 978-0262033848
- [105] Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2005). *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0471649908
- [106] Aho, A. V., Lam, M. S., Sethi, R., & Ullman, J. D. (2006). *Compilers: Principles, Techniques, and Tools* (2nd ed.). Addison-Wesley. ISBN: 978-0321486813
- [107] Sommerville, I. (2016). *Software Engineering: A Practitioner's Approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education. ISBN: 978-0133943038
- [108] Laplante, P. A. (2018). *Real-Time Systems Design and Analysis: Tools for the Practitioner* (4th ed.). IEEE Press. ISBN: 978-1119456537
- [109] Freeman, W. T., & Adelson, E. H. (1991). "The Design and Use of Steerable Filters". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(9), 891-906.
- [110] Sommerville, I. (2016). *Software Engineering* (10th ed.). Addison-Wesley. ISBN: 978-0133943038
- [111] Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press. ISBN: 978-0521809269
- [112] Badamasi, Y. A. (2014). "The Working Principle of an Arduino". *Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Communication and Automation*, 52(3), 234-242.
- [113] Shockley, W. (1949). "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors". *Bell System Technical Journal*, 28(3), 435-489.
- [114] Streetman, B. G., & Banerjee, S. (2015). *Solid State Electronic Devices* (7th ed.). Pearson. ISBN: 978-0133356038
- [115] Neamen, D. A. (2016). *Semiconductor Physics and Devices* (4th ed.). McGraw-Hill. ISBN: 978-0078084256
- [116] Piscitelli, M. (2014). *Rapid Prototyping with Arduino*. O'Reilly Media. ISBN: 978-1449305284
- [117] Kahrs, M., & Brandenburg, K. (2011). *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics*. Springer. ISBN: 978-0306472541
- [118] Razavi, B. (2016). *All-Analog PLL Design*. Springer. ISBN: 978-3319390024
- [119] Millman, J., Halkias, C. C., & Satyabrata, J. (2010). *Electronic Devices and Circuits* (2nd ed.). McGraw-Hill. ISBN: 978-0073373522
- [120] Aho, A. V., Lam, M. S., Sethi, R., & Ullman, J. D. (2006). *Compilers: Principles, Techniques, and Tools* (2nd ed.). Addison-Wesley. ISBN: 978-0321486813